

известства НЛ ВД в 8—10 раз); светильников с РЛ ВД — в 6 раз, с ЛЛ — в 3 раза;

стабилизацию производства ЛН на уровне 1,5 млрд шт. в год при снижении выпуска светильников с ЛН в 3 раза;

резкое повышение технического уровня и качества ламп и светильников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Ю. Б. Освещение в свете экономии// Энергия (Экономика. Техника. Экология). 1988. № 5. С. 48—52.
2. Кунгс Я. А., Фаермарк М. А. Экономия электрической энергии в осветительных установках. М.: Энергоатомиздат, 1984. 160 с.
3. Скобарева З. А., Текшева Л. М. Оценка состояния искусственного освещения в школах// Светотехника. 1982. № 1. С. 24—27.
4. Справочная книга по светотехнике/ Под ред. Ю. Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 480 с.
5. Айзенберг Ю. Б., Гусева Л. С., Кроль Ц. И., Фаермарк М. А. Об «Инструкции по рациональному использованию электроэнергии и снижению затрат в промышленных осветительных установках (Внутреннее освещение)»// Светотехника. 1981. № 5. С. 14—16.
6. Эффективное использование электроэнергии. М.: Энергиздат, 1981. 400 с.
7. К вопросу внедрения люминесцентного освещения в быту/ Н. С. Перова, Г. Н. Ундасынов, Г. В. Федюкина и др./ Светотехника. 1987. № 1. С. 3—5.
8. Кулаков И. А., Рожкова Н. В. Состояние и развитие компактных люминесцентных ламп// Светотехника. 1985. № 9. С. 12—15.
9. Айзенберг Ю. Б., Пыжов П. П., Сарычев Г. С. Важнейшее направление комплексного повышения эффективности осветительных установок и светотехнического производства// Светотехника. 1978. № 12. С. 1—4.
10. Светотехническая наука на новом этапе// Светотехника. 1987. № 11. С. 4—6.
11. Айзенберг Ю. Б., Бухман Г. Б. О классификации и допусках на кривые силы света светильников// Светотехника. 1978. № 6. С. 6—10.
12. Айзенберг Ю. Б., Гусева Л. С., Фаермарк М. А. Область рационального применения световых приборов с типовыми кривыми силы света// Светотехника. 1985. № 7. С. 6—8.
13. Фаермарк М. А. Эффективность выбора светильников с учетом их эксплуатационной группы// Светотехника. 1983. № 2. С. 16—18.
14. Айзенберг Ю. Б., Бухман Г. Б., Пятигорский В. М., Яремчук Р. Ю. Состояние и задачи развития работ по щелевым световодам// Светотехника. 1981. № 11. С. 3—6.
15. Айзенберг Ю. Б., Бухман Г. Б. Осветительные приборы в установке// Светотехника. 1985. № 10. С. 2—6.
16. Аничкин А. Г., Ефимкина В. Ф. Совмещенные системы освещения и кондиционирования. М.: Энергия. 1972. 136 с.
17. Кроль Ц. И., Терешкович С. Г. Принципы нормирования освещения в общесоюзных нормах по комплексной оценке световой среды производственных помещений// Светотехника. 1982. № 1. С. 15—18.
18. Коробко А. А., Пятигорский В. М., Терешкович С. Г. Использование прямого солнечного света для внутреннего освещения зданий// Светотехника. 1989. № 3. С. 8—10.
19. Айзенберг Ю. Б. О необходимости разработки необслуживаемых осветительных приборов и устройств// Светотехника. 1985. № 3. С. 25—26.

УДК 621.84

## ОСНОВЫ ВИЗУАЛЬНОЙ СВЕТОТЕХНИКИ

Х.-В. БОДМАНН, проф.

Светотехнический институт Университета  
г. Карлсруэ, ФРГ

**1. Введение.** Сегодня измерительная система светотехники опирается единственно на физиолого-оптическую функцию, а именно на относительную спектральную световую эффективность  $V(\lambda)$  адаптированного к свету среднего наблюдателя, как она была установлена в 1924 г. МКО. Возникшая таким образом яркость должна характеризовать величину светлоты излучения, т. е. представлять собой порядковую меру светлоты.

Функция  $V(\lambda)$  базируется на специальных условиях предъявления и наблюдения. Отсюда высказывание, что два излучения равной яркости кажутся одинаково светлыми, в целом неправильно. Вопрос о метрической шкале светлоты и ее связи с яркостью является более сложным.

Если описывать влияние освещения на визуально выполненную работу при решении практических задач, то в каждом отдельном случае мы существенно зависим от эксперимента. И лишь когда имеется модель визуального восприятия, можно разрабатывать физиолого-оптические величины оценки света и заранее предсказывать успешность зрительного восприятия человека.

Вообще наше понимание зрительного восприятия еще не достаточно, чтобы можно было в принципе ответить на этот вопрос светотехники. Тем не менее в последние годы намечается некоторый прогресс в развитии модели зрения, который оказывает решающее влияние на визуальные основы светотехники и расширяет их.

Изложим состояние проблемы на примере светлоты, шкалирования светлоты, обнаружения и различения зрительных знаков, а также переходной адаптации. При этом ограничимся в основном исследованиями, которые проводились в Институте светотехники в Карлсруэ.

**2. Стимул светлоты.** Фотометрия основывается на аспекте светлоты излучения, воспринимаемого глазом. Итак, в психофизике и в целом в биофизике дано определение воздействию, вызванному излучением, как правило, на формальном или предписывающем уровне, т. е. мы можем различать ответы на воздействие лишь благодаря отношениям «одинаковый» или «неодинаковый», соответственно «больше» или «меньше». Всякая иная связь на этом уровне бессмысленна. Отсюда следует, что фотометрическую оценку излучения необходимо основывать прежде всего на сравнении светлоты двух излучений. Обычное поле для сравнения светлоты показано на рис. 1, причем излучением  $M$ , которое необходимо оценить (измеряемое излучение), изолируется с помощью разделительной карты от излучения  $N$ , с которым производится сравнение (эталонное излучение). Поле сравнения обрамлено полем окружения. Важно, что более точно определяются не только физические условия предъявления, но и методы сравнения, а также условия наблюдения.

Относительная спектральная световая эффективность, установленная МКО в 1924 г., существенным образом опирается на следующие условия [1]: величина поля сравнения около  $2^{\circ}$ , фотоптический уровень измеряемого и сравниваемого излучений, нейтральное (ахроматическое) поле окружения, фoveальное (центральное) наблюдение, мигающее фотометрическое сравнение светлоты, наблюдатель с нормальным зрением. В таких специальных рамках яркость излучения определена как

$$L = K_{\max} \int_{\lambda} V(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $K_{\max} = 683 \text{ лм/Вт}$  и  $L_{e\lambda}(\lambda)$  как спектральная плотность яркости. Только в этих специальных рамках яркость является адекватной величиной «светлоты», т. е. два спектральных излучения, составленных в любом порядке, тогда и лишь тогда являются одинаково светлыми (при мелькающем фотометрическом сравнении), если совпадает их яркость. Строго говоря, функция  $V(\lambda)$  в области коротких волн должна быть иметь большие значения, как это и было предложено Д. Джаддом в 1951 г. [2]. Однако эта коррекция едва проявляется для практических ИС.

