Овчинников Е.Л., Яшин С.С., Тарасенко Д.С., Давыдкин-Гогель М.М.

*Самарский государственный медицинский университет
Самара, Россия*

doi: 10.18411/spc-31-07-2017-02

idsp 000001:spc-31-07-2017-02

Тождественность законов Вебера – Фехнера и Стивенса

Аннотация

Цель: Установление тождественности теоретического закона Вебера–Фехнера, устанавливающего относительные значения между интенсивностями звуков, и экспериментальным соотношением С.С. Стивенса, устанавливающим значение громкости через абсолютные параметры звука.

Результаты: В статье представлены законы Вебера–Фехнера и Стивенса, устанавливающие связь между интенсивностью (давлением) звуков и громкостью, которую они производят при их ощущении. Аналитические преобразования приводят к тождественности этих законов.

Ключевые слова: Закон Вебера – Фехнера, закон Стивенса, громкость звука.

Abstract

Purpose: Establishment of the identity of the theoretical Weber – Fechner law, which establishes the relative values between the intensities of sounds, and the experimental relation SS Stevens, setting the loudness value through absolute sound parameters.

Result: The article presents the laws of Weber – Fechner and Stevens, establishing a connection between the intensity (pressure) of sounds and loudness, they produce when they are sensed. Analytical transformations lead to the identity of these laws.

Keywords: The Weber – Fechner law, the Stevens law, the volume of sound.

Введение

Теория слуха по Н. Helmholtz [1], классические эксперименты по слуховым явлениям [2, 3], их теоретическое обоснование с выдвижением экспериментально-статистических положений [4, 5] и последующим анализом стали основой акустической модели и теории слуха [6, 7] она получила солидное научное обоснование, представленная как полумодель в патенте [8], статьях [9, 10], и как полная модель и теория – в работе [11] и монографии [12]. Более того, она не только соответствует наблюдаемым результатам, но и позволяет прогнозировать многие слуховые эффекты [13-16]. На основе волновых процессов во внутреннем ухе, на которых построена морфофункциональная акустическая теория слуха [1], адекватно отражающая результаты классических экспериментов; разработана биофизическая модель восприятия человеком частоты, интенсивности и спектра звука, психофизическими коррелятами которых являются высота, громкость и тембр тонов.

Экспериментально установленный (Е.Н. Weber, 1834) и математически обоснованный (G.Th. Fechner, 1858) закон Вебера – Фехнера утверждает, что существуют закономерная связь между силой воздействия внешних раздражителей и вызываемой ею субъективной реакцией рецепторной системы.

В психофизике слуха закон Вебера – Фехнера (Ю.А.Владимиров, 1983; В.О. Самойлов /ред., 1986; Я.А. Альтман /ред., 2003) регламентирует соотношение силы раздражителя, – относительной интенсивности звука I (звукового давления Δp) относительно пороговой интенсивности I_0 (порогового звукового давления Δp_0), – и её субъективного ощущения – громкости тона E .

Таким образом, громкость тона является психоакустическим коррелятом восприятия слухом звуковой энергии (интенсивности звука, звукового давления). В настоящее время закон Вебера – Фехнера представляется для стандартной частоты

$$f_c = 1 \text{ кГц в виде } E = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \text{ фон. (1)}$$

Закон Вебера – Фехнера для стандартной частоты $f_c = 1 \text{ кГц}$ в форме (1) устанавливает единицу громкости слухового ощущения.

На этой частоте 1 дБ по шкале интенсивности принято считать равным 1

дБ по шкале громкости: при этом 1 дБ громкости характеризует уровень слухового ощущения и называется фоном.

Громкость звука E произвольной интенсивности I (звукового давления Δp), в фонах и декафонах (1 дафон = 10 фон), на стандартной частоте определяется как

$$E = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \text{ фон} = \lg \frac{I}{I_0}, \text{ декафон.}$$

С учётом связи интенсивности звука со звуковым давлением имеем

$$E = 20 \lg \frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \text{ фон} = 2 \lg \frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \text{ декафон.}$$

На практике используется также шкала громкости с единицей измерения 1 сон, громкость в сонах устанавливает степенной закон Стивенса (s.s.Stevens, 1951, 1961). Этим законом утверждается, что ощущение громкости звука носит степенной характер и нарастает пропорционально интенсивности звукового стимула:

$$E_{\text{сон}} = k I^n. \quad (2)$$

Связь между громкостью в сонах и фонах устанавливается экспериментально (графическое соотношение показано на рис. 1, а).

