

Korekcja wad wzroku
dla optyków okularowych

*Pamięci Profesora Witolda Starkiewicza (1906–1978),
twórcy i wieloletniego kierownika Kliniki Okulistycznej Akademii Medycznej w Szczecinie,
który uważał, że tylko optyk znający podstawy korekcji wad wzroku
będzie potrafił profesjonalnie wykonywać okulary i dobrze współpracować z okulistą*

UNIwersytet Szczeciński

Andrzej Styszyński
Jacek Styszyński

Korekcja wad wzroku dla optyków okularowych

Szczecin 2023

Rada Wydawnicza

Tomasz Bernat, Anna Cedro, Urszula Chęcińska, Małgorzata Makiewicz
Małgorzata Ofiarska, Michał Pluciński, Małgorzata Puc, Andrzej Skrendo
Karol Sroka, Renata Urban, Grzegorz Wejman
Marek Górski – przewodniczący Rady Wydawniczej
Elżbieta Zarzycka – dyrektor Wydawnictwa Naukowego

Recenzent

dr hab. n. med. Wojciech Warchoł

Redakcja językowa

Izabela Krupa

Korekta

Małgorzata Szczęsna

Redakcja techniczna i skład

Wiesława Mazurkiewicz

Projekt okładki

Piotr Kryk



Wersja elektroniczna publikacji dostępna na licencji CC BY-SA 4.0
po 12 miesiącach od daty wprowadzenia do obrotu

© Copyright by Uniwersytet Szczeciński, Szczecin 2018

DOI 10.18276/978-83-7972-687-5

ISBN (online) 978-83-7972-687-5

ISBN (print) 978-83-7972-686-8

ISBN 978-83-7972-228-0 (print, data wydania 2018)

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIWERSYTETU SZCZECIŃSKIEGO

Wydanie I (dodruk) | Ark. wyd. 10,0 | Ark. druk. 12,5 | Format 170/240

Spis treści

Wprowadzenie	9
1. Podstawy optyki geometrycznej.....	11
1.1. Prawa odbicia i załamania	11
1.2. Całkowite wewnętrzne odbicie	14
1.3. Załamanie światła w pryzmacie	16
1.4. Załamanie światła na powierzchni sferycznej	19
1.5. Soczewki.....	20
1.6. Układ dwóch soczewek	28
1.7. Soczewka gruba.....	29
1.8. Układ dwóch soczewek grubych.....	36
1.9. Układy Keplera i Galileusza	38
1.10. Aberracje układu optycznego.....	39
1.11. Aberracja sferyczna.....	40
1.12. Koma	41
1.13. Astygmatyzm wiązki skośnej	41
1.14. Krzywizna pola	42
1.15. Dystorsja.....	43
1.16. Aberracja chromatyczna	44
1.17. Działanie pryzmatyczne soczewki sferycznej.....	48
1.18. Soczewki asferyczne	50
2. Układ wzrokowy	59
2.1. Gałka oczna	61

2.2.	Błona zewnętrzna	63
2.3.	Błona środkowa	64
2.4.	Błona wewnętrzna	65
2.5.	Komory w gałce ocznej	72
2.6.	Soczewka	75
2.7.	Ciało szkliste	77
2.8.	Mięśnie zewnętrzne gałki ocznej	78
2.9.	Powieki	80
2.10.	Narząd łzowy	81
3.	Układ optyczny oka	86
3.1.	Moc układu optycznego oka. Miarowość i niemiarowość. Niezborność	86
3.2.	Punkt daleki	93
3.3.	Refrakcja oka	95
3.4.	Zasada optycznej korekcji wad wzroku	96
3.5.	Korekcja astygmatyzmu	99
3.6.	Ekwiwalent sferyczny soczewki korekcyjnej	100
3.7.	Oko akomodujące	102
3.8.	Ostrość wzroku	103
4.	Podmiotowe (subiektywne) badanie refrakcji	112
4.1.	Ekwiwalent sferyczny	112
4.2.	Tarcza do badania astygmatyzmu	117
4.3.	Cylinder skrzyżowany	121
4.4.	Sposoby (procedury) badania refrakcji	126
4.5.	Korekcja prezbiopii	137
5.	Przedmiotowe (obiektywne) badanie refrakcji	141
5.1.	Skiaskopia	141
5.2.	Refraktometria	149

