

УДК 534.835.46:658.382.3:006.354

НОРМАТИВЫ И РЕГЛАМЕНТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗВУКА НА СЛУХ ЧЕЛОВЕКА: РЕКОМЕНДАЦИИ В СООТВЕТСТВИИ С НАУЧНЫМИ ОСНОВАМИ ДОЗИМЕТРИИ ЗВУКА

© 2011 Е.Л. Овчинников, Н.В. Ерёмина, Н.А. Ромашова, М.Н. Шаталаева

Самарский государственный медицинский университет

Поступила в редакцию 30.09.2011

Концепция научных принципов дозиметрии звука строится на предположении, что функциональные свойства слуховых рецепторов определяются морфоструктурой спирального органа. Нормальное восприятие ими стимулов звукового давления в течение длительного времени возможно при возбуждении не более того числа наружных волосковых клеток, которое находится на внешнем ряду спирального органа: $n_c \leq 6$. Возбуждение большего числа рецепторов может вызвать проблемы в работе слухового органа вплоть до их гибели. Поскольку число возбуждённых рецепторов (наружных волосковых клеток) связано с уровнем звукового давления L очевидным соотношением $n=L+1$, то можно определить и предельный, но безопасный, уровень звукового давления $L_c \leq 5$ Б, который может выдерживать человек длительное время. При оценке слуховых ощущений в физиологии эти величины следует признать нормативными. Теория дозиметрии звука способствует установлению нормативных решений биофизических характеристик звукового поля: доз звука $D(p, \tau)$ как функции давления p и экспозиции τ , экспозиции $t(p, d)$ в звуковом поле как функции давления p и дозы d , уровней звукового давления $L(\tau, \delta D)$ как функции экспозиции τ и доз d (относительных доз δD). Психофизическое решение проблемы регламентирует: уровни громкости звукового сигнала $E(\tau, d)$ или $E(\tau, \delta D)$, в фонах (декафонах), как функции экспозиции τ и доз d (или относительных доз δD), длительность экспозиции человека $t(p)$ при различных звуковых давлениях p (уровнях звуковых давлений L) и предельно допустимой дозе звука $D_{\text{п}}$.

Ключевые слова: *дозиметрия звука, нормативы и регламенты, предельно допустимый уровень звукового давления, предельно допустимая доза звукового воздействия, экспозиция звукового поля*

Нормативы звукового воздействия на человека в производственных условиях зафиксированы в системе стандартов безопасности труда, санитарных нормах и санитарных нормах и правилах. При этом действующий ГОСТ 12.1.003–83 [9] регламентирует предельно допустимые уровни (ПДУ) звукового давления на рабочих местах, действующие Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 [11] и Санитарные нормы и правила СНиП 23-03-2003 [2] устанавливают классификацию шумов и определяют нормируемые параметры шума как на рабочих местах, так и в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Однако стоит отметить лишь

экспериментальную и психоэмоциональную обоснованность указанных величин, причём отмечаются достаточно значимые различия в нормативах шумовых производств разных стран. Для выработки научных подходов к данной проблеме с точки зрения доказательной медицины, высшим результатом которой является установление функциональных связей между воздействующими на организм внешними или внутренними факторами и реакциями на них воспринимающих (рецепторных) систем, необходима концепция теоретических основ дозиметрии звука. Физические методы измерения характеристик звука, морфофизиология структур уха и психофизика восприятия звуковой энергии представляют возможным решение этой задачи. Оказывается осуществимым расчёт предельно допустимых доз звукового воздействия на человека, предельно допустимых звуковых давлений и уровней звуковых давлений и санитарных норм пребывания (экспозиции) человека в звуковом поле. Следует оговориться, что психофизический закон Вебера-Фехнера для слуха [11, 13] обоснован только для частоты 1 кГц, называемой стандартной, и поэтому решение

Овчинников Евгений Леонтьевич, кандидат биологических наук, доцент кафедры медицинской и биологической физики. E-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

Ерёмина Наталья Викторовна, доктор медицинских наук, профессор кафедры оториноларингологии им. акад. И.Б.Солдатова. E-mail: erjominalor@mail.ru

Ромашова Наталья Александровна, ассистент кафедры медицинской и биологической физики. E-mail: meritt@mail.ru

Шаталаева Марина Николаевна, старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики

проблемы в настоящее время сужается до этой частоты. Но появившиеся новые воззрения на природу равногромких тонов [7] открывают пути разработки теоретических основ дозиметрии звука для звуковых полей любых частот и интенсивностей.

1. Физиологические особенности характеристик в дозиметрии звука и их коли-

чественная оценка. Концепция научных принципов дозиметрии звука строится на основе дистантно-локационного анализа организации периферического отдела слухового анализатора; при этом предполагается, что функциональные свойства спирального органа определяются его морфоструктурой.

