

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПРИМЕНЯЕМОГО К ЗАДАЧАМ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Доктор техн. наук, проф. М. М. ГУТОРОВ, канд. техн. наук  
Е. А. НИКИТИНА

Московский энергетический институт,  
Центральный институт охраны труда ВЦСПС

Expressions are proposed for the design of luminance difference threshold and adaptation luminance at a non-uniform distribution in the visual field and a fixed visual line, allowance being made for the light distribution in the eye media and for the induction processes in the visual system

\* \* \*

Обнаружение объектов усложняется при неравномерном распределении яркости в поле зрения из-за рассеяния света в глазных средах, нервных процессов в сетчатке и зрительной системе.

Для оценки условий освещения при неравномерном распределении яркости в поле зрения необходимо знать яркость адаптации  $L_{ad}$ . Так как определение  $L_{ad}$  экспериментальным путем невозможно, то  $L_{ad}$  находят из зависимости  $\Delta L_n = f(L_f)$  для равномерного распределения яркости в поле зрения при соответствующей данному распределению пороговой разности яркости  $\Delta L_{ns}$ .

Изучение  $\Delta L_{ns}$  и  $L_{ad}$  при фиксированной линии зрения и различном распределении яркости в поле зрения выполнялось различными авторами [Л. 1—4]. В их работах для определения  $L_{ad}$  при  $L_n < L_{per}$  использовалась эквивалентная схема [Л. 5], объясняющая изменение параметров зрительной системы при наличии в поле зрения пятен повышенной яркости наложением вуалирующей пелены с яркостью  $\beta$ . При этом

$$L_{ad} = L_n + \beta, \quad (1)$$

где  $L_n$  — яркость центральной части поля зрения;  $\beta$  — яркость вуалирующей пелены.

Для круглых полей (рис. 1) вуалирующую пелену  $\beta$  можно определить, используя методику оценки, предложенную В. В. Мешковым [Л. 1]:

$$\beta = K(L_{per} - L_n) 2\pi F(\theta_n, \theta_{per}), \quad (2)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности.

Зависимость  $F$  от размера центральной части поля зрения  $\theta_n$  приведена в [Л. 1, 3]. При  $\theta_n$ , выраженной в радианах, значения этой функции необходимо умножить на 1,5.

Яркость адаптации для случая более темной по сравнению с центром периферии предлагается определять в [Л. 1] следующим образом:

$$L_{ad} = L_n - \beta, \quad (3)$$

где  $\beta$  рассчитывается по выражению, аналогичному (2).

В работах [Л. 1—4] при  $L_n < L_{per}$  были рассмотрены постоянные размеры центральной части поля зрения

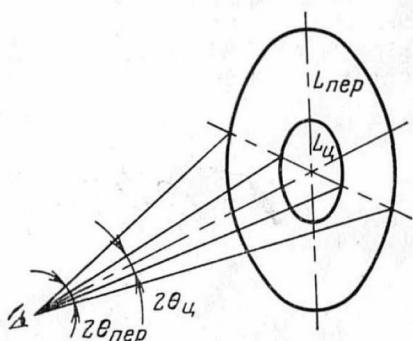


Рис. 1. Вид неравномерного поля зрения.

ния  $\theta_n$ , равные  $1,5-2^\circ$ , и только в [Л. 4] при  $L_n > L_{per}$  значения  $\theta_n$  менялись от  $1,5$  до  $10^\circ$ . Однако ряд зрительных задач по обнаружению объектов на телевизионных экранах, в натурных условиях и других случаях осуществляется при  $\theta_n < 1,5^\circ$ .

На протяжении нескольких лет нами проводились исследования зависимостей  $\Delta L_{ns} = f(\theta_n)$  при различных соотношениях  $L_n$  и  $L_{per}$ . Объекты предъявлялись по методу пределов. Схема экспериментальной установки описана в [Л. 6]. При выбранном методе погрешность измерений пороговых разностей яркостей на установке составляла  $10-12\%$ . В наблюдениях принимали участие 4 испытуемых, усреднение экспериментальных значений  $\Delta L_{ns}$  проводилось по 120—150 результатам.

