

■ **От редакции.** Ниже публикуется полный текст статьи известного светотехника из Канады проф. В. Адриана и инж. Р. Гибсона "Зрительная работоспособность и ее метрика", в которой представлены и обобщены результаты фундаментальных исследований, имеющие большое значение для развития нормирования осветительных установок.

ЗРИТЕЛЬНАЯ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ЕЕ МЕТРИКА*

В. Адриан, доктор,
Р. Гибсон, инж.

Университет Ватерлоо, провинция Онтарио, Канада**

Для создания основы рекомендаций по обеспечению количественных и качественных характеристик внутреннего освещения была инициирована работа по выполнению сравнительного анализа различных исследований зрительной работоспособности (ЗР). В нашем распоряжении находилась только модель Rea [13], однако не ясно, отражают ли она результаты предыдущих и последующих исследований. Поэтому данные о ЗР брались из литературных источников и оценивались по применяемым критериям и экспериментальным условиям. Наиболее полные исследования, выполненные Weston [23], были использованы в качестве основы моделирования ЗР. Проведено сравнение данных Weston с результатами экспериментов Muck и Bodmann [28], Simonson и Brozek [17], Smith и Rea [18], McNelis [12], Loe и Waters [25], при этом обращалось внимание также и на совместимость использовавшихся критериев.

Кроме того, необходимо было исследовать влияние возраста наблюдателя на ЗР и на соотношение ЗР и остроты зрения (ОЗ). Понятие "зрительная работоспособность" включает в себя способность различать детали и необходимое для этого время. В задачах, основанных на оценке ОЗ, зрительная информация обрабатывается высокочастотными каналами (парвоклеточные каналы). Таким образом, можно ожидать, что связь между ОЗ и ЗР существует, хотя она всегда отвергалась, исходя из того, что ОЗ это пороговая характеристика, в то время как ЗР измеряется с задачами на сверхпороговом уровне. Данному вопросу будет уделено особое внимание.

■ **Модель, основанная на данных Weston.** Хорошо известные классические эксперименты по оценке ЗР были выполнены Weston [23]. Он применял таблицы с кольцами Ландольта разного контраста и с разными яркостями фона. От наблюдателя требовалось определить ориентацию разрыва каждого кольца. Weston предложил критерий оценки общей работоспособности, который учитывал точность (A) и скорость (S) этой операции:

$$A = \frac{N_{ci}}{N_0}; \quad S = \frac{N_{ci}}{t},$$

где N_{ci} - число правильно определенных колец; N_0 - общее число колец; t - время, мин.

* Перевод с англ. В.Н. Степанова.

** University of Waterloo, School of Optometry, Waterloo, Ontario, Canada N2L3G1.

Для получения точного времени выполнения непосредственно зрительной работы из общего времени вычиталось время, затрачиваемое на физическое перемещение рук. В итоге ЗР оператора (VP) определялась как

$$VP = A S.$$

Результаты этой работы, в которой изменялись размер критического элемента (разрыва в кольце), контраст кольца и яркость фона, могут быть представлены в виде системы уравнений:

Высокий контраст $C > 0,35$. Угловой размер объекта различия $\alpha > 1,5$:

$$VP = 0,5384(a - 1,499)x(\lg L_b + 0,09196)y(C - 0,2534)z, \quad (1)$$

где $x = 0,1194(\lg L_b + 1,923)0,08403(C + 1,516)^{-0,6549}$;

$$y = 0,8135(a - 1,182)^{-0,7831}(C + 1,054)^{-3,062};$$

$$z = 0,5745(\lg L_b + 0,2669)^{-0,3902}(a - 0,8302)^{-0,7637}.$$

Низкий контраст $C \leq 0,35$:

$$VP = 0,6577(a - 1,4999)x(\lg L_b + 0,035)y(C - 0,08521)z, \quad (1)$$

где $x = 0,082(\lg L_b + 0,11339)^{-0,6378755}(C + 0,02243)^{-0,23}$;

$$y = 0,1452(a - 0,0041)^{-0,18451}(C - 0,099)^{0,1168};$$

$$z = 1,291(\lg L_b + 0,264)^{-0,38675}(a - 0,218)^{-0,523};$$

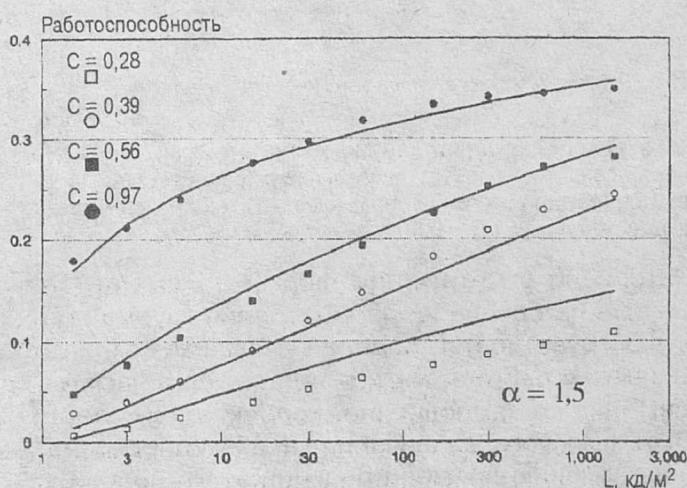
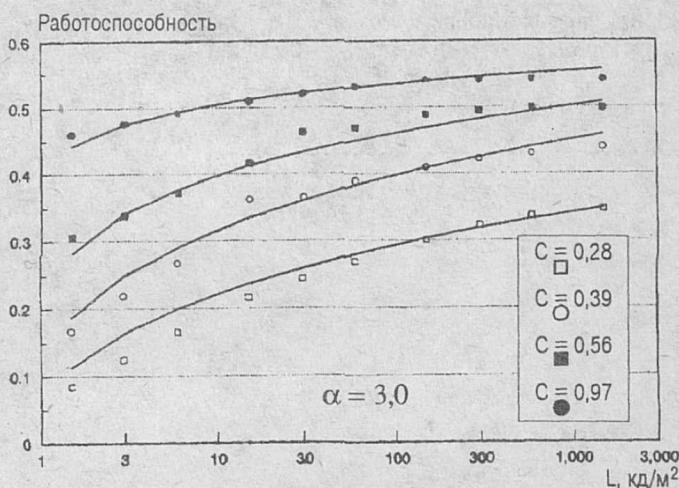
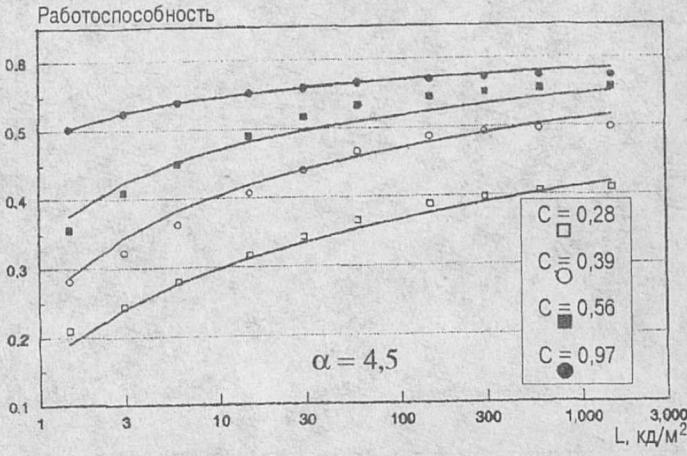
L_b - яркость фона, кд/м²; C - контраст объекта с фоном; α - угловой размер объекта, угл. мин.

На рис.1 показаны кривые, рассчитанные по (1). Эта модель хорошо описывает результаты, полученные Weston. В дальнейшем она была положена в основу проведения сравнений данных, полученных авторами, и системы Rea и Ouellette.

Уравнение (1) выражает оценку ЗР по шкале Weston. Для соотнесения этой шкалы с условиями достижения наивысшей производительности мы приняли, что VP = 1 для углового размера критической детали 4,5' при контрасте C = 0,9 и яркости фона 1000 кд/м². Это означает, что значения VP, получаемые из уравнения (1), следует умножать на 1,728.

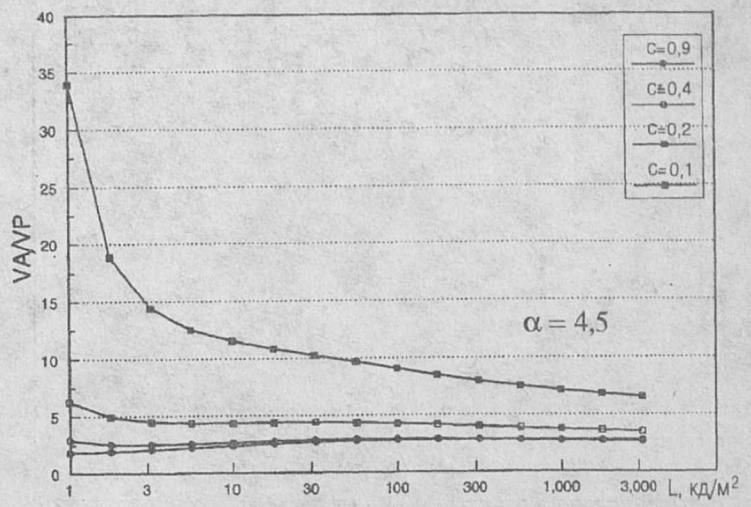
■ **Сравнение данных об остроте зрения.** Модель ЗР по Weston была использована, чтобы продемонстрировать связь между результатами измерений ОЗ, полученными Adrian (1967) и Spafford (1985) [30]. Интересно было сравнить отношение между ОЗ и ЗР для одних и тех же условий контраста и яркости (рис. 4, 5).

Из рассмотрения рисунков видно, что ЗР по Weston связана с ОЗ в широком диапазоне L, контрастов и угловых размеров объекта различия. Отношение этих двух метрик определяется размером и контрастом объекта и очень слабо зависит от L фона.

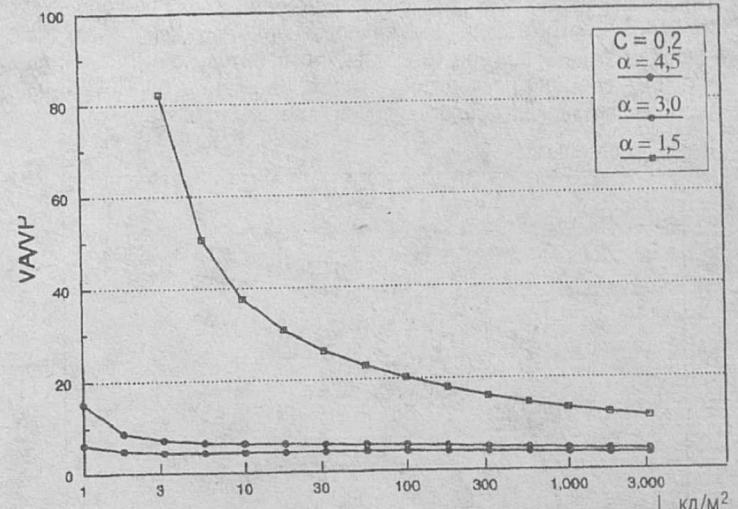


■ Рис.1 - 3. Сравнение данных Weston с результатами расчетов по формуле (1)

При низких уровнях L , малом размере и контрасте объекта оно резко возрастает (размеры объекта приближаются к пределу физического различия объекта глазом). Более того, это указывает на то, что при малых L и контрастах ЗР снижается за счет увеличения времени выполнения задачи, а ОЗ определяется при постоянном времени наблюдения в 2 с, и поэтому остается неизменной. Другими словами, ОЗ (VA), в отличие от относительной ЗР (RVP) не несет в себе переменного компонента времени. Это и может быть причиной отличия кривых на рис. 4 и 5 для небольших объектов и малых контрастов.