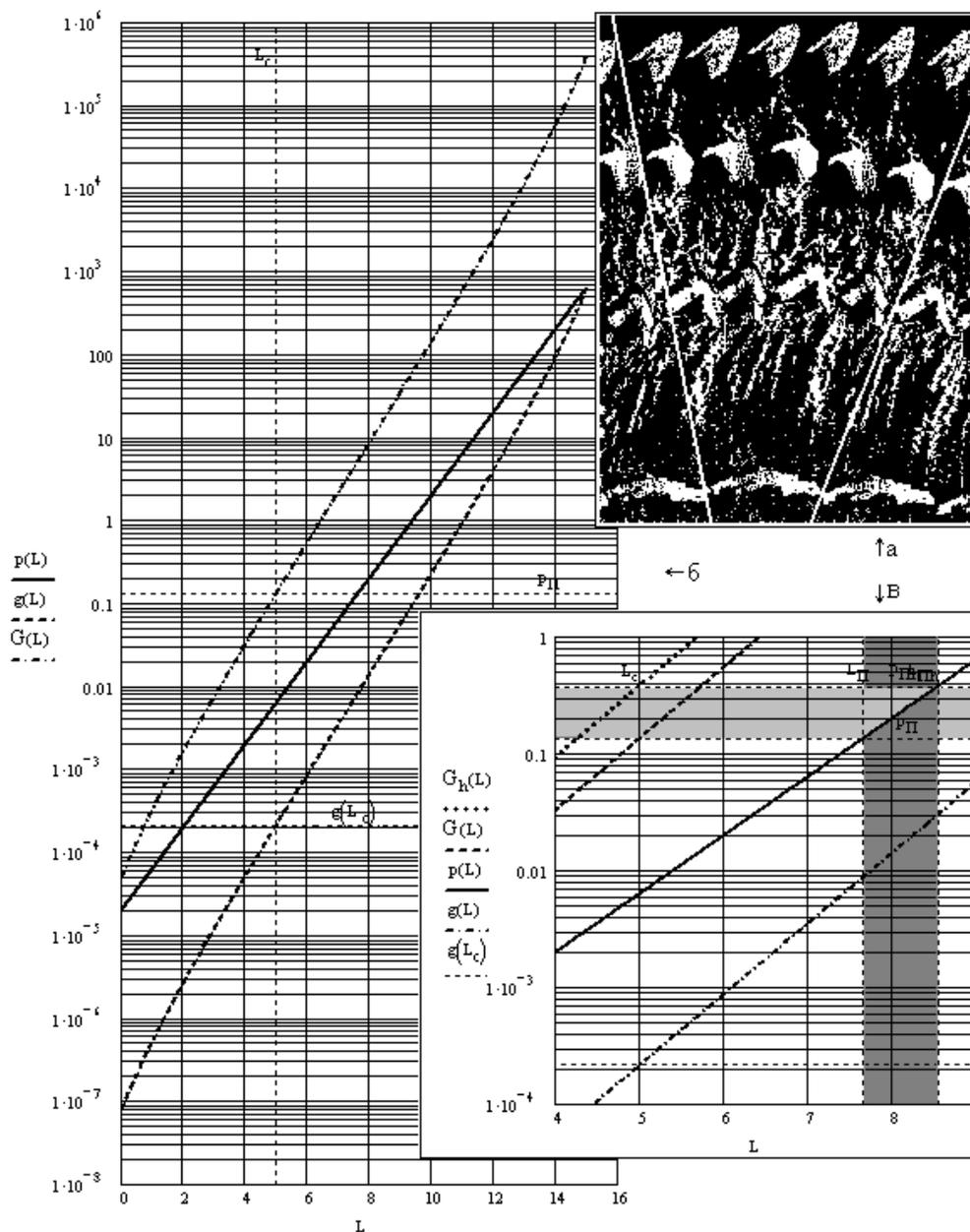


Рис. 1. Физиологическое и биофизическое обоснование концепции влияния звука на слуховую сенсорную систему человека

Обосновано [7], что внутренние волосковые клетки отвечают за восприятие высоты тонов, а наружные устанавливают градицию уровней звукового давления (интенсивности звука) на каждой высоте. Полнофункциональное, толерантное и безадаптационное, отношение наружных волосковых клеток к стимулам

звукового давления в течение длительного времени возможно при возбуждении не более того числа НВК, которое находится на внешнем ряду спирального органа, т.е. $n_c \leq 6$ (рис. 1,а, [14]). Возбуждение большего числа НВК может вызвать проблемы в работе слухового органа вплоть до гибели ВК. Поскольку число

возбуждённых рецепторов (НВК) связано с уровнем звукового давления L очевидным соотношением $n=L+1$, то оно определяет и предельный, но безопасный, уровень звукового давления, который может выдержать человек длительное время (возможно, весь срок службы слухового органа $T=360$ лет [6]): $L_c \leq 5$ Б. Определяя величину того давления $g(L,n)$ во внутреннем ухе, которое может идентифицироваться с уровнем L для n возбуждённых НВК, имеем

$$g(L,n) = \frac{p(L)}{Z - (n-1)} \cdot \frac{n}{Z} \quad (1)$$

где $Z=N_b+N_n$ – общее число всех рецепторов ($N_n=15$ наружных ВК и $N_b=1$ внутренняя ВК, рис. 1,а), способных к трансдукции звука на заданной частоте, $Z-(n-1)$ – функциональная мобильность рецепторов слухового органа на уровне L , на котором задействовано $n-1$ НВК [4], $\frac{p(L)}{Z-(n-1)}$ – функциональная восприимчивость НВК на соответствующем уровне L звукового давления $p(L)$.

Связь $L=n-1$ позволяет упростить соотношение (1), сведя его к одной переменной L как функции $g(L)$. Её графический расчёт представлен на рис. 1,б нижней, пунктирной линией. Расчёт минимального (порогового) давления звука, на которое реагирует слуховой рецептор (НВК), даёт величину $g_{\text{порог}} = g(0) = 7,81250 \cdot 10^{-8}$ Па, регистрируемую при $L_{\text{min}}=0$, что соответствует $n=1$. Уровню $L=L_c=5$, который может выдержать слуховой рецептор длительное время (возможно, всей жизни человека), соответствует предельно допустимому $g_{\text{п}} = g(L_c) = 2,215610 \cdot 10^{-4}$ Па. Это значение можно считать репером порогового звукового давления в физиологии слуховых ощущений. Оно не может вызвать деструктивных изменений слуховых рецепторов на протяжении длительного времени. Его можно считать базовым для установления предельно допустимой дозы, воздействующей на слуховые рецепторы без ущерба для их полноценного функционирования длительное время, для любого уровня $L < L_c$, устанавливаемой по (2). В этом случае доза звукового воздействия $D(L) = g(L)^2 \cdot T$. Для уровня звукового давления $L_c=5$ Б и времени $T=360$ лет, на которое рассчитана работа уха [6], имеем $D(L_c) = 0,1467$ Па²·ч. В физиологии слуховых ощущений эти величины следует считать нормативными.