Как только отступаешь от выше названных условий, яркость можно использовать в качестве величины светлоты только лишь приблизительно. На рис. 2 наряду с функцией  $V(\lambda)$  и исправлением по Д. Джадду изображена относительная спектральная световая эффективность  $B_2(\lambda)$ , которая получается при прямом сравнении светлоты вместо мигающего фотометрического сравнения [3]. Эта функция явно шире и позволяет увидеть слабо выраженный побочный максимум, который указывает на участие «цветовых рецепторов». Решающим, однако, для фотометрии является то, что законы аддитивного сложения спектральных составляющих светлоты в общем не выполняются при прямом фотоптическом сравнении, так что на основе  $B_2$  нельзя построить определение яркости по (1).

С точки зрения физиологии эту ситуацию можно характеризовать таким образом, что ощущение светлоты основано на действии двух механизмов возбуждения систе-

мы колбочек, во-первых, системой «Ломинанц» с аддитивным сложением ответов рецепторов, представленной функцией  $V(\lambda)$ , и во-вторых системой «Хроминанц» с антагонистично, встречно включенными ответами рецепторов, представленной разностью между  $B_2(\lambda)$  и  $V(\lambda)$ . Для системы «Ломинанц» «синий рецептор», если и играет, то несущественную роль [4]. При мигающем фотометрическом сравнении светлоты вклад системы «Хроминанц» исключается, так как она не может следовать за частотой предъявления, кроме случая смешения цветов.

Ситуация аналогична и при других значениях углов поля сравнения. Для практики наряду с 2-градусной фотометрией интересна как фотометрия точечных источников света (световые сигналы, световые диоды, знаки экрана), так и излучающих поверхностей (сияющие потолки, стены, образцы с большой поверхностью). Для этого имеются относительные спектральные световые эффективности, которые получены с помощью прямого сравнения светлоты [3]. Все эти функции можно применять из-за их неаддитивности лишь для сравнения со спектральным возбуждением. Это не является удовлетворительным. Нам необходима универсальная мера для стимула светлоты, которая применима для различных условий предъявления и наблюдения, и сочетается с системой МКО.

Здесь предлагается концепция эквивалентной яркости, которая была ранее введена для области адаптации [5]. По схеме рис. 1 сравнивают излучение  $M$ , которое следует оценить, в принципе с любым другим излучением  $N$  непосредственно по равной светлоте. Таким образом определяют эквивалентную яркость  $L_{eq}$  измеренного излучения «МКО», где  $L$  — яркость сравниваемого излучения равна по светлоте измеренному.

$$L_{eq}(M) = L(N). \quad (2)$$

Проблема заключается в установлении связи  $L_{eq}(M)$  с яркостью  $L(M)$  измеряемого излучения и особенно в определении так называемого соотношения уровней возбуждения

$$L_{eq}(M) / L(M). \quad (3)$$

При полной адаптации наблюдателя к темноте задействована лишь система палочек. Тогда получим аналогично уравнению (1):

$$L_{eq} = L' = K'_{\max} \int_{\lambda} V'(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где  $K'_{\max} = 1700 \text{ лм/Вт}$ ;  $V'(\lambda)$  означает относительную спектральную световую эффективность для «ночного зрения», как она была определена МКО в 1951 г. [6]. Величина  $V'(\lambda)$  объясняется с точки зрения физиологии спектральной абсорбцией особого вещества, содержащегося в палочках (родопсина), преретинальной средой глаза. Здесь нет никакой проблемы аддитивности и гетерохромного сравнения светлоты. Связь «скотопической» яркости  $L'$  и  $L$  осуществляется из (1) и (4), и должна вычисляться для всякого вида света или определяться двумя независимыми измерительными приемниками излучения.

Вообще следует считать, что ответ зрительной системы на светлоту осуществляется тремя компонентами колбочек и палочками. Затем  $L_{eq}$  должна складываться из «скотопической» яркости и из трех координат цвета измеряемого излучения, т. е. из величин систем колбочек и палочек, которые уже установлены международной практикой. С точки зрения измерительной техники необходимы 4 независимые приемника.

Это было впервые доказано исследователем Кокошкой [7] в мезоптической области. Затем  $L_{eq}$  определяется с допустимым приближением из линейной комбинации  $L'$  и трех координат цвета, где коэффициенты характерным образом зависят от уровня возбуждения, т. е. от  $L_{eq}$ . При снижении яркости измеряемого излучения возрастает активация системы палочек, в то время как компоненты колбочек реагируют по-разному. «Приемник красного цвета» значительно приглушается, в то время как активность «приемника зеленого цвета» сначала возрастает, а под конец быстро падает. «Приемник синего цвета» вносит лишь

совсем малый вклад, однако его активность возрастает еще сильнее, чем активность зеленого и падает лишь при очень низком уровне возбуждения. Это положение объясняет так называемый эффект Пуркинье, который нельзя объяснить только переходом на систему палочек. В 1976 г. были предложены такой измерительный прибор и фотометрическая система [8].

В фотоптической области работы Кларка и Трезона [9] как раз и подтвердили 4-компонентную теорию светлоты. Однако до сегодняшнего дня не имеется законченной системы МКО, опирающейся на данные физиологии. Методом аппроксимации была предложена эмпирическая формула для поля сравнения  $2^\circ$ .

$$L_{eq} = L \cdot 10^{C(x, y)} \quad (5)$$

для  $y > 0,02$ , где  $C(x, y) = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657y^4$ ;  $x, y$  — координаты цветности измеряемого излучения [10]. Линии постоянных отношений величин возбуждения на цветовом графике представлены на рис. 3. Эти линии отражают эффект Гельмгольца — Кольрауша. Для почти ахроматического излучения соотношение величины возбуждения составляет примерно 1, точно так же как для спектрального возбуждения в диапазоне 585—550 нм. Сообразно с этим правильно по их яркости оцениваются, например, натриевые лампы низкого давления, в то время как при предельно коротковолновом и длинноволновом излучении эквивалентная яркость составляет 1,5 или 1,7 единиц от яркости по МКО.