■ Рис. 4. Зависимость отношения ОЗ (VA) к ЗР (VP) по Weston от яркости

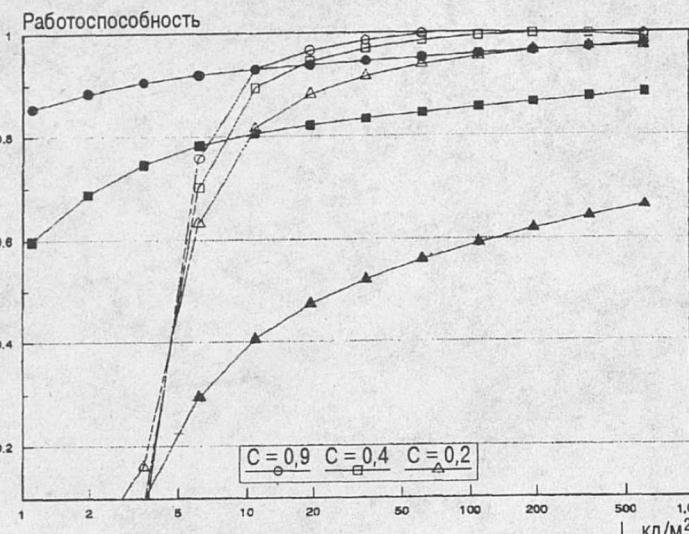


■ Рис. 5. Зависимость отношения ОЗ к ЗР по Weston от яркости при изменении α

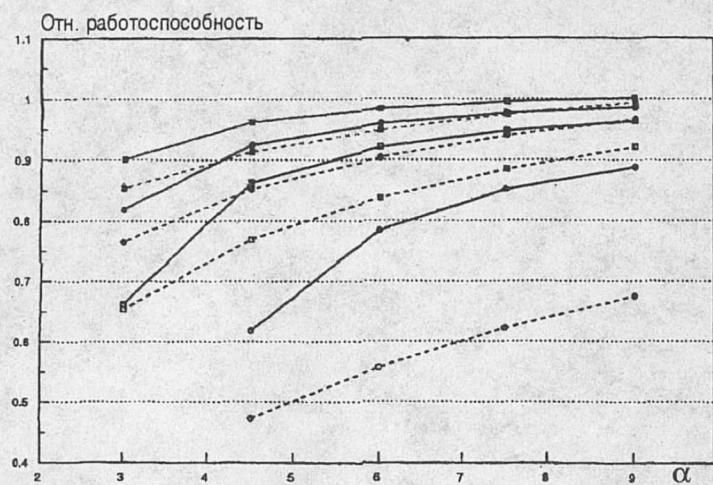
■ **Модель зрительной работоспособности Rea.** Rea [31], а позднее Ouellette [14], выполнили серию экспериментов по определению ЗР и предложили математическое описание результатов. Это позволило рассчитать относительную ЗР при различных световых параметрах. В результате на основе принятых критериев была создана всесторонняя модель ЗР.

Rea и Ouellette провели два отдельных эксперимента. Первый был основан на тесте числового сравнения [31], при котором наблюдатель должен провести сравнение двух списков чисел и обнаружить несовпадения. Контраст и L фона испытуемых таблиц изменялась, но размер цифр был постоянным. Скорость чтения и число ошибок являлись мерой ЗР. Позднее критерий количества ошибок при выполнении теста был отброшен и в качестве меры ЗР рассматривалась только скорость чтения. Доводом в пользу такого отказа являлось утверждение, что мера количества ошибок вносит незначительный вклад в оценку ЗР.

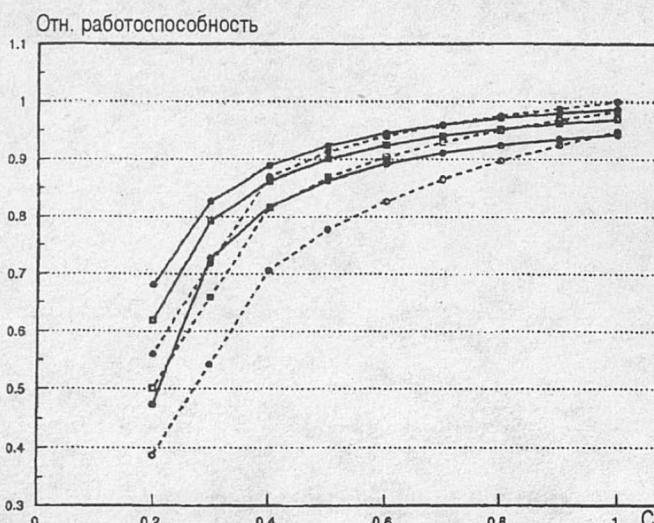
Во втором эксперименте измерялось время реакции. Наблюдатель отмечал момент обнаружения объекта, проецируемого на экран дисплея [14]. В эксперименте изменялся размер, L и контраст



■ Рис. 6. Данные Rea, полученные в экспериментах по корректуре цифровых таблиц и определению времени реакции (закрашенные маркеры относятся к относительной ЗР (RVP) на основе времени реакции, незакрашенные маркеры - к RVP на основе выполнения сопоставления числовых таблиц)



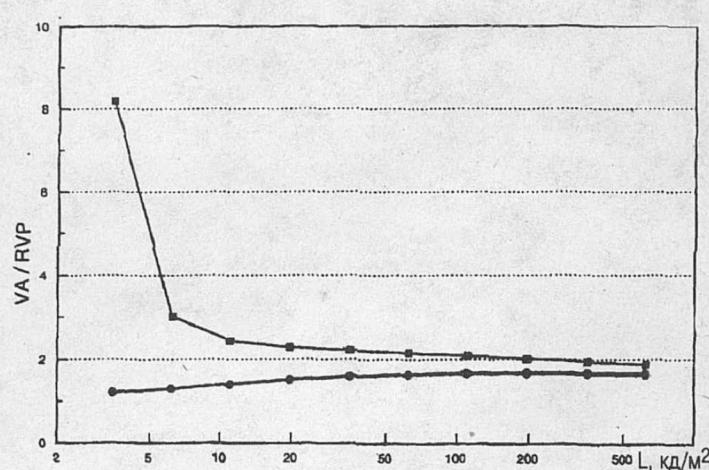
■ Рис. 8. Сравнение моделей Weston и Rea при изменении контраста и размера тест-объекта ($L = 100 \text{ кд} \cdot \text{м}^2$): ○ - $C = 0,2$; □ - $C = 0,4$; ● - $C = 0,6$; ■ - $C = 0,9$; — — модель Rea; - - - модель Weston



■ Рис. 7. Сравнение моделей Weston и Rea при изменении яркости и контраста (размер объекта в модели Rea определяется телесным углом, выраженным в стерадианах, критического элемента - размером $4.5'$): ○ - $L = 10 \text{ кд}/\text{м}^2$; □ - $L = 100 \text{ кд}/\text{м}^2$; ● - $L = 562 \text{ кд}/\text{м}^2$; — — модель Rea; - - - модель Weston

объекта. Мерой ЗР являлось время обнаружения объекта без различия деталей. Однако информация, необходимая для обнаружения, обрабатывается низкочастотными (магноклеточными) каналами в отличие от высокочастотного различия, использовавшегося в исследованиях Weston. Результатом проведенных экспериментов явилась модель расчета времени реакции наблюдателя.

Результаты этих экспериментов были обработаны отдельно, а затем было проведено их сравнение. После введения некоторых корректирующих коэффициентов результаты двух экспериментов стали конгруэнтными. Графики, отображающие эти две модели, приведены на рис.6. Для расчета ЗР на основе результатов эксперимента по обнаружению использовался эквивалентный квадратный тест-объект со стороной $4.5'$. Угловой размер буквы определяет размер объекта в корректурных экспериментах.



■ Рис. 9. Отношение остроты зрения к относительной зрительной работоспособности по Rea, основанной на оценках времени реакции (острота зрения измерялась для кольца Ландольта с разрывом $4.5'$): ○ - $C = 0,9$; ● - $C = 0,4$; ■ - $C = 0,2$

Интересно отметить, что формы кривых не совпадают и на основе их рассмотрения трудно выявить конгруэнтность моделей. Различия кривых объясняются работой магно- и парвоклеточных каналов, так как выполнение корректурного теста требует высокого различия, а в экспериментах по определению времени реакции этого не требуется.

Однако Rea и Ouillette использовали результаты определения времени реакции для разработки метода оценки ЗР.

Для расчета порогового контраста объекта в модели Rea используются освещенность сетчатки и телесный угол критичного элемента. Разница между фактическим и пороговым контрастами используется затем для оценки ЗР. При таком подходе возникают определенные сложности. Первая - как определить освещенность сетчатки? Rea предлагает формулу расчета размера зрачка, что несколько облегчает задачу. Вторая трудность - определение телесного угла. Необходимо проанализировать зрительную задачу, чтобы определить критический элемент. Это область противоречий.

Rea считает, что критическим элементом при чтении является телесный угол для закрашенного чернилами участка буквы, в то время как у кольца Ландольта определяется телесный угол для участка разрыва в кольце. Многие авторы считают, что критическим элементом при чтении является ширина штриха при написании буквы, так же как и в тестах по определению ОЗ. Но какой бы критический элемент не был принят, телесный угол рассчитать непросто. Rea утверждает, что задача упрощается, если для определения угла использовать видеосистему. Может быть это и так, но на наш взгляд это непрактично.

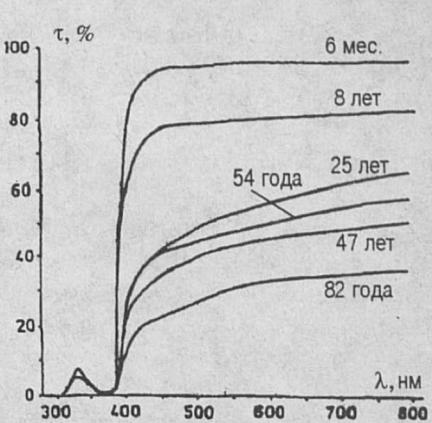
Сравнение моделей, основанных на данных Weston и Rea, при изменении контраста, яркости и размера объекта (α) показано на рис. 7 и 8. Разрыв в кольце Ландольта определял угловой размер критического элемента в экспериментах Weston, а величина площади этого разрыва использовалась в модели Rea.

Можно видеть, что кривые, основанные на данных Rea и Weston, имеют похожий ход, но разные абсолютные значения. Размеры объектов характеризовались угловой величиной критического элемента в модели Weston и телесным углом круглого объекта с тем же угловым размером для модели Rea. Соотношения для размеров тест-объекта очень близки. Однако эти графики демонстрируют, что модель Rea менее чувствительна к изменениям контраста, чем модель Weston. Причиной этого может быть метрика, используемая для оценки ЗР. Weston учитывал как скорость чтения, так и точность выполнения задачи, Rea регистрировал время реакции, а в другом эксперименте скорость чтения, но как и на рис.6, в последнем случае результаты очень разнятся от тех, что получены в эксперименте, где определялось время реакции.

Большой интерес представляет сравнение модели Rea с результатами определения ОЗ. На рис.9 приведено отношение ОЗ к ЗР, рассчитанное для тест-объекта с $\alpha = 4.5'$ и различных контрастов. Примечательна конгруэнтность отношений для различных контрастов, кроме диапазона ниже 0,2, это подтверждает нечувствительность к изменениям контраста в модели Rea. Контраст равный 0,2 близок к пороговому, рассчитанному для данного тест-объекта. На рис.9 снова видна взаимосвязь относительной ЗР и ОЗ, что еще раз подтверждает необходимость применения последней в качестве критерия оценки работоспособности.

