АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том I 1955 Вып. 3

# УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЛУХА ОТ ТРАВМИРУЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ШУМОВ

*И. М. Полковский*

Рассматриваются причины возникновения слуховых травм в условиях производственных шумов; определяются основные требования, которые должны быть предъявлены к устройствам для защиты от слуховых травм; выводятся формулы для расчета указанных устройств, выполненных как в виде ушных втулок, так и в виде заглушек, облегающих ушную раковину.

Современные промышленные предприятия оборудованы механизмами и машинами, являющимися источниками акустических шумов. Указанные шумы во многих случаях стабильны во времени, характеризуются сравнительно большим уровнем интенсивности и наличием составляющих в широком спектре частот. Поэтому они оказывают значительное мешающее и травмирующее действие на слух человека и организм в целом. Несмотря на отдельные успешные попытки ослабить шумы в местах их возникновения [1, 2, 3], на многих промышленных предприятиях уровень интенсивности шумов весьма высок. Поэтому важное значение в ослаблении разрушительного действия шумов на человеческий организм имеет создание защитных устройств индивидуального пользования.

## 1. Причины слуховых травм и формы их проявления

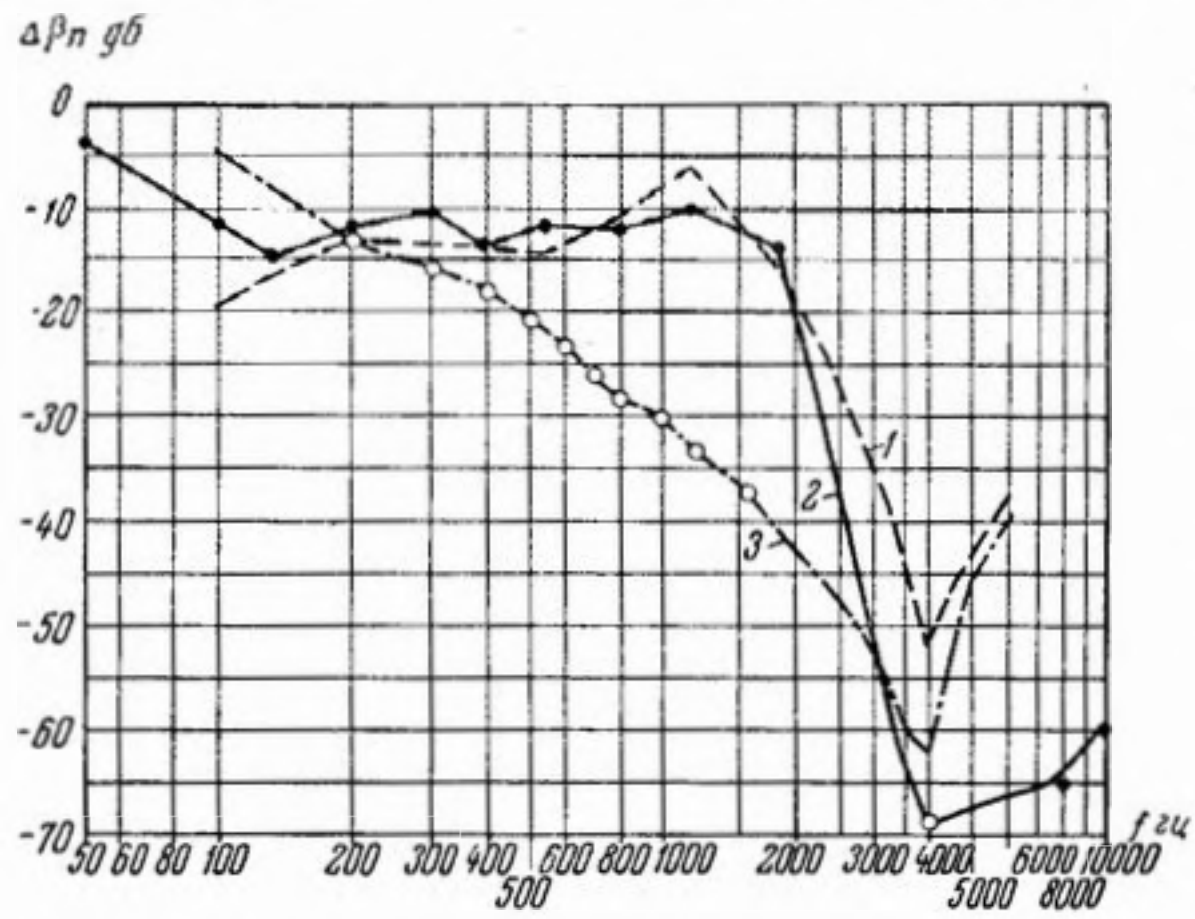
Источниками слуховых травм могут быть ударные волны (например, при подрывных работах) и акустические шумы.