Вообще следует рассматривать в качестве стимула светлоты эквивалентную яркость, а не «яркость по МКО». В зависимости от предъявления и наблюдения используют различные «инструкции для измерений» для  $L_{eq}$  как ком-

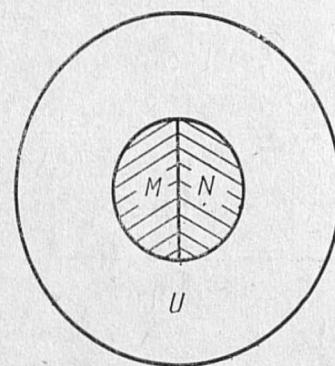


Рис. 1. Поле предъявления для прямого сравнения светлоты:  $M$  — измеряемое излучение;  $N$  — стандартное излучение;  $U$  — фон

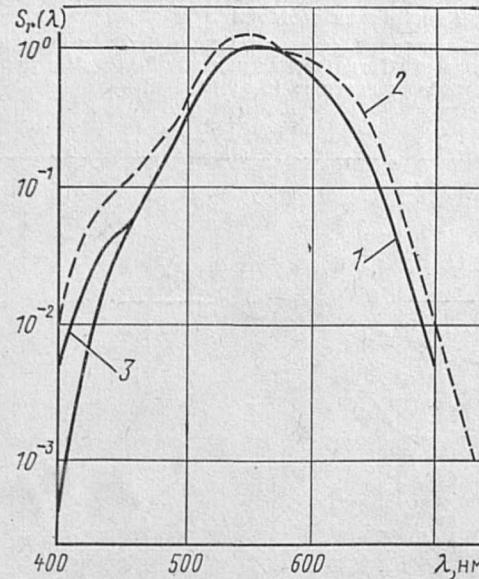


Рис. 2. Относительная спектральная световая эффективность  $B_2(\lambda)$  среднего глаза для поля  $2^\circ$  (фиксация поля на фовеа — светлоадаптированный наблюдатель):

1 — сравнение методом мельканий [1]; 2 — прямое сравнение светлот [3]; 3 — данные по Д. Джадду, 1951

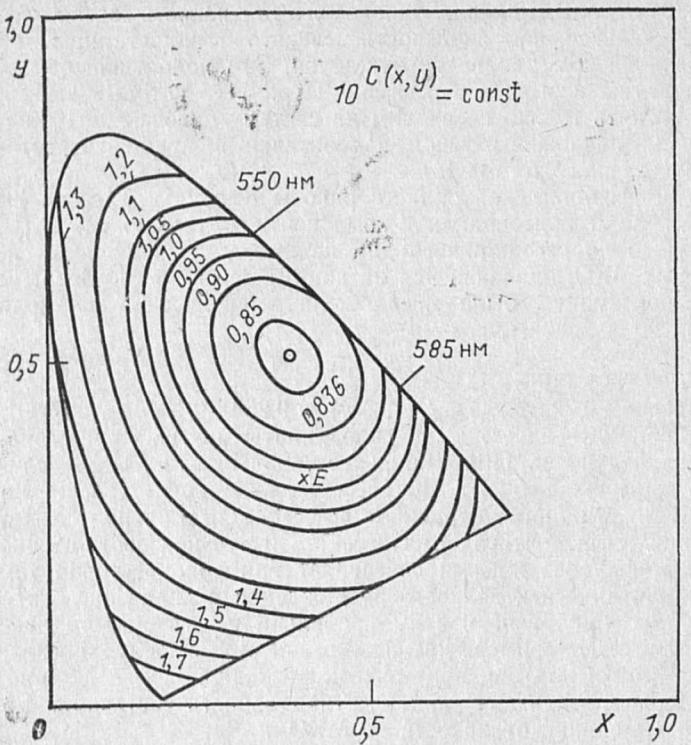


Рис. 3. Координаты цветностей с постоянным отношением  $L_{eq}/L$  для фотоптического центрального поля сравнения  $2^\circ$  [10]

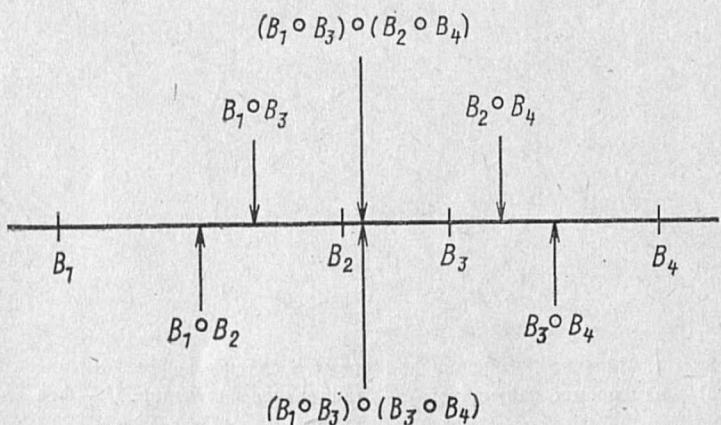


Рис. 4. К доказательству бисимметрии операции «усреднения» (символ  $\circ$ ) при восприятии светлоты

$B_1, B_2, B_3, B_4$  — светлоты, соответствующие четырем стимулам в континууме ощущений. Тогда усреднение  $(B_1 \circ B_2) \circ (B_3 \circ B_4)$  должно быть равно по светлоте усреднению  $(B_1 \circ B_3) \circ (B_2 \circ B_4)$

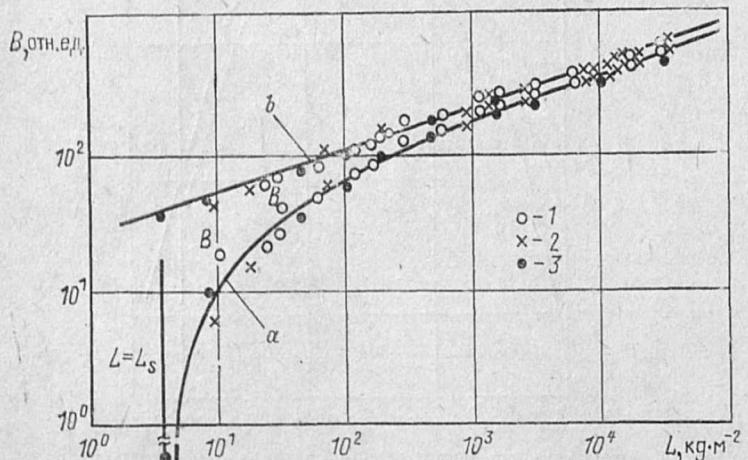


Рис. 5. Связь между светлотой и яркостью для примерно бесцветных световых стимулов в  $2^\circ$  на фоне яркостью  $L_u$ . Единица шкалы светлот произвольна 1 — середина; 2 — выборочная проба 1; 3 — проба 2

бинированного ответа задействованных рецепторов. Нелинейная комбинация ответов рецепторов определена (5). Отсюда нельзя судить по относительной спектральной светочувствительности  $B_2(\lambda)$  (см. рис. 2) о  $L_{eq}$ . Напротив, можно использовать (5) для спектрального возбуждения и получить функцию  $B_2(\lambda)$  по [11] с допустимым приближением.