Влияние возраста на зрительную работоспособность. С возрастом мы наблюдаем изменения в глазных средах, особенно в роговой оболочке и хрусталике. Кроме снижения общего пропускания светового излучения роговой оболочкой и, в большей степени, хрусталиком, изменяется спектральное пропускание глазной среды в синей части спектра; происходит так называемый эффект пожелтения, наиболее выраженный в хрусталике. На рис.10 показаны спектральные функции пропускания хрусталика с изменением возраста. Снижение пропускания в синей области связано с пожелтением хру-

сталика. Интересно отметить, что основные изменения происходят в сравнительно ранний период жизни. Помутнение хрусталика с возрастом вызывает увеличение рассеяния света. Глазные среды человека в возрасте 75 лет характеризуются почти в 2.5 раза большим рассеянием, чем в 25 лет [32].



■ Рис.10. Зависимость спектрального пропускания света глазными средами человека от возраста

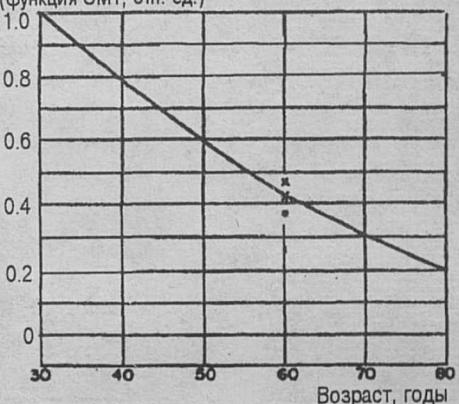
Функция интегрального пропускания глазных сред (ОМТ) показана на рис.11. Значения светопропускания приведены в относительных единицах, за базу взята характеристика глаз в возрасте 30 лет. Функция может быть численно выражена следующим выражением:

$$OMT = \frac{(Age - 110,2)}{69,8} + 7,9, \quad (2)$$

где Age - возраст, годы.

Функция выведена на основе экспериментальных данных Blackwell [8], которые приведены в Публикации МКО 19.2. На график нанесены также данные Weale и Verriest, полученные для наблюдателя в возрасте 60 лет. Из рисунка видно, что глаз человека в возрасте 80 лет имеет только 20% полного пропускания глаза в 30 лет.

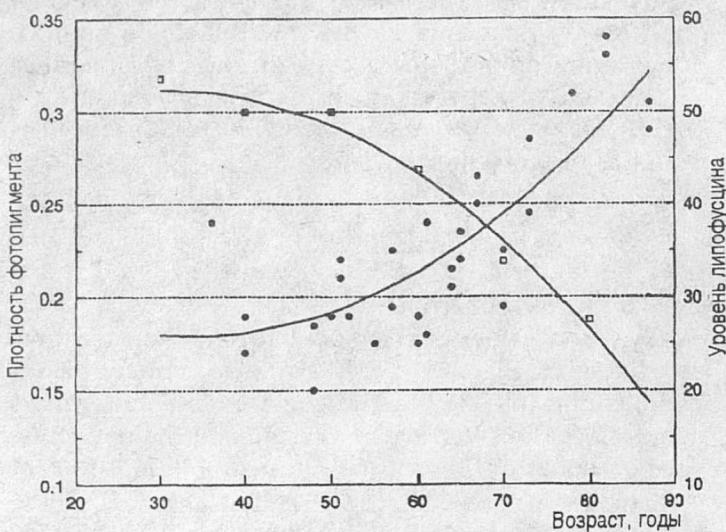
Однако эти оптические изменения в глазных средах не полностью объясняют то ухудшение зрения, которое наблюдается с возрастом. Оно проявляется прежде всего в уменьшении ОЗ или способности различать детали. Так как ОЗ взаимосвязана со ЗР, то именно на снижение ОЗ следует обратить особое внимание при исследовании. Основная причина снижения ОЗ заключается в возрастном отмирании зрительных и ганглиозных клеток. По данным Balluzzi [4], проводившим подсчет нервных волокон в зрительном нерве людей в возрасте от 20 до 79 лет, в год отмирает интегральное светопропускание (функция ОМТ, отн. ед.)



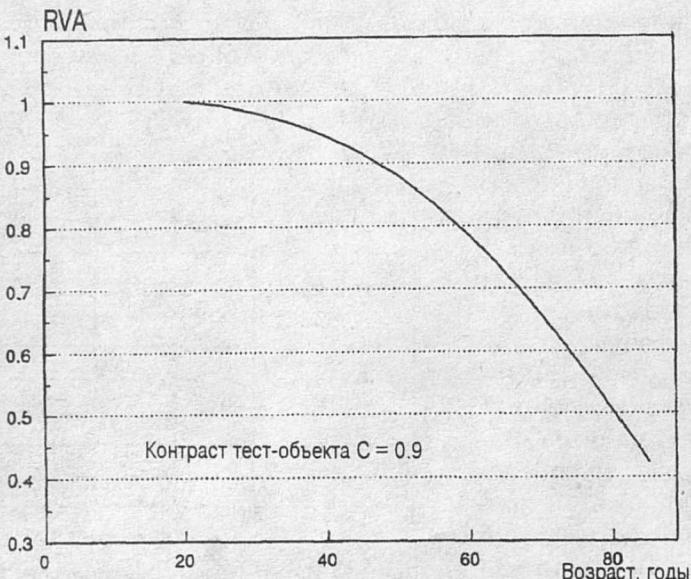
■ Рис.11. Интегральное светопропускание глазных сред человеческого глаза. Статистические данные по 234 наблюдателям в возрасте от 20 до 79 лет: x - Verriest (1971); o - Weale (1961)

около 5600 аксонов ганглиозных клеток, к 60 годам отмирают 366000 аксонов. Этот факт можно сопоставить с возникновением так называемого "возрастного протеина" - липофусцина в пигменте эпителия, который считается токсичным для клеток рецепторов. По данным о количестве липофусцина и плотности фотопигмента были построены зависимости, приведенные на рис.12 [20,30]. Были рассчитаны аппроксимационные кривые. Эти данные показывают, что плотность фотопигмента, которую можно считать соответствующей плотности фоторецепторов, снижается в той же мере, в какой увеличивается содержание липофусцина. Вероятно, ганглиозные клетки отмирают пропорционально снижению плотности рецепторов.

Эти возрастные процессы ухудшения оптических характеристик и отмирания фоторецепторов приводят к снижению ОЗ. Суммарный эффект показан на рис.13.



■ Рис.12. Зависимость концентрации липофусцина и плотности фоторецепторов от возраста



■ Рис.13. Зависимость относительной остроты зрения (RVA) от возраста (на основе 7 экспериментальных исследований [33])

Относительное снижение ОЗ [$VA_{rel} = f(Age, C)$] может быть выражено следующей формулой:

$$VA_{rel} = 1 - [1,317 \cdot 10^{-4} (Age - 20)^{\varepsilon}], \quad (3)$$

где $\varepsilon = (C + 0,199)^{-0,148} + 1,024$; Age - возраст, годы; C - контраст объекта ($\Delta L/L_b$); L_b - яркость фона.

При $C = 0,9$ показатель ε становится равным 2,01, а при этом значении ε функция принимает вид, показанный на рис.13, что соответствует функции VA_{rel} , найденной для яркости адаптации $L \geq 40 \text{ кд}/\text{м}^2$. За базу для функции VA_{rel} взята ОЗ человека в возрасте 20 лет, когда $VA = 1$. Человек в возрасте 70 лет, например, в среднем будет обладать лишь 66% той ОЗ, которая у него была в 20 лет. А к 80 годам ОЗ снизится до 50%. Это снижение зрительного разрешения намного больше той величины, которую можно было бы ожидать за счет уменьшения прозрачности глазных сред, повышения рассеяния света, и соответствующего снижения контраста объектов. Таким образом, для правильной оценки влияния возраста на ЗР следует использовать функцию снижения ОЗ, а не одну лишь функцию уменьшения прозрачности глазных сред, как это предлагает делать Rea [13].

При оценке влияния возраста на ЗР следует учитывать еще один эффект, а именно изменение размера зрачка. В моделях, основанных на определении освещенности сетчатки, значение стимула рассчитывается в троландах, и при этом необходимо знать размер зрачка. Rea и Oullette, использовавшие такие стимулы, предложили модифицированный вариант уравнения DeGroot и Gebhard [10] для оценки размера зрачка при различных уровнях яркости фона.

Однако эта функция отражает изменение размера зрачка только для молодых наблюдателей, имеющих более широкие зрачки (до 7,9 мм) при малых уровнях яркости. С возрастом размер зрачка сокращается в соответствии с выражением

$$r = -0,04 Age + 8,58, \text{ мм}. \quad (4)$$

В работе [13] влияние возраста не учитывается, и таким образом фальсифицируется оценка освещенности сетчатки. В подходе, предложенном в настоящей работе, используется возрастная функция, основанная на ОЗ, которая была получена при работе с реальными зрачками, и, следовательно, учитывающая названный эффект.

Зависимость между ОЗ и ЗР по Weston показана на рис.4. Для контраста $C = 0,2$ соотношение между ОЗ и ЗР практически постоянно в широком диапазоне L фона (от 2 до $3000 \text{ кд}/\text{м}^2$). Это доказывает сильную взаимосвязь этих двух функций, то есть, что ЗР соответствует ОЗ. Таким образом, ОЗ можно считать фундаментальной функцией, определяющей ЗР. Отклонения величины отношения ОЗ к относительной ЗР (VA/RVP) для очень низких контрастов и очень малых тест-объектов (рис.5) и особенно при малых уровнях яркости объясняются тем, что для выполнения зрительной работы тре-

буется время, которое возрастает при малых контрастах и низких уровнях яркости. Острота зрения снижается при росте времени наблюдения, как было показано Söllner [24], который проводил эксперименты с высококонтрастными кольцами Ландольта. Очевидно, что различия из-за временного фактора возрастают при малых контрастах тест-объекта. Это было подтверждено в исследованиях Adrian [1994, готовится к публикации]. Предварительные результаты аппроксимации функции $V_A_{rel} = f(t, C)$ могут быть представлены в виде:

$$VA_{rel} \frac{-2,757}{(1,2 + 7,8C)t + 4,712} + (0,7583 + 0,4135C), \quad (5)$$

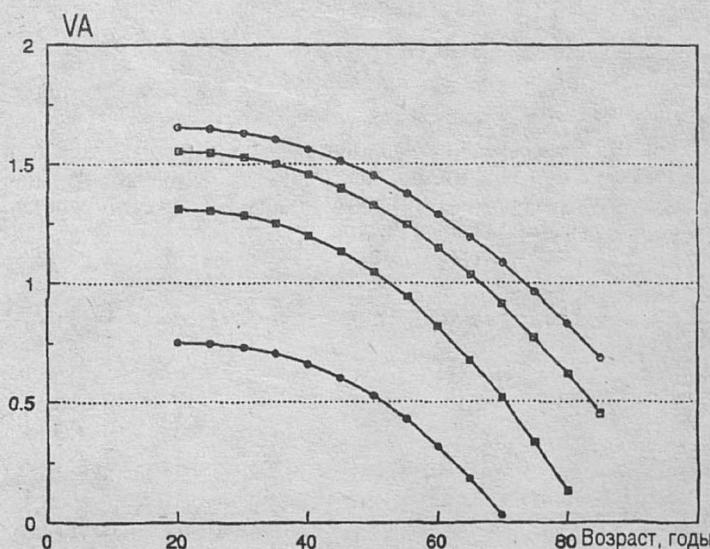
где $0,17 < C < 0,8$; t - время наблюдения, с; (формула справедлива для диапазона L фона: $3 < L_b < 63 \text{ кд/м}^2$).

Расчеты показывают, что при работе с малоконтрастными кольцами Ландольта требуется большее время для достижения той же ОЗ. Этим можно объяснить ход верхней кривой на рис.4 и 5 в области низких контрастов. При малом времени наблюдения ОЗ также уменьшается, что приводит к уменьшению отношения VA/RVP .

