

А. В. ЛУИЗОВ

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОРОГОВОГО КОНТРАСТА ОТ ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ

(Представлено академиком А. Н. Терениным 23 II 1948)

Если на фоне определенной яркости на короткое время  $\tau$  появляется объект с угловым размером  $\delta$ , минимальный контраст  $K$ , при котором объект может быть замечен, связан со временем  $\tau$  формулой (1)

$$K = \frac{\varepsilon \vartheta}{\int_{-\tau}^0 A(t) dt}, \quad (1)$$

где

$$\vartheta = \int_{-\infty}^0 A(t) dt \quad (2)$$

и  $\varepsilon$  — пороговый контраст данного объекта при длительной экспозиции ( $\tau \rightarrow \infty$ ).

По предварительным данным для  $A(t)$  можно было допустить одно из двух выражений:

1. Формулу кривой третьего порядка

$$A(t) = \frac{\vartheta^2}{(\vartheta - t)^2}. \quad (3)$$

К выражению (3) мы приходим, приняв, что  $K\tau$  линейно зависит от  $\tau$ . Поэтому связанные с таким допущением формулы мы называем формулами линейной зависимости. Согласно линейной зависимости

$$K = \varepsilon \left(1 - \frac{\vartheta}{\tau}\right). \quad (4)$$

2. Экспоненциальное выражение

$$A(t) = e^{t/\vartheta}, \quad (5)$$

согласно которому

$$K = \frac{\varepsilon}{1 - e^{-\tau/\vartheta}}. \quad (6)$$

Мы поставили себе целью экспериментально решить, какая зависимость — линейная или экспоненциальная — ближе к истине.

Основное затруднение состоит в том, что формулы (4) и (6) не очень сильно отличаются друг от друга. При очень малых  $\tau$  согласно обеим формулам  $K$  обратно пропорционально  $\tau$ . При больших  $\tau$  согласно обеим формулам  $K = \varepsilon$ , что, впрочем, следует из самого определения величины  $\varepsilon$ . При каких-то средних значениях  $\tau$  результаты вычислений по обеим формулам отличаются друг от друга не более, чем на  $\sim 25\%$  от вычисленной величины.

Так обстоит дело, если считать  $\varepsilon$  величиной известной и одинаковой в обеих формулах. Если же, имея ряд экспериментально найденных значений  $K$  и  $\tau$  в не очень широком интервале изменения  $\tau$ , подбирать для каждой зависимости свое  $\varepsilon$ , различия между результатами вычислений по обеим формулам могут оказаться совершенно неощутимыми. Эти соображения определили методику нашей работы.

У нас наблюдатель длительно фиксировал одним глазом молочное стекло яркостью около 60 асб. На этом светлом фоне на короткое время  $\tau$  появлялась марка с угловым размером  $5',5$  и с определенным контрастом  $K$ . Мы задавали 7 значений контраста, указанных в табл. 1 (от 100 до  $18\%$ ), и определяли для каждого контраста пороговое время  $\tau$ , при котором наблюдатель едва улавливал появление темного пятнышка.

Чтобы более надежно определить вид зависимости  $K$  от  $\tau$ , мы получили  $\tau$ , соответствующее каждому контрасту, как среднее из довольно значительного числа отсчетов; для каждого  $\tau$  — 6 отсчетов в одной серии, с каждым наблюдателем 10 серий, число наблюдателей 5. Таким образом индивидуальное среднее  $\tau$  получилось при усреднении 60 отсчетов, а среднее для всех наблюдателей — 300 отсчетов.

Обработка сред

№ фильтра	11		12		13		14	
	106%		75%		58%		45%	
Измеренный контраст $K$ в %								
Наблюдатель	$\tau^*$	$\lg \tau$	$\tau$	$\lg \tau$	$\tau$	$\lg \tau$	$\tau$	$\lg \tau$
Л.И.С.	82,9	$\bar{3},9186$	116,2	$\bar{2},0654$	153,8	$\bar{2},1870$	204,7	$\bar{2},3112$
Т.Н.К.	101,2	$\bar{2},0050$	137,7	$\bar{2},1391$	182,3	$\bar{2},2607$	249,8	$\bar{2},3976$
Г.И.З.	88,6	$\bar{3},9476$	123,9	$\bar{2},0999$	161,3	$\bar{2},2076$	231,6	$\bar{2},3648$
И.О.Г.	79,4	$\bar{3},9008$	107,1	$\bar{2},0299$	140,6	$\bar{2},1479$	187,9	$\bar{2},2739$
Э.А.С.	74,4	$\bar{3},8719$	102,5	$\bar{2},0105$	134,3	$\bar{2},1280$	184,8	$\bar{2},2667$
Среднее	84,9	$\bar{3},9288$	116,8	$\bar{2},0678$	153,6	$\bar{2},1862$	210,3	$\bar{2},3228$
Экспоненц.	$\vartheta = 0,6595$ сек.	$K_{\text{выч}}$	100	74,8	58,6	44,6		
	$\Delta K_{\text{ср}} = 0,3\%$	$\Delta K$	0	0,2	0,6	0,4		
	$(\Delta K/K)_{\text{ср}} = 0,9\%$	$\Delta K/K$	0	0,3	1,0	0,8		
Линейн.	$\vartheta = 0,6553$ сек.	$K_{\text{выч}}$	100	76,3	61,2	48,3		
	$\Delta K_{\text{ср}} = 3,1\%$	$\Delta K$	0	1,3	3,2	3,3		
	$(\Delta K/K)_{\text{ср}} = 10\%$	$\Delta K/K$	0	1,7	5,5	7,4		

\*  $\tau$  в десяти тысячных долях секунды.