3. Шкалирование светлоты. В предыдущем разделе мы рассматривали яркость или эквивалентную яркость в качестве меры светлоты. Мы должны попытаться в качестве следующего шага последовательно связать интенсивность ощущения светлоты на более высоком метрическом уровне со стимулом светлоты. Этот вопрос ставится по крайней мере 100 лет, вызывая споры (Фехнер, Стивенс, Джемисон и Гурвич, Бартлесон и др.).

Если ощущение светлоты вообще обладает метрическими свойствами, то должны быть выполнены определенные аксиомы или инвариантные свойства, которыми обладает метрическая шкала. Существование шкалы интервалов очевидно и не нуждается в доказательствах, если ответ однозначен, постоянен и бисимметричен, причем образование дистанций (интервалов) позволяет лишь полусимметрию [12]. Наличие бисимметрии светлоты иллюстрирует рис. 4. При этом наблюдатели должны таким образом отрегулировать световой стимул ИС, чтобы разница светлоты между двумя заданными стимулами была одинаковой и чтобы эта «операция» усреднения привела к однаковому результату, независимо от того, как задан интервал светлоты  $B_1-B_4$ . На этой основе Хаубнер [13] доказал существование шкалы интервалов для почти ахроматических стимулов на равномерном поле окружения. Несмотря на это, испытуемые при равных условиях эксперимента должны были сообщить путем оценки величин соотношение светлоты между исследуемым стимулом и стандартным. Полученная таким образом шкала оказалась линейной трансформацией шкалы, полученной усреднением, что приводит к метрической шкале светлоты. Очевидно наша система восприятия в состоянии определить разницу и соотношение светлоты. Как раз это и оспаривалось до сих пор. Кроме того, анализ цифрового материала показал, что признаком светлоты является одномерность и в высокой степени детерминированность стимула, по крайней мере для ахроматических стимулов. Обобщение результатов шкалирования иллюстрирует рис. 5. Для темного поля окружения ( $L_u=0$ ) действует степенной закон  $H \sim L^{0.31}$ . При светлом поле окружения  $L_u=300$  ( $\text{кд}/\text{м}^2$ ) должен быть определен постоянный уровень светлоты  $H_0$ , как предсказывает модель индукции Джемисона и Гурвича. Коррекция стимула, как было предложено Стивенсом, напротив, цели не достигает.

С помощью функциональной модели (рис. 5), которая основывается на трех положениях, опирающихся на данные физиологии, можно объяснить: 1) перенос внешних образов яркости на рецепторы с помощью наложения передаточных функций глаза; 2) нелинейное преобразование образов стимула сетчаткой глаза с помощью степенной функции; 3) горизонтальная связь (связывание) рецепторных сигналов на нейронном уровне.

Для тест-объекта возьмем величину угла зрения  $\varphi$  и яркость объекта  $L_t$ , а яркость поля окружения —  $L_u$ . Отсюда следует связь светлоты и яркости:

$$H = C_t(\varphi) L_t^n - H_0(L_u, \varphi), \quad (6)$$

где  $H_0 = C_t(\varphi)[S_0(\varphi) + S_1(\varphi)L_u^n]$  при  $n=0.31$ . Параметры  $C_t$ ,  $S_0$  и  $S_1$  приведены в таблице.

$\varphi/\text{мин}$	$S_1(\varphi)$	$C_t(\varphi)$	$S_0(\varphi)$
10	30,747	0,27308	0,39842
20	27,971	0,20132	0,35557
30	26,235	0,17975	0,31888
60	23,973	0,13133	0,26578
90	23,415	0,10868	0,25265
100	23,128	0,07473	0,24943
120	22,969	0,07186	0,24481

Эта модель Хаубнера не только дает функциональное объяснение рис. 5, но и объясняет также зависимость уров-

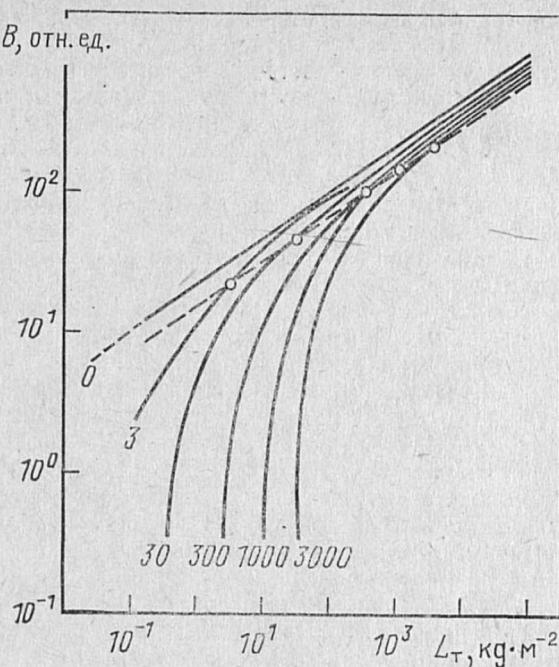


Рис. 6. Графические характеристики светлоты на основе модели Хаубнера [13]

Параметры: яркость фона  $L_u$ , кд·м $^{-2}$ , угол зрения  $\phi=120'$

ня черного порога (при  $H=0$ ) от яркости поля окружения и от угла зрения. В свою очередь на основании уровня черного порога можно судить о нейронных связях.

Из (6) получают графические (рис. 6) характеристики светлоты  $H(L_t, L_u, I)$  для  $\phi=2^\circ$ . Предложенные ранее шкалы светлоты (Фехнер, Стивенс, Марден, Бодманн и Фойт) оказываются частными приближениями к модели Хаубнера.

Практическое значение метрической шкалы светлоты заключается в том, что яркости и контрасты яркостей можно перевести в точные численные значения. Таким образом, разница светлот является определяющим фактором для заметности световых сигналов и вообще предпосылкой для визуального руководства как в помещении, так и на улице. Однако потребуется еще много работы, чтобы можно было провести общую оценку светлоты освещенных сцен с любым местным, времененным и спектральным обобщением световых стимулов.

**4. Обнаружение и различие.** Визуальное восприятие происходит вследствие фиксаций (движение глаз) и резких скачкообразных движений глаза, которые мы едва замечаем, разве что при чтении. То, что мы видим, воспринимается в паузах фиксации, которые делятся примерно 0,2—0,4 с. В течение этого времени зрительный знак может быть воспринят фoveально или экстрафовеально. При этом следует различать воспринимается ли только наличие зрительного сигнала, например, светового сигнала (обнаружение) или узнается форма зрительного сигнала, например, разница между буквами  $O$  и  $D$  (различие).

Обнаружение зрительного знака во время фиксации на пустом поле равномерной яркости может быть описана приблизительно одной функцией [14], например,

$$P_q = 1 - 2^{-VL} = 1 - 2^{-\left(\frac{VL_0}{K(\beta)}\right)^a}. \quad (7)$$

Причем  $P_q$  означает вероятность восприятия на фиксацию (probability per glimpse) и  $VL$  — соотношение от имеющегося к пороговому контрасту ( $P_q=0,5$ ) знака. Показатель  $a$  определяет крутизну кривой в форме  $S P_q(VL)$  и может иметь значение от 3 до 4.