Ударные волны всегда имеют направленный характер и воспринимаются как чисто механическое воздействие или удар. Сила удара на барабанную перепонку уха определяется крутизной нарастания волны. Установлено, что слуховые травмы имеют место не вследствие больших давлений, а вследствие большой скорости или крутизны нарастания этих давлений. Так, кессонные рабочие и водолазы испытывают значительно более высокие давления, чем, например, артиллеристы или подрывники, однако, поскольку эти давления изменяются медленно, они не вызывают слуховых травм. Для того чтобы ослабить удар, вызываемый действием ударной волны, необходимо перевести его на поверхности менее чувствительные, чем барабанная перепонка. Сделать это сравнительно просто, применив, например, эластичную резиновую заглушку, облегающую ушную раковину.

Борьба с травмирующим действием акустических шумов более сложна, так как значительно более сложен механизм их воздействия на слуховой аппарат человека. При обследовании работников «шумных» профессий с потерей слуха, связанной с повреждениями внутреннего уха, было установлено, что независимо от причин, вызвавших глухоту (промышленные шумы, взрывы, стрельба и т. п.), наибольшее поражение слуха всегда наблюдается на частотах, близких 4000 гц (фиг. 1). Исследования этого явления позволили установить, что, даже при шумах очень высокого уровня, защита от слуховых травм может быть обеспечена путем заглушения со-

ставляющих шумов, начиная с 1000—1200 гц, с таким расчетом, чтобы в диапазоне выше 3000 гц эффект заглушения был не менее 30—35 дб. Это значит, что в качестве устройств для защиты от слуховых травм могут быть применены акустические фильтры нижних частот с полосой пропускания, позволяющей обеспечить сравнительно высокую разборчивость передаваемой речи.

Существенным требованием к устройствам для защиты от слуховых травм является обеспечение удобства пользования и сохранение стабильности их характеристик в любых метеорологических и климатических условиях. Следует отметить, что попытки, предпринятые в этом направлении за границей, не увенчались успехом [4, 5, 6], так как во всех известных там типах устройств для защиты от слуховых травм требуемая частотная характеристика вносимого затухания обеспечивалась за счет отверстий в наружных поверхностях; при загрязнении этих отверстий защитные свойства такого рода устройств резко изменяются.




Фиг. 1. Аудиограммы людей, имеющих потери слуха:

1 — аудиограмма рабочего ткацкой фабрики, 2, 3 — аудиограммы артиллеристов

Устройства для защиты от слуховых травм могут быть выполнены в виде:

а) втулок, вставляемых в слуховой канал;

б) эластичных заглушек, облегающих ушную раковину;

в) защитных металлических диафрагм либо быстродействующих клапанных устройств.

Последнее является мало целесообразным, так как приводит к созданию весьма громоздких и сложных устройств. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать расчет параметров только для первых двух видов устройств.

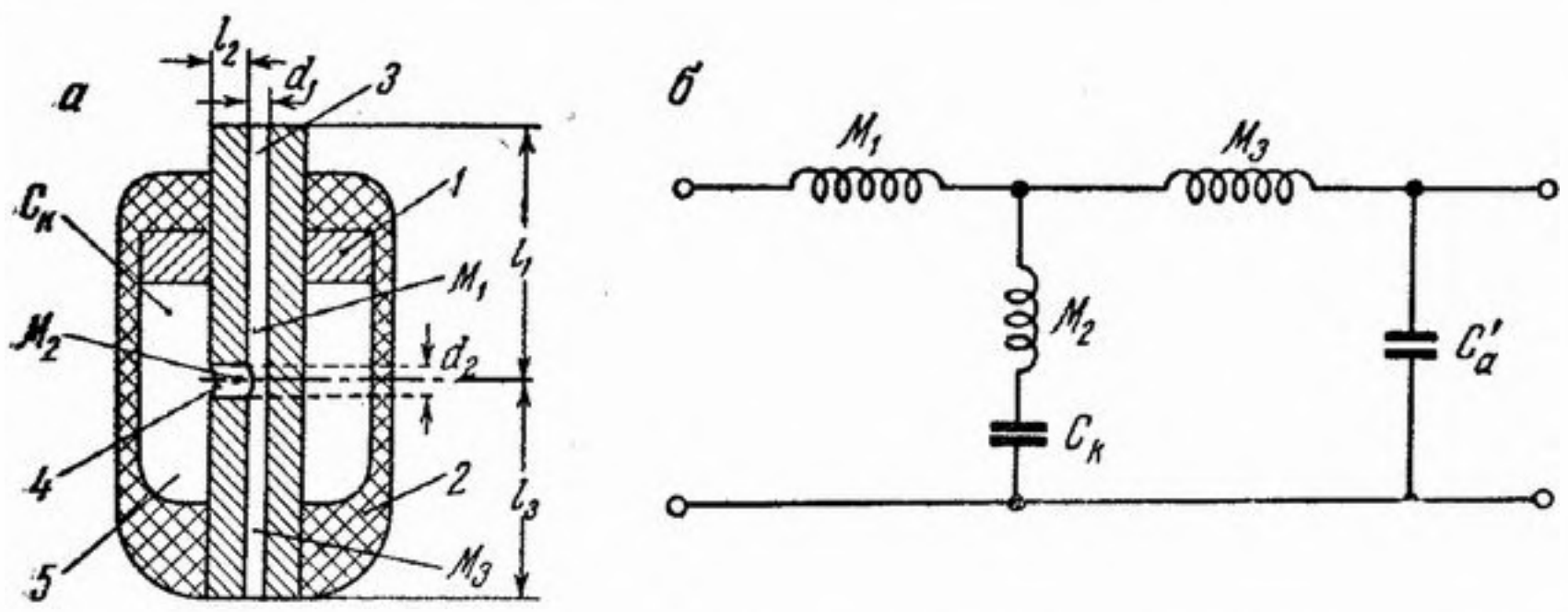
## 2. Основные соотношения для расчета устройств типа ушных втулок

