

Jeżeli rogówka nie jest powierzchnią sferyczną, wówczas układ optyczny oka ma różną moc, a więc i różną refrakcję w różnych przekrojach południkowych. Obraz jest astygmatyczny i przy obserwacji testu złożonego z promieniowo ułożonych kresek występują różnice między przekrojami w ich ostrym odwzorowaniu. Wada *astygmatyzmu* jest korygowana za pomocą szkieleń torycznych, których moc czołowa jest również odpowiednią funkcją przekroju południkowego.

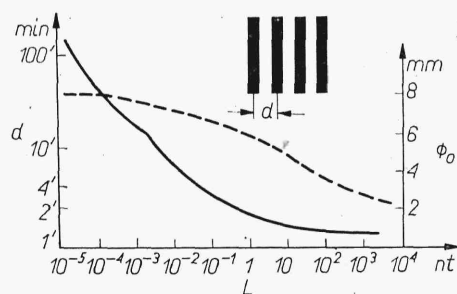
Bardziej szczegółowe dane na temat korekcji widzenia i konstrukcji szkieleń okularowych można znaleźć w [2] i [4].

4.3. Zdolność rozpoznawcza oka

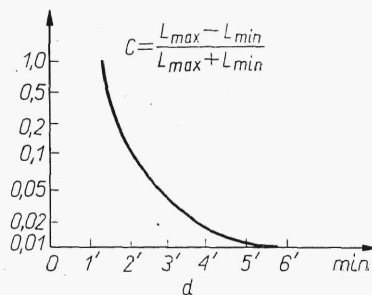
Z uwagi na budowę siatkówki, zachodzące procesy nerwowe, aberracje układu optycznego oka, zjawiska dyfrakcji itp. istnieją fizjologiczne granice możliwości rozpoznania przez człowieka różnych elementów lub zachodzących zdarzeń.

Przez *granice rozpoznania* lub *zdolność rozpoznawczą* oka rozumieć się będzie pewne wartości liczbowe, oderwane lub mianowane, charakteryzujące w sposób ilościowy wspomniane możliwości. Pojęcia te odnoszą się tu do warunków, kiedy obserwator ma swobodę w doborze najkorzystniejszego położenia oka, a więc bez ustalonego punktu fiksacji.

Granica rozpoznania jest najczęściej funkcją wielu parametrów, np. zależy od warunków w jakich próba się odbywa, od sposobu oświetlenia, od kolejności zachodzących zjawisk (zagadnienie adaptacji) itp. i wielokrotnie jest pojęciem subiektywnym z uwagi na trudność definicji samego momentu rozpoznania. Przykładem może być prosty przypadek obrazu dwóch punktów. Przy dostatecznie małej ich odległości powstaje wrażenie jednego punktu. W miarę ich oddalania najpierw obraz wydłuża się w kierunku ruchu, a dopiero później powstaje wrażenie zdwojenia. Przy jednakowej światłości obydwu punktów eksperymentalnie wyznaczony graniczny kąt rozpoznania przy dostrzeganiu wydłużenia wynosi $1,3'$, natomiast zdwojenia $1,8'$. Kąt ten rośnie, a więc zdolność rozpoznawcza maleje wraz ze wzrostem światłości obydwu punktów. Spowodowane jest to zwiększaniem się wpływu światła rozproszonego (zjawisko dyfuzji) w ośrodkach optycznych oka.



Rys. 4.7



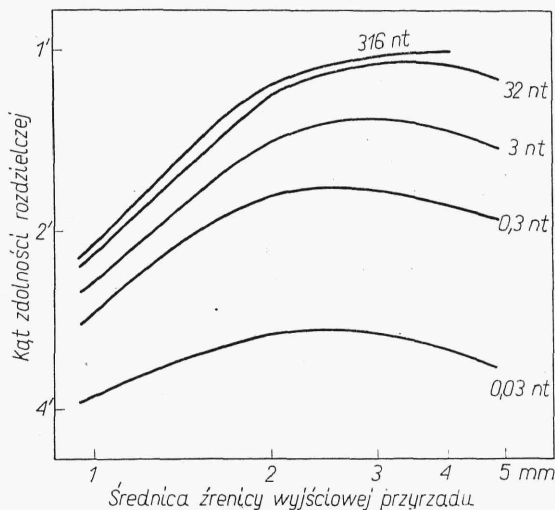
Rys. 4.8

Test Foucault'a złożony z układu czarno-białych linii (rys. 4.7) odgrywa ważną rolę przy badaniu jakości obrazu układów optycznych. Jako graniczny kąt rozpoznawania testu przyjmuje się minimalny kąt, pod jakim

