

УДК 519.7

МОДЕЛЬ СТАТИКИ АДАПТАЦИИ ОРГАНОВ ЧУВСТВ

М.Ф. Бондаренко¹, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко²

¹ХНУРЭ, г. Харьков, Украина

²ХНУРЭ, г. Харьков, Украина



Исследуются модель адаптации зрения и ее статические реакции. Описаны опыты по исследованию статико-адаптационных реакций ахроматического зрения и эксперименты по статике адаптации человеческого слуха. Приведено построение статического преобразования яркости в светлоту.

МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ, ЗРЕНИЕ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЕ, РЕАКЦИЯ СТАТИКО-АДАПТАЦИОННАЯ

Введение

В статьях [1, 2] было рассмотрено цветное зрение человека во всем его объеме и сложности. При этом удалось построить два нижних этажа оператора зрения. Было также установлено, что найденные преобразования имеют ту же степень достоверности, которой обладают законы Грассмана и Талбота. Эти нижние этажи оператора осуществляют подавление избытка информации в органе зрения человека. Дальнейшие преобразования информации осуществляются без ее потери. Теперь перед нами стоит задача найти вид преобразования сигналов в верхних этажах оператора зрения. Эта задача сводится к отысканию вида взаимно однозначного оператора Φ , преобразующего вектор-функцию промежуточного сигнала $\bar{V}(x, y, t)$ в вектор-функцию зрительного ощущения $\bar{S}(x, y, t)$.

Однако такая задача слишком обширна, и мы, по необходимости, должны себя ограничить. Сделаем это, ограничившись в дальнейшем входными сигналами $b_\lambda(x, y, t)$ в виде излучений постоянного спектрального состава. Поскольку таким излучениям соответствуют однокомпонентные зрительные ощущения, при этой постановке задачи остаются в стороне вопросы, связанные с трехкомпонентностью зрения. Одноцветность зрительного ощущения означает, что его насыщенность $S_2(x, y, t)$ и цветовой тон $S_3(x, y, t)$ не меняются ни в поле зрения x, y , ни во времени t . В отличие от этого светлота зрительного ощущения $S_1(x, y, t)$, которую мы будем в дальнейшем обозначать просто $S(x, y, t)$, может изменяться как в поле зрения x, y , так и во времени t .

Наша дальнейшая задача будет состоять в том, чтобы отыскать вид оператора преобразования зрительных картин постоянного спектрального состава $b_\lambda(x, y, t)$ в одноцветное зрительное ощущение, характеризуемое светлотой $S(x, y, t)$. Ниже рассматривается частный случай изложенной постановки задачи, когда зрительная картина однородна и является лишь функцией времени $b=b_\lambda(t)$. Кроме того, предполагается, что зрительная картина во времени изменяется достаточно медленно.

При такой постановке мы приходим к задаче построения математической модели адаптации светлотного зрения.

1. Модель адаптации зрения и ее статические реакции

С учетом результатов, полученных в работах [1, 2], представим однокомпонентный вариант модели в случае, когда входной сигнал зависит лишь от времени $b=b_\lambda(t)$, в виде схемы, изображенной на рис. 1. Работа блоков модели описывается следующими уравнениями:

блок 1

$$B(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b_\lambda(t) K(\lambda) d\lambda; \tag{1}$$

блок 2

$$V(t) = \frac{k}{a} \int_{-\infty}^t B(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{a}} d\tau; \tag{2}$$

блок 3

$$S(t) = \Phi(V(t)). \tag{3}$$

Функция $K(\lambda)$ выражает одну из кривых сложения фотоприемников глаза — кривую видности; Φ — взаимно однозначный оператор, включающий в себя адаптационное преобразование. Сигнал $B(t)$ совпадает по своему содержанию с понятием фотометрической яркости, рассматриваемой в курсе светотехники [3]. В дальнейшем сигнал $B(t)$ будем называть просто яркостью зрительной картины.

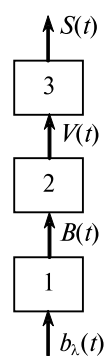


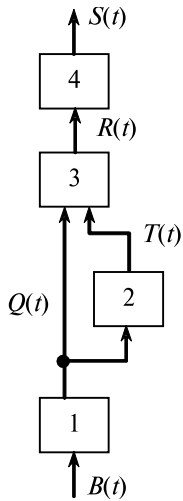
Рис. 1

При рассмотрении адаптационных процессов можно пренебречь процессами, обусловленными инерцией зрения, поскольку последние завершаются в неизмеримо более короткие сроки по сравнению с адаптационными процессами. В связи с этим оператор (2) в данном случае можно считать просто тождественным преобразованием сигналов:

$$V(t) = kB(t). \tag{4}$$

Включая множитель k в оператор Φ , можем записать:

$$S(t) = \Phi(B(t)). \tag{5}$$



Таким образом, задача построения модели адаптации зрения сводится к установлению вида преобразования медленно изменяющейся во времени яркости зрительной картины $B(t)$ в светлоту зрительного ощущения $S(t)$.

В качестве оператора Φ предлагается математическая модель адаптации зрения, представленная на рис. 2.

Работа блоков модели описывается следующими уравнениями:

Рис. 2. Математическая модель адаптации ахроматического зрения

блок 1

$$Q = c \lg dB; \tag{6}$$

блок 2

$$m \frac{dT}{dt} + T = k_a Q; \tag{7}$$

блок 3

$$R = Q - T; \tag{8}$$

блок 4

$$S = r \cdot 10^R + s. \tag{9}$$

В уравнениях (6)-(9) символы c, d, m, k_a, r, s обозначают константы адаптационного преобразования; $Q = Q(t), T = T(t), R = R(t)$ — некоторые промежуточные сигналы преобразования.

Согласно модели, блок 1 осуществляет логарифмирование яркости, блок 2 усредняет полученное значение логарифма яркости Q за период времени, определяемый величиной константы m , которую мы назовем постоянной времени адаптации. Кроме того, блок 2 умножает сигнал Q на константу k_a , называемую нами постоянной статистики адаптации. Блок 3 осуществляет адаптационное изменение уровня передаваемого сигнала Q на величину T , характеризующую состояние адаптации органа зрения. Наконец, блок 4 осуществляет операцию потенцирования сигнала R . Реакции построенной модели в качественном отношении соответствуют адаптационным реакциям органа зрения. Так, при переходе от темноты к яркому свету этот свет вначале слепит глаза, но со временем светлота зрительного ощущения снижается и постепенно устанавливается на некотором постоянном уровне. Таким образом, в этом случае мы имеем резкий скачок светлоты зрительного ощущения в сторону

повышения с последующим постепенным снижением светлоты к некоторому постоянному уровню [4].

Точно такой же в качественном отношении будет реакция модели адаптации. Поскольку вначале на вход модели длительно подавался сигнал B малой величины, сигналы Q, T, R и S модели также будут иметь сравнительно небольшую величину. При последующем скачкообразном увеличении сигнала B вместе с ним скачкообразно увеличиваются сигналы Q, R, S . В то же время в первое мгновение сигнал T , вследствие инерционности блока 2, останется неизменным. Однако со временем под действием сигнала Q большой величины инерционный блок вступит в работу, следствием чего явится постепенный рост сигнала T . Благодаря этому, а также действию блока 3, осуществляющему вычитание сигнала T из Q , произойдет постепенное падение уровня сигнала R , а вместе с ним и снижение светлоты S зрительного ощущения, устанавливающейся в конце концов на постоянном уровне.

