

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКИ АДАПТАЦИИ СЛУХА И ЗРЕНИЯ

Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Г. Ф. Дюбко,  
Е. П. Пуятин, М. Ф. Бондаренко

Харьковский институт радиоэлектроники

Известно, что слух человека обладает свойствами адаптации. Так, после длительного воздействия на орган слуха громких звуков снижается его чувствительность к слабым звукам, однако с течением времени эта чувствительность постепенно восстанавливается. С другой стороны, после пребывания в тишине в продолжение некоторого времени звуки кажутся более громкими, чем обычно. Эти и другие подобные факты свидетельствуют о том, что в органе слуха действует какая-то система регулирования громкости звука, по характеру функционирования подобная системам автоматического регулирования, применяемым в технике. Однако до настоящего времени почти ничего не известно о законах преобразования информации, лежащих в основе работы механизма адаптации слуха. Аналогичными адаптационными свойствами обладает также орган зрения человека.

В настоящей работе предлагается математическая модель адаптационного преобразования сигналов в органе слуха и исследуются ее статические реакции, которые сравниваются с фактическими слуховыми реакциями. Эта же модель проверяется и в экспериментах со зрением.

Модель формулируется в виде следующей системы уравнений:

$$X' = a \lg bJ; \quad (1)$$

$$m \frac{dY}{dt} + Y = kX; \quad (2)$$

$$G = X - Y, \quad (3)$$

где  $I = I(t)$  — изменяющаяся во времени интенсивность звука постоянного спектрального состава;  $G = G(t)$  — субъективно воспринимаемая наблюдателем громкость звука;  $X = X(t)$  и  $Y = Y(t)$  — некоторые промежуточные сигналы преобразования;  $a, b, m, k$  — некоторые константы преобразования,  $t$  — время.

Согласно модели, блок 1 осуществляет логарифмирование интенсивности звука; блок 2 усредняет полученное значение логарифма интенсивности звука  $X$  за период времени, определяемый величиной постоянной адаптации  $m$ , и умножает его на постоянную статистики адаптации  $k$ , в результате чего получаем сигнал  $Y$ . Блок 3 осуществляет адаптационное смещение уровня передаваемого сигнала  $X$  на величину  $Y$ , характеризующую состояние адаптации органа слуха.

Подадим на вход модели ступенчатый сигнал

$$J(t) = \begin{cases} J_1 & \text{при } t < 0, \\ J_2 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Этот сигнал соответствует скачкообразному изменению интенсивности звука с некоторого постоянного значения  $J_1$  на другое постоянное значение  $J_2$ .

Нас будут интересовать следующие вопросы: какое значение будет иметь выходной сигнал  $G$ , т. е. громкость звука 1) непосредственно перед моментом скачкообразного изменения интенсивности звука, т. е. при  $t = -0$ ; 2) сразу же после момента скачка интенсивности звука, т. е. при  $t = +0$ ; 3) при установившемся режиме работы модели после момента изменения интенсивности звука, т. е. при  $t = \infty$ .

Решение поставленных вопросов не требует исследования переходных режимов работы модели, т. е. ее динамических реакций. Поэтому перечисленные выше реакции модели адаптации слуха мы будем именовать статическими.

Определим значение сигналов модели  $X = X_1$ ,  $G = G_1$ ,  $Y = Y_1$  при  $t = -0$ , т. е. в момент времени непосредственно перед скачкообразным изменением интенсивности звука.

Согласно формуле (1) с учетом (4) имеем

$$X_1 = a \lg bJ_1. \quad (5)$$

Поскольку до момента изменения интенсивности звука сигнал  $X_1$  сохранял постоянное значение неограниченно долго, блок 2 модели при  $t < 0$  работает в установившемся режиме. Следовательно,

$$\frac{dY}{dt} = 0,$$

и поэтому

$$Y_1 = kX_1 = ka \lg bJ_1. \quad (6)$$

Громкость звука  $G_1$  согласно (3) равна

$$G_1 = X_1 - Y_1 = (1 - k) a \lg bJ_1. \quad (7)$$

Аналогично этому найдем значения сигналов модели  $X = X_2$ ,  $Y = Y_2$ ,  $G = G_2$  при  $t = \infty$ , т. е. при неограниченно долгом воздействии на модель интенсивности звука  $J_2$ :

$$X_2 = a \lg bJ_2; \quad (8)$$

$$Y_2 = ka \lg bJ_2; \quad (9)$$

$$G_2 = (1 - k) a \lg bJ_2. \quad (10)$$

Наконец, определим значения сигналов модели  $X = X_3$ ,  $Y = Y_3$ ,  $G = G_3$  при  $t = +0$ , т. е. сразу же после скачкообразного изменения интенсивности звука.