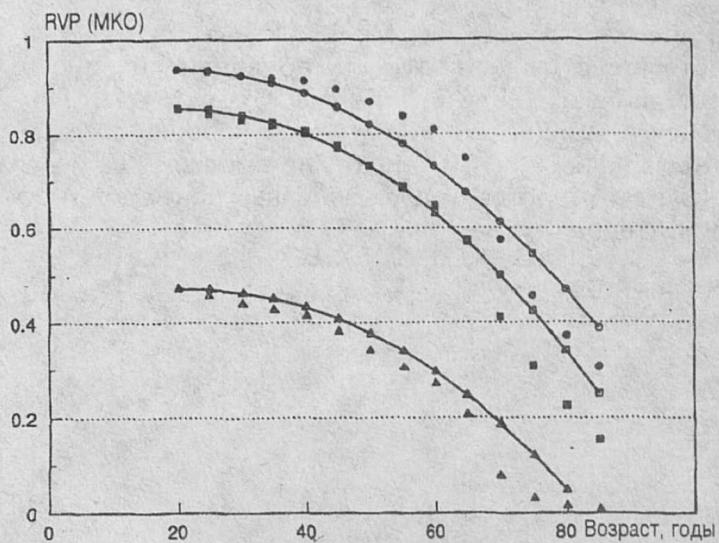
После того, как мы установили явную зависимость между ОЗ и ЗР, кажется логичным применить зависимость ОЗ от возраста к оценке RVP. Это значит, что выражение (3) может рассматриваться как возрастной фактор (age factor, AF). Его можно использовать в виде множителя при функции ЗР (1) для учета влияния возраста

$$VP = VP^{20} : AF, \text{ где } AF = [VA \text{ rel} = f(Age, C)].$$

Эта операция пояснена на рис.14 и 15. Зависимость ОЗ для высоких и низких контрастов тест-объектов приведена на рис.14. Кривая для высоких контрастов хорошо обоснована, как показано на рис.13. Кривые для малых контрастов были рассчитаны на основе измерений ОЗ, выполненных Halonen [34] с двумя группами наблюдателей со средним возрастом, соответственно 26 лет и 51 год.



■ Рис.14. Зависимость остроты зрения (VA) от возраста для различных контрастов колец Ландольта: ○ - $C = 0,93$; □ - $C = 0,63$; ■ - $C = 0,24$; ● - $C = 0,03$; L = 108 кд/м²



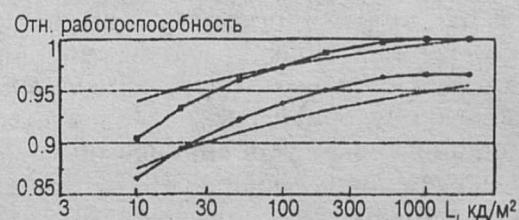
■ Рис.15. Сравнение зависимостей относительной ЗР от возраста, полученных Blackwell и рассчитанных по (3). (Данные из Публикации МКО нанесены зачеркнутыми символами.)
 VA: ○ - $C = 0,93$; □ - $C = 0,63$; Δ - $C = 0,24$.
 VP: ● - $C = 0,93$; ■ - $C = 0,63$; ▲ - $0,24$. $L = 57 \text{ кд}/\text{м}^2$

Соотношение измеренных значений ОЗ (51/26) рассчитывалось для уровней контраста С = 0,93; 0,63; 0,24 и 0,03. Расчет VA_{rel} выполнен на основе (3), снижение VA при низких контрастах для молодых наблюдателей взято из [30].

Сравнение функций ОЗ и ЗР по Blackwell [8] показано на рис.15. Учитывая то, что была установлена сильная связь между VA и RVP, следовало ожидать, что и зависимости от возраста будут очень близки. Две верхние кривые для $C=0,93$ и $C=0,63$ хорошо согласуются с данными Blackwell. То же можно сказать о нижней кривой для малого контраста. Разрыв в положении нанесенных данных объясняется в [8] переходом от одного выражения к другому. В целом же ход кривых отражает тенденцию зависимости RVP от величины контраста и возраста и взаимосвязь с ОЗ (VA).

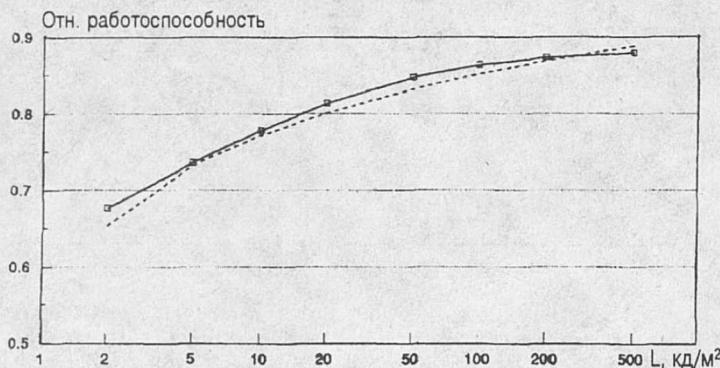
■ Сравнение данных о зрительной работоспособности

Mick и Bodmann проводили эксперименты, в которых наблюдатель должен был найти заданное число среди 50 случайно расположенных чисел, расположенных на одном листе бумаги [28]. Наблюдатели были разделены на две возрастные группы, эксперименты проводились при изменении контраста и угловых размеров тест-объектов, а также L фона. Зрительная работоспособность выражалась величиной обратной времени поиска заданного числа. Размеры тест-объектов отличались от тех, с которыми работал Weston. Сравнение ре-



■ Рис.16. Сравнение данных Muck и Bodmann с результатами расчетов по модели Weston для высокого контраста ($C=0,9$): $\circ - C = 0,9, \alpha = 4'$; $\square - C = 0,9, \alpha = 6'$; $- - -$ - расчет по модели Weston

зультатов, полученных Muck для молодых наблюдателей, с данными Weston приведено на рис.16 (для высоких контрастов) и рис.17 (для малых контрастов). Видно, что результаты хорошо согласуются с данными Weston как для высоких, так и для низких контрастов, и для различных размеров тест-объектов.



■ Рис.17. Сравнение данных Muck и Bodmann (□) с результатами расчетов по модели Weston (—) для низкого контраста ($C=0,6$) $\alpha = 4'$

Влияние возраста, установленное Muck, не показано на рисунке. Это различие может быть выявлено только между двумя возрастными группами, что дает только одну точку в функциональной зависимости от возраста.

Simonson и Brozek [17] исследовали ЗР и утомление. Для оценки зрительного утомления при выполнении цифровых тестов по распознаванию они использовали несколько критериев. Установка в их экспериментах представляла собой ящик с узкой щелью, за которой в случайном порядке предъявлялись буквы, напечатанные на белой бумаге и прикрепленные к движущейся ленте. Буква предъявлялась в щели в течение 0,56 с. От наблюдателя требовалось вручную записать увиденную букву. Запись выполнялась без зрительного контроля.

Яркость тест-объектов обеспечивалась за счет подсветки лампами, установленными внутри ящика, а интенсивность освещения регулировалась диафрагмами. Буквы имели угловой размер $\alpha = 10'$ и контраст с бумагой $C = 0,91$. Положение головы наблюдателя фиксировалось на определенном расстоянии от щели.

Наблюдатель должен был выполнять зрительную работу в течение 2 часов. За это время проводились три тестовых замера ЗР по 6 мин. каждый. Первый тест выполнялся через 5 мин. после начала работы, второй - после 1 ч работы, и третий - через 110 мин. Наблюдатели считали, что они находятся под постоянным контролем. Оценка велась по количеству правильно распознанных букв из 200 представленных. Усредненное по трем тестам число давало оценку общей ЗР.

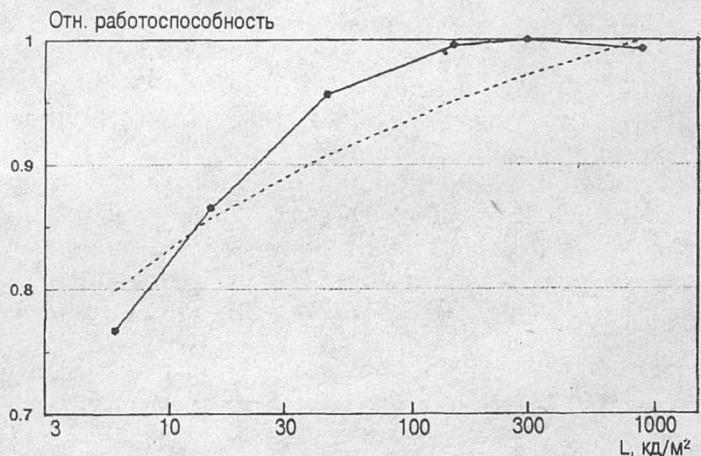
Значения функции относительной ЗР, найденные по усредненным результатам экспериментов Simonson и Brozek, приведены на рис.18. Здесь же выполнено сравнение с результатами расчетов по модели Weston при $C = 0,91$ и размере тест-

объекта $\alpha = 2'$ ($10'$ для буквы, $2'$ для критической детали). Сравнение показывает, что экспериментальная и расчетная кривые несколько отличаются по форме, но в целом сопоставимы по значениям.

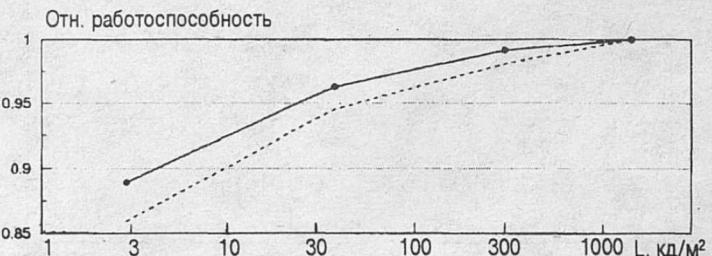
Smith и Rea проводили корректурные тесты, в которых оценивали способность испытуемых находить ошибки в текстах [18]. В качестве меры ЗР они использовали комбинацию скорости чтения и точности выполнения теста - критерий очень схожий с тем, что применял Weston.

Испытания проводились при четырех различных уровнях яркости, при трех видах качества печати и при двух цветах бумаги. Качество печати изменялось путем "вымарывания" отдельных частей букв. Контраст букв при этом не изменялся. Бумага была белой и голубой, это изменяло в некоторой степени контраст букв; L фона составляла 2,9; 38 и 302 $\text{кд}/\text{м}^2$ для белой бумаги и 2,4; 29,8 и 244 $\text{кд}/\text{м}^2$ - для голубой. Контрасти в экспериментах выражались значением коэффициента воспроизведения контраста (CRF), и составляли 0,992 для белой бумаги и 0,948 для голубой. Угловой размер деталей не указан, но, по нашим оценкам, он составлял около $3'$.

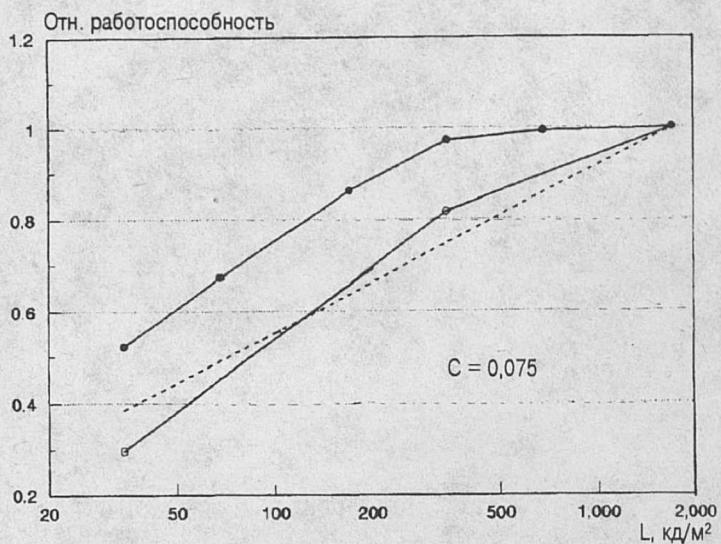
Оценка работы наблюдателя выставлялась на основе отношения количества правильных действий к неправильным и скорости чтения. Очки добавлялись за скорость чтения, за правильные ответы и вычитались за неправильные ответы.