Имея определенную величину в 1 сон при эталонном тоне в 1000 мел (звуке стандартной частоты 1 кГц), громкость звука в E сонов определяется при интенсивности, в E раз превышающей его первоначальную.

Оказывается, что оба закона: и Вебера – Фехнера, и Стивенса, – являются тождественными. В доступной литературе не обнаружено установления этого заключения, поэтому приводим собственное математическое обоснование.

Результаты исследования

для эталонного звука 1000 Гц (тона 1000 мел) между громкостью тонов в фонах и сонах установлено соотношение: 1 сон = 40 фонов = 4 дафон.

Уравнение прямой (рис. 1, а) имеет вид:

$$\log_2 E_{\text{сон}} = E_{\text{дафон}} - 4 = N_B - 4 = \lg \frac{I}{I_0} - 4,$$

откуда получается закон стивенса, выраженный действительно в виде степени

$$E_{\text{сон}} = 2^{\lg \frac{I}{I_0} - 4} = \frac{2^{\lg \frac{I}{I_0}}}{2^4} = \frac{2^{\log_2 \frac{I}{I_0} \lg 2}}{2^4} = \frac{\left(2^{\log_2 \frac{I}{I_0}}\right)^{\lg 2}}{2^4} = \frac{\left(\frac{I}{I_0}\right)^{\lg 2}}{2^4} = \frac{I^{\lg 2}}{2^4 I_0^{\lg 2}} = k I^n,$$

где показатель степени $n = \lg 2$.

При этом коэффициент $k = \frac{1}{2^4 I_0^{\lg 2}} = 256 = 2^8$ и

$$I_0^{\lg 2} = 2,441 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 2^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Выводы

Таким образом, утверждение, что закон Стивенса является альтернативным (А.А. Пузырей, 1976), не вполне корректно – это просто иная запись одного и того же эффекта. Однако значение закона Стивенса велико потому, что он позволяет пользоваться не относительными значениями интенсивности звука, а их абсолютными значениями (рис. 1, б).

Но, с другой стороны, закон Вебера – Фехнера устанавливает линейное определение относительной интенсивности звука, а закон Стивенса определяет эту интенсивность звука в виде степени. На рис. 2 представлены результаты собственных расчетов по установлению тождественности законов Вебера – Фехнера и Стивенса. заданы константы $n = \lg 2$ и $I_0 = 10^{-12}$, интервал изменения возможных значений реальной интенсивности звука: $N \in [-12, 1]$, так что $I(N) \in [10^{-12}, 10]$. Приведено графическое представление величин $E_{\text{фон}}(I)$ и $E_{\text{сон}}(I)$. Нижний график точно соответствует закону Стивенса, а верхний – показывает его степенной характер.

Более полное представление о восприятии громкости звука слуховой системой человека показано в современных работах [17-20].

Рис. 1; а – диаграмма соответствия шкал громкости в сонях и фонах: удвоение громкости (в сонях) пропорционально увеличению стимула на 10 фонов; б – соотношения между шкалами уровней интенсивности звука (звукового давления), N , дБ, и уровней громкости, E , фон, и E , сон.

Рис.2. Результаты расчета тождественности законов Вебера – Фехнера и стивенса: верхний график – экспериментальное(линейное) соответствие между шкалами громкости в фонах (ось абсцисс) и сонах (ось ординат), средний – степенной характер закона Стивенса, нижний – линейный (в логарифмическом представлении по основанию 2) закон Стивенса.