Характерной особенностью рассматриваемых систем является то, что один из элементов их, а именно акустическая емкость, образуемая воздушным объемом между барабанной перепонкой и срезом ушной втулки, всегда задан. Кроме того, задана также граничная частота $f_c \approx 1000$ гц.

Поэтому задача в основном состоит в том, чтобы выбрать акустический фильтр, который обеспечил бы требуемую крутизну нарастания затухания при переходе от полосы пропускания к полосе непрохождения, а также требуемую величину затухания в полосе непрохождения. Применение для этих целей простейшего акустического фильтра нижних частот, представляющего собой трубку, нагруженную на некоторый воздушный объем, нецелесообразно, так как этот фильтр имеет сравнительно небольшую крутизну нарастания затухания при переходе от полосы пропускания к полосе непрохождения и ограниченные возможности регулировки характеристик системы вследствие того, что в данном случае единственным переменным элементом является длина трубки.

Отмеченные недостатки в значительной мере устраняются при применении ушной втулки, представляющей собой двухзвенный акустический

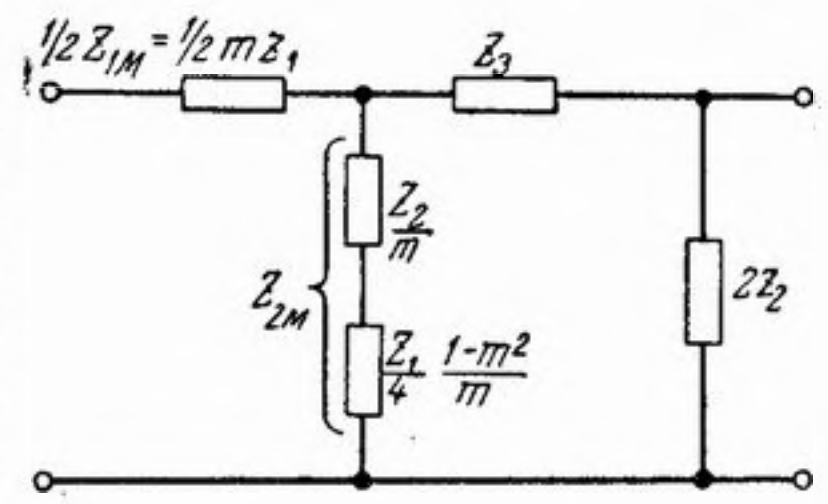
фильтр нижних частот. Типовая конструкция такой ушной втулки изображена на фиг. 2,*а*. Как видно из фигуры, рассматриваемая ушная втулка состоит из пластмассового сердечника *1*, запрессованного в резиновую оболочку *2*. По всей длине сердечника проходит канал круглого сечения *3*, соединяющий ухо с окружающей воздушной средой. Сердечник имеет поперечное отверстие *4*, которое соединяет продольный канал с воздушной камерой *5*.




Фиг. 2. Устройство типа ушной втулки, выполненное в виде двухзвенного фильтр нижних частот:

*а* — эскиз конструкции, *б* — эквивалентная схема

Эквивалентная схема описанной ушной втулки изображена на фиг. 2, *б*, где $M_1$ — акустическая масса воздуха в продольном канале *3* до оси поперечного отверстия *4*; $M_2$ — акустическая масса воздуха в поперечном отверстии *4*; $M_3$ — акустическая масса воздуха в продольном канале *3* от оси поперечного отверстия *4* до среза ушной втулки, вставляемого в ухо; $C_к$ — акустическая гибкость воздушного объема камеры *5*; $C'_a$ — акустическая гибкость воздушного объема между нижним срезом ушной втулки и барабанной перепонкой. Таким образом, ушная втулка, изображенная на фиг. 2, *а*, представляет собой последовательное соединение двух Г-образных звеньев, из которых одно является звеном типа *m*, а другое — звеном типа постоянной *K*. Исследуем эквивалентную схему фиг. 2, *б*, заменив ее схемой фиг. 3, где