При экстрафовеальном предъявлении тест-объекта под углом  $\beta$  к оси зрения  $VL=VL_0/K(\beta)$  [где  $K(\beta)$  — пороговый контраст относительно  $\beta=0$ ].  $VL$  практически идентичен видимости по МКО (публ. 19/2), определенной для периодического предъявления в 0,2 с с интервалом в 0,8 с при сфокусированном глазе. Функция  $P_q(VL)$  вместе с результатами измерения Флека [15] представлена на рис. 7.

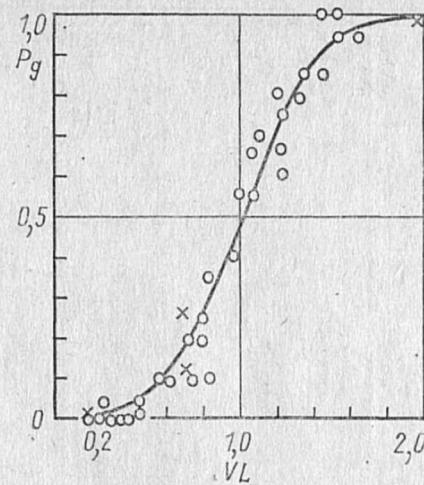


Рис. 7. Вероятность обнаружения знаков на экране [15]:  
 $P_q$  — суммарная частота обнаружения;  $VL$  — отношение контраста к пороговому контрасту для знака. Предъявление: фoveальное и экстрафовеальное, время предъявления 300 мин  
 $\times$  — фovea;  $\circ$  —  $\beta=7^\circ \pm 27^\circ$

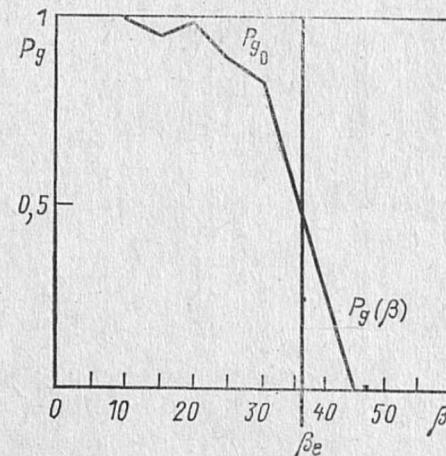


Рис. 8. К определению эффективного углового размера  $\beta_e$  поля зрения из зависимости  $P_q(\beta)$

С помощью  $VL$  в качестве величины стимула получают по существу одну и ту же функцию зрительной вероятности независимо от размера объекта, яркости поля окружения и угла предъявления  $\beta$ . По теории обнаружения сигналов можно связать  $VL$  с соотношением сигнал-шум [14].

Из функции  $P_q(VL_0, \beta)$  получают для точного  $VL$  вероятность обнаружения для различных углов  $\beta$  и отсюда расширение поля видимости (visibility lobe). Эффективный угол радиуса  $\beta_e$  этого поля задается формально путем интегрирования функции  $P_q(VL_0, \beta)$  по телесному углу  $\beta$  путем замены «воронки» половинным разводом угла  $\beta_e$  [16]:

$$2\pi \int_0^{\beta_{max}} P_q(VL_0, \beta) \sin \beta d\beta = 2\pi (1 - \cos \beta_e). \quad (8)$$

Схематично это обозначено на рис. 8.

На рис. 9 показаны графики  $\beta_e$  при обнаружении объекта в виде круга в  $20'$  в области ночной уличной яркости по измерениям Гройля [17]. Поле видимости сначала быстро растет с яркостью поля окружения, затем рост замедляется. При движении городского транспорта в целях безопасности как раз важно своевременно заметить препятствия, появляющиеся сбоку.

Вообще поле обнаружения тест-объекта (на пустом фоне) простирается далеко на периферию. По (7)  $P_q$  при каждом значении  $\beta$  достигает значения 1, если контраст является достаточно большим. Напротив, поле различения даже при высоком контрасте не заходит за предельный угол  $\beta_{max}$ , который зависит от размеров детали. Увеличение контраста ведет здесь исключительно к резкому паде-

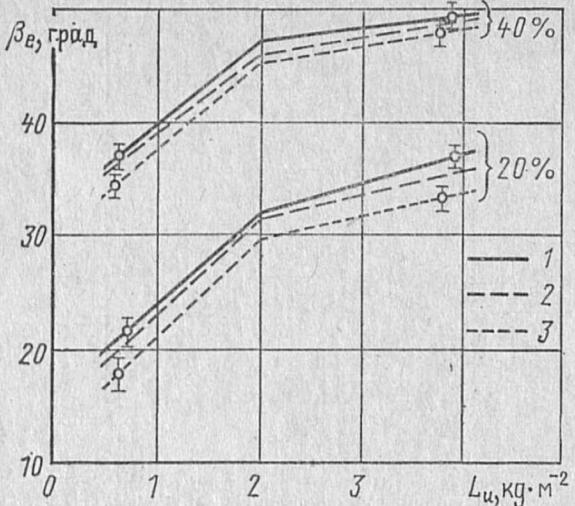


Рис. 9. Эффективный угол  $\beta_e$  для обнаружения круга 20' на равномерном фоне [17]:  
1 — без нагрузки; 2 — легкая нагрузка; 3 — сильная нагрузка

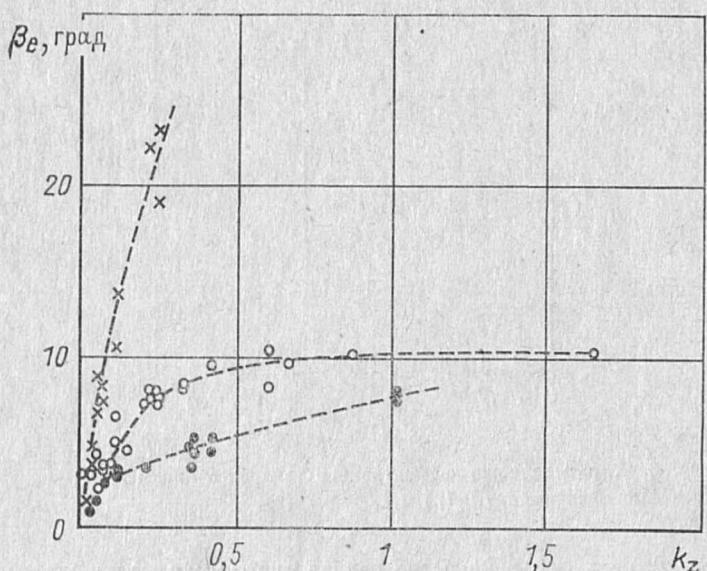


Рис. 10. Эффективный угол  $\beta_e$  для поля зрения знака на экране [15]:  
× — обнаружение (тест O, D; 36'×18';  $L_u=20$  кд·м⁻²); ○ — различие O или D; ● — различие D в ряду мешающих букв O. Кривые можно объяснить с помощью модели Флека.