widać jego okres przestrzenny d w chwili, gdy odróżnione są poszczególne kreski (kierunkowość struktury zauważana jest przy mniejszym kącie). Dla optymalnych warunków obserwacji kąt ten wynosi $1,2'$. Wartość kąta rośnie, a więc zdolność rozpoznawcza maleje, wraz ze spadkiem luminancji (rys. 4.7) i kontrastu (rys. 4.8) testu. Nieciągłość na pierwszym wykresie powstająca dla luminancji testu $5 \cdot 10^{-3}$ nt jest spowodowana zmianą roli czopków i pręcików jako elementów światłoczułych. Ogólnie biorąc zdolność rozpoznawcza kierunków poziomych i pionowych jest jednakowa, ale średnio o 70% wyższa niż kierunków skośnych kresek.

Zmiana luminancji obserwowanego testu wprowadza zmianę natężenia oświetlenia w płaszczyźnie siatkówki. Z uwagi na sprzężoną z tym zmianą średnicy Φ_0 źrenicy oka¹⁾ (linia przerywana na rys. 4.7) następuje równocześnie zmiana wpływu aberracji układu na jakość obrazu na siatkówce i dane wykresu 4.7 są wynikiem nałożenia się wpływu wielkości reakcji elementów światłoczułych siatkówki i jakości obrazu.

Przy współpracy oka z przyrządem optycznym, kiedy źrenica wyjściowa przyrządu ustala pęk promieni wchodzących do oka, występuje rozdzielanie tych czynników. Na rys. 4.9 zamieszczone są wyniki badań [5]



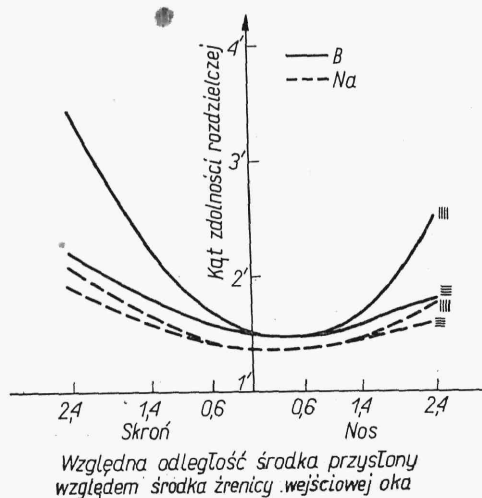
Rys. 4.9

uwzględniające niezależnie wpływ średnicy źrenicy i natężenia oświetlenia na powierzchni siatkówki. Przytoczone wartości luminancji testu wyznaczone są dla źrenicy o średnicy 2 mm. Z wykresu wynika, że najwyższa zdolność rozpoznawcza oka występuje przy średnicy około 3 mm. Dla większych średnic pogorszenie warunków rozpoznawania spowodowane jest aberracją oka, natomiast dla mniejszej — zjawiskiem dyfrakcji.

Wyniki badań przedstawione na rys. 4.9 odnoszą się do optymalnego ustawienia oka względem przyrządu, przy czym położenie dobierane jest przez samego obserwatora. Przy przesunięciach środka źrenicy wyjściowej przyrządu poza środek źrenicy wejściowej oka zdolność rozróżniania

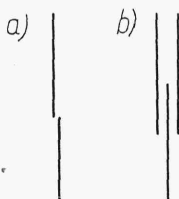
¹⁾ Względna zmiana natężenia oświetlenia z tego powodu jest mniejsza niż względna zmiana luminancji testu.

testu maleje, ponieważ wprowadzane są wtedy aberracje decentracji układu optycznego oka. Na rys. 4.10 przedstawiono wyniki badań 10 osób przeprowadzone przez autora [6] dla źrenicy wyjściowej przyrządu ϕ 2,4 mm, luminancji testu około 10 nt dla światła białego (B) i sodowego (Na) oraz poziomego \equiv i pionowego \parallel kierunku kresek. Wykres dotyczy przesunięć źrenicy przyrządu w przekroju poziomym. Z wykresu wynika, że środek obszaru o najwyższej zdolności rozpoznawczej przesunięty jest około 0,3 mm w stronę nosa względem środka źrenicy oka, co jest spowodowane asymetryczną budową oka w tej płaszczyźnie. Poza tym obraz poza środkiem jest astygmatyczny. W przekroju pionowym charakter zmian jest podobny z tym, że wykres jest symetryczny.