Сигнал  $X_3$  согласно (3) и (4) равен

$$X_3 = a \lg bJ_2. \quad (11)$$

В силу инерционности блока 2 его выходной сигнал непрерывен, поэтому

$$Y_3 = Y_1 = ka \lg bJ_1. \quad (12)$$

Громкость звука  $G_3$  в момент  $t = +0$  согласно (3) равна

$$G_3 = X_3 - Y_3 = a \lg bJ_2 - ka \lg bJ_1. \quad (13)$$

Уровень громкости  $G_3$  можно было бы получить на выходе модели и другим путем, подавая неограниченно долго на ее вход интенсивность звука  $J_3$ , связанную с громкостью  $G_3$  следующей зависимостью:

$$G_3 = (1 - k) a \lg bJ_3. \quad (14)$$

Приравнивая правые части формул (13) и (14), получим зависимость, связывающую между собой интенсивность звука  $J_1, J_2, J_3$ :

$$J_2 \leftarrow J_1^k J_3^{1-k}. \quad (15)$$

Зависимость (15) допускает экспериментальную проверку.

Идея опыта состоит в следующем. На одно ухо испытуемого длительно подается интенсивность звука  $J_1$ , которая в некоторый момент времени сменяется интенсивностью  $J_2$ . На второе ухо длительно действует звук, интенсивность  $J_3$  которого подбирается с таким расчетом, чтобы в первый момент действия интенсивности  $J_2$  громкости обоих звуков оценивались испытуемым как одинаковые.

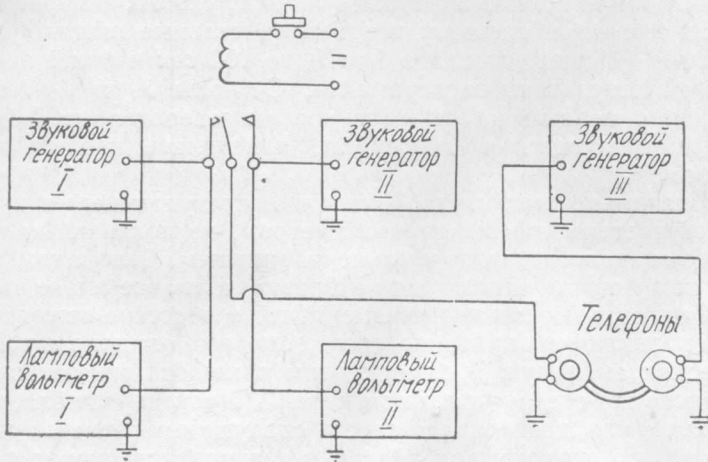


Рис. 1

Известно, что каждое ухо адаптируется к воспринимаемому звуку независимо от другого уха\*. Это обстоятельство позволяет считать, что в данной ситуации мы имеем дело с двумя независимыми и одинаковыми аппаратами адаптации слуха. Равенство или неравенство выходных сигналов этих аппаратов отмечается сознанием испытуемого.

Если модель адаптации слуха верна, то в опыте интенсивности звука  $J_1, J_2, J_3$  должны быть связаны между собой зависимостью (15).

Эксперименты выполнялись на установке, схематически изображенной на рис. 1.

В качестве входных сигналов, поступающих в орган слуха испытуемого, использовались гармонические колебания воздуха с частотой 500 гц. Эти колебания возбуждались телефонами типа «Октава», к которым подводилось синусоидально изменяющееся напряжение, формируемое с помощью генератора звуковой частоты ЗГ-10. Всего используются три генератора. Амплитуда колебаний, возбуждаемых каждым из них, может регулироваться независимо от остальных.