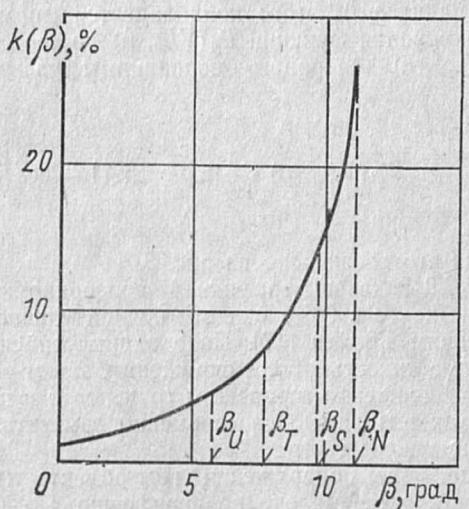


Рис. 11. Разделение функции  $K(\beta)$  (различение) на четыре различных участка.

Границные углы  $\beta_U$ ,  $\beta_T$ ,  $\beta_S$ ,  $\beta_N$  характеризуют выбор по возрастающей пространственной частоте (рецептивные поля различных величин возбуждающего центрального поля)

нию  $P_q$  на границе поля видимости. Если знак укладывается в поле окружающих его знаков (знаки-помехи), то поле видимости значительно сужается. Здесь играет решающую роль контраст яркости между зрительным знаком и знаком-помехой. Подобное сужение периферийного восприятия обнаружил Фосс [14] при возрастающей нагрузке наблюдателя в центральном поле зрения (пересечение перекрестка) (рис. 9). Однако малые колебания яркости фона мало влияют на обнаружение и различение. Расширение поля видимости типичных знаков экрана [15] иллюстрировано рис. 10.

Эти положения могут по существу объясняться по Флеку [15] структурой приемника, имеющегося в сетчатке. Модель исходит из передачи контраста в глазу для разных пространственных частот. По Вильсону и Бергену [18] можно передаточную функцию контраста (Modulation Transfer Function MTF) представить на каждом участке сетчатки из четырех фильтрующих каналов, которые работают, суммируя вероятности. С точки зрения физиологов фильтрующие каналы представлены различными по размеру рецептивными полями с центром возбуждения и периферийного торможения, что соответствует полосовому фильтру для пространственных частот. Ширина полосы обратно пропорциональна величине центра возбуждения, которая возрастает для всех каналов почти линейно с углом  $\beta$ . Чтобы можно было различить деталь, по крайней мере одно из четырех рецептивных полей должно быть достаточно малым. Если наблюдается буква заданной сложности, проецирующаяся на разные участки от фовеа к периферии, то сначала реагируют все 4 канала со своей местной максимальной чувствительностью, пока не начнут отключаться один за другим более глубокие каналы. В этом случае относительный пороговый контраст  $K(\beta)$  должен в большей или меньшей степени явно измениться. Предельный угол  $\beta_N$ , при котором выпадает даже самый уточненный из имеющихся там каналов, соответствует границе опознания  $\beta_{max}$  детали с очень крутым подъемом функции  $K(\beta)$  (рис. 11).

В отличие от различия при обнаружении фильтрующие каналы не выпадают при увеличении предельного угла  $\beta_U$ ,  $\beta_T$ ,  $\beta_S$ ,  $\beta_N$ . Контрастная чувствительность по закону Рикко наоборот отступает к центру поля рецепторов, в то время как образ знака не превышает величины центра поля. Результатом этого является прогрессирующее уменьшение общего ответа 4 каналов с возрастающим  $\beta$ . Данное уменьшение следует учитывать также и при различении. На этой основе Флек разработал уравнения модели для  $K(\beta)$  — функции для задач различения и обнаружения. Пример для сопоставления модели и эксперимента показан на рис. 12. Важным параметром модели является предельный угол  $\beta_N$ , так как остальные предельные углы четко с ним соотносятся, равно как и местная максимальная чувствительность четырех каналов. Из функции  $K(\beta)$ , полученной путем регрессивного анализа, получается жесткая зависимость между  $\beta_N$  и размером зрительного знака или детали, а также между  $\beta_N$  и яркостью фона. При наличии знаков-помех модель исходит из того, что помеха в качестве шума воздействует на общий ответ всех каналов [14]. Если же известен фовеальный пороговый контраст или  $V_L$  знака, то можно в первом приближении определить по (7) и (8) угол  $\beta_e$  видимых полей для различных зрительных задач, как это показал Флек. Это основы для лучшего понимания полей видимости, которые со своей стороны оказывают существенное влияние на успешность опознавания объекта [16, 19, 20]. Чем дальше на периферии распознается зрительный знак, тем меньше требуется глазу фиксаций для идентификации знака. Наоборот, нам нет необходимости в этом случае точно фиксировать изображение знака, чтобы идентифицировать его. Связь видимого поля, реакции глаза и успешности опознавания объекта описан на модели Индицкий [16].

5. Переходная адаптация. До сих пор мы пренебрегали тем, что наш глаз оптимально приспособлен к предлагаемому уровню светового возбуждения. В помещении наш взгляд блуждает от рабочего места на поле окружения (пол, стена, потолок), включая светильники и окна с постоянно меняющимся уровнем светового возбуждения. Еще драматичнее обстоит дело со сменой светового стимула

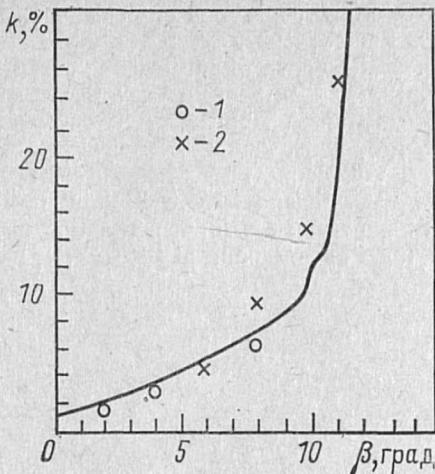


Рис. 12. Рассчитанная кривая  $K(\beta)$  для различения знаков  $O$  и  $D$  по сравнению со стандартной  
1 — слева; 2 — справа

при въезде в туннель днем или при выходе из ярко освещенного помещения ночью. Способность глаза настраиваться к быстро меняющейся группе световых стимулов является важным вопросом светотехники к физиологии.

В рамках данного сообщения в заключение мы остановимся на одном идущем в настоящее время эксперименте, в котором исследуется ход изменения во времени центральных и периферийных пороговых контрастов после скачка яркости поля окружения. Из практических соображений нас интересует промежуток времени между 0,1 и 1 с после скачка, так как в ситуации опасности знак должен обнаруживаться и идентифицироваться с минимальным количеством фиксаций.