1. Helmholtz H. Die Lehre den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Braunschweig: F. Vieweg und Sohn; 1863.
2. von Békésy G. Experiments in Hearing. NY – Toronto – London: McGraw-Hill Book Co.; 1960.
3. Koenig W. A new frequency scale for acoustic measurements / W. Koenig // Bell Laboratory Record, 1949.
4. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Математическое обеспечение проблем биоакустики и психофизики слуха. 1. Дифференциальные уравнения в обосновании распределения слуховых рецепторов по частотам. // Сб.: Образование и наука: современное состояние и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 112-118.

5. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Математическое обеспечение проблем биоакустики и психофизики слуха. 2. Дифференциальные уравнения в обосновании воз- растных изменений слуха. // Сб.: Образование и наука: современное состояние и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 118-124.
6. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Вычислительная биология внутреннего уха: апикальная связка мембран улиткового протока – от гипотезы к обсуждению. // Сб.: Наука и образование: проблемы и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 117-121.
7. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Вычислительная биология внутреннего уха: расчет линейных параметров улиткового протока. // Сб.: Наука и образование: проблемы и перспективы развития: Тамбов, 2014. С. 121-125.
8. Овчинников Е.Л., Ерёмина Н.В. Способ выявления биофизических процессов, реализующих механизм и биофизическую (волновую) модель слуха человека. // Патент RU № 2146878 С1 РФ от 27.03.2000 по заявке № 97111773 от 08.07.1997.
9. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха: биофизическая концепция. Клинические приложения. // Росс. оториноларингол.– 2002. – № 3(3). – С. 71 – 76.
10. Ovchinnikov E.L. Acoustic-wave hearing model, initial stage: the sound transduction in the inner ear. / E.L. Ovchinnikov, V.V. Ivanov, Yu.V. Ovchinnikova // European Science and Technology: 3rd International scientific conference, Munich, Germany, 2012, p. 524-535.
11. Ovchinnikov E.L. Acoustic-Wave Hearing Model, The Initial Stage-C: Hydroacoustics of the Inner Ear (Sound Field Formation in the Cochlea) // J. Appl. Bioinform. Comput. Biol., 2014, 3:2 , p. 1 of 6. <http://dx.doi.org/10.4172/2329-9533.1000112>.
12. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха. Монография . / Е.Л. Овчинников // Изд. ScienceCentre, 2016, 128 с.
13. Yashin SS, Shiryazdanov RU, Ovchinnikov EL. Bioacoustics of hearing: Part 1. Transduction in the human organ of hearing. // 53rd IEB workshop and Symposium 2016, Montpellier, France, p.n. 148-149.
14. Yashin SS, Shiryazdanov RU, Ovchinnikov EL. Bioacoustics of hearing: Part 2. Tonotopicity in the human organ of hearing. // 53rd IEB workshop and Symposium 2016, Montpellier, France, p.n. 148-149.
15. Ovchinnikov EL, Yashin SS. Metamorphosis of wave processes in inner ear: part 1. From vibrations to waves and back // 53rd IEB workshop and Symposium 2016, Montpellier, France, p.n. 159.
16. Ovchinnikov EL, Yashin SS. Metamorphosis of wave process in inner ear: part 2. Sound energy ways at pre-receptor level // 51st IEB workshop and Symposium 2014, Sheffield, UK, p.n. 160.
17. Овчинников Е.Л. Громкость звуков различных частот и интенсивностей: обобщенный закон Вебера для слуха // Наука и инновации в медицине. 2016. №1. – С.14-18.
18. Овчинников Е.Л. Акустический Декамерон: ДесятиГлав о дифференциальных уравнениях в биоакустике и психофизике слуха//Science Centre. – 192 с.
19. Яшин С.С., Ширязданов Р.У., Тарасенко Д.С., Давыдкин-Гогель М.М.. Закон Вебера – Овчинникова. // Сб. Научный диалог: Вопросы медицины, по материалам международной научно-практической конференции 15 ноября 2016 г. – С. 32-40.
20. Овчинников Е.Л., Яшин С.С. Морфофункциональная основа механизмов влияния звука на слуховые рецепторы. // Сб. Научный диалог: Вопросы медицины, по материалам международной научно-практической конференции 15 июня 2017 г. – С. 30-36.