Фиг. 3. Эквивалентная схема двухзвенного акустического фильтра нижних частот, приведенная к каноническому виду

$$Z_{1м} = j\,2\omega M_1, \tag{1}$$

$$Z_{2м} = j\left(\omega M_2 - \frac{1}{\omega C_к}\right), \tag{2}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j2\,\omega C'_a}, \tag{3}$$

$$Z_3 = j\omega M_3. \tag{4}$$

При условии, что $Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{1м} + Z_1)$, имеем

$$Z_1 = \frac{2Z_3}{1+m}, \tag{5}$$

$$Z_{1м} = mZ_1, \tag{6}$$

$$Z_{2M} = \frac{Z_2}{m} + \frac{Z_1}{4}\,\frac{1-m^2}{m}, \tag{7}$$

$$Z_{\text{т}} = \sqrt{\frac{M_3}{C'_{\text{а}}}\,\frac{1}{1+m} - \frac{\omega^2 M_3^2}{(1+m)^2}}. \tag{8}$$

Из уравнения (8):

а) при $\omega = 0$, $|Z_{\text{т}}| = R_0$

$$R_0 = \sqrt{\frac{M_3}{C'_{\text{а}}}\,\frac{1}{1+m}}; \tag{9}$$

б) при $\omega = \omega_{\text{с}}$, $Z_{\text{т}} = 0$

$$\omega_{\text{с}} = \sqrt{\frac{1+m}{M_3 C'_{\text{а}}}}. \tag{10}$$

Определим численное значение $R_0$. Известно, что акустическая масса трубки при условии, что ее размеры меньше минимальной длины волны рабочего диапазона ($\lambda_{\min}$), равна

$$M_{\text{а}} = \rho\,\frac{l}{S}, \tag{11}$$

где $\rho$ — плотность воздуха, $l$ — длина трубки, $S$ — площадь поперечного сечения трубки.

Акустическая гибкость объема $V$ при тех же условиях

$$C_{\text{а}} = \frac{V}{\rho c^2}, \tag{12}$$

где $c$ — скорость звука в см/сек.

Из (9) и (10) с учетом (11) и (12)

$$R_0 = \frac{\rho c^2}{2\pi f_{\text{с}} V}. \tag{13}$$

При $\rho = 1{,}2\cdot 10^{-3}$ г/см³, $c = 34400$ см/сек, $f_{\text{с}} = 1000$ гц

и $V = 0{,}5$ * см³, $R_0 \approx 460$.

Рассмотрим условия согласования фильтра рассматриваемого типа с сопротивлением нагрузки, т. е. с импеданцем барабанной перепонки, и с внутренним сопротивлением генератора, т. е. с импеданцем открытого пространства.

С учетом (13) характеристическое сопротивление фильтра со стороны наружного среза ушной втулки

$$Z_{\text{т}} = 460\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_{\text{с}}}\right)^2}, \tag{14}$$

а характеристическое сопротивление со стороны противоположного конца втулки, вставляемого в слуховой канал

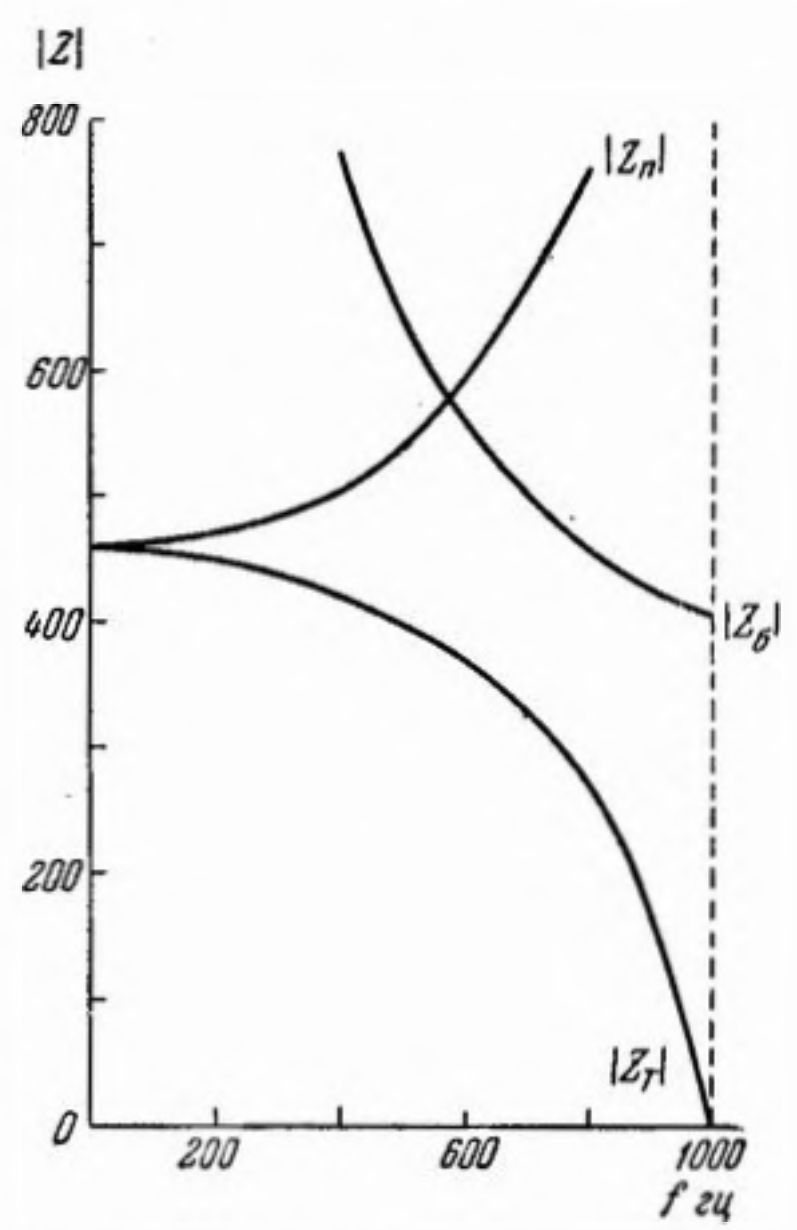
$$Z_{\text{п}} = \frac{460}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_{\text{с}}}\right)^2}}. \tag{15}$$