Реакции модели качественно согласуются с фактическими зрительными реакциями и в случае перехода с яркого света к низкому уровню освещения. В первый момент времени ощущается значительное потемнение, что соответствует низкому уровню светлоты зрительного ощущения. Однако с течением времени глаз адаптируется, и уровень светлоты зрительного ощущения повышается. Такой же характер будут иметь и реакции модели, если на ее вход подать ступенчатый сигнал, изменяющийся с высокого значения на низкое. Заметим, что при некоторых упрощениях в предлагаемой модели адаптации зрения мы приходим к известным зависимостям. Так, заменяя уравнения (7)-(9) тождественными преобразованиями, мы приходим к логарифмической зависимости светлоты от яркости, то есть к закону Вебера-Фехнера [5, 6]. Если же заменить тождественными преобразованиями только лишь зависимости (7) и (8), то мы придем к известному степенному закону зависимости светлоты от яркости [7-10]. Наконец, заменяя тождественными преобразованиями зависимости (6) и (9), мы приходим к модели адаптации, предложенной академиком П.П. Лазаревым [11].

Подадим на вход модели адаптации ступенчатый сигнал:

$$B = \begin{cases} B_1 & \text{при } t < 0, \\ B_2 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \tag{10}$$

Этот сигнал соответствует скачкообразному изменению во времени яркости зрительной картины с некоторого постоянного значения B_1 на другое постоянное значение B_2 . Нас будут интересовать следующие вопросы: какое значение имеет выходной сигнал S модели, то есть светлота зрительного

ощущения, 1 — непосредственно перед моментом скачкообразного изменения яркости зрительной картины, то есть при $t = -0$; 2 — сразу же после момента скачка яркости зрительной картины, то есть при $t = +0$; 3 — при установившемся режиме работы модели после момента изменения яркости зрительной картины, то есть при $t = \infty$. Решение поставленных вопросов не требует исследования переходных режимов работы модели, то есть ее динамических реакций. Поэтому перечисленные выше реакции модели мы будем именовать статическими.

Определим значение сигналов модели $Q=Q_1$, $T=T_1$, $R=R_1$, $S=S_1$ при $t = -0$, то есть в момент непосредственно перед скачкообразным изменением зрительной картины. Согласно формуле (6), с учетом (10) имеем:

$$Q = c \lg dB_1. \quad (11)$$

Поскольку до момента изменения яркости сигнал Q_1 сохранял постоянное значение неограниченно долго, блок 2 модели при $t < 0$ работает в установившемся режиме. Следовательно, $dT/dt = 0$ и поэтому, согласно соотношению (7),

$$T_1 = k_a Q = k_a c \lg dB_1. \quad (12)$$

Сигнал R_1 , согласно (8), равен:

$$R_1 = Q_1 - T_1 = (1 - k_a) c \lg dB_1. \quad (13)$$

Наконец, светлота S_1 зрительного ощущения, согласно (9), равна:

$$S_1 = r 10^{R_1} + s = r (dB_1)^{(1-k_a)c} + s. \quad (14)$$

Аналогично этому найдем значения сигналов модели адаптации $Q = Q_2$, $T = T_2$, $R = R_2$ и $S = S_2$ при $t = \infty$, то есть при неограниченно долгом воздействии сигнала B_2 на вход модели:

$$Q_2 = c \lg dB_2, \quad (15)$$

$$T_2 = k_a c \lg dB_2, \quad (16)$$

$$R_1 = (1 - k_a) c \lg dB_2, \quad (17)$$

$$S_2 = r (dB_2)^{(1-k_a)c} + s. \quad (18)$$

Определим значения сигналов модели $Q = Q_0$, $T = T_0$, $R = R_0$ и $S = S_0$ при $t = +0$, то есть сразу же после скачкообразного изменения яркости. Сигнал Q_0 , согласно (6) и (10), равен:

$$Q_0 = c \lg dB_2. \quad (19)$$

В силу инерционности блока 2, его выходной сигнал непрерывен, поэтому

$$T_0 = T_1 = k_a c \lg dB_1. \quad (20)$$

Сигнал R_0 в момент $t = +0$, согласно (8), равен:

$$R_0 = c \lg dB_2 - k_a c \lg dB_1. \quad (21)$$

Светлота зрительного ощущения в момент $t = +0$, согласно (9), равна:

$$S_0 = r (dB_2)^c \cdot (dB_1)^{-k_a c} + s. \quad (22)$$

Уровень светлоты S_0 можно было бы получить на выходе модели и другим путем, подавая неограниченно долго на ее вход яркость B_0 , связанную со светлотой S_0 следующей зависимостью:

$$S_0 = r (dB_0)^{(1-k_a)c} + s. \quad (23)$$

Приравняв правые части равенств (22) и (23), получим зависимость, связывающую между собой яркости B_0 , B_1 и B_2 :

$$B_2 = B_1^{k_a} \cdot B_0^{1-k_a}. \quad (24)$$

Зависимость (24) допускает экспериментальную проверку. Опыты могут быть поставлены следующим образом. Наблюдатель смотрит на зрительную картину, изображенную на рис. 3а, фиксируя длительное время точку o на линии раздела двух полей. Левое поле имеет яркость B_1 , правое — яркость B_0 .

В некоторый момент времени на левом поле яркость B_1 скачкообразно сменяется на другую яркость B_2 , причем яркость правого поля остается неизменной (рис. 3б). Наблюдатель должен отметить равенство или неравенство светлот сравниваемых полей в момент непосредственно после скачка яркости на левом поле. Далее наблюдатель должен так отрегулировать одну из яркостей (например B_2), чтобы сразу же после скачка яркости он увидел равенство светлот сравниваемых полей.

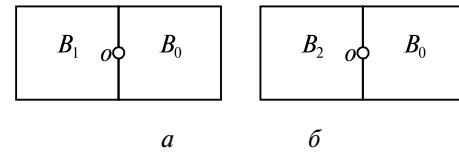


Рис. 3

Если работа органа зрения правильно описывается введенной выше моделью адаптации, то при видимом равенстве светлот полей, изображенных на рис. 3, яркости B_0 , B_1 и B_2 должны быть связаны соотношением (24).

2. Опыты по исследованию статико-адаптационных реакций ахроматического зрения

Выше, исходя из предложенной нами модели адаптации зрения, было получено равенство (24), допускающее экспериментальную проверку. Настоящий раздел посвящен опытной проверке этого следствия из модели. Эксперименты осуществлялись с помощью диска Максвелла (вертушки), на котором устанавливались три пары кружков с прорезями. В каждой паре один из кружков имеет белую поверхность с коэффициентом отражения 83% (бумага ватман), другой кружок имеет черную поверхность с коэффициентом отражения 0, 25%

(черный бархат). Значения коэффициентов отражения белой и черной поверхностей кружков были определены на колориметре КНО-3 в лаборатории цветковых измерений, руководимой канд. техн. наук Д.А. Шкловером, Всесоюзного научно-исследовательского светотехнического института.