2. Количественная оценка биофизических результатов в теории дозиметрии звука. Анализ теории дозиметрии звука способствует установлению нормативных решений в

практическом смысле с биофизической точки зрения. Концептуальное решение проблемы заключается в том, что звуковое давление $p(L)$ на соответствующем уровне L (для стандартной частоты) устанавливается по закону Вебера-Фехнера [11, 13] соотношением

$$p(L) = p_0 \cdot 10^{\frac{L}{2}}, \quad (2)$$

где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – минимальное звуковое давление (порог слышимости), воспринимаемое ухом среднестатистического человека на стандартной частоте с вероятностью $\frac{1}{2}$. График зависимости (1) представлен на рис. 1,б сплошной линией. Являясь, по сути, энергетической величиной, на основе закона сохранения и превращения полной механической энергии, применим равенство доз воздействия $D(L) = g(L)^2 \cdot T = G(L)^2 \cdot T_p$, дающее соотношение

$$G(L) = \sqrt{\frac{D(L)}{T_p}}, \quad (3)$$

которое определяет звуковое давление $G(L)$ во внешнем поле за рабочую смену длительностью T_p (рис. 1,б, верхняя штрихпунктирная линия). Для уровня звукового давления $L_c=5$ Б и экспозиции человека в звуковом поле $T_p=8$ ч по (3) звуковое давление $G(L_c) = 0,1354$ Па, – и именно это значение является предельно допустимым звуковым давлением $p_{\text{п}}$ при расчёте за рабочую смену длительностью 8 ч. Физиологически и биофизически аргументированное, оно, по формуле $p_{\text{п}} / \sqrt{\frac{D_{\text{ex}}}{T_p}}$, примерно в 3

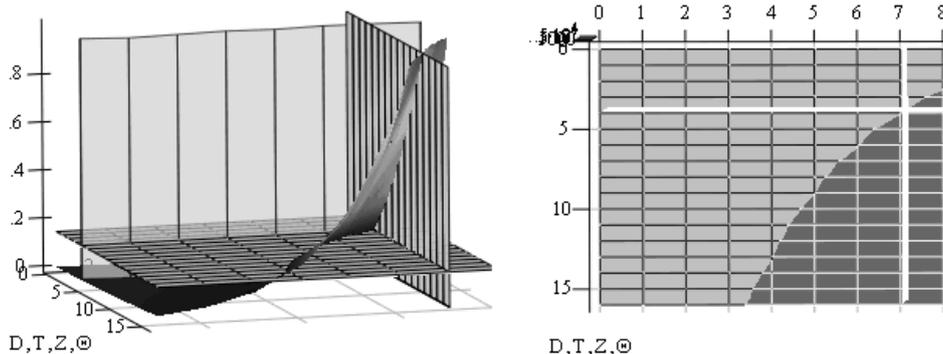
раза меньше принятой в России научным консенсусом и декларативно заявленной дозы $D_{\text{ex}} = 1$ Па²·ч. Само же значение дозы D_{ex} превышает обоснованное значение $D_{\text{п}} = 0,1467$ Па²·ч почти в 7(!) раз. Расчёт доз звука $D(p,\tau)$ как функции давления p и экспозиции τ приведён на рис. 2 в графическом и табличном исполнении (расчёт величин относительных доз $\delta D(p,\tau) = \frac{D(p,\tau)}{D_{\text{п}}} \cdot 100\%$, в виду их простоты, не

приводятся). На рис. 2 сверху слева в 3-D представлена система координат с линейной (цена деления $C_p = 0,0271$ Па/дел.) осью давления O_p , направленной вниз-вправо, логарифмической (по основанию 2) осью времени O_t , направленной вправо, и вертикальной осью доз звуковых воздействий $D(p,\tau)$ с ценой деления $C_d = 2$ Па²·ч/дел. Кроме самой поверхности $D(p,\tau)$, для ориентира здесь представлены также: горизонтальная тау-плоскость T для дозы $d = D_{\text{п}}$, зет-плоскость Z с постоянным давлением

$p_{п}$ и тета-плоскость Θ с постоянной экспозицией T_p длительностью в рабочую (восьмичасовую) смену.

Сверху справа приведены те же поверхности при развороте системы координат так, чтобы она была наблюдаема сверху. При этом ось времени O_t направлена вправо, ось давления O_p направлена вниз. Светло-серая область определяет значения дозы звукового воздействия $D(p,\tau) < D_{п}$, напротив, тёмно-серая область – значения дозы звукового воздействия

$D(p,\tau) > D_{п}$. Линия сечения поверхности $D(p,\tau)$ тау-плоскостью T определяет предельно допустимую дозу звукового воздействия $D_{п}$. Зет-плоскость Z с постоянным давлением $p_{п}$ и тета-плоскость Θ с постоянной экспозицией T_p представлены горизонтально и вертикально расположенными плоскостями, на графике выделенными широкими светлыми горизонтальными и вертикальными полосами, соответственно.



Экспозиция τ , ч

| | | | | | | | | | | | |
|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| $\tau =$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| | 0 | 0.063 | 0.125 | 0.250 | 0.500 | 1.000 | 2.000 | 4.000 | 8.000 | 16.000 | 32.000 |