На основе анализа экспериментальных данных [Л. 4]<sup>1</sup>, расчетных значений  $\Delta L_{ns}$  и  $\beta$  при различных  $L_n$ ,  $L_{per}$  и  $\theta_n$ , а также результатов собственных экспериментов был сделан вывод, что применяемое понятие вуалирующей пелены  $\beta$  не является универсальным, так как не объясняет характер изменения  $\Delta L_{ns}$  с изменением: 1)  $\theta_n$  при  $L_n < L_{per}$ ;  $L_{per} < 100$  кд/м<sup>2</sup> и  $\theta_n < 3-5^\circ$ ; 2)  $\theta_n$  при  $L_n/L_{per} > 1$  и  $\theta_n > 10^\circ$ .

Поскольку  $L_{ad}$  определяется косвенно по результатам измерения  $\Delta L_{ns}$ , величина вуалирующей пелены не во всех случаях определяет характер изменения  $L_{ad}$ .

Сделанные нами выводы подтверждаются данными физиологических исследований, указывающими, что в определенном диапазоне  $L_n$ ,  $L_{per}$  и  $\theta_n$  изменение чувствительности зрительного анализатора, в первую очередь, связано с нервными процессами, а не с рассеянием света в глазных средах [Л. 7]. Учет нервных процессов зрительной системы, для моделирования которых на основании физиологических исследований выдвинута гипотеза о фильтре [Л. 8], приобретает действенное значение при объяснении закономерности изменения  $\Delta L_{ns}$  с изменением  $\theta_n$  в диапазоне  $L_n$  и  $L_{per}$ , при которых происходит перестройка нервных связей.

Поэтому возникла необходимость разработки новой модели зрительной системы применительно к задачам обнаружения объектов на неравномерных полях при различных  $L_n$ ,  $L_{per}$  и  $\theta_n$ , учитывающей как влияние рассеяния света, так и индуктивные процессы в зрительной системе.

Анализ полученных нами многочисленных экспериментальных данных  $\Delta L_{ns}$  позволил предложить довольно простые выражения для определения  $\Delta L_{ns}$  и  $L_{ad}$ , при выводе которых мы пытались совместить обе точки зрения на природу обнаружения объектов на полях (рис. 1).

Рассмотрим случай, когда  $L_n < L_{per}$ .

При  $L_{per} \leq 100$  кд/м<sup>2</sup> пороговые разности яркости можно определять следующим образом:

$$\Delta L_{ns} = \Delta L_{n(L_n + \beta)} K_1 + \Delta L_{n(L_{per})} (1 + K), \quad (4)$$

где  $\Delta L_{n(L_{per})}$  — пороговая разность яркости при равномерном поле зрения с яркостью  $L_{per}$ ;  $\Delta L_{n(L_n + \beta)}$  — пор-

<sup>1</sup> Анализ был проведен по данным W. Adrian и K. Eberbach, так как в работах [Л. 1, 2] не опубликованы результаты экспериментов, а в [Л. 3] производилось сравнение двух полей зрения, а не обнаружения объекта на поле с  $L_n$  и  $L_{per}$ .

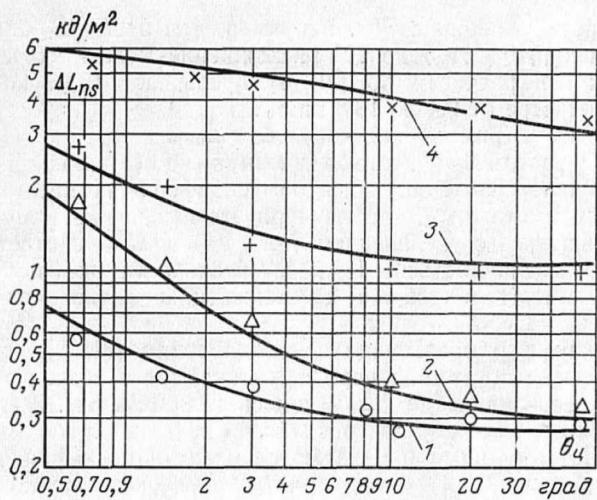


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости влияния размера центральной части поля зрения на обнаружение объектов при  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  ( $\alpha=10'$ ).