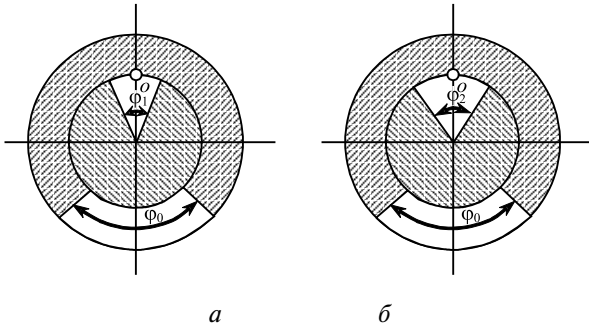


Рис. 4. Схема вертушки, использованной в опытах

Внешнее поле постоянно имеет яркость B_0 , внутреннее поле первоначально имеет яркость B_1 (рис. 4а), затем происходит скачкообразное изменение яркости внутреннего поля и уровня B_2 (рис. 4б). Смена яркости внутреннего поля достигалась тем, что в определенный момент времени пара кружков, формирующих яркость B_1 снималась и под ней обнаруживалась другая пара кружков, дающих яркость B_2 . Диск вращается со скоростью около 50 об/сек. При этой скорости мелькания яркости сливаются при любом угле раствора кружков, и наблюдатель увидит поля неизменной во времени яркости. Регулируя углы раствора белых кружков φ_0, φ_1 и φ_2 , вставленных своими прорезями в прорези черных кружков, можно достичь плавной и точной регулировки яркости полей. Углы φ_0, φ_1 и φ_2 измерялись в делениях, одно деление соответствует 1/128 части полной окружности.

Согласно закону Талбота, яркость поля B , образовавшуюся в результате слияния мельканий, можно вычислить по формуле:

$$B = \frac{\varphi B_б + (128 - \varphi) B_ч}{128}, \quad (25)$$

где $B_б$ и $B_ч$ — яркость белого и черного кружков, φ — угол раствора белого кружка в делениях. Яркость черного поля $B_ч$ очень мала по сравнению с яркостью белого поля, поэтому в равенстве (25) без ущерба для точности ее можно приближенно принять равной нулю. Сделав это, мы можем вычислять яркости B_0, B_1 и B_2 полей вертушки по формулам:

$$B_0 = \frac{B_б}{128} \varphi_0, B_1 = \frac{B_б}{128} \varphi_1, B_2 = \frac{B_б}{128} \varphi_2. \quad (26)$$

Во время проведения опытов наблюдение велось с расстояния 20 см. Диаметр внешнего поля равен 200 мм, внутреннего — 120 мм. Опыты проводились при освещенности 130 лк. Диск освещался стандартной лампой накаливания с вольфрамо-

вой нитью напряжением 220 В и мощностью 150 Вт с расстояния 3 м под углом 45°. Подставляя (26) в (24), получим:

$$\varphi_2 = \varphi_1^{k_a} \cdot \varphi_0^{1-k_a}. \quad (27)$$

Если модель адаптации зрения верна, то углы раствора дисков, полученные в опытах, должны быть связаны зависимостью (27).

Опыты выполнялись следующим образом. На полях вертушки задавались некоторые углы раствора φ_0 и φ_1 . Затем наблюдатель в течение 100 сек фиксировал точку o на границе между двумя полями. При этом одна часть поля зрения практически полностью адаптировалась к яркости B_0 , а другая — к яркости B_1 . После этого пара внутренних кружков снималась, и под ней открывалось третье поле, образованное парой кружков с углом раствора белого кружка φ_2 . Яркость B_2 регулировалась путем изменения угла φ_2 с таким расчетом, чтобы оба поля в первый момент времени после смены уровня яркости виделись одинаковыми по светлоте. Во время постановки опытов особое внимание пришлось уделить точному центрированию малых кружков, так как в противном случае на границе между сравниваемыми полями образуется узкая полоса, резко отличающаяся по светлоте и существенно снижающая точность фотометрирования.

В ходе опытов выяснялся вопрос о том, какие размеры полей должны быть выбраны, чтобы избежать влияния явлений контраста. С этой целью предварительно была проведена серия опытов при фиксированном значении яркостей B_0 и B_1 полей, но с изменением радиусов кружков. Было выяснено, что при диаметре кружков соответственно 100 и 60 мм и меньше результаты фотометрирования начинают заметно изменяться. При вариации диаметра кружков вне указанных границ результаты опытов остаются практически стабильными. Отсутствие влияния явлений контраста на результаты опытов проверялось также и с помощью бинокулярного фотометрирования. С этой целью один глаз с помощью бинокля адаптировался к внешнему полю вертушки, а другой — к внутреннему. В этом случае контраст принципиально не может повлиять, так как каждому глазу предъясняется однородная картина. Опыты показали, что установки получаются те же, хотя их точность значительно ниже.

Специальные опыты пришлось также выполнить с целью выяснения вопроса о том, какое время адаптации выбрать, чтобы практически достичь установившегося режима глаза. Для этого выборочно проводились опыты при различном времени адаптации. Было выяснено, что при длительности адаптации до 50-60 сек фотометрические установки существенно зависят от времени адаптации. При длительности адаптации в 100 и более секунд

получаемые установки практически остаются стабильными (в пределах точности эксперимента). Далее исследовалось влияние уровня освещения на характер фотометрических установок. Как следует из равенства (24), при пропорциональном изменении яркостей B_0 и B_1 , например, в μ раз, в то же число раз должна измениться и яркость B_2 :

$$\mu B_2 = (\mu B_1)^{k_a} \cdot (\mu B_0)^{1-k_a} . \quad (28)$$

Это означает, что изменение уровня освещения не должно влиять на исход опыта: светлотное равенство полей не должно нарушиться. И действительно, изменение освещенности диска в широких пределах (от 30 до 3000 лк) не привело к изменению угла φ_2 , обеспечивающего светлотное равенство полей сравнения.

Опыты проводились на одном наблюдателе и повторялись многократно (не менее 10 раз) в течение месяца в различное время суток. Повторяемость исхода опытов хорошая, разброс результатов (если исключить явные промахи), как правило, не превышает 3÷4 делений. Если же опыты выполняются один за одним при одинаковых установках углов φ_0 и φ_1 , то разброс в установке угла φ_2 , как правило, не выходит за пределы одного деления. В табл. 1 в каждой ее ячейке слева от наклонной черты приведены средние значения угла φ_2 , полученные в опыте для различных значений углов φ_0 и φ_1 . Значения углов даны в делениях шкалы. Разброс результатов в замерах, представленных в таблице выше жирной линии, как правило, не выходил за пределы 1÷2 делений шкалы, в замерах, представленных ниже этой линии, разброс достигал 3÷6 делений.