Давление p , Па Доза звукового излучения, D , Па²·ч

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|----|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| $p =$ | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| | 0 | 0.0271 | $34 \cdot 10^{-5}$ | $69 \cdot 10^{-5}$ | $34 \cdot 10^{-4}$ | $68 \cdot 10^{-4}$ | $35 \cdot 10^{-4}$ | $67 \cdot 10^{-3}$ | $34 \cdot 10^{-3}$ | $68 \cdot 10^{-3}$ | 0.012 | 0.023 |
| | 1 | 0.0542 | $34 \cdot 10^{-4}$ | $68 \cdot 10^{-4}$ | $35 \cdot 10^{-4}$ | $67 \cdot 10^{-3}$ | $34 \cdot 10^{-3}$ | $68 \cdot 10^{-3}$ | 0.012 | 0.023 | 0.047 | 0.094 |
| | 2 | 0.0813 | $26 \cdot 10^{-4}$ | $52 \cdot 10^{-4}$ | $50 \cdot 10^{-3}$ | $01 \cdot 10^{-3}$ | $02 \cdot 10^{-3}$ | 0.013 | 0.026 | 0.053 | 0.106 | 0.211 |
| | 3 | 0.1083 | $35 \cdot 10^{-4}$ | $67 \cdot 10^{-3}$ | $34 \cdot 10^{-3}$ | $68 \cdot 10^{-3}$ | 0.012 | 0.023 | 0.047 | 0.094 | 0.188 | 0.376 |
| | 4 | 0.1354 | $46 \cdot 10^{-3}$ | $92 \cdot 10^{-3}$ | $34 \cdot 10^{-3}$ | $69 \cdot 10^{-3}$ | 0.018 | 0.037 | 0.073 | 0.147 | 0.293 | 0.587 |
| | 5 | 0.1625 | $50 \cdot 10^{-3}$ | $01 \cdot 10^{-3}$ | $02 \cdot 10^{-3}$ | 0.013 | 0.026 | 0.053 | 0.106 | 0.211 | 0.423 | 0.845 |
| | 6 | 0.1896 | $46 \cdot 10^{-3}$ | $93 \cdot 10^{-3}$ | $36 \cdot 10^{-3}$ | 0.018 | 0.036 | 0.072 | 0.144 | 0.288 | 0.575 | 1.150 |
| | 7 | 0.2167 | $34 \cdot 10^{-3}$ | $68 \cdot 10^{-3}$ | 0.012 | 0.023 | 0.047 | 0.094 | 0.188 | 0.376 | 0.751 | 1.502 |
| | 8 | 0.2438 | $13 \cdot 10^{-3}$ | $27 \cdot 10^{-3}$ | 0.015 | 0.030 | 0.059 | 0.119 | 0.238 | 0.475 | 0.951 | 1.901 |
| | 9 | 0.2708 | $34 \cdot 10^{-3}$ | $69 \cdot 10^{-3}$ | 0.018 | 0.037 | 0.073 | 0.147 | 0.293 | 0.587 | 1.174 | 2.347 |
| | 10 | 0.2979 | $47 \cdot 10^{-3}$ | 0.011 | 0.022 | 0.044 | 0.089 | 0.178 | 0.355 | 0.710 | 1.420 | 2.840 |
| | 11 | 0.3250 | $02 \cdot 10^{-3}$ | 0.013 | 0.026 | 0.053 | 0.106 | 0.211 | 0.423 | 0.845 | 1.690 | 3.380 |
| | 12 | 0.3521 | $48 \cdot 10^{-3}$ | 0.015 | 0.031 | 0.062 | 0.124 | 0.248 | 0.496 | 0.992 | 1.983 | 3.967 |
| | 13 | 0.3792 | $36 \cdot 10^{-3}$ | 0.018 | 0.036 | 0.072 | 0.144 | 0.288 | 0.575 | 1.150 | 2.300 | 4.601 |
| | 14 | 0.4063 | 0.010 | 0.021 | 0.041 | 0.083 | 0.165 | 0.330 | 0.660 | 1.320 | 2.641 | 5.281 |
| | 15 | 0.4333 | 0.012 | 0.023 | 0.047 | 0.094 | 0.188 | 0.376 | 0.751 | 1.502 | 3.004 | 6.009 |

Рис. 2. Расчёт доз влияния звукового излучения $D(p,\tau)$ как функции давления p и экспозиции τ

Таблица величин доз звуковых воздействий $D(p,\tau)$ как значений функции давления p и времени τ (рис. 2, внизу) имеет два входа. Вход слева соответствует значениям давлений p , а вход сверху – значениям времени τ с указанными шагами счёта. К примеру, давлению $p=p_{п}=0,1354$ Па и времени $\tau=T_p=8$ ч соответствует доза $D(p,\tau)=0,147$ Па²ч, причём с ростом этих величин доза воздействия тоже растёт, и наоборот (таблица относительных величин доз звуковых воздействий $\delta D(p,\tau)$ как значений

функции давления p и времени τ , по причине её простого расчёта, не приведена).

Решая обратную задачу, можно получить несколько интересных результатов. Во-первых, рассчитанные значения доз звуковых воздействий $D(p,\tau)$ при заданных давлениях p приводят к возможности нахождения экспозиции $t(p,d)$ в звуковом поле. На рис. 3 сверху слева в 3-D представлена система координат с линейной осью давления O_p (цена деления $C_p=0,0271$ Па/дел.), направленной вниз-вправо, логарифмической (по основанию 2) осью доз

звуковых воздействий O_d , направленной вправо, и вертикальной осью времени O_t как функции $t(p,d) = \sqrt{\frac{d}{p^2}}$. Здесь также представлены: горизонтальная тау-плоскость T для экспозиции T_p , зет-плоскость Z с постоянным давлением p_{Π} и тета-плоскость Θ с постоянным значением дозы D_{Π} . Те же поверхности приведены на рис. 3 сверху справа при их обзоре сверху. При этом ось доз звукового воздействия O_d направлена вправо, ось давления O_p – вниз.

Светло-серая область определяет значения времени $t(p,d) < T_p$, напротив, тёмно-серая область – значения времени воздействия $t(p,d) > T_p$. Линия сечения поверхности $t(p,d)$ тау-плоскостью T определяет экспозицию звукового воздействия как T_p . Зет-плоскость Z с постоянным давлением p_{Π} и тета-плоскость Θ с постоянной дозой D_{Π} представлены горизонтальной и вертикальной плоскостями, на графике выделенные широкими светлыми полосами, соответственно.