— расчет; ○, Δ, +, × — эксперимент.  
 1 —  $L_{\text{п}}=2 \text{ кд}/\text{м}^2$ ,  $L_{\text{пер}}=15 \text{ кд}/\text{м}^2$ ; 2 —  $L_{\text{п}}=2 \text{ кд}/\text{м}^2$ ,  $L_{\text{пер}}=50 \text{ кд}/\text{м}^2$ ;  
 3 —  $L_{\text{п}}=15 \text{ кд}/\text{м}^2$ ,  $L_{\text{пер}}=75 \text{ кд}/\text{м}^2$ ; 4 —  $L_{\text{п}}=60 \text{ кд}/\text{м}^2$ ,  $L_{\text{пер}}=600 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

говая разность яркости при равномерном поле зрения с яркостью  $(L_{\text{п}} + \beta)$ .

В (4) коэффициент  $K_1$  по аналогии с коэффициентом передачи высокочастотного фильтра определяется следующим образом:

$$K_1 = \frac{a_1 \theta_{\text{п}}}{\sqrt{1 + (a_1 \theta_{\text{п}})^2}}, \quad (5)$$

где  $a_1$  — постоянная величина, аналогичная постоянной времени низких частот.

Обработка экспериментальных данных показала, что при  $\theta_{\text{п}}$ , выраженному в градусах, можно принять  $a_1=1$ . Тогда

$$K_1 = \theta_{\text{п}} / \sqrt{1 + \theta_{\text{п}}^2}. \quad (6)$$

Аппроксимация порогов по (4) при  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  целесообразна до  $L_{\text{пер}} \leq 100 \text{ кд}/\text{м}^2$ , т. е. до такой яркости, при которой по данным Н. Blackwell [Л. 9] уже не происходит изменение зоны суммации.

При  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  и  $L_{\text{пер}} > 100 \text{ кд}/\text{м}^2$  для определения  $\Delta L_{ns}$  предлагается следующее выражение, учитывающее дополнительную пелену, накладываемую на центральное пятно с установленными нервными связями:

$$\Delta L_{ns} = \Delta L_{n(L_{\text{ад}})}, \quad (7)$$

где  $\Delta L_{n(L_{\text{ад}})}$  — пороговая разность яркости при равноярком поле зрения с яркостью  $L_{\text{ад}}$  [см. ниже выражение (9)].

Рассчитанные по (4) и (7) зависимости  $\Delta L_{ns}=f(\theta_{\text{п}})$  при  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  и различных  $L_{\text{п}}$  и  $L_{\text{пер}}$  приведены на рис. 2. На этом же рисунке нанесены полученные нами экспериментальные точки, соответствующие 75% вероятности обнаружения<sup>2</sup>. Расхождение между экспериментом и расчетом не превышает 20%.

Выполненная нами аппроксимация  $\Delta L_{ns}$  при  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  позволяет предложить несложные выражения для определения  $L_{\text{ад}}$ , которые в общем виде записываются следующим образом. Так, при  $L_{\text{пер}} \leq 100 \text{ кд}/\text{м}^2$

$$L_{\text{ад}} = (L_{\text{п}} + \beta) K_1 + L_{\text{пер}} (1 - K_1), \quad (8)$$

<sup>2</sup> При расчете  $\Delta L_{ns}$  для определения величин  $\Delta L_n$  на равноярких полях мы пользовались также 75% вероятностью обнаружения.

а при  $L_{\text{пер}} > 100 \text{ кд}/\text{м}^2$

$$L_{\text{ад}} = L_{\text{ад}} + \beta_1, \quad (9)$$

где  $L_{\text{ад}}$  в (9) определяется по (8) для  $L_{\text{пер}} = 100 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

На рис. 3 приведены полученные нами расчетные зависимости  $L_{\text{ад}}=f(\theta_{\text{п}})$  при  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  и нанесены значения  $L_{\text{ад}}$ , найденные на основании результатов измерения  $\Delta L_{ns}$ . На этом же рисунке показаны зависимости  $L_{\text{ад}}=f(\theta_{\text{п}})$ , рассчитанные по данным L. Holladay [Л. 5] и по выражениям, предложенным М. М. Епанешниковым [Л. 3].

Из рис. 3 видно, что при  $L_{\text{пер}} > 100 \text{ кд}/\text{м}^2$ , а также  $L_{\text{пер}} < 100 \text{ кд}/\text{м}^2$  и  $\theta_{\text{п}} > 3-5^\circ$  характер зависимостей, рассчитанных по L. Holladay и M. M. Епанешникову, подобен характеру наших зависимостей  $L_{\text{ад}}=f(\theta_{\text{п}})$ , а при  $L_{\text{пер}} < 100 \text{ кд}/\text{м}^2$  и  $\theta_{\text{п}} < 3-5^\circ$  наши зависимости и рассчитанные по [Л. 3 и 5] имеют различный характер.