Таблица 1

$\varphi_1 \backslash \varphi_0$	2	4	8	16	32	64	96	128
2	2/2	3/3	4/4	6/6	8/8	10/11	13/14	15/16
4	3/3	4/4	6/6	8/8	11/11	16/16	19/20	22/23
8	5/4	7/6	8/8	11/11	16/16	22/23	28/28	32/32
16	8/6	9/8	11/11	16/16	23/23	32/32	40/39	45/45
32	10/8	12/11	17/16	23/23	32/32	45/45	55/55	64/64
64	14/11	18/16	25/23	33/32	46/45	64/64	78/78	90/90
96	17/14	22/20	30/28	40/39	55/55	78/78	96/96	111/111
128	18/16	25/23	35/32	47/45	65/64	91/90	111/111	128/128

Справа от наклонной черты в ячейках таблицы вычислены теоретические значения угла φ_2 по формуле (27) при значении постоянной статики адаптации $k_a=0,50$. В опытах, соответствующих ячейкам таблицы выше жирной линии, достигалось полное совпадение оттенков полей сравнений. В опытах, соответствующих ячейкам таблицы под жирной линией, оттенки можно было выровнять лишь по светлоте, так как поле, имеющее яркость B_2 , приобретало легкий зеленоватый оттенок. На диаграмме рис. 5 кружками показаны экспериментальные данные, на них наложены теоретические

кривые. Расхождения между теорией и экспериментом не выходят за пределы ошибок опыта. Замена белых кружков цветными (красным, зеленым и желтым) не внесла существенных изменений в результаты опыта. По изложенной выше методике были дополнительно поставлены опыты на шести испытуемых. Характер результатов опытов остался прежним. Для различных испытуемых были отмечены лишь незначительные отличия в постоянной статики адаптации, значения которой не выходили за пределы $k_a=0,45-0,60$.

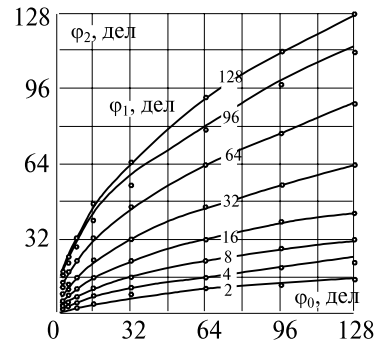


Рис. 5

3. Эксперименты по статике адаптации человеческого слуха

В предыдущем разделе были описаны опыты по исследованию статических реакций адаптационного аппарата и было установлено согласование реакций органа зрения с модельными реакциями. Поскольку свойство адаптации является общим для всех рецепторов, нам представилась заманчивой мысль проверить справедливость выводов, вытекающих из модели адаптации зрения, также на каком-либо другом рецепторе. В качестве объекта исследования был выбран орган слуха. Как и в случае зрения, проверке подлежало равенство:

$$B_2 = B_1^{k_a} \cdot B_0^{1-k_a} . \quad (29)$$

Теперь под сигналами B_0 , B_1 и B_2 следует понимать не яркость излучений, а интенсивность звука, измеряемую уровнем звукового давления. Если адаптационные реакции органа слуха будут подчиняться зависимости (29) так же хорошо, как и реакции органа зрения, то можно будет с большей уверенностью утверждать, что в основе адаптации различных органов чувств лежат одни и те же процессы переработки информации.

Адаптационные реакции органа слуха исследовались на специальной установке, схематически изображенной на рис. 6. В качестве входных сигналов слухового аппарата использовались гармонические колебания воздуха с частотой 500 гц. Эти колебания возбуждались телефонами типа «Октава», к которым подводилось синусоидально изменяющееся напряжение, формируемое с помощью

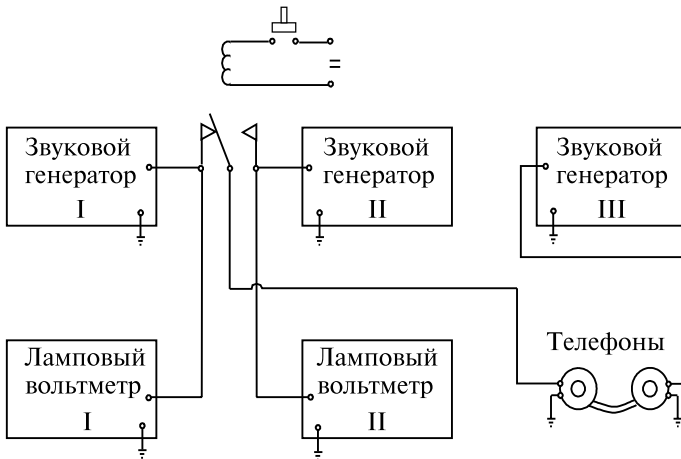


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для исследования статики адаптации слуха

генераторов электрических колебаний звуковой частоты — звуковыми генераторами. Всего в схеме использовано три генератора. Амплитуда колебаний, возбуждаемых каждым генератором, может регулироваться независимо от остальных. Напряжение, подводимое к телефонам, в опытах изменялось от 50 до 1050 мв. Этим напряжениям соответствует диапазон изменения звукового давления непосредственно на выходе телефона 0, 002-0, 060 бар. Напряжения, подводимые к телефонам, измерялись с помощью двух ламповых вольтметров. Погрешность измерений не превышала 1мв. Телефоны в пределах использованных напряжений имеют линейную характеристику: это значит, что звуковое давление, создаваемое телефоном, пропорционально амплитуде электрического сигнала.

Может возникнуть вопрос о том, что принять в качестве характеристики входного сигнала: его амплитуду или мощность. Ответ на этот вопрос, каким бы он ни был, не имеет в данном случае никакого значения. В самом деле, обозначим амплитуду колебаний звукового давления через B , а мощность — через P . Между этими величинами существует следующая связь [12]:

$$P = mB^2, \quad (30)$$

где m — коэффициент пропорциональности. Предположим, что равенство (29) выполняется, если под B понимать амплитуду звукового давления. Заменим теперь значения B_0, B_1, B_2 на P_0, P_1, P_2 согласно равенству (30). В результате получим:

$$\sqrt{\frac{P_2}{m}} = \left(\sqrt{\frac{P_1}{m}} \right)^{k_a} \cdot \left(\sqrt{\frac{P_0}{m}} \right)^{1-k_a}, \quad (31)$$

а после преобразований приходим к соотношению

$$P_2 = P_1^{k_a} \cdot P_0^{1-k_a}, \quad (32)$$

имеющему такой же вид, что и первоначальное равенство (29). Таким образом, если справедливо

равенство (29), то будет выполняться также и условие (32) и наоборот. В дальнейшем уровень входного сигнала будем характеризовать амплитудой напряжения электрических колебаний, подводимых к телефону, измеряя его в милливольтках.

Во время проведения опыта на одно (левое) ухо длительно подавался сигнал с амплитудой B_1 , на второе (правое) ухо в это время подавался сигнал с амплитудой B_0 . Длительность действия этих сигналов должна быть достаточной для полной адаптации обоих слуховых анализаторов испытуемого к соответствующим сигналам, эта длительность была принята равной 60 сек. Как показали специальные дополнительные опыты, увеличение длительности действия сигналов B_0 и B_1 до 100 сек и более практически не влияет на результаты эксперимента. Сигналы B_1 и B_0 создавались соответственно первым и третьим звуковыми генераторами. Амплитуда B_1 сигнала, поступающего в левое ухо, измерялась первым ламповым вольтметром (рис. 6).