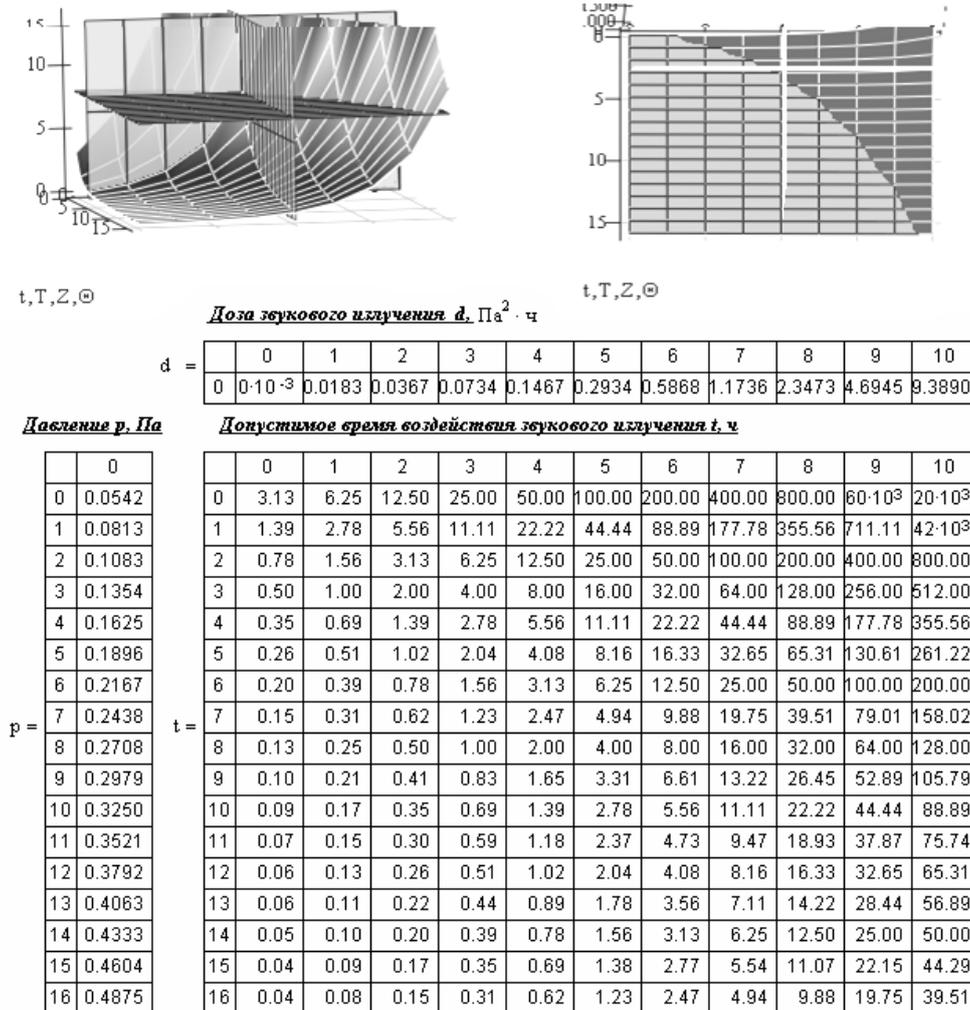


Рис. 3. Расчёт времени действия звукового излучения $t(p,d)$ как функции давления p и получаемой дозы звука d

Таблица величин времени звуковых воздействий $t(p,d)$ как значений функции давления p и дозы d (рис. 3, внизу) имеет два входа. Вход слева соответствует значениям давлений p , а вход сверху – значениям доз d с указанными шагами счёта. К примеру, давлению $p = p_{\Pi} = 0,1354$ Па при дозе $d = D_{\Pi} = 0,1467$ Па²·ч соответствует экспозиция, как и следовало ожидать, $t = T_p = 8$ ч, причём увеличение давления звука при постоянной дозе воздействия требует уменьшения экспозиции человека в

звуковом поле, и наоборот; при постоянном же давлении доза пропорциональна экспозиции.

Во-вторых, противоположный подход, – по заданным значениям доз воздействия звука d и экспозиций τ – приводит к расчёт давлений звукового поля как функции $p(\tau,d)$. На рис. 4 сверху слева в 3-D представлена система координат с линейной осью давления O_p (цена деления $C_p = 0,0271$ Па/дел.), направленной вниз-вправо, логарифмической (по основанию 2) осью доз звуковых воздействий O_d , направленной вправо, и вертикальной осью времени O_t как

функции $t(p,d) = \sqrt{\frac{d}{p^2}}$. Здесь также представле-

ны: горизонтальная тау-плоскость Т для экспозиции T_p , зет-плоскость Z с постоянным давлением p_{Π} и тета-плоскость Θ с постоянным значением дозы D_{Π} . Те же поверхности приведены на рис. 3 сверху справа при их обзоре сверху. При этом ось доз звукового воздействия Od направлена вправо, ось давления Op – вниз. Светло-серая область определяет значения времени $t(p,d)$, по величине меньшие T_p , напротив, тёмно-серая область – значения времени воздействия $t(p,d)$, большие T_p . Линия сечения поверхности $t(p,d)$ тау-плоскостью Т определяет экспозицию звукового воздействия как T_p . Зет-плоскость Z с постоянным давлением p_{Π} и тета-плоскость Θ с дозой D_{Π} представлены горизонтальной и вертикальной плоскостями, на графике они выделены, соответственно, широкими светлыми полосами.

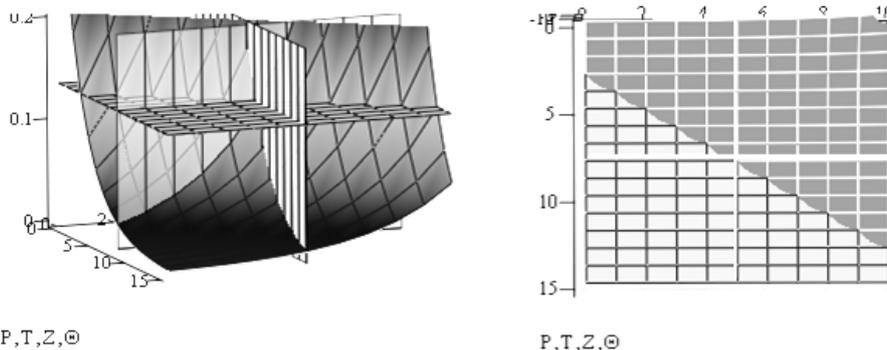
Таблица величин времени звуковых воздействий $t(p,d)$ как значений функции давления p и дозы d (рис. 4, внизу) имеет два входа. Вход слева соответствует значениям давлений

p , а вход сверху – значениям доз с указанными шагами счёта. К примеру, давлению $p = p_{\Pi} = 0,1354$ Па при дозе $d = D_{\Pi} = 0,1467$ Па²ч соответствует экспозиция $t = 8$ ч, причём увеличение давления звука при постоянной дозе воздействия требует уменьшения экспозиции человека в звуковом поле, и наоборот; при постоянном же давлении доза пропорциональна экспозиции.

В-третьих, рассчитав давления, производимые звуком, можно оценить их уровни. По определению [12]

$$L(\tau, d) = 21g \frac{p(\tau, d)}{p_0}, \quad (4)$$

причём для восьмичасовой экспозиции $\tau = T_p = 8$ ч и предельно допустимом звуковом давлении $p = p_{\Pi} = 0,1354$ Па, что соответствует предельно допустимой дозе $d = D_{\Pi} = 0,1467$ Па²ч, получаем значение предельно допустимого уровня звукового давления $L(T_p, D_{\Pi}) = L_{\Pi} = 7,66$ Б, звук на котором не вызывает деструктивных изменений в слуховом органе.