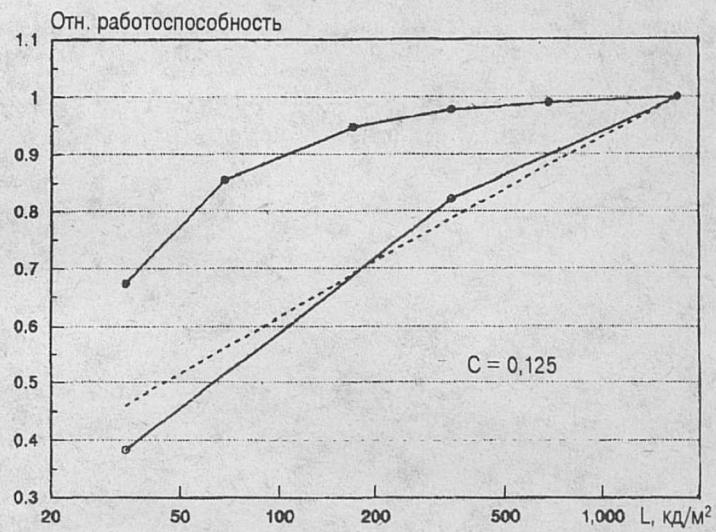
■ Рис.18. Сравнение экспериментальных данных Simonson и Brozek с результатами расчетов по модели Weston:
— Simonson и Brozek (после 2 часов работы);
- - - расчет по модели Weston



■ Рис.19. Результаты расчета по модели Weston с данными Smith и Rea [18]: — Smith и Rea; - - - расчет по модели Weston



■ Рис. 20. Данные McNelis. Распознавание левой буквы:
● - McNelis; ○ - данные с поправкой на время фиксации

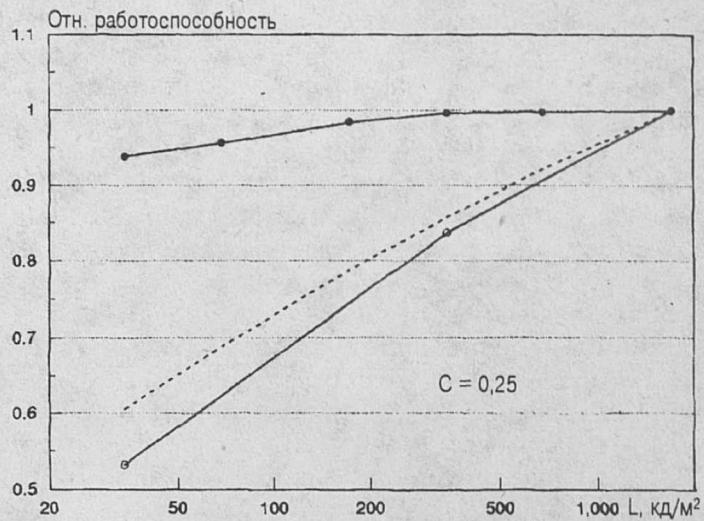


■ Рис. 21. Данные McNelis. Распознавание левой буквы:
● - McNelis; ○ - данные с поправкой на время фиксации

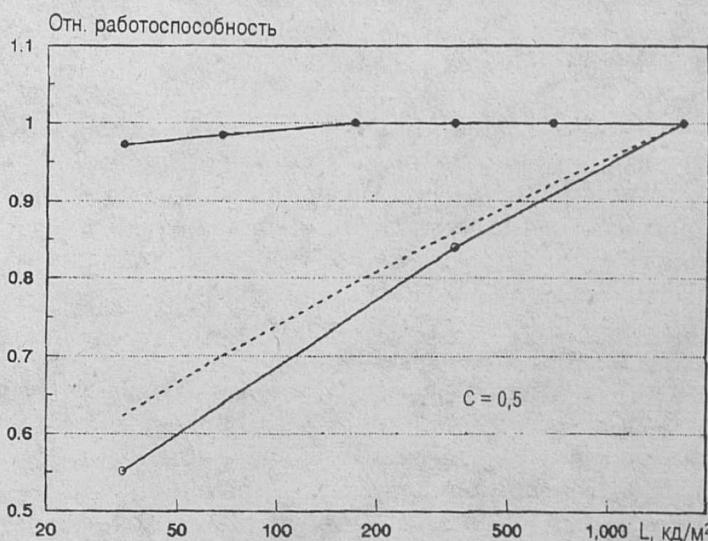
В зависимости от набранных очков было выполнено ранжирование наблюдателей. Результаты экспериментов и расчетов приведены на рис.19 (существует заметная корреляция между экспериментальными данными и расчетными результатами по модели Weston, если при этом учтены различия в оценке ЗР).

McNelis организовал эксперименты по изучению работоспособности человека при выполнении зрительных задач различной сложности [12]. Наблюдателю предъявлялись две буквы, разнесенные на угловое расстояние 10° ; то есть наблюдатель не мог одновременно наблюдать обе буквы. Задача наблюдателя заключалась в том, чтобы прочесть буквы и затем назвать их. Каждая пара букв предъявлялась в течение 0,4 с, после чего следовала пауза 3 с для того, чтобы можно было осмыслить и назвать буквы вслух. Точность опознавания служила мерилом работоспособности.

Буквы имели $\alpha = 8'$ по высоте, а критические детали (ширина штриха) составляли $1.6'$. Яркость букв регулировалась с помощью фильтров и различных электрических схем питания, чтобы обеспечить равномерность и неизменность цветности освещения.



■ Рис. 22. Данные McNelis. Распознавание левой буквы:
● - McNelis; ○ - данные с поправкой на время фиксации



■ Рис. 23. Данные McNelis. Распознавание левой буквы:
● - McNelis; ○ - данные с поправкой на время фиксации

Изменение контраста объекта с фоном осуществлялось вуалирующей яркостью. Тесты проводились при четырех контрастах букв: 0,5; 0,25; 0,12 и 0,075.

Точности опознавания каждой из двух букв сильно разнились. Как правило, точность опознавания правой буквы была существенно меньше. Это являлось результатом самого процесса опознавания. Наблюдатель сначала смотрел на левую букву, а затем на правую, причем на опознавание второй буквы использовалось лишь то время, которое оставалось после опознавания первой буквы. Результаты опознавания левой буквы приведены на рис.20 - 23.

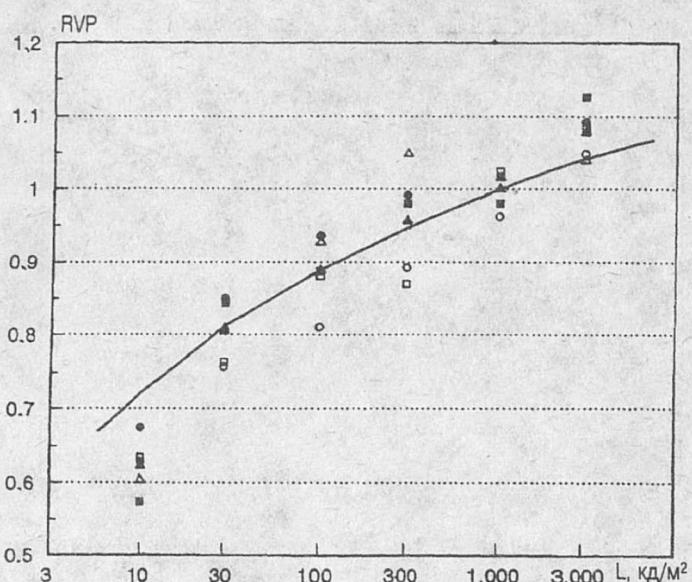
McNelis привел также некоторую информацию о времени, затрачиваемом на чтение каждой буквы, но только для малого контраста. Для одного из наблюдателей были выполнены измерения глазных движений и фиксационных пауз при контрасте тест-объекта 0,75 и яркостях адаптации 34,3; 343 и 1713 кд/м². Эти данные были использованы для выработки интегрального критерия ЗР, включающего в себя оценки скорости и точности выполнения зрительной работы в виде отношения A/t , где A - точность; t - время фиксации левой буквы.

Расчетные оценки этой величины при восприятии левой буквы приведены на рис. 20 и 23 и сравняны с данными расчетов по модели Weston. При введении поправки на время фиксации результаты McNelis хорошо коррелируют с моделью Weston. При более высоких контрастах (0,5; 0,25) данные по McNelis и по Weston начинают отличаться друг от друга в большей степени, так как поправка на время вводилась только для $C=0,075$. Для более высоких контрастов тест-объекта время фиксации, очевидно, будет короче, и характеристика ЗР будет также соответствовать модели Weston. В целом же, с учетом временной поправки результаты McNelis и Weston хорошо согласуются, хотя в их экспериментах использовались различные критерии.

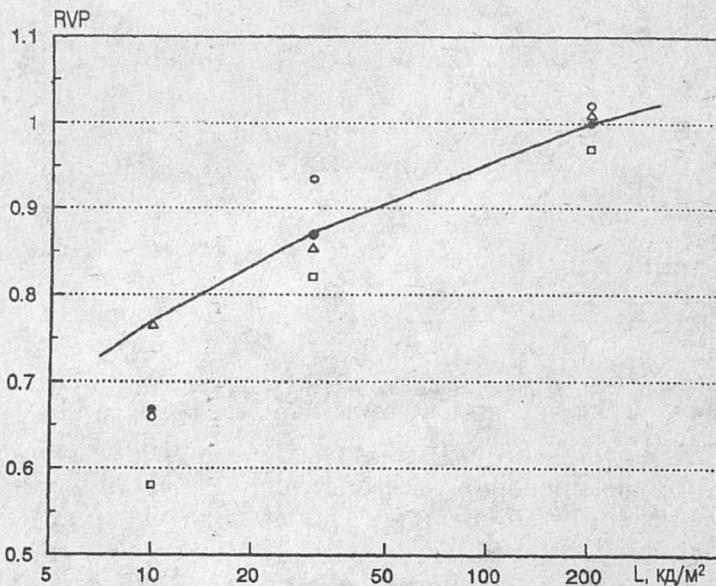
В 1973 г. (одновременно с экспериментами McNelis), Loe и Waters [29] выполнили свои исследования ЗР по методике Weston (1946 г.). При этом, они несколько расширили круг зрительных задач, не ограничиваясь кольцом Ландольта, которое они называли "простой зрительной задачей". Их тест-объект представлял собой три концентрических кольца Ландольта, причем внутреннее кольцо имело перемычку со средним кольцом. Эксперименты проводились при различном спектральном составе излучения ИС, применявшемся для освещения. Использовались лампы типа ДРЛ, в том числе дневного света ЛЛ, МГЛ, НЛВД, ГЛН, а также монохроматическое красное и синее освещение. Некоторые из полученных результатов представлены на рис. 24 и 25. Данные, рассчитанные по (1), и измеренные значения относительной ЗР (RVP) приведены к уровню для $L = 1000 \text{ кд}/\text{м}^2$. Видно, что результаты расчетов и измерений хорошо согласуются лишь в области малых яркостей ($10 \text{ кд}/\text{м}^2$); результаты опытов Loe и Waters постоянно ниже рассчитанных по модели Weston.

В отношении спектрального состава освещения не выявлено каких-то существенных различий в ЗР во всем диапазоне яркостей, что подтверждено статистическим анализом данных. На этом основании Loe и Waters сделали вывод, что при дневных уровнях адаптации спектральный состав излучения (из набора ИС, использованных в экспериментах) не влияет на ЗР. Для более сложных зрительных задач были получены аналогичные результаты, однако, разброс данных, полученных при различных спектральных составах излучений, был более широким.