Первоначально амплитуда B_0 сигнала, поступающего в правое ухо, измерялась третьим ламповым вольтметром, не показанным на схеме. Однако это оказалось методически неправильным. Дело в том, что левый и правый телефоны обладают хотя и близкими, но все же не вполне одинаковыми передаточными характеристиками, а это приводит к тому, что испытуемый улавливает различие сигналов по громкости при одинаковых значениях электрических амплитуд B_1 и B_0 . В связи с этим пришлось отказаться от измерений амплитуды третьим вольтметром. Уровень B_0 сигнала, поступающего в правое ухо дозировался теперь следующим образом: сначала на этот уровень по первому вольтметру регулировался сигнал для левого уха, а затем регулировался уровень сигнала для правого уха до получения испытуемым одинаковых слуховых ощущений от обоих ушей. При этом сам испытуемый выполнял роль нулевого прибора. Дифференциальный порог (зона нечувствительности) таких установок невелика и лежит в пределах 2-3%. Возможным фактором, искажающим результаты описанных выше субъективных выравниваний громкости сигналов, мог оказаться диспложизис (неодинаковая чувствительность) ушей испытуемого. Для выявления диспложизиса был проведен специальный дополнительный опыт, в котором телефоны менялись местами. Несмотря на такую замену, установки на равенство, делаемые испытуемым, практически не изменились. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что диспложизис ушей испытуемого находился в пределах дифференциального порога и поэтому не мог

существенно исказить результаты описываемых ниже опытов.

Для более глубокой проверки справедливости условия (29) желательно было варьировать отношение амплитуд B_1/B_0 как можно в более широких пределах. Однако здесь приходится считаться с явлением костной проводимости звука [13]. Если отношение B_1/B_0 будет очень большим, то громкий сигнал B_1 , ввиду костной проводимости, будет действовать в ослабленной форме также на другое ухо, где в это время действует тихий сигнал, и это может существенно исказить результаты экспериментов. В связи с этим пришлось ограничить отношение B_1/B_0 величиной не более 20. Как будет показано ниже, уже при отношении $B_1/B_0=20$ возникает подозрение о существенном искажающем влиянии костной проводимости на результаты экспериментов. Это обстоятельство привело к ограничению диапазона изменения амплитуд звуковых сигналов пределами от 50 до 1050 мв.

По истечении 60 сек уровень сигнала, поступающего в левый телефон, скачкообразно меняется со значения B_1 на значение B_2 . Сигнал B_0 , подаваемый в правый телефон, продолжает оставаться неизменным. Скачкообразное изменение сигнала левого телефона осуществляется с помощью специального реле (рис. 6), срабатывающего от кнопки, нажимаемой испытуемым. Это реле переключает левый телефон с генератора 1 на генератор 3, предварительно настроенный на заданную частоту и амплитуду. В процессе постановки эксперимента выявилась серьезная помеха в виде щелчка, возникающего в момент переключения за счет появления искры между контактами реле. Этот щелчок сильно дезориентирует испытуемого, в связи с чем резко снижается точность установки субъективных громкостей на равенство. Для устранения этого недостатка пришлось дополнить экспериментальную установку специальной электрической сглаживающей схемой.

Согласно идее эксперимента, испытуемый должен так подрегулировать громкость B_2 , чтобы в первый момент после переключения сигналы B_2 и B_0 имели одинаковую субъективную громкость. Однако на практике для осуществления сравнения требуется, чтобы сигнал B_2 длился около 1÷2 сек. Если обрывать сигнал B_2 через 0, 5 сек после его возникновения, то испытуемый резко снизит точность своих установок на равенство. Конечность времени сравнения звучания сигналов B_2 и B_0 также является источником неучтенных погрешностей, поскольку за это время произойдут определенные изменения чувствительности левого уха за счет его адаптации. Опыт с регулировкой громкости B_2 повторялся многократно. Исходя из слыши-

мого уровня громкости сигнала B_2 по отношению к уровню громкости сигнала B_0 (громче или тише), испытуемый соответственно уменьшал или увеличивал громкость сигнала B_2 для следующей пробы. Испытуемый имел доступ к ручке регулятора громкости сигнала B_2 , однако показаний приборов он не видел. Испытуемый поворачивал ручку, по памяти учитывая результаты предыдущего эксперимента. Перед каждой новой пробой, без ведома испытуемого, менялось положение ручки регулятора относительно ее оси, чтобы воспрепятствовать испытуемому устанавливать ее, отправляясь от установки, найденной в предыдущем опыте.

Испытуемый пользовался следующей методикой отыскивания установки сигналов на равенство по слышимой громкости. Сначала он отыскивал такие два положения ручки, когда при одном из них звук слышался явно более громким в левом ухе, а при другом — более громким в правом ухе. Затем испытуемый постепенно сужал интервал изменения сигнала B_2 пока, наконец, не находил положение ручки регулятора, соответствующее середине зоны нечувствительности. Находясь в пределах зоны нечувствительности, испытуемый отмечает потерю направления звучания (слева или справа), ему кажется, что источник звука находится не извне, а непосредственно в голове.

Подобная серия опытов по установке громкости на слышимое равенство повторялась по 6 раз для каждой пары значений громкости B_1 и B_0 . Разброс получаемых значений громкости B_2 , как правило, не выходил за пределы 10%, а зачастую находился в пределах 5% от B_2 . В приводимых ниже таблицах указывается среднее значение из шести измерений. Все опыты проводились на одном испытуемом. Найденные значения громкости B_2 в милливольтах для различных пар сигналов B_1 и B_0 даны в табл. 2. Из соотношения (29) вытекает следующее равенство для определения постоянной статической адаптации слуха:

$$k_a = \frac{\lg \frac{B_2}{B_0}}{\lg \frac{B_1}{B_0}}. \quad (33)$$

По этой формуле подсчитаны значения k_a для каждого опыта, помещенного в табл. 2. Результаты вычислений представлены в табл. 3.

Среднее значение коэффициента k_a , вычисленное для всех значений табл. 3, равно $k_a = 0,7$, среднее отклонение $\Delta k = 0,04$, то есть составляет всего 6%. Как видим из табл. 3, отдельные значения постоянной статической адаптации слуха весьма близки к среднему значению, незначительно отличаются от него. На рис. 7 представлены экспериментальные диаграммы, построенные по данным табл. 2.

Таблица 2

$B_1, \text{мВ}$ $B_0, \text{мВ}$	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
50	50	77	115	143	190	227	263	282	300	330	350	—	—
100	75	100	150	193	242	287	338	378	420	450	483	—	—
200	88	127	200	255	335	377	440	477	538	573	613	675	705
300	99	132	222	300	358	435	484	547	587	650	714	747	785
500	100	150	267	343	422	500	551	621	690	752	812	870	922
800	120	180	294	380	480	575	663	722	800	861	—	—	1052

Таблица 3

$B_1, \text{мВ}$ $B_0, \text{мВ}$	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
50	—	0,62	0,60	0,59	0,64	0,66	0,67	0,65	0,65	0,65	0,65	—	—
100	0,41	—	0,58	0,61	0,64	0,66	0,68	0,68	0,68	0,69	0,69	—	—
200	0,59	0,66	—	0,60	0,74	0,69	0,72	0,70	0,72	0,70	0,70	0,71	0,70
300	0,62	0,75	0,74	—	0,62	0,73	0,69	0,71	0,68	0,70	0,72	0,70	0,69
500	0,70	0,75	0,68	0,73	0,75	—	0,54	0,65	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
800	0,68	0,72	0,72	0,76	0,74	0,71	0,65	0,76	—	0,71	—	—	0,67