P, T, Z, Θ

P, T, Z, Θ

Доза звукового излучения d , Па² · ч

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $d =$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0.0092 | 0.0183 | 0.0367 | 0.0734 | 0.1467 | 0.2934 | 0.5868 | 1.1736 | 2.3473 | 4.6945 | 9.3890 |

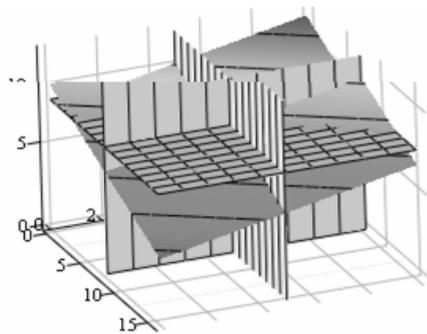
Экспозиция τ , ч Давление p , Па

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $\tau =$ | 0 | 0.063 | 0 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 | 2.167 | 3.064 | 4.333 | 6.128 | 8.667 | 12.257 |
| | 1 | 0.125 | 1 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 | 2.167 | 3.064 | 4.333 | 6.128 | 8.667 |
| | 2 | 0.250 | 2 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 | 2.167 | 3.064 | 4.333 | 6.128 |
| | 3 | 0.500 | 3 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 | 2.167 | 3.064 | 4.333 |
| | 4 | 1.000 | 4 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 | 2.167 | 3.064 |
| | 5 | 2.000 | 5 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 | 2.167 |
| | 6 | 4.000 | 6 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | 1.532 |
| | 7 | 8.000 | 7 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 |
| | 8 | 16.000 | 8 | 0.024 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 |
| | 9 | 32.000 | 9 | 0.017 | 0.024 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 |
| | 10 | 64.000 | 10 | 0.012 | 0.017 | 0.024 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 |
| 7 | 8.000 | 7 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | 1.083 | |
| 8 | 16.000 | 8 | 0.024 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | 0.766 | |
| 9 | 32.000 | 9 | 0.017 | 0.024 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | 0.542 | |
| 10 | 64.000 | 10 | 0.012 | 0.017 | 0.024 | 0.034 | 0.048 | 0.068 | 0.096 | 0.135 | 0.192 | 0.271 | 0.383 | |

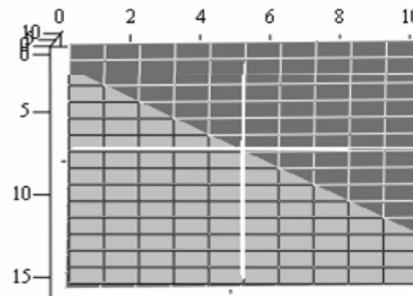
Рис. 4. Расчёт давления звукового излучения $p(\tau, d)$ как функции экспозиции τ и получаемой дозы звука d

Рис. 5 иллюстрирует расчёт уровней звукового давления как функции $L(\tau, \delta D)$ в зависимости от экспозиции человека в звуковом поле τ и, как это обычно принято [9], от относительной дозы δD . Здесь сверху слева соотношение (4) дано в 3D-представлении как функция $L(\tau, \delta D)$ двух аргументов – экспозиции τ и относительной дозы звукового воздействия δD , причём ось времени $O\tau$ (с ценой деления $C_\tau=1$ ч/дел.), направлена вниз-вправо, логарифмическая (по основанию 2) ось относительных доз воздействия звукового излучения $O\delta D$ направлена вправо, ось уровней интенсивности звука OL (с ценой деления $C_L=5$ Б) – вертикальна. Поверхность $L(\tau, \delta D)$, определяющаяся логарифмом функции $p(\tau, \delta D)$ с аргументом δD , изменяющимся с шагом степенной функции, вырождается в плоскость. Здесь, кроме этой плоскости $L(\tau, \delta D)$, представлены также:

тау-плоскость T с фиксированным уровнем давления L_{Π} , тета-плоскость Θ с постоянным значением экспозиции T_p и зета-плоскость Z с фиксированной дозой звукового излучения D_{Π} . Те же поверхности приведены на рис. 5 сверху справа при их обзоре сверху. При этом ось доз звукового воздействия $O\delta D$ направлена вправо, ось давления O_p – вниз. Светло-серая область определяет значения уровней давлений $L < L_{\Pi}$, тёмно-серая область, напротив – значения уровней давлений $L > L_{\Pi}$. Линия сечения плоскости $L(\tau, \delta D)$ тау-плоскостью T определяет предельный уровень давлений L_{Π} . Зета-плоскость Z с фиксированной дозой звукового излучения D_{Π} и тета-плоскость Θ с постоянным значением экспозиции T_p представлены горизонтальной и вертикальной плоскостями, на графике они выделены, соответственно, широкими светлыми полосами.



L, T, Z, Θ



L, T, Z, Θ

| | | Экспозиция τ ч | | | | | | | | | | | |
|--|---------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Относительная доза звукового излучения, δD , % | | $\tau =$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | 0 | 0 | 0.063 | 0.125 | 0.250 | 0.500 | 1.000 | 2.000 | 4.000 | 8.000 | 6.000 | 32.000 | 64.000 |
| | | Уровень звукового давления L , бел (Б) | | | | | | | | | | | |
| $\delta D =$ | | L = | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 0 | 6.25 | 0 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 | 7.059 | 6.758 | 6.457 | 6.156 | 5.855 | 5.554 |
| 1 | 12.50 | 1 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 | 7.059 | 6.758 | 6.457 | 6.156 | 5.855 |
| 2 | 25.00 | 2 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 | 7.059 | 6.758 | 6.457 | 6.156 |
| 3 | 50.00 | 3 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 | 7.059 | 6.758 | 6.457 |
| 4 | 100.00 | 4 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 | 7.059 | 6.758 |
| 5 | 200.00 | 5 | 0.070 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 | 7.059 |
| 6 | 400.00 | 6 | 0.371 | 0.070 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 | 7.360 |
| 7 | 800.00 | 7 | 0.672 | 0.371 | 0.070 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 | 7.661 |
| 8 | 1600.00 | 8 | 0.973 | 0.672 | 0.371 | 0.070 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 | 7.962 |
| 9 | 3200.00 | 9 | 1.274 | 0.973 | 0.672 | 0.371 | 0.070 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 | 8.263 |
| 10 | 6400.00 | 10 | 1.575 | 1.274 | 0.973 | 0.672 | 0.371 | 0.070 | 9.769 | 9.467 | 9.166 | 8.865 | 8.564 |

Рис. 5. Расчёт уровней давления звукового излучения $L(\delta D, \tau)$ как функции относительных доз звука δD и экспозиции τ

Таблица значений уровней звуковых давлений $L(\tau, \delta D)$ как функции экспозиции τ и относительных доз δD (рис. 5, внизу) имеет два входа. Вход слева соответствует значениям относительных доз δD , а вход сверху – значе-

ниям экспозиций τ с указанными шагами счёта. К примеру, относительной дозе $\delta D=100\%$ при экспозиции $\tau=T_p=8$ ч соответствует уровень звуковых давлений $L=7,661$ Б, равный, как и следовало ожидать, предельно допустимому

уровню давления L_{Π} , причём увеличение давления звука при постоянной дозе воздействия требует уменьшения экспозиции человека в звуковом поле, и наоборот; при постоянном же давлении доза пропорциональна экспозиции.