Кроме того, для каждого наблюдателя определялся экспериментально пороговый контраст при длительной экспозиции  $\varepsilon$  (по той же марке) и, следовательно, произвол в выборе этого параметра исключался.

Все полученные данные сведены в табл. 1. Под номерами фильтров (верхняя строка) поставлены контрасты, ими создаваемые. В 5 следующих строках поставлены индивидуальные средние значения  $\tau$ ,  $\lg \tau$  и  $\varepsilon$  для пяти наблюдателей. Затем даны средние геометрические этих величин.

При обработке средних данных мы прежде всего по значениям  $\varepsilon$  и  $\tau$  для фильтра № 11 ( $K=1$ ) вычисляли  $\vartheta$ . Затем по  $\varepsilon$ ,  $\vartheta$  и каждому из  $\tau$  находили  $K_{\text{выч}}$  — вычисленный контраст, сравнение которого с  $K$  измеренным (стоящим во второй строке сверху) могло служить критерием правильности формулы. Абсолютная  $\Delta K$  и относительная  $\Delta K/K$  погрешности также приведены в табл. 1.

Вычисления повторены дважды: по формулам (4) и (6). Аналогичные вычисления мы произвели и по индивидуальным данным каждого наблюдателя, получив индивидуальные отклонения  $\Delta K_{\text{и}}$  и  $\Delta K_{\text{и}}/K$ .

Оказалось, что средние отклонения для линейной зависимости по индивидуальным данным

$$(\Delta K_{\text{и}})_{\text{ср}}^{\text{н}} = 0,032, \quad (\Delta K_{\text{и}}/K)_{\text{ср}}^{\text{н}} = 12\%;$$

по усредненным данным

$$(\Delta K)_{\text{ср}}^{\text{н}} = 0,031, \quad (\Delta K/K)_{\text{ср}}^{\text{н}} = 10\%.$$

Таблица 1

них данных

15		16		17		19		$\varepsilon$	$\lg \varepsilon$
29%		24%		18%		13,6%			
$\tau$	$\lg \tau$	$\tau$	$\lg \tau$	$\tau$	$\lg \tau$	$\tau$	$\lg \tau$		
353,5	$\bar{2},5484$	498,2	$\bar{2},6974$	945,4	$\bar{2},9756$	—	—	0,146	$\bar{1},1655$
467,6	$\bar{2},6698$	714,2	$\bar{2},8538$	1528	$\bar{1},1840$	—	—	0,155	$\bar{1},1915$
366,4	$\bar{2},5640$	480,8	$\bar{2},6820$	750,2	$\bar{2},8752$	—	—	0,137	$\bar{1},1379$
298,9	$\bar{2},4750$	379,4	$\bar{2},5791$	531,7	$\bar{2},7647$	1260	$\bar{1},1004$	0,105	$\bar{1},0203$
300,7	$\bar{2},4782$	381,9	$\bar{2},5820$	563,6	$\bar{2},7510$	1525	$\bar{1},1833$	0,125	$\bar{1},0976$
352,6	$\bar{2},5472$	477,4	$\bar{2},6789$	813,0	$\bar{2},9101$	—	—	0,133	$\bar{1},1227$
29,8		24,1		17,9					
0,8		0,1		0,1					
2,8		0,4		0,6					
34,2		28,7		22,4					
5,2		4,7		4,4					
17,9		19,6		24,5					

Для экспоненциальной зависимости:  
по индивидуальным данным

$$(\Delta K_n)_{\text{ср}}^{\text{э}} = 0,008, \quad (\Delta K_n/K)_{\text{ср}}^{\text{э}} = 2,6\%$$

по усредненным данным

$$(\Delta K)_{\text{ср}}^{\text{э}} = 0,003, \quad (\Delta K/K)_{\text{ср}}^{\text{э}} = 0,9\%$$

Мы видим, что вычисления по экспоненциальной зависимости значительно точнее, чем по линейной.

Заметим, что положив в формуле (4)  $\varepsilon = 7,6\%$  и  $\vartheta = 0,103$  сек., мы получим для всех 7 контрастов довольно хорошее совпадение вычисленных величин с измеренными. Но совершенно ясно, что при увеличении  $\tau$  такие параметры не дадут непрерывного перехода к весьма длительным экспозициям, так как непосредственно измеренное значение  $\varepsilon$  не 7,6, а 13,3%. Несостоятельность такой подгонки обнаруживается опытами с фильтром № 19, с которым могли работать два наблюдателя, обладающие большой контрастной чувствительностью. Взяв среднее из их данных и положив в формуле (4) для них  $\varepsilon = 5,3\%$ ,  $\vartheta = 0,137$ , мы получим довольно хороший результат вычисления для первых 7 контрастов, но очень большое отклонение для восьмого. В то же время формула (6) без всяких натяжек против экспериментально найденного значения  $\varepsilon$  дает и для этих наблюдателей хороший результат.

Таким образом, мы считаем возможным утверждать, что зависимость порогового контраста от времени экспозиции формулами экспоненциальной зависимости (4) изображается значительно лучше, чем формулой линейной зависимости (6).

Государственный оптический институт

Поступило  
20 II 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. В. Луи з о в, ДАН, 57, № 8 (1947).