Rys. 4.10

Często w pomiarowych przyrządach optycznych wykorzystywana jest zdolność oka do wykrywania braku współliniowości dwóch kresek (rys. 4.11a). Powtarzalność koincydencji przy ich zgrywaniu jest rzędu 5"—10". Wyższą jeszcze dokładność można osiągnąć przez symetryczne ustawienie jednej kreski względem dwóch odpowiednio rozstawionych (rys. 4.11b).

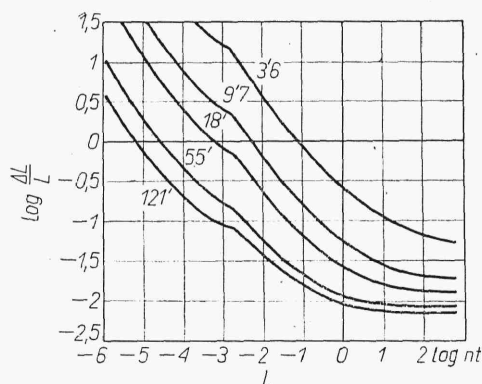


Rys. 4.11

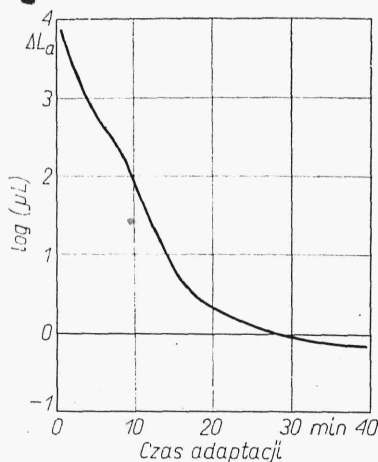
Do celów okulistycznych, szczególnie przy wyznaczaniu wad refrakcji, stosowane są *tablice testowe* złożone najczęściej z układu liter lub cyfr o różnej wysokości. Miarą zdolności rozpoznawczej jest pojęcie ostrości wzrokowej (wizusa) definiowanej jako odwrotność kąta, pod którym widać najmniejszy rozpoznawany element. Przyjmuje się, że ostrość wzrokowa

$V = 1$, jeżeli wspomniany kąt wynosi $5'$. Badanie za pomocą testów optometrycznych daje ogólne informacje o możliwości percepcyjnej oka, lecz do celów technicznych jest zbyt mało precyzyjne, gdyż np. granica rozpoznawcza zależy również od rodzaju litery, lub cyfry.

Ważną cechą rozpoznawczą oka wykorzystywaną do celów metrologicznych w fotometrii jest dostrzeganie różnicy oświetlenia dwóch pól. Najmniejsza dostrzegalna różnica luminancji ΔL nazywana jest progiem różnicowym. Na rys. 4.12 podano wyniki pomiarów, dotyczących porównywania luminancji $(L + \Delta L)$ koła widocznego pod kątem w (kąt w zaznaczony na każdej krzywej) znajdującego się na tle o luminancji L . Wraz ze wzrostem kąta w i luminancji L maleje monotonicznie względny próg różnicowy $\Delta L/L$ (rośnie względna zdolność rozpoznawcza), dążąc do war-



Rys. 4.12



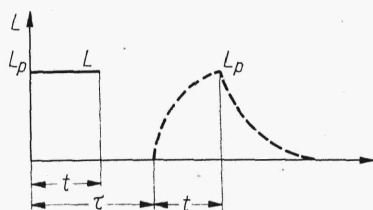
Rys. 4.13

tości asymptotycznych. Jeżeli luminancja pola odniesienia $L = 0$, mówi się wtedy o *progu absolutnym* ΔL_a . Jego wartość silnie zależy od adaptacji. Ilustracją tej zależności jest wykres na rys. 4.13. Dopiero po czasie 1 godziny przebywania w ciemności osiągnięta jest maksymalna zdolność dostrzegania. Adaptacja ma podobny wpływ na wyznaczenie progu różnicowego, przy czym jej rola maleje wraz ze wzrostem luminancji L pola odniesienia.