Во время проведения опытов напряжение, подводимое к телефонам, изменялось от 50 до 1300 мв. Этому напряжению соответствует диапазон изменения звукового давления непосредственно на выходе телефона  $2 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-2}$  бар. Напряжения, подводимые к телефонам, измерялись

\* С. Н. Ржевкин. Слух и речь в свете современных физических исследований, ОНТИ НКТП СССР, М., 1936.

с помощью двух ламповых вольтметров. Погрешность измерения не превышала 1 мв.

В пределах использованных уровней напряжения телефоны имеют линейную характеристику, следовательно, звуковое давление, создаваемое телефоном, пропорционально амплитуде электрических колебаний. Это дает нам основание характеризовать интенсивность звука амплитудой электрических колебаний, подводимых к телефону, измеряя ее в милливольтгах.

Во время проведения опыта на одно (левое) ухо испытуемого длительно подавался звук интенсивности  $J_1$ , а на другое — звук интенсивности  $J_3$ . Длительность действия сигналов была выбрана равной 60 сек, что достаточно для полной адаптации обоих слуховых аппаратов испытуемого. Как показали специальные дополнительные опыты, увеличение длительности действия сигналов  $J_1$  и  $J_3$  до 100 сек и более практически не влияет на результаты эксперимента. Сигналы  $J_1$  и  $J_3$  создавались соответственно первым и третьим звуковыми генераторами. Амплитуда  $J_1$  сигнала, поступающего в левое ухо, измерялась первым ламповым вольтметром.

Первоначально амплитуда  $J_3$  сигнала, поступающего в правое ухо, измерялась третьим ламповым вольтметром, не показанным на рис. 1. Однако это оказалось методически неправильным. Дело в том, что левый и правый телефоны обладают хотя и близкими, но все же не вполне одинаковыми передаточными коэффициентами, вследствие чего испытуемый улавливает различие звуков по громкости при одинаковых значениях электрических амплитуд. В связи с этим пришлось отказаться от непосредственного измерения уровня сигнала  $J_3$ . Уровень сигнала, поступающего в правое ухо, дозировался теперь следующим образом: сначала 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 обеих ушей. При этом роль нуля-прибора выполнял сам испытуемый. Ошибка такого рода установок невелика и лежит в пределах 2÷3%.

Возможным фактором, искажающим результаты описанных выше субъективных выравниваний громкости сигналов, могла послужить неодинаковая чувствительность ушей испытуемого. В связи с этим был проведен специальный дополнительный опыт, в котором телефоны менялись местами. Несмотря на такую замену, установки на равенство, делаемые испытуемым, оставались практически одинаковыми.

По истечении 60 сек уровень сигнала, поступающего в левое ухо скачкообразно менялся со значения  $J_1$  на значение  $J_2$ . Сигнал  $J_3$  оставался неизменным. Скачкообразное изменение сигнала осуществлялось с помощью реле, срабатывающего от кнопки, нажимаемой испытуемым. Реле переключает левый телефон с генератора II на генератор III, предварительно настроенный на уровень  $J_2$ . Через 2 сек после переключения подача звука в правое ухо прекращалась. В течение этого времени испытуемый сравнивает громкости звуков  $J_2$  и  $J_3$  и в случае их неодинаковости соответствующим образом регулирует уровень сигнала  $J_2$  для следующей пробы. Испытуемый имел доступ к ручке регулятора уровня сигнала  $J_2$ , однако показаний вольтметра не видел.

Испытуемый пользовался следующей методикой отыскания установок 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  $J_2$ , пока, наконец, находил положение ручки регулятора, соответ-

вующее 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 шесть раз для каждой пары значений сигналов  $J_1$  и  $J_3$ . Разброс получаемых значений интенсивности звука  $J_2$ , как правило, не выходил за пределы 10%, а зачастую находился в пределах 5% от уровня  $J_2$ . В приводимых ниже таблицах указывается среднее значение  $J_2$  из шести измерений. Все опыты проводились на одном испытуемом.

Найденные значения интенсивности звука  $J_2$  для различных пар сигналов  $J_1$  и  $J_3$  даны в милливольтгах в табл. 1.