Типичная зависимость от времени порогового контраста представлена на рис. 13 для фoveального опознания буквы за время  $\tau$  после скачка яркости от 2000 до 8 кд/м<sup>2</sup> и наоборот [21]. Относительный пороговый контраст изображен в соответствии с его стационарной конечной величиной. Наша зрительная система адаптируется в области фотопической в течение нескольких секунд, при обратном скачке практически в течение одной секунды. Бросается в глаза критический участок в диапазоне 0,2—0,3 с, указывающий по крайней мере на два механизма адаптации в фотопической области, которые уже были открыты Шутеном и Ориштейном [22], названные затем  $\alpha$ - и  $\beta$ -адаптацией. При периферийном предъявлении зрительного знака в принципе проходит примерно такое же время [23], однако адаптация в начальной фазе осуществляется быстрее, чем в фoveе. При  $\tau \approx 1$  с сетчатка, где расположено изображение знака, не играет больше никакой роли для состояния адаптации.

Следующий вывод касается влияния размеров поля окружения (поля адаптации) на переходный пороговый контраст. Начиная с размера поля примерно в 10° расширение поля окружения практически также не играет никакой роли. Если поле адаптации ограничено, но расположено вокруг фovee, то восприятие контраста будет затрудняться в увеличивающейся степени из-за последовательных образов, так как кривые на рис. 13 при более высоких значениях  $\Phi$  начинают возрастать и только позже достигают своих конечных значений. Это является особенно ответственным для длительного времени реадаптации после вспышки автомобильных фар на темном поле окружения.

С точки зрения физиологов процесс адаптации глаза сводится к фотохимии зрительного вещества, к переработке возбуждения сетчаткой глаза и передаче нервного возбуждения в высшие центры, а также реакции зрачка. В настоящее время еще не существует законченной модели. Для разрушения и восстановления зрительного вещества служит следующее уравнение:

$$\frac{ds}{dt} = -k_1 E_{ret} s + k_2 (1 - s), \quad (9)$$

где  $s$  — концентрация зрительного вещества (относительно максимальной величины);  $E_{ret}$  — освещенность сетчатки;

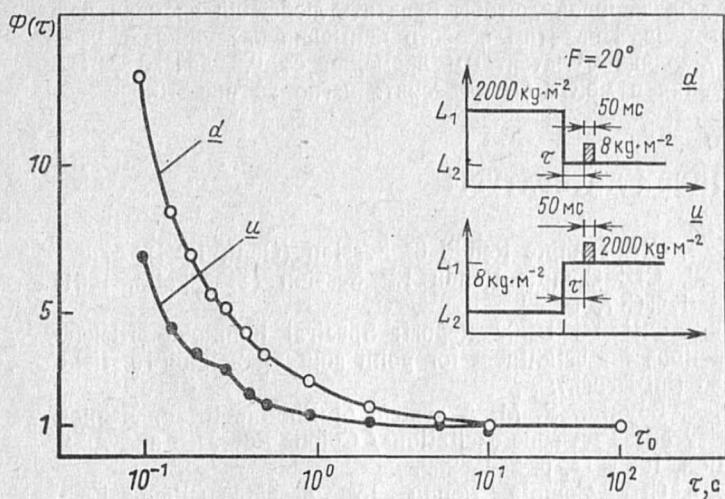


Рис. 13. Зависимость от времени фoveального порогового контраста узнавания буквы после скачка яркости поля адаптации  $F$  [21]  
 $\Phi$  — отношение мгновенного порогового контраста к его стационарному значению. Параметры опыта: буквы 20'

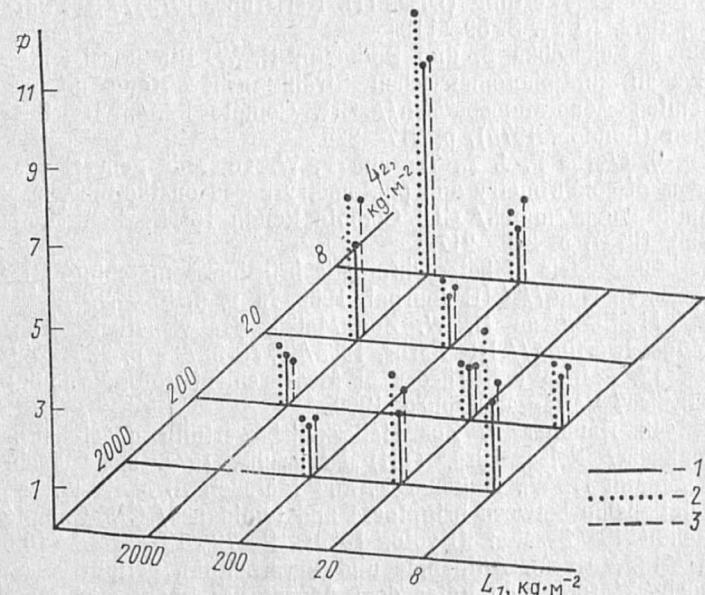


Рис. 14. Сравнение измеренного и расчетного значения  $\Phi$  для времени  $\tau=0,3$  с после скачка яркости фона с  $L_1$  до  $L_2$  [21]  
Параметры опыта (кольцо Ландольта): — экспериментальная; ··· МКО публикация; — модуль Фрайя

$k_1, k_2$  — скорости реакции распада и восстановления зрительного вещества, установленные Раштоном [24]. Исходя из этого фотохимический процесс слишком медленно протекает, чтобы с его помощью можно было бы объяснить быстрые фазы адаптации. Однако тип дифференциального уравнения (9) и его решение часто были использованы в качестве уравнения модели для временных феноменов контрастного зрения (см. например, [25]). Подставляя постоянные и вводя экспоненты, можно надежно описать отдельные фазы адаптации с помощью (9). Фрай [26], наоборот, разработал многоступенчатую модель адаптации, допуская, что в сетчатке глаза протекают еще два процессы ( $\alpha$  и  $\rho$ -адаптации), соответствующие типу (9) и работающие в фотохимическом процессе в качестве цепи усиления (gain control). Таким образом, возникает система связанных дифференциальных уравнений с единственным законом постоянных реакций. Связь с относительным пороговым  $\Phi(\tau)$  освещена в [21]. При модификации констант данных Фрайем действительно можно описать большую часть экспериментальных результатов. Сравнение результатов измерений с результатами расчета для времени  $\tau=0,3$  с представлено на рис. 14. Для этого времени МКО (публ. 19/2) дает эмпирическую формулу для  $\Phi$ , которая основана на измерениях Бойтона и др. [27] и Блэквуда [28]. В целом результаты действительно хорошо согласуются. Однако остается открытым вопрос, модифицируется ли и насколько