■ Причины различий в результатах экспериментов, полученных Weston, Rea и Ouellette. Выше было показано, что существуют различия в результатах, получаемых на основе моделей Weston, Rea и Ouellette. Хотя в построенных зависимостях ЗР от L фона и наблюдается схожесть, но функции ЗР от контраста сильно разнятся. Контраст являлся важным параметром в исследованиях Weston, Muck и Bodmann, Simonson и Brozek, Smith и Rea, McNelis, Loe и Waters.



■ Рис. 24. Данные Loe и Waters для простой зрительной задачи (серия 8). (Расчеты выполнены по (1) и приведены к уровню $L=1000 \text{ кд}/\text{м}^2$): ○ - ЛЛ типа MCF (белого света); □ - лампа ДРЛ типа MBF Kolorlux; Δ - МГЛ типа MBIF Kolorarc; ● - НЛВД типа SON; ■ - ГЛН; ▲ - усредненные значения

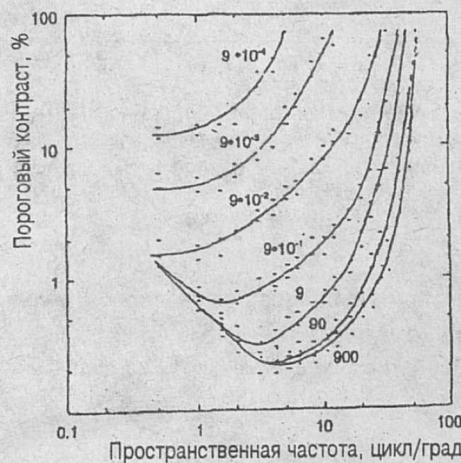


■ Рис. 25. Данные Loe и Waters для простой зрительной задачи (серия 5): ○ - ЛЛ белого света ($T_{цв} = 4000 \text{ K}$); □ - красное и синее (узкоспектральное) излучение; Δ - белый свет, близкий к дневному; ● - усредненные значения

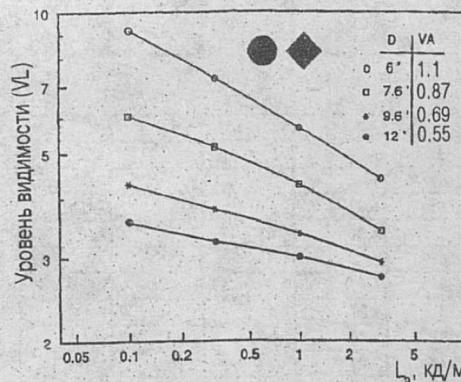
Причина этого, по всей вероятности, кроется в различии критериев оценки ЗР. В исследованиях Weston и ряда других упомянутых авторов для ее оценки использовались ОЗ, время и точность выполнения зрительной работы. Rea и Ouellette в качестве критерия выбрали величину обратную времени обнаружения тест-объекта, имеющего положительный контраст. Такая зрительная задача не требовала от наблюдателя высокой различительной способности.

По физиологии нашего зрительного аппарата эти задачи выполняются разными каналами. Рис. 26 может служить в качестве объяснения. Campbell и Green (1965) определили пороговые контрасты восприятия синусоидальных решеток. Простран-

ственная частота выражалась в циклах на градус [26]. Измеренные функции показаны на рис.26. Обнаружение тест-объекта требует информации с низкой пространственной частотой, которая обрабатывается магноклеточной системой. Если же требуется различать мелкие детали, например, при чтении, то с объекта считывается информация с высокой пространственной частотой, которая обрабатывается парвоклеточной системой, определяющей ОЗ. Например, 50 циклов/градус соответствует ОЗ, равной 0,83, которая необходима для чтения букв с размерами типичными для зрительных задач в офисе. Рис.26 демонстрирует разницу в пороговых контрастах для низкой частоты, например, 5 циклов/град., и для высокой частоты в 50 циклов/град. при интенсивности освещения, характерной для офиса (100 троландов). При такой освещенности на сетчатке пороговый контраст тест-объекта с 5 циклов/град. составляет 0,25%, а различие решетки с пространственной частотой 50 циклов/град. требует контраста равного 100%.



■ Рис.26. Зависимость контрастной чувствительности от пространственной частоты при различных уровнях освещенности на сетчатке (в троландах), определяемой яркостью фона и размером зрачка. (Измерения выполнялись с решеткой размерами $8,25^\circ \times 4,5^\circ$, проецируемой в центр фовеа).



■ Рис.27. Результаты эксперимента Aulhorn [27]: необходимое увеличение контраста для распознавания формы объекта (квадрата или круга с равными площадями) при различных яркостях адаптации L_a . Размер объекта указан для диаметра D в угловых минутах.

Увеличение контраста выражено числом пороговых величин, называемым "уровнем видимости": $VL = C_{\text{факт}}/C_{\text{пор}}$.

Роль контраста отражена и на рис.27, где приведены результаты, полученные Aulhorn (1964) [27]. Наблюдателю предъявлялись объекты в виде круга или квадрата, имеющие равные площади. На этом рисунке показано увеличение контраста тест-объекта необходимое для распознавания формы. Тесты выполнены при различных размерах объектов. Обнаружение квадрата связано с функцией ОЗ. Очевидно, что с ростом яркости фона должен расти и контраст необходимый для восприятия формы тест-объекта, что соответствует результатам, приведенным на рис.26.

В заключение можно отметить, что выполнение зрительных задач, характеризуемых различными пространственными частотами, приводит к разным результатам при оценке ЗР.

■ **Выводы и обсуждение.** Функция ЗР, предложенная для описания данных Weston, согласуется с этими данными с допустимой погрешностью даже для наименьшего тест-объекта с $\alpha = 1.5'$ с низким контрастом (рис.1-3). Эта функция была сопоставлена с функцией ОЗ. Они хорошо коррелируют в диапазоне L дневного зрения для различных контрастов, исключение наблюдается для низких контрастов и малых яркостей адаптации. Одной из возможных причин такого отклонения от правила была названа разница во времени наблюдения. Данный результат указывает на зависимость ЗР от возможности различать детали.

Далее было проведено сравнение моделей Weston и Rea и Ouellette для различных размеров тест-объектов, контрастов и L фона.

Кроме трудностей, связанных с определением размеров тест-объектов в этих двух моделях, следует отметить, что модель Rea демонстрирует независимость от контраста объекта вплоть до пороговых значений. Это объясняется тем, что время для восприятия объекта в экспериментах Rea в большей части не зависело от контраста вплоть до пороговых условий.

Если не принимать в расчет размеры тест-объектов, то обе модели одинаково ведут себя при изменении L фона. Как указывалось выше, при изменении контраста такого не происходит. Модель Weston чувствительна к контрасту символов, и вместе со снижением контраста уменьшается ЗР.

Было проведено сравнение разработанной модели с экспериментальными результатами Muck и Bodmann. Так как эти авторы работали с объектами с размерами $4'$ и $6'$, то модель Weston необходимо было экстраполировать для больших размеров тест-объектов, но и в этом случае получено очень хорошее совпадение (рис. 16-17).

Simonson и Brozek проводили цифровые тесты по распознаванию. Они оценивали утомление, и в целом условия проведения экспериментов были иными. Но несмотря на все это, полученные ими результаты хорошо согласуются с нашей моделью (рис.18).

Более ранние исследования Smith и Rea с корректурными таблицами также хорошо согласовывались с данными Weston, что видно из рис.19. Как было указано, результаты McNelis должны быть скорректированы с учетом времени наблюдения левой буквы. После выполнения такой процедуры характеристика ЗР полностью совпадает с функцией Weston (рис. 20-23).

Loe и Waters исследовали ЗР, используя кольца Ландольта высокого контраста, при различных спектральных составах освещения. Их результаты также хорошо согласуются с моделью Weston (рис. 24,25). Более того, для работы в дневном диапазоне яркостей, они не установили существенных различий в результатах при разных спектральных составах освещения.

Проведенные сравнения результатов различных исследований показывают, что функция, основанная на данных, полученных Weston, действительно отражает изменение ЗР. Даже при существенном различии в выборе критерия оценки, например, в экспериментах Muck, Simonson, Smith и McNelis, общий ход характеристики относительной ЗР (RVP) остается неизменным. Очевидно, это объясняется тем, что во всех этих экспериментах использовались зрительные задачи с высокими пространственными частотами.

Оценка влияния возраста на ЗР выполнялась на основе рассмотрения изменений ОЗ, зависящей также от контраста объектов. Все это согласуется с моделью, предложенной в Отчете МКО [8], лишь при высоких контрастах наблюдаются существенные различия.

■ Практическое применение модели оценки зрительной работоспособности. В табл. 1-9, приведенных ниже, даны значения ЗР (VP) для различных размеров критических деталей тест-объектов (высота букв или ширина штриха), контрастов и возраста наблюдателя. Значения VP рассчитаны по (1) с учетом (3). Таблицы содержат рекомендуемые уровни яркости, обеспечивающие выбранный уровень ЗР в диапазоне от 0 до 1. Эти расчеты выполнены для возраста 25, 40 и 65 лет. Следует отметить, что фактор возраста AF не только сдвигает VP вниз, но также влияет и на требуемый контраст зрительной задачи.

Например, $VP=1$ для углового размера критической детали, равного $4.5'$ при контрасте $C = 0,9$ и $L = 1000 \text{ кд}/\text{м}^2$. Для объектов с меньшим контрастом ЗР будет меньше при тех же значениях размеров объектов, яркости и возраста.

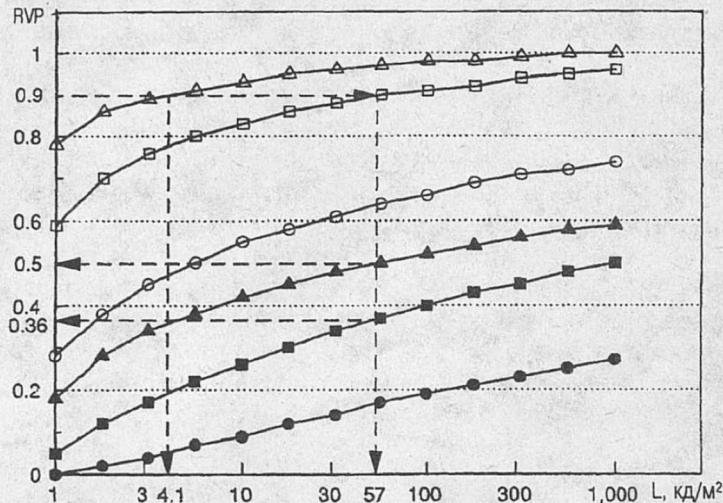
- Таблицы уровней яркости ($\text{кд}/\text{м}^2$), требуемых для обеспечения заданного уровня зрительной работоспособности при определенном размере и контрасте объекта. Диапазон яркостей от 1 до $1000 \text{ кд}/\text{м}^2$. NA - Требуемый уровень работоспособности недостижим при заданных характеристиках. AC - Требуемый уровень работоспособности достижим при всех яркостях из диапазона от 1 до $1000 \text{ кд}/\text{м}^2$

■ Таблица 1

$\alpha = 1,5'$

Возраст = 25 лет

На рис.28 приведен пример для объектов с $\alpha = 1,5'$ и $4,5'$ и трех величин контрастов. Для объекта $4,5'$ с контрастом $C = 0,9$ на фоне с $L = 4,1 \text{ кд}/\text{м}^2$ может быть достигнут уровень $RVP = 0,9$, но при контрасте $C = 0,6$ тот же уровень ЗР достигается лишь при яркости $57 \text{ кд}/\text{м}^2$. При контрасте $C = 0,3$ такая высокая ЗР вообще недостижима, в этом случае даже при $L = 57 \text{ кд}/\text{м}^2$ значение ЗР снижается до уровня 0,63.