Таблица 1

$J_1, мв$ / $J_3, мв$	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
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	745
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	972	—
800	120	180	294	380	480	575	663	722	800	861	—	—	1052	—

Из формулы (15) вытекает следующее равенство для определения постоянной статики адаптации  $k$  человеческого слуха:

$$k = \frac{\lg \frac{J_2}{J_3}}{\lg \frac{J_1}{J_3}} \quad (16)$$

По этой формуле подсчитаны значения  $k$  для каждого опыта, приведенного в табл. 1. Результаты вычислений представлены в табл. 2. Среднее значение  $k$ , вычисленное для всех значений табл. 2, равно 0,68; среднее отклонение  $\Delta k = 0,04$ , т. е. составляет всего 6%.

Таблица 2

$J_1, мв$ / $J_3, мв$	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	0,69	0,69	0,68	—	—
200	0,59	0,66	—	0,60	0,74	0,69	0,72	0,70	0,72	0,70	0,70	0,72	0,71
300	0,62	0,75	0,74	—	0,62	0,73	0,69	0,71	0,68	0,70	0,74	0,70	—
500	0,70	0,75	0,68	0,73	0,75	—	0,54	0,65	0,69	0,70	0,67	0,71	0,71
800	0,68	0,72	0,72	0,76	0,74	0,71	0,65	0,76	—	0,71	—	—	0,67

На рис. 2 представлены экспериментальные кривые, построенные по данным табл. 1. Теоретические кривые, вычисленные при  $k = 0,68$  по формуле (15), построены на рис. 3. 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 расчета с опытом: верхние пять теоретических кривых практически точно ложатся на экспериментальные точки. Исключение составляет нижняя теоретическая кривая (для  $J_3 = 50 мв$ ), которая проходит заметно выше экспериментальных точек. Наиболее велико это различие в зоне больших значений  $J_1$ , где оно достигает 50 мв. Мы не

склоны видеть в этом различии указание на несогласование теории с опытом. Скорее всего здесь действует источник каких-то неустранимых систематических ошибок, возможно, сказывается эффект костной проводимости звука.

Для полной завершенности исследований необходимо было также

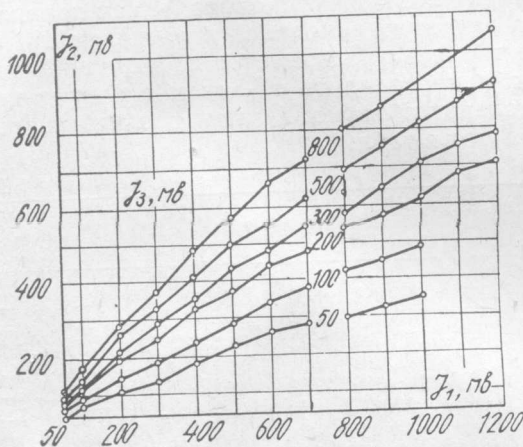


Рис. 2

Постоянство значений величины  $k$  для звуков различной частоты означает, что уровень адаптации слуха не влияет на соотношение субъективной громкости отдельных компонентов в сложном звуке. Очевидно, что отсутствие такого свойства слуха существенно затруднило бы распознавание сложных звуков, в том числе и звуков человеческой речи.

Формулу (15) можно проверить также в экспериментах со зрением человека. Применительно к зрению эту формулу запишем в виде

$$U_2 = U_1^{k_a} U_0^{1-k_a}, \quad (17)$$

где  $U_0$  — яркость поля сравнения;

$U_1$  — яркость поля при  $t < 0$ ,

$U_2$  — яркость поля при  $t \geq 0$ ,  $k_a$  — константа модели адаптации зрения

Эксперименты осуществлялись с помощью диска Максвелла (ветушки), на котором устанавливались три пары кружков с прорезьями. 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 калориметре КНО-3 в лаборатории цветовой измерений Всесоюзного научно-исследовательского светотехнического института, руководимой канд. техн. наук Д. А. Шкловером.