ко модель Фрайя, чтобы охватить любое по времени поле стимулов. При этом особого внимания заслуживает реакция зрачка с латентным временем от 0,2 до 0,3 с. Эта реакция и могла бы объяснить изгиб на рис. 13.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. CIE Compte Rendu 6<sup>e</sup> Session (Genf, 1924), 67.
2. CIE Compte Rendu 12<sup>e</sup> Session (Stockholm, 1951). Vol. 1, TC 7, 1—52.
3. CIE TC 1—02 Report: Spectral luminous efficiency functions for brightness for point sources, 2° and 10° fields, 1986 (im Druck).
4. Boynton R. M. A system of Photometry and Colorimetry based on cone excitations/ Colour Research and Application, 1986, 11, p. 244—252.
5. CIE Compte Rendu 15<sup>e</sup> Session (Wien, 1963). Vol. B, p. 209—220.
6. CIE Compte Rendu 12<sup>e</sup> Session (Stockholm, 1951). Vol. 3, p. 37.
7. Kokoschka S. Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung (Diss. TH. Karlsruhe, 1972)// Die Farbe, 1972, № 21, S. 39—112.
8. Kokoschka S. und Bodmann H. W. Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbewertung im gesamten Adaptationsbereich// CIE Compte Rendu 18<sup>e</sup> Session (London, 1975), p. 217—225.
9. Clarke F. J. J., Trezona P. W. Towards general systems of colourimetry and photometry based on the tetrachromatic colour match/ CIE Compte Rendu 18<sup>e</sup> Session (London, 1975), p. 205—217.
10. Models of heterochromatic brightness matching. CIE Research Note// CIE Journal, 1986, № 5, p. 57—59.
11. Bodmann H. W. Zur Metrik der visuellen Strahlungsbewertung// Die Farbe, 1985/86, № 32/33, p. 235—249.
12. Pfanzagl J. Theory of Measurement (Monographie) Physica/ Verlag Würzburg, 1969.
13. Haubner P. Zur Helligkeitsbewertung quasi-achromatischer Reize, Diss. (TH) Karlsruhe, 1977, siehe auch: Bodmann H. W., Haubner P. and Marsden A. M. A unified relationship between brightness and luminance/ CIE Compte Rendu 19<sup>e</sup> Session (Kyoto, 1979), P—79. 13, S. 90—102.
14. Voss M. Aufnahme und Verarbeitung peripherer visueller Information unter dem Aspekt der Beanspruchungsmessung. Diss. (TH), Karlsruhe, 1982.
15. Fleck H.-J. Zur peripheren Wahrnehmung von Sehzeichen. Diss. (TH), Karlsruhe, 1986.
16. Inditsky B. Analysis of visual performance, Theoretical and experimental investigation of visual search. Diss. (TH), Karlsruhe, 1978.
17. Greule R. Die Wahrnehmbarkeit peripherer Lichtreize bei nächtlichen Straßenleuchtdichten/ Diplomarbeit, Lichttechnisches Institut (TH), Karlsruhe, 1985.
18. Wilson H. R. und Bergen J. R. A four mechanism model for threshold spatial vision/ Vision Research, 1979, 19, p. 19—32.
19. Inditsky B., Bodmann H. W. und Fleck H.-J. Elements of visual performance, contrast metric-visibility losses-eye movements/ Lighting Research and Technology, 1982, 14, p. 218—231.
20. Kokoschka S. Zeichenkontrast und visuelle Leistung am Bildschirm, in H. W. Bodmann (Hrg) Aspekte der Informationsverarbeitung — Funktion des Sehsystems und technische Bilddarstellung/ Springer Verlag, 1985, p. 254—300.
21. Bodmann H. W., Kokoschka S. und Greule R. Contrast thresholds at transient adaptation/ CIE Proceedings 21<sup>st</sup> Session (Venedig, 1987), Vol. 1, p. 50—53.
22. Schouten J. F. und Ornstein L. S. Measurements on direct and indirect adaptation by means of a binocular method// J. Opt. Soc. Am., 1939, 29, p. 162—182.
23. Möbius I. Periphere Kontrastwahrnehmung bei transienteiner Adaptation/ Diplomarbeit, Lichttechnisches Institut (TH), Karlsruhe, 1987.
24. Rushton W. A. H. Kinetics of cone pigments measured objectively on the living human fovea/ Annals N. Y. Acad. Sci. 74, 1958, p. 291—304.
25. Hecht S. Rods, cones and the chemical basis of vision// Physiol. Review, 1937, 17, p. 239—290.
26. Fry G. A. Response of the eye to a flash of light// Am. J. Optom. 1973, 50, p. 355—375.
27. Boynton R. M. Visibility losses caused by sudden luminance changes/ CIE Compte Rendu 16<sup>e</sup> Session (Washington, 1967), Vol. A, p. 171—182.
28. Blackwell O. M. and Blackwell H. R. Individual responses to lighting parameters for a population of 235 observers of varying ages// Journal IES (NY), 1980, 9, p. 205—232.

## ДИСКУССИИ

УДК 628.9 : 329.016

### ИНТЕРВЬЮ ЖУРНАЛА

Журнал «Светотехника» провел интервью ряда ведущих специалистов-светотехников и ученых смежных областей по проблемам развития основных направлений светотехнической науки, техники и промышленности.

Специалистам были заданы следующие вопросы.

1. Как Вы оцениваете состояние развития вашей области светотехники в нашей стране и в чем Вы видите отставание [если оно имеется] от мирового уровня?

2. Каковы перспективы развития вашей области светотехники в мире до 2000 года?

3. Каковы с Вашей точки зрения основные задачи на ближайшее пятилетие?

Продолжаем публиковать полученные ответы. (Начало — «Светотехника», 1989, № 8, с. 14—17; № 9, с. 15—18; № 10, с. 18—20; № 11, с. 13—14)

Рохлин Г. Н., профессор, доктор технических наук



1. За послевоенные годы отечественная электроламповая промышленность, наука и подготовка кадров превратились в развитую подотрасль электротехники, которая обеспечивает нашу страну практически всеми современными ИС. Бурный рост выпуска разрядных ИС, и в первую очередь ЛЛ, начался с 60-х годов. В последние пятилетки осуществляется преумножительный рост выпуска высокoeffективных РЛ ВД. Общий объем выпуска ИС достиг почти 2,7 млрд ламп в год. Тем не менее потребность страны в отдельных видах ИС удовлетворяется не полностью.

Отечественные ИС общего применения (ЛН, ЛЛ, ДРЛ, МГЛ, ДНат) по своим техническим параметрам близки к среднему мировому уровню, если сравнивать данные ГОСТ и ТУ с данными каталогов передовых зарубежных фирм. Однако многочисленные отзывы эксплуатирующих организаций свидетельствуют о том, что фактически качество отечественных ИС по ряду параметров заметно ниже, в том числе по продолжительности горения, по спаду светового потока и некоторым другим параметрам (см. например, «Качеству источников света — особое внимание» — заседание «За круглым столом» — «Светотехника», 1988, № 1, с. 3—9).