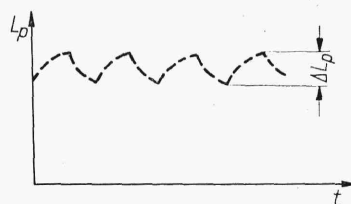
Jeżeli luminancja testu lub obserwowanego pola jest zmienna w czasie, wówczas jej pozorna zmiana rejestrowana w świadomości człowieka nie będzie pokrywała się ze zmianami rzeczywistymi. Niech dla przykładu test będzie oświetlony za pomocą impulsu prostokątnego dostatecznie krótkiego zaznaczonego linią ciągłą na rys. 4.14, wówczas odpowiadająca mu pozorna zmiana luminancji L_p przedstawiona jest linią przerywaną. Czas opóźnienia τ , w którym sygnał przebywa drogą od siatkówki do świadomości człowieka zmienia się od 0,3 s dla luminancji najniższych do 0,15 s dla oświetlenia dziennego. W czasie t wrażenie narasta wykładniczo, by następnie w podobny sposób zanikać. Mówi się wtedy o zjawisku *inercji widzenia*.

Jeżeli impulsy powtarzają się periodycznie, wówczas pozorna luminancja również ulega zmianie (rys. 4.15), lecz jej względna wartość $\Delta L_p/L_p$ maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Z uwagi na różnicowy próg do-

strzegania istnieje pewna częstotliwość krytyczna N_K , poza którą luminancja pozorna będzie stała. Częstotliwość krytyczna jest funkcją luminancji i zmienia się od 10 Hz dla 10^{-2} nt do 55 Hz dla $5 \cdot 10^4$ nt. Pozorny zanik zmian luminancji jest podstawą przekazywania ciągłości ruchu na ekranie telewizyjnym i kinowym.

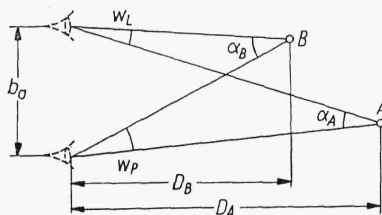


Rys. 4.14



Rys. 4.15

Wrażenie rejestrowane przez człowieka o intensywności odbieranego sygnału, nazywane tu jego pozorną wartością, jest również funkcją częstotliwości. Przykładowo dla $N = 5 - 10$ Hz i wysokich luminancji testu, pozorna intensywność sygnału jest kilkakrotnie wyższa niż intensywność jaka byłaby odczuwana przy ciągłym jego działaniu o tej samej luminancji. Zjawisko to jest spowodowane zmianą adaptacji siatkówki (miejscowe olśnienia) i jest wykorzystywane w sygnalizacji świetlnej.



Rys. 4.16

Powstawanie wrażenia przestrzennego rozmieszczenia przedmiotów w polu widzenia człowieka jest cechą związaną z widzeniem dwuocznym. Różnica kątów (rys. 4.16) $\Delta w = w_L - w_P$, pod którymi widać dwa punkty A i B przez lewe i prawe oko, odczuwana jest jako różnica odległości $D = D_A - D_B$ od obserwatora. Istnieje graniczny kąt Δw_g możliwości dostrzeżenia przestrzennego (stereoskopowego) przemieszczenia dwóch przedmiotów. Dla blisko leżących punktów w polu widzenia średnio wynosi on $10''$. Jeżeli punkt A znajduje się w nieskończoności, wówczas $\alpha_A = 0$ i położenie granicznego punktu B, który dla obserwatora nie będzie leżał na tej samej odległości co punkt A wynika z równości $\alpha_B = \Delta w_g = 10'' = 5 \cdot 10^{-5}$ rad. Ponieważ odległość środków źrenic oczu b_0 wynosi średnio 65 mm, to graniczna odległość D_g nazywana *promieniem widzenia stereoskopowego* wyniesie

$$D_g = \frac{b_0}{\Delta w_g} = 1300 \text{ m} \quad (4.7)$$

Przedmioty leżące na odległości większej od promienia widzenia stereoskopowego dla obserwatora będą znajdowały się już nieskończenie daleko.

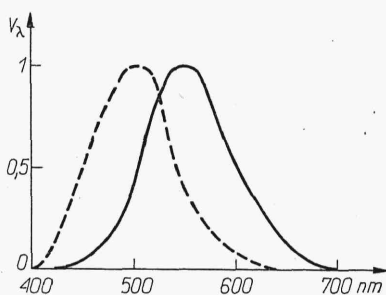
Wzajemne usytuowanie przedmiotów w przestrzeni można ocenić rów-

niez jednoocześnie i na odległościach większych niż D_g . Ocena taka opiera się na szacowaniu proporcji perspektywicznych i uwzględnieniu wpływu czynników atmosferycznych. Np. przedmiot zamglony będzie wydawał się pozornie jako dalej leżący, niż ten sam przedmiot obserwowany w przezroczystym powietrzu. Szacowanie położenia przedmiotów za pomocą czynników wtórnych jest nieprzydatne do celów metrologicznych i leży w kręgu zagadnień dotyczących złudzeń optycznych.