По опытным данным [6] частотная зависимость импеданца барабанной перепонки в интересующей нас полосе пропускания может быть пред-

* Установлено, что при вставлении ушной втулки в ухо воздушный объем между нижним срезом втулки и барабанной перепонкой $V \approx 0{,}5$ см³.

ставлена кривой, изображенной на фиг. 4. Там же приведены частотные зависимости характеристических сопротивлений фильтра, рассчитанные по формулам (14) и (15). Из сравнения кривых $|Z_п| = \varphi_1(f)$ и $|Z_б| = \varphi_2(f)$ следует, что практически согласование импеданца барабанной перепонки и характеристического сопротивления фильтра со стороны внешнего среза ушной втулки может быть достигнуто лишь на одной частоте. При этом во всей полосе пропускания (за исключением самых низких частот) $|Z_п|$ и $|Z_б|$ являются величинами примерно одного порядка. Это значит, что в полосе пропускания фильтра не будет наблюдаться заметного уменьшения коэффициента передачи.

Из фиг. 4 видно, что при $R_0 \approx 460$ частота согласования примерно равна средней частоте полосы 200—1000 гц, имеющей решающее значение для достижения наибольшей разборчивости речи при пользовании устройствами для защиты от слуховых травм. Таким образом, и с этой точки зрения целесообразно принять величину $R_0 = 460$ исходной при расчете. Импеданц открытого воздушного пространства незначителен. Поэтому в рассматриваемых условиях имеет место случай работы генератора на сопротивление нагрузки, значительно превышающее его собственное. Найдем основные соотношения, необходимые для определения конструктивных размеров ушной втулки.




Фиг. 4. Частотные зависимости характеристических сопротивлений акустического фильтра и импеданца барабанной перепонки

Из (5) и (6)

$$Z_{1M} = \frac{2m\,Z_3}{1+m}. \qquad (16)$$

Подставив в (16) значения $Z_{1M}$ и $Z_3$ из (1) и (4), получим

$$M_1 = \frac{m}{1+m} M_3. \qquad (17)$$

Из (2), (3), (5) и (7)

$$M_2 = \frac{1-m^2}{1+m}\frac{M_3}{2m}, \qquad (18)$$

$$C_к = \frac{2C_а}{m}. \qquad (19)$$

Величина $C_а$ задана, а величина $M_3$ может быть определена из (12) и (10):

$$M_3 = \frac{(1+m)\rho C^2}{\omega_c^2 V}. \qquad (20)$$

Соотношения (17), (18), (19) и (20) позволяют получить все формулы, необходимые для конструктивных расчетов:

$$d_1 = 2{,}06\cdot 10^{-4} f_c \sqrt{\frac{l_3 V}{1+m}}\ \text{см}, \qquad (21)$$

$$l_1 = l_3 \frac{m}{1+m}\ \text{см}, \qquad (22)$$

$$d_3 = 2{,}9\cdot 10^{-4} f_c \sqrt{\frac{m l_2 V}{1-m^2}}\ \text{см}. \qquad (23)$$

Значение коэффициента $m$, при котором обеспечивается требуемая крутизна нарастания затухания при переходе от полосы пропускания к

полосе непрохождения, может быть определена по формуле

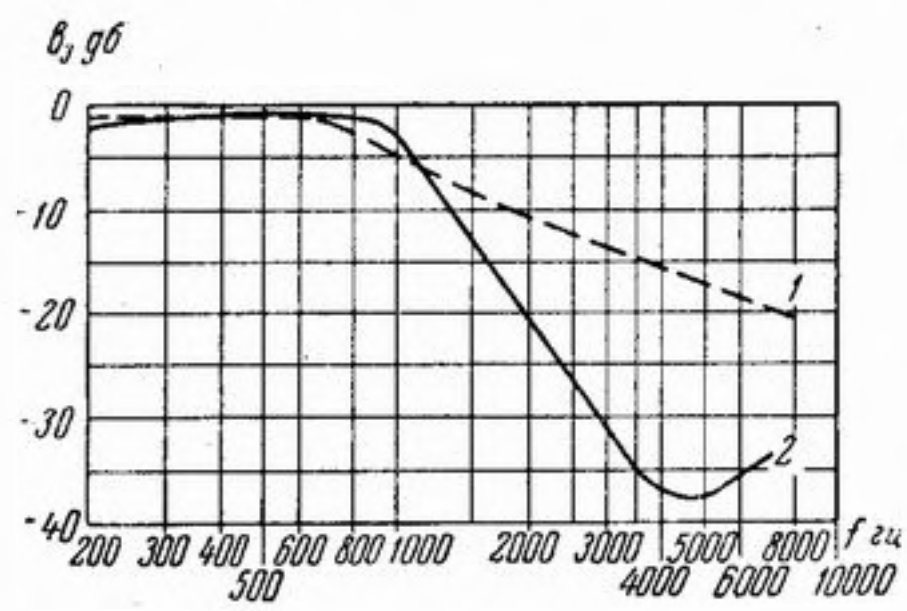
$$m = \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_\infty}\right)^2}, \tag{24}$$