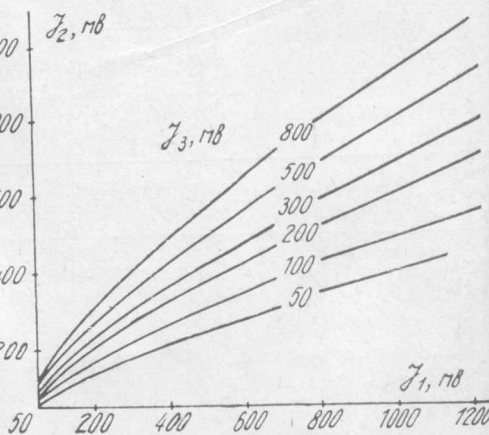


Рис. 3

На диске вертушки формируются два поля различной яркости (рис. 4). Внешнее поле постоянно имеет яркость, внутреннее поле первоначально имеет яркость  $U_1$  (рис. 4, а); затем происходит скачкообразное изменение яркости внутреннего поля до уровня  $U_2$  (рис. 4, б). Смена яркости внутреннего поля достигалась тем, что в определенный момент времени пара кружков, формирующих яркость  $U_1$  снималась и под ней обнаружилась другая пара кружков, дающих яркость  $U_2$ .

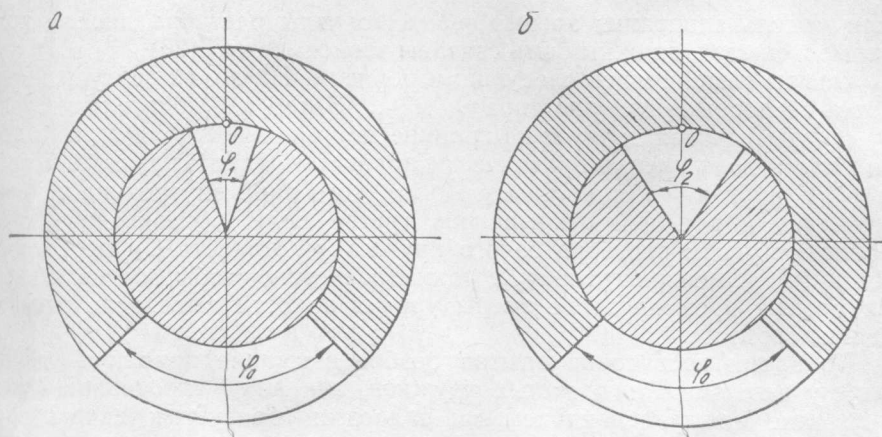


Рис. 4

Таблица 3

$I_1, мв$	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$I_2, мв$	165	213	255	297	317	385	400	450	500
$k$	0,73	0,69	0,68	0,68	0,65	0,69	0,67	0,69	0,70

Диск вращается со скоростью около 50 об/сек. При этой скорости мелькания яркости сливаются при любом угле раствора кружков и наблюдатель видит поля неизменной во времени яркости. Регулируя углы раствора белых кружков  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ , вставленных своими прорезями в прорези черных кружков, можно достичь плавной и точной регулировки яркости полей. Углы  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$  измерялись в делениях; одно деление соответствует  $1/128$  части полной окружности.

Согласно закону Тальбота, яркость поля  $U$ , образовавшуюся в результате слияния мельканий, можно вычислить по формуле

$$U = \frac{\varphi U_б + (128 - \varphi) U_ч}{128}, \quad (18)$$

где  $U_б$  и  $U_ч$  — яркость белого и черного кружков,  $\varphi$  — угол раствора белого кружка в делениях.

Яркость черного поля  $U_ч$  очень мала по сравнению с яркостью белого поля, поэтому в формуле (18) без ущерба для точности ее можно приближенно принять равной нулю.

Сделав то, мы можем вычислить яркости  $U_0, U_1, U_ч$  полей вертушки по формулам

$$U_0 = \frac{U_б}{128} \varphi_0; \quad U_1 = \frac{U_б}{128} \varphi_1; \quad U_ч = \frac{U_б}{128} \varphi_ч. \quad (19)$$

Во время 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 вольфрамовой нитью напряжением 220 в, мощностью 150 вт с расстояния 3 м под углом 45°.