3. Количественная оценка психофизических феноменов в дозиметрии звука. Последний результат имеет и ещё одно важное, психофизическое, приложение как решение, регламентирующее поведение человека в звуковом поле. На стандартной частоте $f_c=1$ кГц соотношение (4) может определять уровни громкости звукового сигнала $E(\tau, d)$ или $E(\tau, \delta D)$, в фонах (декафонах). С помощью закона Вебера-Фехнера на стандартной частоте это достигается декларативным равенством

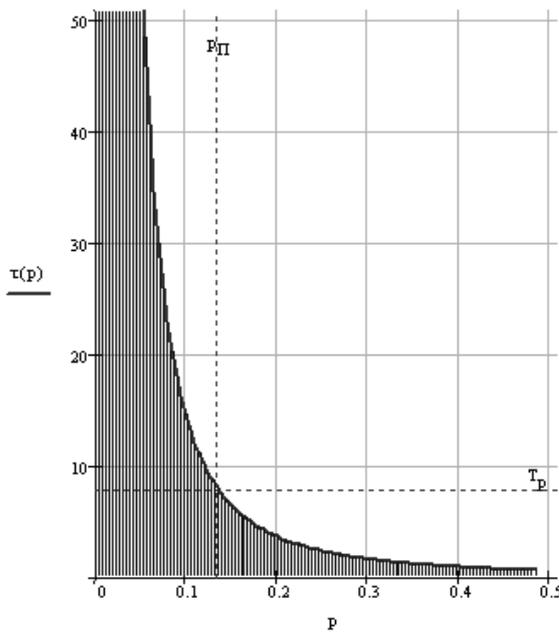
$$E(\tau, \delta D), \text{ декафон} = L(\tau, \delta D), \text{ Б}, \quad (5)$$

т.е.

$$E(\tau, \delta D) = 2 \lg \frac{p(\tau, \delta D)}{p_0}, \quad (6)$$

– громкость, которую орган слуха может выдержать комфортно и без ущерба для своей полноценной работы длительное время. Ввиду равенства уровней звуковых давлений и громкости тонов на стандартной частоте расчёт последней величины не приводится. Но в качестве примера поясним, что на этой частоте предельно допустимая громкость тонов (предельно допустимый уровень громкости тонов) составляет, как и ожидалось, $E_{\Pi}=7,661$ декафон = 76,61 фон.

И, наконец, представим ещё один психофизический результат. Полагая дозу воздействия звукового излучения постоянной, например, предельно допустимой D_{Π} , можно рассчитать длительность экспозиции человека t в этом поле при различных звуковых давлениях p (уровнях звуковых давлений L).



Доза звукового излучения
d, Па.ч

| | |
|-------|-------|
| d^T | 4 |
| | 0.147 |

Относительная доза
звукового излучения,
 δD , %

| | |
|--------------------|-------|
| δD_{Π}^T | 4 |
| | 100.0 |

Звуковое
давление
p, Па

Допустимая экспозиция
звукового излучения
t, ч

| | 0 | 4 |
|----|--------|-------|
| 0 | 0.0542 | 50.00 |
| 1 | 0.0813 | 22.22 |
| 2 | 0.1083 | 12.50 |
| 3 | 0.1354 | 8.00 |
| 4 | 0.1625 | 5.56 |
| 5 | 0.1896 | 4.08 |
| 6 | 0.2167 | 3.13 |
| 7 | 0.2438 | 2.47 |
| 8 | 0.2708 | 2.00 |
| 9 | 0.2979 | 1.65 |
| 10 | 0.3250 | 1.39 |
| 11 | 0.3521 | 1.18 |
| 12 | 0.3792 | 1.02 |
| 13 | 0.4063 | 0.89 |
| 14 | 0.4333 | 0.78 |
| 15 | 0.4604 | 0.69 |
| 16 | 0.4875 | 0.62 |

Рис. 6. Расчёт предельной экспозиции человека в звуковом поле $t(d)$ или $t(\delta D)$ как функции давления звукового излучения p для предельной дозы d или предельной относительной дозы δD звука

Такой расчёт представлен на рис. 6. В левой его части приведён график функции $t(p) = \sqrt{\frac{D_{II}}{p}}$ и прямые для $t=T_p$ и $p=r_{II}$, штриховкой показана область тех значений p и t , для которых $t < T_p$. В правой части рис. 6 представлены количественные результаты некоторых предельных значений экспозиций t человека в звуковом поле с заданными параметрами давлений p и доз d и пропорциональных им относительных доз δD .

Рассматриваемая концепция теоретических принципов дозиметрии звука, являясь физиологически и биофизически аргументированной, решает многие практические задачи. Возвратимся к рис. 1. На врезке (в) представлены уже знакомые графики $g(L)$, $G(L)$ и $p(L)$. Нижняя горизонтальная пунктирная линия отмеряет на графике $g(L)$ для $L=L_c=5$ Б давление $g_{II}=g(L_c)=2,215610 \cdot 10^{-4}$ Па. Вертикальная линия для $L=L_c=5$ Б на пересечении с прямой $G(L)$ даёт давление $r_{II}=0,1354$ Па, горизонтальная пунктирная линия с этим значением в пересечении с графиком $p(L)$ устанавливает предельный уровень звукового давления, которому человек может подвергаться в течение рабочей смены $L=L_{II}=7,661$ Б. укорочение экспозиции до 1 часа может сопровождаться повышением давления $G(L)$ до 0,383 Па (диапазон этого увеличения отмечен светло-серой полосой), при таком сокращении экспозиции допустимый уровень звукового давления возрастает до 8,564 Па (диапазон увеличения уровней звукового давления отмечен тёмно-серой полосой). И всё же главный итог предлагаемой концепции научных принципов дозиметрии звука заключается в аргументированном обосновании и расчёте предельных значений характеристик звукового излучения, действующего на человека. Кроме сравнительного анализа полученных данных, рекомендованных ВОЗ [1] и принятых в России по ГОСТ, СН и СанПиН [2, 9, 11] (не в пользу последних), данная концепция становится основой для расчёта и других параметров, определяющих энергетическое воздействие звука на человека. Так оказывается возможным расчёт