где $f_\infty$ — частота максимума затухания $m$-производного фильтра в полосе непрохождения.

Величинами $l_3$ и $l_2$ следует задаться, исходя из конструктивных соображений. При этом должны быть выполнены условия $l_2 \ll \lambda_{\min}$ и $l_3 \ll \lambda_{\min}$.

## 3. Расчет устройств типа заглушек, облегающих ушную раковину

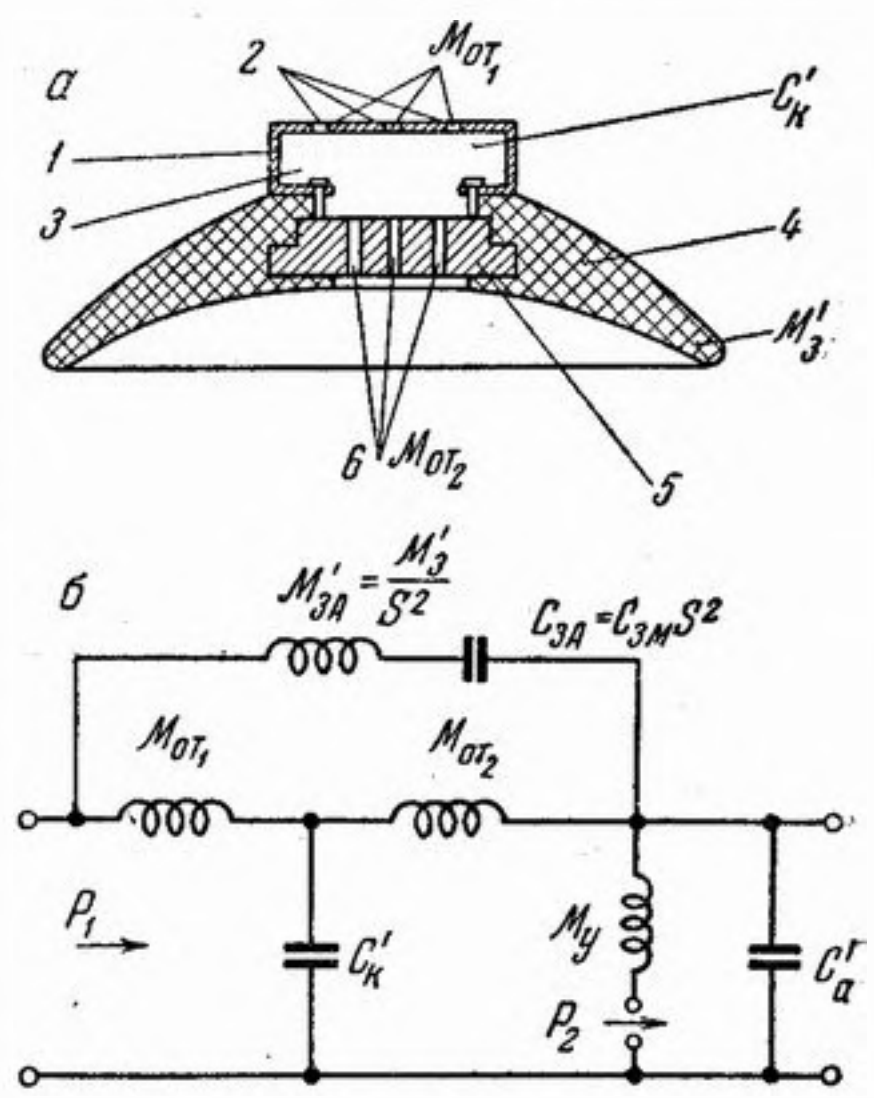
Простейшим типом защитного устройства данного вида является обычная телефонная заглушка, которая с известным приближением может рассматриваться как Г-образный акустический фильтр, по своим свойствам близкий фильтру нижних частот (фиг. 5, кривая *1*). Этим объясняется, в частности, почему подавляющее большинство телефонных заглушек, облегающих ушную раковину, вносит незначительное затухание в области частот до 800—1000 гц и обеспечивает сравнительно медленное нарастание затухания при переходе в область более высоких частот, что подтверждается многочисленными исследованиями свойств телефонных заглушек. Поэтому ни один из известных типов заглушек не обеспечивает в должной мере защиту от слуховых травм.