Подставляя (19) в (17), получим

$$\varphi_2 = \varphi_1^{k_a} \varphi_0^{1-k_a}. \quad (20)$$

Если модель адаптации зрения верна, то углы раствора дисков, полученные в опытах, должны быть связаны зависимостью (20).

Опыты выполнялись следующим образом. На полях вертушки задавались некоторые углы раствора  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$ . 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  $U_0$ , а другая — к яркости  $U_1$ . После этого пара внутренних кружков снималась и под ней открывалось третье поле, образованное парой кружков с углом раствора белого кружка  $\varphi_2$ . Яркость  $U_2$  регулировалась путем изменения угла  $\varphi_2$  с таким расчетом, чтобы оба поля в первый момент времени после смены уровня яркости выглядели одинаковыми по светлоте.

Во время постановки опытов особое внимание пришлось уделить точному центрированию малых кружков, так как в противном случае на границе между сравниваемыми полосами образуется узкая полоса резко отличающаяся по светлоте, существенно снижающая точность фотометрирования.

В ходе опытов выяснялся вопрос о том, какие размеры полей следует выбрать, чтобы избежать влияния явлений контраста. С этой целью предварительно была проведена серия опытов при фиксированном значении яркостей  $U_0$  и  $U_1$  полей, но с изменением радиусов кружков. 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 бинокулярным фотометрированием. Для этого 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 предъявляется 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 работы глаза. Для этого выборочно проводились опыты при различном времени адаптации. Установлено, что при длительности адаптации до 50 ÷ 60 сек фотометрические установки существенно зависят от времени адаптации. При длительности адаптации 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 формулы (17), при пропорциональном изменении яркостей  $U_0$  и  $U_1$ , например в  $\mu$  раз, в то же число раз изменится и яркость  $U_2$ :

$$\mu U_2 = (\mu U_1)^{k_a} \mu U_0^{1-k_a}. \quad (21)$$

Это означает, что перепад уровня освещения не влияет на исход опыта светлотное равенство полей не должно нарушаться. Действительно

изменение освещенности диска в широких пределах (от 10 до 1000 нит), не привело даже к малейшему сдвигу в установке угла  $\varphi_2$ , обеспечивающей 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 другим при одинаковых установках углов  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$ , то разброс в установке угла  $\varphi_2$ , как правило, не выходит за пределы одного деления.

В табл. 4 в каждой ячейке над диагональной чертой приведены средние значения угла  $\varphi_2$ , полученные в опыте для различных значений углов  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$ . 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 ниже этой линии разброс достигал 3 ÷ 6 делений.

Таблица 4

$\varphi_0 \backslash \varphi_1$	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

Под диагональной чертой в ячейках таблицы вычислены теоретические значения угла  $\varphi_2$  по формуле (20) при значении постоянной статики адаптации  $k_a = 0,50$ . В опытах, соответствующих ячейкам таблицы

выше жирной линии, достигалось полное совпадение оттенков полей сравнения. В опытах, соответствующих ячейкам под жирной линией, оттенки можно было выравнять лишь по светлоте, так как поле, имеющее яркость  $B_2$ , приобрело легкий зеленоватый оттенок. На диаграм-

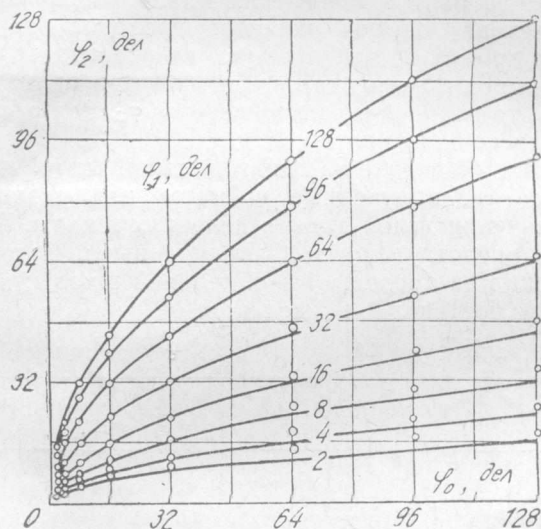


Рис. 5

ме 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.