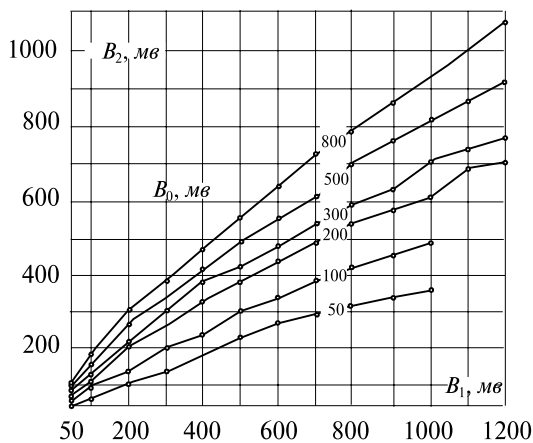


Рис. 7

Теоретические диаграммы, вычисленные при $k_a = 0,7$ по формуле (29), построены на рис. 8. Сравнение теоретических и экспериментальных кривых указывает на хорошее качественное согласование теории с опытом: теоретические кривые имеют такой же характер, как и экспериментальные. Имеет место также хорошее количественное согласование теории с опытом: верхние пять теоретических кривых практически точно проходят по экспериментальным точкам при наложении теоретической диаграммы на экспериментальную. Исключение составляет нижняя теоретическая кривая (для $B_0 = 50$ мВ), которая проходит заметно выше экспериментальных точек.

Особенно велико это различие в зоне больших значений B_1 , где оно достигает 50 мВ. Мы не склонны видеть в этом различии указание на несогласование теории с опытом. Скорее всего, здесь действует источник каких-то не устраненных сис-

тематических ошибок эксперимента. Приходится снова вспомнить о костной проводимости звука, которая в данном случае как раз больше всего могла сказаться и дать отклонение именно в ту сторону, в которую фактически сместились результаты эксперимента. Оценивая же в целом результат эксперимента, мы приходим к выводу о вполне удовлетворительном согласовании теории с опытом, свидетельствующем о справедливости формулы (29).

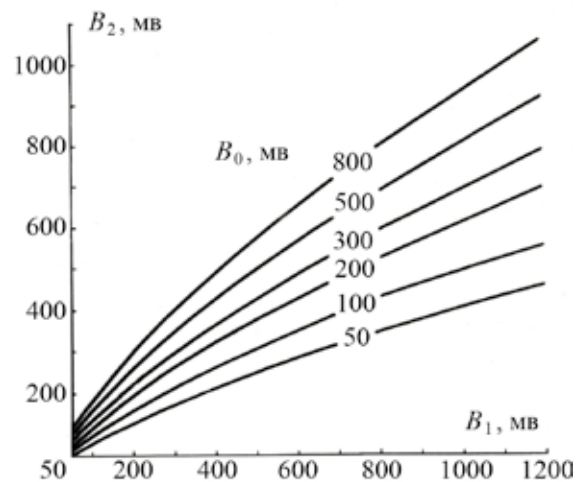


Рис. 8

Для полной завершенности исследования необходимо было также выяснить, что покажет эксперимент при другой частоте входных сигналов. С этой целью был поставлен опыт на входных синусоидальных сигналах, имеющих частоту 800 гц. Уровень сигнала B_0 был выбран равным 100 мВ. Эксперименты проводились на описанной выше установке по той же методике. Полученная в опыте

зависимость сигнала B_2 и B_1 дана в табл. 4. В третьей строке таблицы помещены вычисленные по формуле (33) значения параметра k_a . Как видим, коэффициент k_a почти в точности сохраняет постоянную величину, которая весьма близка к найденному ранее значению 0,7. Это значит, что и в этом случае справедливость равенства (29) подтверждается на опыте, а значение постоянной статики адаптации слуха сохраняет прежнее значение 0,7. Нельзя не отметить целесообразный смысл, легко усматриваемый в факте постоянства значений величины k_a для звуков различной частоты. Такое постоянство означает, что уровень адаптации слуха не влияет на соотношения субъективных громкостей отдельных компонентов в сложном звуке. Очевидно, что отсутствие такого свойства слуха существенно затруднило бы распознавание сложных звуков, в том числе и звуков человеческой речи. Описанные выше опыты были повторены еще на пяти испытуемых. Результаты опытов полностью аналогичны. Отмечаются лишь незначительные для различных испытуемых колебания постоянной статики адаптации слуха в пределах $k_a = 0,60-0,70$.

Таблица 4

B_1 , мВ	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
B_2 , мВ	165	213	255	297	317	385	400	450	500
k_a	0,73	0,69	0,68	0,68	0,65	0,69	0,67	0,69	0,70

4. Построение статического преобразования яркости в светлоту

В предыдущих разделах статьи из математической модели адаптации зрения было выведено одно следствие в виде формулы (24) и получено его экспериментальное подтверждение в опытах со зрением и слухом. В этом разделе выводится еще одно следствие из модели адаптации зрения, которое сопоставляется с данными психофизического эксперимента. Затем чисто логически из этих двух следствий модели выводится зависимость статического преобразования яркости в светлоту. Эта зависимость имеет вид степенной функции. Введем в рассмотрение два уровня светлоты S_I и S_{II} . Разделим светлотный интервал $[S_I, S_{II}]$ светлотой S в отношении λ . В этом случае светлота S будет равна:

$$S = (1-\lambda)S_I + \lambda S_{II}. \quad (34)$$

Подберем яркости B_I , B_{II} и B так, чтобы в первый момент их предъявления наблюдателю, зрение которого адаптировано к некоторой произвольно выбранной яркости B_a , у него возникли зрительные ощущения со светлотой соответственно S_I , S_{II} и S .

Исходя из принятой модели адаптации зрения, установим связь между яркостями B_I , B_{II} и B . Применяя к рассматриваемому случаю формулу (22),

запишем выражения для определения светлот S_I , S_{II} и S по яркости B_I , B_{II} , B и B_a :

$$S_I = r(dB_I)^c \cdot (dB_a)^{-k_a c} + s, \quad (35)$$

$$S_{II} = r(dB_{II})^c \cdot (dB_a)^{-k_a c} + s, \quad (36)$$

$$S = r(dB)^c \cdot (dB_a)^{-k_a c} + s. \quad (37)$$

Подставляя найденные значения светлот S_I , S_{II} и S в формулу (34), получим:

$$B^c = (1-\lambda)B_I^c + \lambda B_{II}^c. \quad (38)$$

Полученная формула дает нам искомую связь между яркостями B_I , B_{II} и B , порождающими соответственно светлоты S_I , S_{II} и S , связанные соотношением (34).

Зависимость (38), являясь следствием из математической модели адаптации зрения, допускает экспериментальную проверку. Постановка опыта возможна благодаря тому, что сознание наблюдателя способно выполнять операцию деления пополам любого светлотного интервала.

Эту способность легко продемонстрировать с помощью следующего опыта. Наблюдателю предъявляют три рядом расположенных поля, имеющих яркости B_I , B и B_{II} (рис. 9), и предлагается установить, является ли светлота S центрального поля средней по отношению к светлотам S_I и S_{II} боковых полей или нет. Испытуемый легко справляется с поставленной задачей, показания его достаточно стабильны. Правда, точность такого рода установок значительно ниже тех, при которых сознание используется в качестве нулевого прибора. Основываясь на опыте установок такого рода, можно оценить зону нечувствительности при нахождении средней светлоты в размере около 10% от величины светлотного интервала.