Фиг. 5. Частотные характеристики затухания:

*1* — типовой телефонной заглушки, *2* — защитного устройства

Как уже отмечалось, чтобы осуществить требуемую частотную характеристику в устройстве для защиты от слуховых травм, оно должно представлять собой по крайней мере двухзвенный акустический фильтр нижних частот. Это может быть сделано, например, в устройстве, изображенном на фиг. 6,*а*, которое состоит из металлической чашки *1* с отверстиями *2*, жестко закрепленной на пластмассовом вкладыше *5*, имеющем звуковые отверстия *6* и размещенном в эластичной резиновой заглушке *4*. Эквивалентная схема подобного устройства изображена на фиг. 6,*б*, где $p_1$ — звуковое давление у наружной поверхности устройства, $p_2$ — звуковое давление, непосредственно воздействующее на ухо вследствие неплотности прилегания заглушки, $M_{от_1}$ — акустическая масса отверстий *2* в наружной поверхности устройства, $M_{от_2}$ — акустическая масса отверстий *6* в пластмассовом вкладыше, $C'_к$ — акустическая гибкость воздуха, заключенного между наружной крышкой и заглушкой, $C_{за}$ — эквивалент-



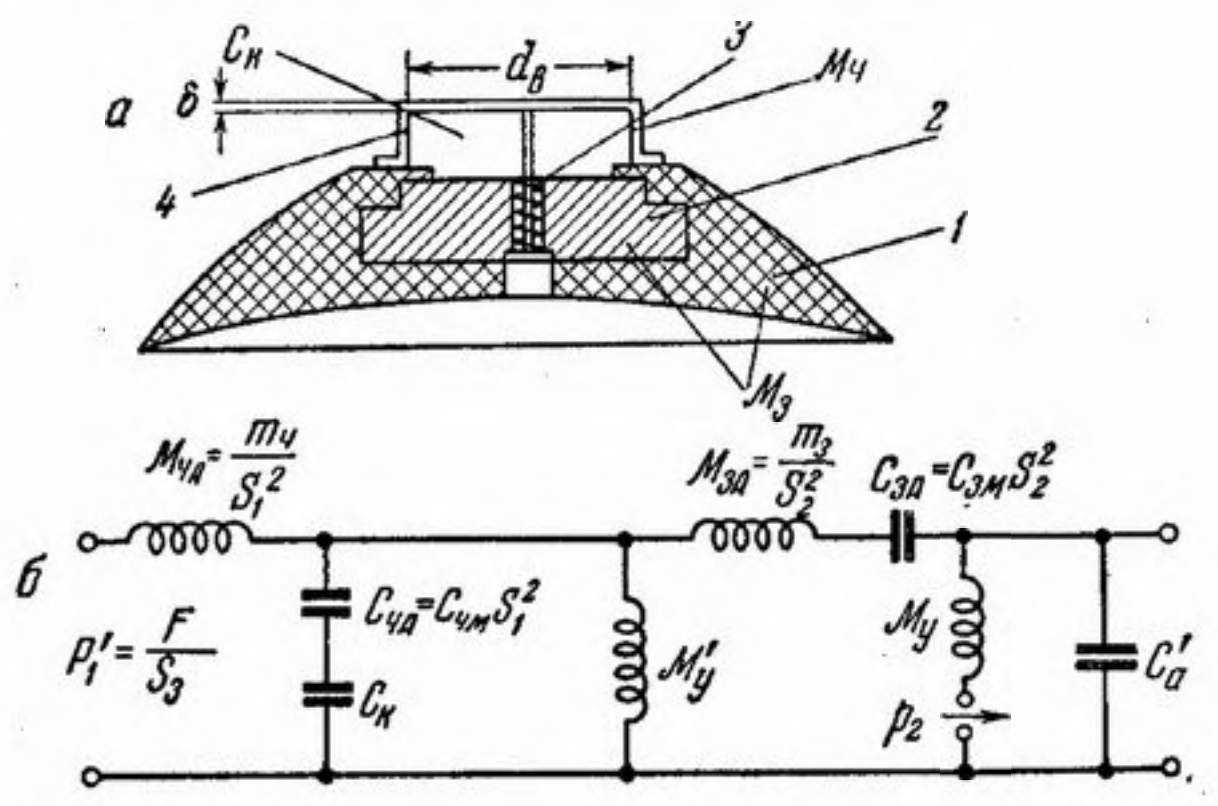

Фиг. 6. Устройство типа заглушки, облегающей ушную раковину, с отверстиями в наружной поверхности:

*а* — эскиз конструкции, *б* — эквивалентная схема

ная акустическая гибкость устройства, определяемая эластичностью его крепления на голове, $M'_{за}$ — эквивалентная акустическая масса устройства, $M_у$ — акустическая масса утечки за счет щелей и неплотности прилегания устройства к ушам, $C'_а$ — акустическая гибкость, образуемая воздушным объемом при закрывании уха защитным устройством.