– давлений $p(t, D_{II})$ как функции экспозиции t и предельно допустимой дозы D_{II} ,

– экспозиции $\tau(D_{II}, L)$ как функции предельно допустимой дозы D_{II} и уровней звукового давления L ,

– предельно допустимых доз $D_{II}(\tau, L)$ как функции экспозиции τ и уровней звукового давления L и др.

Вывод: используя физиологический, био- и психофизический подходы к механизмам восприятия звукового давления, научно обоснован метод определения предельно допустимых доз звукового воздействия, предельно допустимых звуковых давлений, предельно допустимых уровней звуковых давлений и санитарных норм экспозиции человека в звуковом поле на стандартной частоте 1000 Гц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. 12. Шум. Всемирная организация здравоохранения, Женева, 1983. – М.: Медицина, 1984. 156 с.
2. Защита от шума. СПиП 23-03-2003. – М.: ГК РФ по строительству и жилищно-ком. комплексу, 2004. 12 с.
3. *Каспаров, А.А.* Гигиена труда и промышленная санитария / *А.А. Каспаров* – М.: Медицина, 1981. 368 с.
4. *Макаров, В.А.* Физиология. Основные законы, формулы, уравнения / *В.А. Макаров*. – М.: Изд. дом ГЕОТАР-МЕД, 2001. 112 с.
5. *Мучин, П.В.* Безопасность жизнедеятельности / *П.В. Мучин*. – Новосибирск: СГТА, 2003. 273 с.
6. Пат. № 2184485 Российская Федерация. МПК⁷ А61В5/12. Способ установления координатного распределения внутренних волосковых клеток на базилярной пластинке периферического отдела слухового анализатора человека. // *Е.Л. Овчинников, Н.В. Ерёмкина, Н.Ю. Хохлова*, заявители и патентообладатели, заявл. 05.01.2000, опубл. 10.04.2002. Бюлл. № 19, 2002. С. 149.
7. Пат. № 2248752 Российская Федерация. МПК⁷ А61В5/12. Способ определения громкости тонов для произвольной частоты звуков по *Е.Л. Овчинникову* с учетом закона Вебера-Фехнера. // *Е.Л. Овчинников*, заявитель и патентообладатель, заявл. 12.03.03, опубл. 27.03.05. Бюлл. № 9, 2005. 26 с.
8. *Кириллов, В.Ф.* Руководство к практическим занятиям по гигиене труда / *В.Ф. Кириллов*. – М.: Медицина, 2001. 400 с.
9. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. ГОСТ 12.1.003-83. – М.: Изд. стандартов, 1983. 12 с.
10. *Альтман, Я.А.* Физиология сенсорных систем / *Я.А. Альтман*. – СПб.: Паритет, 2003. 352 с.
11. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. – М.: МЗ РФ, 1997. 14 с.
12. *Яворский, Б.М.* Справочник по физике / *Б.М. Яворский, А.А. Детлаф*. – М.: Наука, 1990. 624 с.
13. *Fernandez, C.* The innervation of the cochlea (guinea pig.) // *Laryngoscope*, 1951, v. 61. P. 1152-1172.
14. *Lim, D.J.* Fine morphology of the tectorial membranes: Its relationship to the organ of Corti // *Arch. Otol.* 1972. V. 96. P. 199-215.

**SPECIFICATIONS AND ORDERS OF SOUND INFLUENCE ON
PERSON'S HEARING: RECOMMENDATIONS ACCORDING TO
SCIENTIFIC BASES OF SOUND DOSIMETRY**

© 2011 E.L. Ovchinnikov, N.V. Eryomina, N.A. Romashova, M.N. Shatalaeva

Samara State Medical University

The concept of scientific principles of sound dosimetry is under construction on the assumption that functional properties of acoustical receptors are defined morphological structure of spiral body. The normal perception them of stimulus of sound pressure is possible for a long time at excitation no more that number of external hairpin cells which is on an external number of spiral body: $n \leq 6$. Excitation of more number of receptors can cause problems in work of acoustical body up to their destruction. As the number of excited receptors (external hairpin cells) is connected with level of sound pressure L an obvious parity $n=L+1$ it is possible to define limiting, but safe, level of sound pressure $L_c \leq 5$ which person is able to withstand for a long time. At an estimation of acoustical sensations in physiology it is necessary to recognize these sizes standard. The theory of sound dosimetry promotes an establishment of standard decisions of biophysical characteristics of a sound field: doses of sound $D(p, \tau)$ as pressure functions p and expositions τ , expositions $t(p, d)$ in a sound field as pressure functions p and doses d , levels of sound pressure $L(\tau, \delta D)$ as exposition functions τ and doses d (relative doses δD). The psychophysical solution of a problem regulates: levels of sound signal loudness $E(\tau, d)$ or $E(\tau, \delta D)$, in phones (decaphones), as exposition functions τ and doses d (or relative doses δD), duration of an exposition of the person $t()$ at various sound pressure p (levels of sound pressure L) and a maximum permissible dose of sound D_{Π} .

Key words: sound dosimetry, specifications and orders, maximum permissible level of sound pressure, maximum permissible dose of sound influence, exposition of sound field

Evgeniy Ovchinnikov, Candidate of Biology, Associate Professor at the Department of Medical and Biological Physics. E-mail:

E.L.Ovchinnikov@ya.ru

Nataliya Eryomina, Doctor of Medicine, Professor at the Department of Otorhinolaryngology, named after acad. I.B. Soldatov. E-mail:

erjominalor@mail.ru

Nataliya Romashova, Assistant at the Department of Medical and Biological Physics. E-mail: merittt@mail.ru

Marina Shatalaeva, Senior Teacher at the Department of Medical and Biological Physics