■ Рис.28. Относительная зрительная работоспособность (RVP) при работе с большими и малыми объектами, имеющими разные контрасты (наблюдатель в возрасте 25 лет):
 $\alpha = 1,5'$ - ● - $C = 0,3$; ■ - $C = 0,6$; ▲ - $C = 0,9$
 $\alpha = 4,5'$ - ○ - $C = 0,3$; □ - $C = 0,6$; Δ - $C = 0,9$

Таблица 2

 $\alpha = 4,5'$

Возраст = 25 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.1	4.9	AC							
0.15	18.62	AC							
0.2	93.33	1.32	AC						
0.25	691.83	1.91	AC						
0.3	NA	3.16	1.07	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.35	NA	5.75	1.45	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.4	NA	12.02	2.04	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.45	NA	28.84	3.16	1.17	AC	AC	AC	AC	AC
0.5	NA	89.13	5.5	1.45	AC	AC	AC	AC	AC
0.55	NA	363.08	10.72	1.91	1.17	AC	AC	AC	AC
0.6	NA	NA	25.7	2.82	1.48	1.02	AC	AC	AC
0.62	NA	NA	38.02	3.31	1.62	1.12	AC	AC	AC
0.64	NA	NA	57.54	4.07	1.91	1.2	AC	AC	AC
0.66	NA	NA	93.33	5.13	2.14	1.32	AC	AC	AC
0.68	NA	NA	154.88	6.61	2.63	1.48	1.07	AC	AC
0.7	NA	NA	275.42	8.71	3.16	1.7	1.17	AC	AC
0.72	NA	NA	501.19	11.46	3.89	2.04	1.32	AC	AC
0.74	NA	NA	NA	16.6	5.13	2.51	1.48	1.07	AC
0.76	NA	NA	NA	23.99	6.76	3.09	1.78	1.2	AC
0.78	NA	NA	NA	37.15	9.55	4.07	2.14	1.32	AC
0.8	NA	NA	NA	57.54	14.13	5.5	2.63	1.62	1.12
0.82	NA	NA	NA	100	21.88	7.76	3.55	2	1.26
0.84	NA	NA	NA	173.78	35.48	12.02	5.13	2.51	1.48
0.86	NA	NA	NA	338.84	64.57	19.95	7.76	3.55	1.91
0.88	NA	NA	NA	691.83	123.03	33.48	12.88	5.5	2.63
0.9	NA	NA	NA	NA	257.07	70.79	23.99	9.12	4.07
0.92	NA	NA	NA	NA	588.84	162.18	51.29	17.78	7.08
0.94	NA	NA	NA	NA	NA	407.38	128.82	41.69	14.79
0.96	NA	NA	NA	NA	NA	NA	398.11	128.82	41.69
0.98	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	524.81	162.18

Таблица 3

 $\alpha = 6,0'$

Возраст = 25 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.05	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.1	1.91	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.15	4.57	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.2	12.88	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.25	48.98	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.3	263.03	1.32	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.35	NA	2	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.4	NA	3.31	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.45	NA	6.03	1.2	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.5	NA	12.88	1.82	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.55	NA	33.88	2.95	1.12	AC	AC	AC	AC	AC
0.6	NA	117.49	5.5	1.38	AC	AC	AC	AC	AC
0.7	NA	NA	30.2	2.75	1.45	1.0	AC	AC	AC
0.72	NA	NA	46.77	3.31	1.62	1.12	AC	AC	AC
0.74	NA	NA	79.43	4.07	1.91	1.26	AC	AC	AC
0.76	NA	NA	138.04	5.37	2.29	1.38	1.02	AC	AC
0.78	NA	NA	257.04	7.08	2.82	1.62	1.12	AC	AC
0.8	NA	NA	501.19	10.23	3.55	1.91	1.26	AC	AC
0.82	NA	NA	NA	14.79	4.9	2.4	1.48	1.07	AC
0.84	NA	NA	NA	22.91	6.76	3.16	1.82	1.2	AC
0.86	NA	NA	NA	38.02	10.23	4.27	2.29	1.45	1.02
0.88	NA	NA	NA	67.61	15.85	6.31	3.09	1.82	1.2
0.9	NA	NA	NA	128.82	27.54	10.23	4.57	2.4	1.48
0.92	NA	NA	NA	263.03	53.7	17.78	7.41	3.55	2
0.94	NA	NA	NA	616.59	117.49	35.48	13.49	6.03	2.95
0.96	NA	NA	NA	NA	288.4	83.18	30.2	12.02	5.13
0.98	NA	NA	NA	NA	851.14	245.47	83.18	30.9	12.02

■ Таблица 4

 $\alpha = 1,5'$

Возраст = 40 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.05	NA	13.49	4.07	2.29	1.38	1.02	AC	AC	AC
0.1	NA	100	12.88	5.75	2.63	1.55	1.12	AC	AC
0.12	NA	234.42	20.89	8.13	3.47	1.91	1.32	AC	AC
0.14	NA	562.34	35.48	11.48	4.57	2.4	1.55	1.12	AC
0.16	NA	NA	60.26	16.6	6.03	2.95	1.82	1.26	AC
0.18	NA	NA	104.71	22.91	8.13	3.89	2.14	1.45	1.07
0.2	NA	NA	181.97	33.88	11.22	4.9	2.63	1.62	1.17
0.22	NA	NA	338.84	46.77	15.49	6.61	3.31	1.91	1.32
0.24	NA	NA	660.69	67.61	20.89	8.71	4.27	2.4	1.48
0.26	NA	NA	NA	100	30.2	12.02	5.5	2.82	1.7
0.28	NA	NA	NA	144.54	41.69	16.6	7.41	3.55	2.04
0.3	NA	NA	NA	213.8	60.26	22.91	10	4.57	2.51
0.32	NA	NA	NA	302	89.13	32.36	13.49	6.03	3.09
0.34	NA	NA	NA	446.68	128.82	46.77	19.5	8.32	3.89
0.36	NA	NA	NA	660.69	190.55	70.79	27.54	11.48	5.13
0.38	NA	NA	NA	977.24	288.4	104.71	41.69	16.6	7.08
0.4	NA	NA	NA	NA	426.58	162.18	63.1	24.55	10
0.42	NA	NA	NA	NA	660.69	245.47	97.72	38.02	14.79
0.44	NA	NA	NA	NA	NA	398.11	154.88	60.26	22.91
0.46	NA	NA	NA	NA	NA	630.96	257.04	100	35.48
0.48	NA	NA	NA	NA	NA	NA	426.58	169.82	60.26
0.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	776.25	302	109.65
0.52	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	562.34	208.93
0.54	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	407.38
0.56	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	912.01
0.58	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

■ Таблица 5

 $\alpha = 4,5'$

Возраст = 40 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.1	5.5	AC							
0.15	22.91	AC							
0.2	138.04	1.38	AC						
0.25	NA	2.14	AC						
0.3	NA	3.72	1.17	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.35	NA	7.41	1.62	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.4	NA	16.6	2.4	1.07	AC	AC	AC	AC	AC
0.45	NA	48.98	4.07	1.26	AC	AC	AC	AC	AC
0.5	NA	173.78	7.76	1.62	1.07	AC	AC	AC	AC
0.55	NA	912.01	17.38	2.29	1.32	AC	AC	AC	AC
0.6	NA	NA	46.77	3.72	1.78	1.17	AC	AC	AC
0.62	NA	NA	75.86	4.57	2.04	1.26	AC	AC	AC
0.64	NA	NA	128.82	6.03	2.4	1.45	1.02	AC	AC
0.66	NA	NA	223.87	7.76	2.95	1.62	1.12	AC	AC
0.68	NA	NA	426.58	10.72	3.72	1.91	1.26	AC	AC
0.7	NA	NA	870.96	15.49	4.9	2.4	1.48	1.02	AC
0.72	NA	NA	NA	22.91	6.61	2.95	1.7	1.17	AC
0.74	NA	NA	NA	35.48	9.12	3.89	2.04	1.32	AC
0.76	NA	NA	NA	57.54	13.49	5.37	2.63	1.55	1.07
0.78	NA	NA	NA	100	21.88	7.76	3.55	2	1.26
0.8	NA	NA	NA	181.97	37.15	12.02	5.13	2.63	1.55
0.82	NA	NA	NA	363.08	67.61	20.89	8.13	3.72	2
0.84	NA	NA	NA	776.25	138.04	38.02	14.13	5.75	2.82
0.86	NA	NA	NA	NA	302	83.18	27.54	10.23	4.37
0.88	NA	NA	NA	NA	758.58	199.53	63.1	21.88	8.32
0.9	NA	NA	NA	NA	NA	562.34	173.78	57.54	19.95
0.92	NA	NA	NA	NA	NA	NA	630.96	199.53	63.1
0.94	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	316.23
0.95	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	870.96

Таблица 6
 $\alpha = 6,0'$
Возраст = 40 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.1	2.14	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.15	5.13	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.2	16.6	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.25	72.44	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.3	467.74	1.48	AC						
0.35	NA	2.29	AC						
0.4	NA	4.07	AC						
0.45	NA	8.32	1.48	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.5	NA	20.89	2.29	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.55	NA	67.61	4.07	1.2	AC	AC	AC	AC	AC
0.6	NA	288.4	8.32	1.62	1.02	AC	AC	AC	AC
0.65	NA	NA	20.89	2.29	1.32	AC	AC	AC	AC
0.7	NA	NA	70.79	3.89	1.82	1.2	AC	AC	AC
0.72	NA	NA	123.03	5.13	2.24	1.38	AC	AC	AC
0.74	NA	NA	234.42	7.08	2.82	1.62	1.12	AC	AC
0.76	NA	NA	489.78	10	3.55	1.91	1.26	AC	AC
0.78	NA	NA	NA	14.79	4.9	2.4	1.48	1.07	AC
0.8	NA	NA	NA	22.91	6.76	3.16	1.82	1.2	AC
0.82	NA	NA	NA	39.81	10.72	4.37	2.29	1.48	1.07
0.84	NA	NA	NA	72.44	17.78	6.76	3.16	1.82	1.2
0.86	NA	NA	NA	144.54	32.36	11.22	4.9	2.51	1.55
0.88	NA	NA	NA	323.59	64.57	20.89	8.32	3.89	2.14
0.9	NA	NA	NA	812.83	151.36	45.71	16.6	7.08	3.47
0.92	NA	NA	NA	NA	407.38	117.49	41.69	15.85	6.76
0.94	NA	NA	NA	NA	NA	398.11	134.9	48.98	18.62
0.96	NA	NA	NA	NA	NA	NA	616.59	223.87	79.43
0.98	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	660.69

Таблица 7
 $\alpha = 1,5'$
Возраст = 65 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.01	57.54	2.82	1.7	1.12	AC	AC	AC	AC	AC
0.02	467.74	5.13	2.4	1.48	1.02	AC	AC	AC	AC
0.04	NA	14.79	4.37	2.4	1.38	1.02	AC	AC	AC
0.06	NA	39.81	7.76	3.89	1.91	1.32	AC	AC	AC
0.08	NA	117.49	14.13	6.03	2.75	1.62	1.17	AC	AC
0.1	NA	354.81	27.54	9.55	3.89	2.14	1.38	1.07	AC
0.12	NA	NA	53.7	15.49	5.75	2.82	1.78	1.2	AC
0.14	NA	NA	109.65	24.55	8.32	3.89	2.24	1.45	1.07
0.16	NA	NA	234.42	38.02	12.59	5.5	2.95	1.78	1.2
0.18	NA	NA	524.81	60.26	19.5	8.13	3.89	2.24	1.45
0.2	NA	NA	NA	100	30.2	12.02	5.5	2.82	1.7
0.22	NA	NA	NA	162.18	46.77	17.78	7.76	3.89	2.14
0.24	NA	NA	NA	263.03	75.86	28.84	12.02	5.5	2.82
0.26	NA	NA	NA	426.58	123.03	45.71	18.62	8.13	3.89
0.28	NA	NA	NA	724.44	208.93	75.86	30.2	12.59	5.5
0.3	NA	NA	NA	NA	338.84	128.82	51.29	19.95	8.32
0.32	NA	NA	NA	NA	588.84	223.87	89.13	33.88	13.49
0.34	NA	NA	NA	NA	NA	407.38	162.18	63.1	23.99
0.36	NA	NA	NA	NA	NA	776.25	316.23	123.03	43.65
0.38	NA	NA	NA	NA	NA	NA	630.96	257.04	89.13
0.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	562.34	208.93
0.42	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	524.81
0.45	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