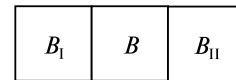


Рис. 9

Множественно используя прием деления светлотного интервала пополам, мы получаем возможность разделить произвольный промежуток светлоты в любом, практически доступном на опыте, отношении λ , то есть выполнить требование (34). Если модель адаптации верна, то получаемые из опыта яркости B_I , B_{II} и B должны находиться в отношении, указываемом соотношением (38). Перейдем в равенстве (38) от яркостей B_I , B_{II} и B к коэффициентам отражения ρ_I , ρ_{II} и ρ соответствующих наблюдаемых поверхностей, используя зависимости:

$$B_I = \rho_I B_0; B_{II} = \rho_{II} B_0; B = \rho B_0, \quad (39)$$

где B_0 — яркость идеально белой поверхности, про-

порциональная освещенности полей. Подставляя (39) в (38), будем иметь:

$$\rho^c = (1-\lambda)\rho_I^c + \lambda\rho_{II}^c. \quad (40)$$

Из формулы (40) следует, что результат деления светлотного интервала в отношении λ не зависит от уровня освещения в том смысле, что при любом уровне освещения мы должны прийти к полю с одним и тем же коэффициентом отражения. Это значит, что однажды найденная установка не нарушится при произвольном изменении уровня освещения. И действительно, опыты показывают, что накраска, выглядящая средней по светлоте по отношению к двум другим накраскам, останется средней, несмотря на изменение уровня освещения в широких пределах. О наличии такого свойства свидетельствует также простой опыт рассматривания ряда светлот в каком-либо цветовом атласе (например, атласе Менселла). Такой ряд выглядит равноступенным при любом уровне дневного освещения.

Соотношение (40) допускает непосредственную проверку экспериментом. Для такой проверки целесообразно использовать черно-белый ряд оттенков, устанавливаемый атласом Менселла. Это связано с тем, что указанный ряд оттенков был получен именно по методу деления светлотных интервалов пополам без привлечения каких-либо побочных соображений. Кроме того, атлас Менселла выгодно отличается от многих других атласов исключительной тщательностью изготовления. Для экспериментальной проверки формулы (40) была использована светлотная шкала, рекомендуемая атласом Менселла издания 1929 г. [14], в виде рядов коэффициентов отражения ахроматических накрасок. Кроме того, использовался ряд коэффициентов отражения, рекомендуемый для атласа Менселла в более поздней работе [15], изданной в 1943 г. Значения коэффициентов отражения ρ в зависимости от номера накраски N даны в ячейках табл. 5 в числителе дроби.

Номер накраски N линейно связан с уровнем светлоты, а следовательно и с параметром λ :

$$\lambda = pN + q, \quad (41)$$

где p и q — некоторые постоянные коэффициенты. Для определения численного значения этих коэффициентов необходимо учесть, что:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0 \text{ при } N=1, \\ \lambda &= 1 \text{ при } N=9. \end{aligned} \quad (42)$$

Подставляя (42) в (41), получаем систему уравнений относительно p и q :

$$\begin{aligned} p + q &= 0, \\ 9p + q &= 1, \end{aligned} \quad (43)$$

решая которую, находим:

$$p = \frac{1}{8}, q = -\frac{1}{8}. \quad (44)$$

С учетом (44) равенство (41) запишется в виде:

$$\lambda = \frac{1}{8}N - \frac{1}{8}. \quad (45)$$

Подставляя (45) в (40), будем иметь:

$$\rho = \left(\frac{1}{8}(\rho_{II}^c - \rho_I^c)N + \rho_I^c - \frac{1}{8}(\rho_{II}^c - \rho_I^c)\right)^{\frac{1}{c}}. \quad (46)$$

Равенство (46) представляет собой теоретически рассчитанную зависимость коэффициента отражения ρ от номера накраски N . Принимая в качестве ρ_I и ρ_{II} значение ρ соответственно при $N=1$ и $N=9$, запишем равенство (46) в виде:

для данных 1929 года:

$$\begin{aligned} \rho = & \left(\frac{1}{8}(0,7280^c - 0,0112^c)N + 0,0112^c - \right. \\ & \left. - \frac{1}{8}(0,7280^c - 0,0112^c)\right)^{\frac{1}{c}}, \end{aligned} \quad (47)$$

для данных 1943 года:

$$\begin{aligned} \rho = & \left(\frac{1}{8}(0,7866^c - 0,0121^c)N + 0,0121^c - \right. \\ & \left. - \frac{1}{8}(0,7866^c - 0,0121^c)\right)^{\frac{1}{c}}. \end{aligned} \quad (48)$$

Значения коэффициентов отражения, вычисленные по формулам (47) и (48) при $c = 0,35$, представлены в ячейках табл. 5 в знаменателе дроби. Как видим, имеет место согласование теории с опытом. Имеющиеся отклонения теории от опытных данных вряд ли выходят за пределы точности экспериментов, лежащих в основе построения светлотной шкалы атласа Менселла.

На диаграмме рис. 10 дано сравнение экспериментальных данных (кружки) и теоретических

Таблица 5

Год издания	N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1929	$\rho, \%$	1,12	2,90	5,95	11,05	18,00	27,30	38,90	53,60	72,80
		1,12	3,01	6,27	11,2	18,2	27,6	39,6	54,6	72,8
1943	$\rho, \%$	1,210	3,126	6,555	12,0	19,77	30,05	43,06	59,10	78,60
		1,21	3,25	6,78	12,2	19,7	29,8	42,8	59,0	78,6

подсчетов (линии). Накраски атласа Менселла охватывают практически весь возможный диапазон изменения коэффициентов отражения для любых реальных поверхностей тел. Это означает справедливость зависимости (40) без каких-либо существенных ограничений. Итак, опытом подтверждена справедливость зависимости (40), а следовательно и зависимости (38). Равенства (24) и (38), первоначально полученные лишь как следствия из модели адаптационного преобразования яркости в светлоте, после подтверждения их опытом, приобретают силу экспериментально установленных закономерностей. Выполнение этих соотношений теперь уже не зависит от того, верна или нет исходная модель.

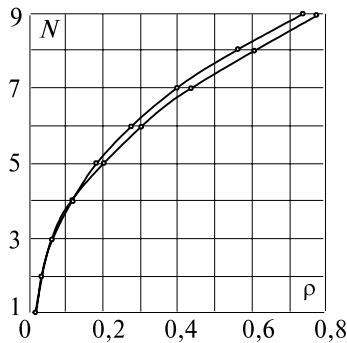


Рис. 10

Основываясь лишь на этих соотношениях без привлечения каких-либо дополнительных данных, можно чисто логически установить вид статической зависимости светлоты от яркости. Установим сначала вид этой зависимости в случае, когда светлота S определяется яркостью B , к которой глаз был предварительно адаптирован. Пусть наблюдатель, глаз которого адаптирован к яркости S_a , воспринимает затем яркости B_* , B_{1*} , B_{2*} . Соответствующие этим яркостям уровни светлоты, возникающие в первый момент наблюдения, обозначим через S , S_1 , S_2 . Если бы эти же светлоты возникали при условии полной адаптации глаза к наблюдаемым яркостям, то уровни яркости были бы иными. Обозначим их через B , B_1 , B_2 .