Если пренебречь действием давления $p_2$, акустической гибкостью $C_{за}$ и утечкой, а также колебаниями устройства как единого целого ($M_{от_1}$ и $M_{от_2} \ll M'_{за}$), то получим эквивалентную схему, для которой справедливы те же соотношения, что и для ушной втулки, представляющей собой двухзвенный акустический фильтр при $m = 1$.

Однако возможно и другое конструктивное оформление устройства для защиты от слуховых травм, предложенное нами в 1952 г. и представляющее собою заглушку, облегающую ушную раковину. Эскиз конструкции такого устройства изображен на фиг. 7, *а*. Как видно из фигуры, указанное устройство состоит из эластичной заглушки *1*, имеющей пластмассовый вкладыш *2*. При помощи винта со спиральной пружиной *3* к заглушке гибко крепится металлическая чашка *4*. Описанное устройство представляет собой двухзвенный акустический фильтр нижних частот, в котором акустическая масса первого звена получена не за счет большого числа отверстий в наружных поверхностях, а за счет некоторой выделенной массы чашки *4*. Эквивалентная схема подобного устройства изображена на фиг. 7, *б*, где $p'_1$ — эквивалентное звуковое давление, действующее на наружную поверхность устройства, $M_{за}$ — эквивалентная акустическая масса заглушки (включая массу пластмассового вкладыша), $M_ч$ — эквивалентная акустическая масса некоторого элемента (например, металлической чашки или мембраны), $C_к$ — акустическая гибкость воздушной камеры, образуемой при закреплении чашки (мембраны) на заглушке, $C_{ча}$ — эквивалентная акустическая гибкость крепления металлической чашки (мембраны) к заглушке, $M'_у$ — акустическая масса утечки за счет неплотного прилегания чашки (мембраны) к заглушке. Остальные обозначения уже встречались в схеме фиг. 6, *б*. Если гибкость крепления выбрать таким образом, что $C_{ча} \gg C_к$, то, учитывая, что практически на всех частотах, кроме самых низких, $j\omega M_з \gg 1/j\omega C_{за}$ и можно пренебречь утечками $M_у$ и $M'_у$, а также действием давления $p_2$, получим эквивалентную схему, для которой справедливы те же соотношения, что и для ушной втулки, представляющей собой двухзвенный акустический фильтр при $m = 1$.




Фиг. 7. Устройство типа заглушки, облегающей ушную раковину, не имеющее отверстий в наружной поверхности:

*а* — эскиз конструкции, *б* — эквивалентная схема

Это значит, что

$$V'_к = 2V', \tag{25}$$

где $V'_к$ — объем воздуха в камере, образуемой при закреплении чашки (либо мембраны) на заглушке, $V'$ — объем воздуха под заглушкой при закрывании ею уха.

В рассматриваемом случае можно принять $V' \cong 6$ см³ (такой объем, в частности, принят для камеры искусственного уха как среднее значение большого числа статистических измерений).

При конструктивном оформлении чашки в виде цилиндра ее высота может быть определена по формуле

$$h = \frac{4V'_{к}}{\pi d_{в}^2} + \delta, \tag{26}$$

где $d_в$ — внутренний диаметр чашки, $\delta$ — толщина дна чашки (см. фиг. 7, *а*).

Масса чашки

$$m_ч = m_з \frac{S_1^2}{2S_2^2}, \tag{27}$$

где $m_з$ — масса заглушки, $S_1$ — площадь прилегания чашки к заглушке в см², $S_2$ — площадь прилегания заглушки к уху в см².

Так как высота чашки может быть определена из (26), а ее диаметр определяется из конструктивных соображений, с учетом выбранного типа заглушки, плотность требуемого материала из (27)

$$\rho_2 = \frac{m_з}{V_ч} \frac{S_1^2}{2S_2^2}, \tag{28}$$

где $V_ч$ — объем материала чашки в см³.

Частотная характеристика затухания, обеспечиваемая при помощи рассмотренного устройства, изображена на фиг. 5 (кривая *2*).

Из описанных выше типов защитных устройств, выполненных в виде ушных втулок и заглушек, облегающих ушную раковину, устройства, имеющие отверстия в наружных поверхностях, обладают тем существенным недостатком, что они не обеспечивают требуемой стабильности защитных свойств. В настоящее время наша промышленность имеет возможность изготовлять устройства данного типа для широкого пользования. Применение подобного рода устройств позволит в значительной мере избавить работников многих профессий от неприятных ощущений, вызываемых действием шумов, а также исключить проявление профессиональной тугоухости. Кроме того, применение устройств для защиты от слуховых травм позволит получить известный экономический эффект за счет повышения производительности труда.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Л. Навяжский. Учение о шуме, Медгиз, 1948.
2. Ю. С. Быков. Шумы современных самолетов и методы их уменьшения, Оборонгиз, М., 1953.
3. С. П. Алексеев. Исследование шумов города Москвы, Издательство АН СССР, 1950.
4. Л. Рюэди и В. Фуррер. IASA, 1946, 18, 2, 409—412.
5. И. Цвисловский. IASA, 1951, 23, 1, 36—40.
6. К. Д. Криттер. IASA, 1946, 18 2, 413—417.

Москва

Поступила в редакцию
17 марта 1955 г.