Записанные в общем виде выражения (4), (8) и (9) могут быть упрощены в зависимости от требуемой точности расчета и соотношения величин  $L_{\text{п}}$ ,  $L_{\text{пер}}$ ,  $\beta$  и  $\theta_{\text{п}}$ . Так, с увеличением  $\theta_{\text{п}}$ , когда  $K_1 \rightarrow 1$ , можно пренебречь индуктивным влиянием и учитывать только вуалирующую пелену  $\beta$ . Тогда выражения (4) и (8) приводятся к известному ранее виду

$$\Delta L_{ns} = \Delta L_{n(L_{\text{п}} + \beta)}, \quad (10)$$

$$L_{\text{ад}} = L_{\text{п}} + \beta. \quad (11)$$

С учетом точности экспериментальной установки выражения (10) и (11) рекомендуется использовать при выполнении следующего неравенства:

$$\frac{L_n}{L_{\text{п}} + \beta} < \frac{1 - 0,9K_1}{0,9(1 - K_1)}. \quad (12)$$

Если же вуалирующая пелена

$$\beta < \frac{1}{9} \frac{L_{\text{п}} K_1 + L_n (1 - K_1)}{K_1}, \quad (13)$$

то можно пренебречь влиянием рассеяния света в глазных средах и определить  $\Delta L_{ns}$  и  $L_{\text{ад}}$  с помощью следующих выражений, учитывающих только индуктивные процессы в зрительной системе:

$$\Delta L_{ns} = \Delta L_{n(L_{\text{п}})} + \Delta L_{n(L_{\text{пер}})} (1 - K_1), \quad (14)$$

$$L_{\text{ад}} = L_{\text{п}} + L_{\text{пер}} (1 - K_1). \quad (15)$$

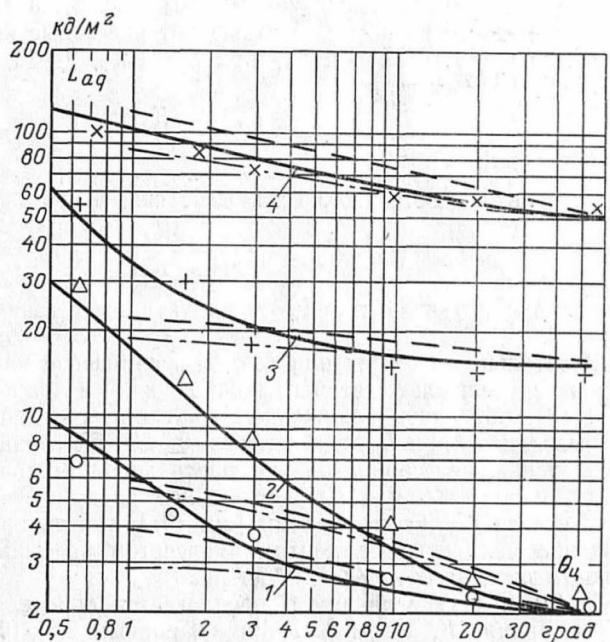


Рис. 3. Яркость адаптации при  $L_{\text{п}} < L_{\text{пер}}$  ( $\alpha=10'$ ).

○, Δ, +, × — эксперимент; — расчет авторов статьи; - - - расчет по L. Holladay; — — расчет по M. M. Епанешникову.

1-4 — спецификация по рис. 1.

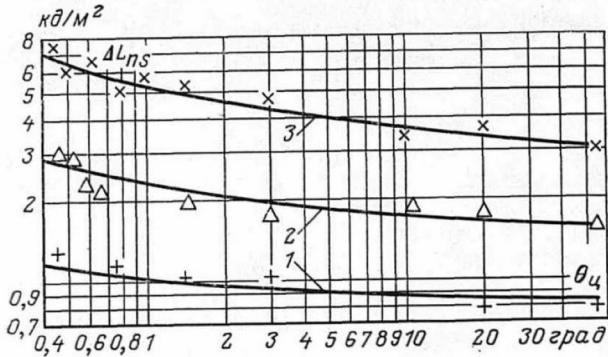


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости влияния размера центральной части поля зрения на обнаружение объектов при  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$  ( $\alpha = 10'$ ;  $L_{\text{пер}} = 15 \text{ кд}/\text{м}^2$ ).