Выразим яркости B_* , B_{1*} , B_{2*} через яркости B , B_1 , B_2 и B_a , используя зависимость (24):

$$B_* = B_a^{k_a} \cdot B^{1-k_a}, \quad (49)$$

$$B_{1*} = B_a^{k_a} \cdot B_1^{1-k_a}, \quad (50)$$

$$B_{2*} = B_a^{k_a} \cdot B_2^{1-k_a}. \quad (51)$$

Будем полагать, что $S_1 \leq S \leq S_2$. Светлота S делит интервал (S_1, S_2) в некотором отношении, которое обозначим через λ . Тогда по определению (формула (34)):

$$S = (1-\lambda)S_1 + \lambda S_2. \quad (52)$$

Согласно равенству (38) яркости B_* , B_{1*} , B_{2*} связаны соотношением:

$$B_*^c = (1-\lambda)B_{1*}^c + \lambda B_{2*}^c. \quad (53)$$

Подставляя значения B_* , B_{1*} , B_{2*} , определяемые формулами (49)-(51), в (53), в результате получим:

$$B^{c(1-k_a)} = (1-\lambda)B_1^{c(1-k_a)} + \lambda B_2^{c(1-k_a)}. \quad (54)$$

Определяем значение λ из последнего равенства:

$$\lambda = \frac{B^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}}{B_2^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}} \quad (55)$$

и подставляем его в формулу (52):

$$S = \left(1 - \frac{B^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}}{B_2^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}}\right) S_1 + \frac{B^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}}{B_2^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}} \cdot S_2. \quad (56)$$

После преобразований будем иметь:

$$S = r(dB)^{c(1-k_a)} + s, \quad (57)$$

где

$$r = S_2 - S_1, \quad (58)$$

$$d = \frac{1}{(B_2^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)})^{\frac{1}{c(1-k_a)}}}, \quad (59)$$

$$s = \frac{S_1 B_2^{c(1-k_a)} - S_2 B_1^{c(1-k_a)}}{B_2^{c(1-k_a)} - B_1^{c(1-k_a)}}. \quad (60)$$

Будем рассматривать B и S как переменные величины, а величины B_1 , B_2 , S_1 , S_2 зафиксируем. Тогда r , d , s превратятся в некоторые константы, а выражение (57) даст искомую связь между светлотой и яркостью в случае, когда глаз адаптирован на ту же яркость. Заметим, что равенство (57) устанавливает степенную зависимость светлоты от яркости, предлагавшуюся ранее в ряде работ [7÷10]. Степенная зависимость (57) имеет показатель, численное значение которого равно:

$$c(1-k_a) = 0,35(1-0,50) = 0,175. \quad (61)$$

Постоянные r , d , s не имеют характера истинных констант зрения, значение постоянной d определяется выбором единицы измерения для яркости, а значение постоянных r , s — выбором единицы измерения и нулевого значения для светлоты.

Пусть теперь светлота S оценивается в первый момент наблюдения яркости B_* после адаптации глаза к яркости B_a . Из равенства (49) определим значение B :

$$B = B_*^{\frac{1}{1-k_a}} \cdot B_a^{\frac{k_a}{1-k_a}} \quad (62)$$

и подставим его в формулу (57). В результате полу-

чим следующее выражение, дающее искомую связь между светлотой и яркостью B , воспринимаемой в первый момент времени после адаптации глаза к яркости B_a :

$$S = \frac{r}{(dB_a)^{ck_a}} \cdot (dB)^c + s. \quad (63)$$

Следовательно, и в этом случае зависимость светлоты от яркости — степенная, однако с иным показателем

$$c = 0,35. \quad (64)$$

Важно подчеркнуть, что степень соответствия соотношений (57) и (63) с фактическим положением дела не зависит от того, верна ли исходная модель адаптации зрения, а лишь от того, насколько точно описывают реакции зрительного анализатора формулы (24) и (38).

Выводы

Построена математическая модель адаптации человеческого зрения. Исследованы реакции модели адаптации на скачок яркости зрительной картины. В результате получена зависимость

$$B_2 = B_1^{k_a} \cdot B_0^{1-k_a}, \quad (24)$$

допускающая экспериментальную проверку. Выполнены эксперименты, подтверждающие справедливость равенства (24) для человеческого зрения. Определено численное значение постоянной статистики адаптации человеческого зрения, равное $k_a=0,50$. Выполнены эксперименты, подтверждающие справедливость равенства (24) для человеческого слуха. Найдено значение постоянной статистики адаптации человеческого слуха, равное $k_a=0,70$. Исследованы реакции модели адаптации при делении светлотно-го интервала в заданном отношении. В результате получена зависимость:

$$B^c = (1-\lambda)B_I^c + \lambda B_{II}^c. \quad (38)$$

Осуществлено сопоставление зависимости (38) с известными экспериментальными данными и получено ее опытное подтверждение. Из соотношений (24) и (38), используемых в качестве экспериментальных постулатов, выведен вид зависимости статического преобразования яркости в светлоту. Зависимость светлоты от яркости имеет вид степенной функции:

$$S = r(dB)^{c(1-k_a)} + s. \quad (57)$$

Из соотношений (24) и (38) выведен также вид зависимости светлоты от яркости, воспринимаемой в первый момент времени после адаптации глаза к иной яркости. Эта зависимость имеет вид:

$$S = \frac{r}{(dB_a)^{ck_a}} \cdot (dB_*)^c + s. \quad (63)$$

Список литературы: 1. Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнаренко Ю.П. Модели цветового зрения // Бионика интеллекта. — 2006. — № 1. — С. 27-41. 2. Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнаренко С.Ю., Шабанов-Кушнаренко Ю.П. Модель сглаживания в зрении // Бионика интеллекта. — 2007. — № 1. — С. 3-14. 3. Мешков В.В. Основы светотехники, ч. 1. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. 4. Коробко Б.Г. О зрительной темновой адаптации. — Л.: Медгиз, 1958. 5. Weber E.H. Tastsinn und Gemeingefuhl // Wagner's Handbuch der Physiologie. — 1846, Bd. 3. 6. Fechner G.T. Elemente der Psychophysik. — 1860. 7. Мешков В.В. Светлота и яркость // Светотехника. — 1958. — № 12. 8. Hopkins R. Appraisal of Brightness. // Jll. Eng. — 1957. — № 4. 9. Le Grand J. Optique physiologique. — 1954. — Т. 2. 10. Экспериментальная психология / Под ред. С.С. Стивенса: Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1963. 11. Лазарев П.П. Исследования по адаптации. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. 12. Фурдуев В.В. Акустические основы вещания. — М.: Связьиздат, 1960. 13. Слух и речь в свете современных физических исследований. — М.-Л.: ОНТИ, 1936. 14. Munsell book of color. — Baltimore. Standard edition, 1929. 15. Newhall S.M., Nickerson D., Judd D.B. Final report of the OSA subcommittee on the spacing of the Munsell colors. // JOSA. — 1943. — V. 33, № 7.

Поступила в редколлегию 24.09.2007