Należy tu podkreślić, że oko jest wykorzystywane do celów pomiarowych, ale tylko jako element porównujący. Np. wizualny pomiar oświetlenia dowolnego pola, czy odległości do dowolnego punktu będzie polegał na zrównaniu intensywności lub odległości z drugim elementem, dla którego te parametry są znane. Bezwzględna ocena tych wielkości jest mało dokładna, a często z uwagi na wyżej wspomniane czynniki obarczona grubym błędem.

4.4. Czułość widmowa oka. Widzenie barwne

Tylko część energii promieniowania elektromagnetycznego padającego na oko dotrze do siatkówki i zostanie pochłonięta przez czopki i pręciki wywołując tym samym reakcję elektro-chemiczną odczuwaną przez nas jako wrażenie świetlne. Pozostała część zostaje rozproszona, pochłonięta lub odbita przez ośrodki optyczne oka. Współczynnik przepuszczania ośrodka jest różny dla różnych długości fali, ponadto wielkość reakcji samych elementów światłoczułych zależy również od długości fali i dopiero nałożenie się tych czynników definiuje gęstość monochromatyczną reakcji oka na promieniowanie nazywaną tu *czułością widmową oka*. Czopki i pręciki mają różne własności widmowe i dlatego czułość widmowa oka zależy od jego adaptacji. Przy świetle dziennym (*widzenie fotopowe*) maksimum czułości przypada na 555 nm, natomiast nocnym (*widzenie skotopowe*) dla 510 nm.



Rys. 4.17

Obie krzywe czułości po znormowaniu ich maksymalnych wartości do 1 pokazano na rys. 4.17 (linia ciągła — widzenie dzienne, linia przerywana — nocne).

Krzywa czułości spektralnej oka przy widzeniu fotopowym odgrywa szczególną rolę w fotometrii (p. 2.7). W celu uniknięcia niejednoznaczności z uwagi na różnice fizjologiczne między poszczególnymi osobami, na podstawie wielu pomiarów ustalona została średnia krzywa czułości nazywana *względną skutecznością świetlną promieniowania monochroma-*

tycznego V_1 , która w pewnym sensie umownie ustala zależności między energią promieniowania elektromagnetycznego, a wrażeniami świetlnymi przez nią wywołanymi.

Przy obserwacji źródła światła, oprócz wrażenia ilościowego określonego przez luminancję źródła, powstaje wrażenie jakościowe, którym jest *barwa promieniowania*. Przykładowo w tabl. 1.2 (rozdział 1) podano barwy wywołane przez promieniowanie monochromatyczne. Wrażenie barwy zachodzi tylko przy widzeniu dziennym, a więc przyczyn jej powstawania należy szukać w budowie czopków. W siatkówce istnieją ich trzy rodzaje, które reagują na różne zakresy widma. Zbiór reakcji tych trzech czopków, zależnie od proporcji sygnałów, ustala wrażenie barwy. Ponieważ znane są gęstości monochromatyczne reakcji wszystkich trzech receptorów, wystarcza to do jednoznacznego określenia każdej barwy za pomocą trzech liczb. Zagadnieniem pomiaru barw, szczególnie ważnym dla przemysłu poligraficznego i sygnalizacji, zajmuje się kolorymetria [7].

Literatura

1. Starkiewicz W.: Psychofizjologia wzroku. Warszawa 1960. PZWL.
2. Le Grand Y.: Optique Physiologique. Paris 1956. t. I, II, III. Éd. de la „Revue d'Optique”.
3. Bartkowska i inni.: Podstawy optyki instrumentalnej. Warszawa 1957. PWT.
4. Hein A., Sidorowicz A., Wagnerowski T.: Oko i okulary. Warszawa 1960. WPL.
5. Leibowitz Herschel.: The Effect of Pupil Size on Visual Acuity for Photometrically Equated Test Fields at Various Levels of Luminance. JOSA Nr 6/1952 str. 416—422.
6. Jóźwicki R.: Zdolność rozdzielcza jako funkcja zmian położenia źrenicy oka względem źrenicy wyjściowej przyrządu. Praca doktorska (w przyg. do publikacji).
7. Zausznica A.: Nauka o barwie. Warszawa 1959. PWN.