— расчет;  $x$ ,  $\Delta$ ,  $+$  — эксперимент.  
1 —  $L_{\text{ц}} = 25 \text{ кд}/\text{м}^2$ ; 2 —  $50 \text{ кд}/\text{м}^2$ ; 3 —  $100 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

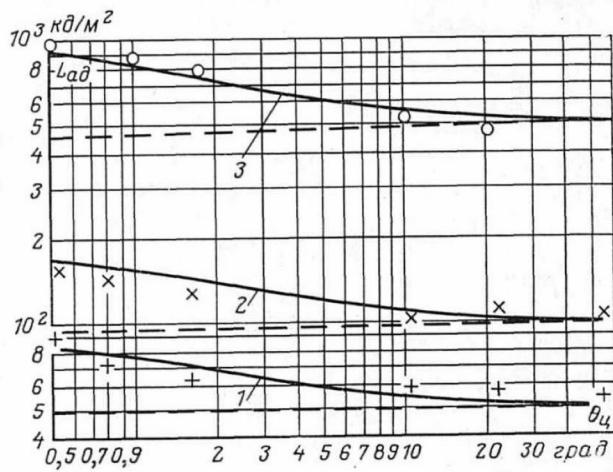


Рис. 5. Яркость адаптации при  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$  ( $\alpha = 10'$ ;  $L_{\text{пер}} = 15 \text{ кд}/\text{м}^2$ ).

○,  $x$ ,  $+$  — эксперимент; — расчет авторов статьи;  
— — расчет по В. В. Мешкову.  
1—3 — спецификация по рис. 4.

Ход экспериментальных кривых (см. рис. 2), а также определенные по ним  $L_{\text{ад}}$  объясняют внесенные корректиры в расчеты  $\Delta L_{ns}$  и  $L_{\text{ад}}$  при  $L_{\text{ц}} < L_{\text{пер}}$ ,  $\theta_{\text{ц}} < 3-5^\circ$  и  $L_{\text{пер}} \leq 100 \text{ кд}/\text{м}^2$ : если

$$\beta < \frac{1}{9} \frac{L_{\text{ц}} K_1 + L_n (1 - K_1)}{K_1}$$

— учет только индуктивного взаимодействия; а при

$$L_{\text{пер}} / (L_{\text{ц}} + \beta) > \frac{1 - 0,9 K_1}{0,9 (1 - K_1)}$$

— учет вуалирующей пелены и индуктивного взаимодействия.

В остальных случаях при  $L_{\text{ц}} < L_{\text{пер}}$  изменение параметров зрительной системы можно, как и раньше [Л. 1—3], объяснить наложением только вуалирующей пелены. Однако при  $L_{\text{ц}} > 100 \text{ кд}/\text{м}^2$  и  $\theta_{\text{ц}} < 3-5^\circ$ , с нашей точки зрения, целесообразно учитывать дополнительную пелену, накладываемую на центральное пятно с установленными нервными связями [см. (9)], так как расхождение между экспериментом и расчетом превышает точность экспериментальной установки.

В (9) и (11) величину  $\beta$  предлагается определять по (2), приняв  $K$ , как и Л. Holladay, равным  $2,81 \cdot 10^{-3}$ , при этом во всем исследованном диапазоне получается минимальное расхождение между экспериментом и расчетом. Использование коэффициентов [Л. 3] не во всех случаях дает совпадение с экспериментом в пределах

точности установки. Так, например, для  $5 < L_n / L_{\text{ц}} < 10$  и изменении  $\theta_{\text{ц}}$  от  $5$  до  $20^\circ$  расхождение между экспериментом и расчетом по [Л. 3] превышает  $10\%$ , когда  $L_{\text{ц}}$  меняется от  $2,4$  до  $13,8 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

Рассмотрим случай, когда  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$ .

Определять яркость адаптации по (3) при более темной по сравнению с центром периферии не представляется возможным, так как при этом величина  $\beta$  будет уменьшаться с увеличением  $\theta_{\text{ц}}$ , а  $L_{\text{ад}}$  и  $\Delta L_{ns}$  соответственно увеличиваться. В действительности же пороги  $\Delta L_{ns}$  имеют тенденцию к уменьшению с увеличением  $\theta_{\text{ц}}$  и при  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$  (рис. 4).