■ Таблица 8
 $\alpha = 4,5'$
 Возраст = 65 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.05	2.51	AC							
0.1	12.88	AC							
0.15	112.2	1.32	AC						
0.2	NA	2.4	AC						
0.25	NA	5.13	1.38	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.3	NA	14.13	2.24	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.35	NA	53.7	4.27	1.32	AC	AC	AC	AC	AC
0.4	NA	323.59	10.23	1.91	1.12	AC	AC	AC	AC
0.45	NA	NA	33.88	3.16	1.62	1.07	AC	AC	AC
0.5	NA	NA	173.78	6.76	2.63	1.55	1.07	AC	AC
0.52	NA	NA	380.19	10.23	3.55	1.91	1.26	AC	AC
0.54	NA	NA	954.99	15.85	4.9	2.4	1.48	1.07	AC
0.56	NA	NA	NA	26.92	7.41	3.31	1.82	1.2	AC
0.58	NA	NA	NA	48.98	12.02	4.9	2.4	1.48	1.07
0.6	NA	NA	NA	100	21.88	7.76	3.55	2	1.26
0.62	NA	NA	NA	223.87	43.65	14.13	5.75	2.82	1.62
0.64	NA	NA	NA	562.34	100	30.2	11.22	4.79	2.4
0.66	NA	NA	NA	NA	273.42	75.86	25.7	9.55	4.27
0.68	NA	NA	NA	NA	912.01	245.47	75.86	25.7	9.55
0.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA	323.59	104.71	33.88
0.72	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	724.44	223.87
0.74	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

■ Таблица 9
 $\alpha = 6,0'$
 Возраст = 65 лет

Контраст объекта	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Уровни работоспособности	Необходимый уровень яркости, кд/м ²								
0.05	1.2	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.1	3.55	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.15	14.79	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.2	100	1.02	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.25	NA	1.82	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.3	NA	3.72	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.35	NA	9.12	1.55	AC	AC	AC	AC	AC	AC
0.4	NA	32.36	2.82	1.07	AC	AC	AC	AC	AC
0.45	NA	181.97	6.76	1.48	AC	AC	AC	AC	AC
0.5	NA	NA	20.89	2.29	1.32	AC	AC	AC	AC
0.55	NA	NA	109.65	4.9	2.14	1.32	AC	AC	AC
0.6	NA	NA	NA	14.79	4.9	2.4	1.48	1.07	AC
0.62	NA	NA	NA	27.54	7.76	3.47	1.91	1.26	AC
0.64	NA	NA	NA	57.54	14.13	5.5	2.82	1.7	1.12
0.66	NA	NA	NA	138.04	30.2	10.72	4.79	2.51	1.48
0.68	NA	NA	NA	380.19	75.86	24.55	9.55	4.37	2.29
0.7	NA	NA	NA	NA	245.47	72.44	25.7	10.72	4.79
0.72	NA	NA	NA	NA	NA	302	104.71	38.02	14.79
0.74	NA	NA	NA	NA	NA	NA	724.44	263.03	97.72
0.76	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adrian, W.K., Grenzen und Irrtümer unseres Sehvermögens bei künstlicher Beleuchtung als Unfallursache, Moderne Unfallverhütung, Heft 20, 1976
2. Adrian, W.K., Visibility of Targets: Model for Calculation, Lighting Research and Technology, 21, 1989, p. 181-188.
3. Adrian, W.K., Report for Public Works Canada, On the Applicability of the Visual Performance Index, VPI, and the Contrast Rendering Factor CRF, as a Quality Criterion of Lighting Systems, 1984
4. Balazzi, A.G. et al. The effect of Age on the Nerve Fiber Population of the Human Optic Nerve. Amer. Journ. of Ophthalmology vol 97 No. 6 (1984) p. 760-766
5. Blackwell, H.R., A comprehensive quantitative method for prediction of visual performance potential as a function of reference luminance, Journal of the IES, 1982
6. Blackwell, H.R., Blackwell, O. Population Data for 140 normal 20-30 year olds for use in assessing some effects of lighting upon visual performance, JIES, 9, 1980, p. 158-174.
7. Boyce, P.R., Illuminance, difficulty, complexity and visual performance, Lighting Research and Technology, Vol. 6, No. 4, 194, pp. 222-226
8. CIE publication 19/2, 1981. CIE Central Bureau, Kegelgasse 27, A-1030 Vienna
9. Clear, R. and Berman, S. Reading Speed, Accuracy and VL. Proceedings IESNA-Meeting San Diego, CA 1992
10. DeGroot, S.G. Gebhard, J.W. Pupil size as determined by adapting luminance Journ. Opt. Soc. Amer. 42 (1952) p. 492-495
11. Fischer D. European Views on Visual Performance Criteria in Lighting, Public Works Canada, 1982. Ministry of Supplies and Services Cat. No. W63-7/1982 p.1-39
12. Mc Nelis, J., Human Performance - A Pilot Study, Journal of the IES, 1973
13. Rea, M.S. Ouellette, M.J. A basis for the application of relative visual performance Light Res. Technol. (1991) p.135-144
14. Rea, M.S. Ouellette, M.J. Visual performance using reaction times. Light. Res. Technol 20 (1990) p. 45-58
15. Rea, M.S., Toward a Model of Visual Performance: A Review of Methodologies, Journal of Illum. Eng. Soc., Winter 1987, p. 128-142
16. Rea, M.S., The Validity of the Relative Contrast Sensitivity Function for Modelling Threshold and Suprathreshold Responses, The Integration of Visual Performance Criteria into the Illumination Design Process, Public Works Canada, 1982. Ministry of Supplies and Services 1983 Cat. No. W 63-7/1982, p. 76-108
17. Simonson, E. and Brozek J., Effects of Illumination level on Visual Performance, JOSA, V. 38, N. 4, 1948
18. Smith, S., Rea, M.S., Proofreading under Different Levels of Illumination, JIES, 1978
19. Smith, S., Rea, M.S., Performance of a Reading Test under Different Levels of Illumination, JIES, 1982
20. Weale, R.A. Retinal illumination and age. Transactions of the Illum. Engng. Soc. (London) 26 (1961) p. 95-100
21. Weale, R. A., The Aging Eye, H.K. Lewis, London, 1963
22. Weston, H.C., The Relation Between Illumination and Industrial Efficiency: The Effect of Size of Work, Joint report of the Industrial Health Research Board and the Illumination Research Committee, His Majesty's Stationery Office, London, 1935
23. Weston, H.C., The relation Between Illumination and Visual Efficiency - The Effect of Brightness Contrast, Industrial Health Research Board of the Medical Research Council Report No. 87, c/o London School of Hygiene and Tropical Medicine, Keppel Street, Gower Street, London WC1, Great Britain, H.M.S.O., London, 1945
24. Shapely, R., Enroth-Cugell, C., Visual Adaptation and Retinal Gain Controls. Progress in Retinal Research, Vol. 3 (1984) editor Osborne, N. and Chader, G., p. 263-346, Oxford: Pergamon
25. Auhorn, E., Über die Beziehung Zwischen Lichtsinn und Schärfe. Graefe's Archiv für Ophthalmologie, 167(1), p. 4, 1964
26. Muck, E., Bodmann, H.-W., Lichttechnik 13 (1961) p. 502-508
27. Loc, D.L., Waters, J.M., Visual Performance in Illumination of Differing Spectral Quality. Environmental Research Group, University College, London, March 1973
28. Adrian, W., Visual Performance, Acuity and Age. Proceedings LUX Europe, Edinburgh, April 1993, p. 278-290
29. Rea, M.S., Towards a Model of Visual Performance. Foundation and Data, JIES, Summer 1986, p.41-57
30. Adrian, W., Bhanji, A. Fundamentals of Disability Glare, 1st International Symposium on Glare, October 1991, Orlando, Florida, p. 185-193, Lighting Res. Institute, 120 Wall Street, 17th Floor, New York, NY 10005
31. Owslay, C., Sekular, R., Siemsen, D. Contrast Sensitivity throughout Adulthood. Aging in Human visual Functions Vol. 2 1982, edited by R. Sekuler et al., New York
32. Halonen, L. Effects of Lighting and Task Parameters on Visual Acuity and Performance. Ph.D. Thesis, Helsinki University of Technology, 1993, Ouakaari 5A, FIN-02150 Espoo

УДК 621.3.032.4:621.327

О РЕАЛИЗАЦИИ ТИРИСТОРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ-ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ В ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

В.Ф. СОКОЛОВ, канд. техн. наук

Харьковская государственная академия городского хозяйства

Проблема регулирования мощности и напряжения на осветительной нагрузке весьма актуальна. Стабилизация напряжения осветительных сетей, регулирование мощности облучательных установок, темнители ОУ в зрачинах зданиях - далеко не полный перечень применения регуляторов напряжения. Наиболее удобным для регулирования напряжения в ОУ общепризнан тиристорный регулятор (ТР). В качестве основного типа ТР для ОУ промышленного и бытового назначения с 70-х годов рекомендуется тиристорный ограничитель ТОН-3, выпускаемый Саранским заводом "Электропривод" и его модификации ППТТ [1]. В последнее время интерес к особенностям конструирования ТР для ОУ возрос, рекомендуются новые разработки аппаратов данного класса с учетом расширения мощности и области применения [2,3]. Однако энергетические службы предприятий должны наиболее полно представлять преимущества и проблемы применения ТР. Такая же задача стоит и перед разработчиками и изготавителями (которых в процессе конверсии становится все больше), поскольку рынок должен насыщаться полноценной и конкурентоспособной продукцией. Кроме того, при современном оснащении предприятия любая энергетическая служба может справиться с задачей создания ТР с учетом особенностей эксплуатации.

Главным в выборе построения и дальнейшей эксплуатации ТР является определение назначения преобразовательного аппарата с учетом максимального использования его возможностей.

Тиристорные регуляторы для ОУ строятся по принципу фазового управления [4]. Структурная схема такого ТР содержит три основных элемента - исполнительный орган (ИО), фазосдвигающее устройство (ФСУ) и управляющее устройство (УУ). Исполнительный орган является силовым коммутирующим звеном, установленным между сетевым вводом и осветительной нагрузкой.

Особенности работы ТР в сети переменного тока с учетом построения и эксплуатации сетей дают право утверждать, что наиболее приемлемым является выполнение ИО на симметричных тиристорах. Основной причиной применения симисторов является то, что при идентичности общих эксплуатационных параметров триисторов и симисторов, последние имеют симметричную вольт-амперную характеристику, обеспечивающую симисторным регуляторам ряд преимуществ по отношению к аналогичным ТР. Двусторонняя проводимость симисторов дает возможность строить простые схемные решения силовых цепей регуляторов, обеспечивает защиту вентилей от повреждения при скачках сетевого напряжения, что позволяет применять в ИО симисторы предельного допустимого класса по напряжению. Симметрия вольт-амперной характеристики позволяет объединять базовые поверхности вентилей, находящиеся под общим потенциалом. А это значит, что при работе ОУ в сетях с глухозаземленной нейтралью возможно построение регулятора, в котором с целью повышения эффективности естественного охлаждения общий теплоотвод блока симисторов может иметь тепловой и электрический контакты с заземленными металлическими конструкциями (фермами строительных перекрытий, мачтами открытых сооружений и т.д.). Такое конструктивное решение ИО регуляторов позволяет максимально использовать мощность управляемых вентилей