Как и в предыдущих исследованиях [Л. 5], нами получено, что темная периферия оказывает значительно меньшее влияние на  $\Delta L_{ns}$ , чем светлая (см. рис. 2 и 3). Однако в ряде случаев преенебречь этим влиянием нельзя. Поэтому нами предлагаются следующие выражения для расчета  $\Delta L_{ns}$  и  $L_{\text{ад}}$  при  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$ , которые позволяют оценить пределы влияния неравномерного распределения яркости на обнаружение объектов при различных  $L_{\text{ц}}$  и  $L_{\text{пер}}$ :

$$\Delta L_{ns} = \Delta L_{n(L_{\text{ц}})} (1 + K_2) - \Delta L_{n(L_{\text{пер}})} K_2; \quad (16)$$

$$L_{\text{ад}} = L_{\text{ц}} (1 + K_2) - L_{\text{пер}} K_2, \quad (17)$$

где

$$K_2 = 1 / V 1 + \theta_{\text{ц}}^2 \quad (18)$$

определяется аналогично коэффициенту передачи низкочастотного фильтра с постоянной времени высоких частот  $a_2 = 1$ .

Расчеты величин  $\Delta L_{ns}$  по (16) дают совпадение с точностью до  $15-20\%$  с результатами эксперимента при  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$ .

На рис. 5 показаны расчетные значения  $L_{\text{ад}}$  при различных  $\theta_{\text{ц}}$  и  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$ . На этом же рисунке нанесены значения  $L_{\text{ад}}$ , полученные по результатам полученных нами экспериментальных величин  $\Delta L_{ns}$ .

Выражения (16) и (17) могут быть упрощены в зависимости от требуемой точности расчета при различных  $\theta_{\text{ц}}$ .

**Выводы.** 1. Показано, что при  $L_{\text{ц}} < L_{\text{пер}}$  изменение параметров зрительной системы целесообразно объяснить как индуктивными процессами, так и рассеянием света в глазных средах, если  $\theta_{\text{ц}} < 3-5^\circ$ , а при  $\theta_{\text{ц}} > 3-5^\circ$  — только рассеянием света.

2. Предложены выражения для определения величин пороговой разности яркости  $\Delta L_{ns}$  при  $L_{\text{ц}} < L_{\text{пер}}$ ,  $\theta_{\text{ц}} < 3-5^\circ$ , а также  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$  и  $\theta_{\text{ц}} < 10^\circ$ , составленные с учетом влияния рассеяния света в глазных средах и индуктивных процессов в зрительной системе.

3. Получены выражения для расчета яркости адаптации  $L_{\text{ад}}$  для неравнояркого поля зрения при  $L_{\text{ц}} < L_{\text{пер}}$ ,  $\theta_{\text{ц}} < 3-5^\circ$  и  $L_{\text{ц}} > L_{\text{пер}}$ ,  $\theta_{\text{ц}} < 10^\circ$  и изменении яркости пятен от  $2$  до  $1000 \text{ кд}/\text{м}^2$ .

### Список литературы

- Мешков В. В. Осветительные установки. М., Госэнергиздат, 1947.
- Moon P., Spenser D. Specification of Foveal Adaptation.—JOSA, 1943, vol. 33, № 8.
- Епанешников М. М., Сидорова Т. Н., Севера В. Адаптация при неравномерном распределении яркости в поле зрения.—«Светотехника», 1964, № 10, с. 7—13.
- Adrian W., Eberbach K. On the Relationship between the Visual Threshold and size of surrounding Field of view.—Lighting Research and Technology, 1969, № 4.
- Holladay L. Action of Light—Souse in Field of view in Lowering Visibility.—JOSA, 1927, vol. 14, № 1.
- Никитин Е. А., Мурашова М. А. Пороговый контраст равноярких диффузных дисков.—В кн.: Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. М., Профиздат, 1973, вып. 81.
- Глазер В. Д., Бертулис А. В. О функциональной перестройке рецептивного поля сетчатки.—В кн.: «Механизмы опознания зрительных образов». Л., «Наука», 1967.
- Шеталов И. В. Электронная модель сетчатки.—В кн.: Механизмы кодирования зрительной информации. Л., «Наука», 1966.
- Blackwell H. Contrast Threshold of Human Eye.—JOSA, 1946, № 11.

Т. 0,37  
ρ. 0,06