6. Korekcja pryzmatyczna	151
7. Szczególne problemy optyki okularowej.....	159
7.1. Korekcja krótkowzroczności	159
7.2. Korekcja nadwzroczności.....	160
7.3. Odległość wierzchołkowa	163
7.4. Różnowzroczność.....	164
7.5. Okulary progresywne.....	166
7.6. Optyczne pomoce dla słabowidzących.....	169
7.7. Okulary dla nurkujących	173
Podsumowanie	179
Piśmiennictwo.....	181
Test sprawdzający	183
Test – prawidłowe odpowiedzi	199

Wprowadzenie

Korekcja okularowa to najstarszy – do dziś najczęściej stosowany – sposób korekcji wad wzroku, a zawód optyka okularowego należy do profesji, które wielu ludziom pomagają polepszyć jakość życia. Kształcenie optyków okularowych w Polsce przebiega na różnych poziomach. Tradycyjna droga to nauka zawodu w zakładzie rzemieślniczym lub technikum. Od dwudziestu lat kształcenie optyków okularowych odbywa się także na poziomie akademickim. Do grona uczelni przygotowujących absolwentów do pracy w zawodzie optyka okularowego dołączył w 2015 roku Uniwersytet Szczeciński. Dlatego, chcąc usprawnić i ułatwić studentom opanowanie podstawowej wiedzy oraz praktycznych umiejętności z zakresu korekcji wad wzroku, zdecydowaliśmy się na przygotowanie podręcznika zawierającego niezbędne informacje z tej dziedziny. Pomoc w zdaniu egzaminu z optyki, korekcji wad wzroku, jak również egzaminu licencjackiego nie jest naszym jedynym celem. Mamy także nadzieję, że podręcznik ten okaże się przydatny każdemu, kto chce przyswoić podstawy korekcji wad wzroku, a w szczególności optykom, którzy już działają w zawodzie. Postęp techniczny obejmuje także produkcję soczewek okularowych i sprawia, że pojawiają się coraz doskonalsze możliwości korekcji okularowej różnych zaburzeń wzroku. Aby możliwości te zostały w pełni wykorzystane, optycy okularowi powinni systematycznie poszerzać zakres swojej wiedzy i umiejętności. Optyk okularowy powinien lubić optykę, zwłaszcza optykę geometryczną, oraz potrafić wykorzystać ją w różnych problemach, które mogą pojawić się w jego codziennej pracy. Znajomość podstaw optyki jest niezbędna dla zrozumienia istoty optycznej korekcji wad wzroku.

Podręcznik ten nie jest kompletnym kursem optyki i nie omawia szczegółowo różnych zaburzeń widzenia obuocznego. Przygotowując go, chcieliśmy, aby zawarta w nim wiedza była zaprezentowana w przystępny sposób. Niech czytelnicy ocenią, czy nam to się udało.

Autorzy

1. Podstawy optyki geometrycznej

Opis wielu zjawisk fizycznych, jeśli nawet opiera się na zaawansowanych metodach matematycznych i obliczeniach komputerowych, ma zwykle charakter przybliżony. Nauki techniczne i medyczne wprowadzają dalsze przybliżenia, które pozwalają uprościć opisy, przez co stają się one przydatne do rozwiązania konkretnego problemu. Takim przybliżeniem, szczególnie przydatnym w korekcji wad wzroku, jest optyka geometryczna.

Optyka geometryczna sprowadza się właściwie do zastosowania trzech praw:

- prawa prostoliniowego rozchodzenia się światła,
- prawa odbicia światła,
- prawa załamania światła.

W optyce geometrycznej pomija się zjawiska uginania światła (dyfrakcji) i przyjmuje się, że światło w środowisku jednorodnym i izotropowym rozchodzi się dokładnie po liniach prostych. Oprócz prostoliniowości zakłada się, że promienie są od siebie niezależne, pomija się zatem interferencję światła. Ponadto przyjmuje się, że zwrot biegu promieni jest odwracalny.

1.1. Prawa odbicia i załamania

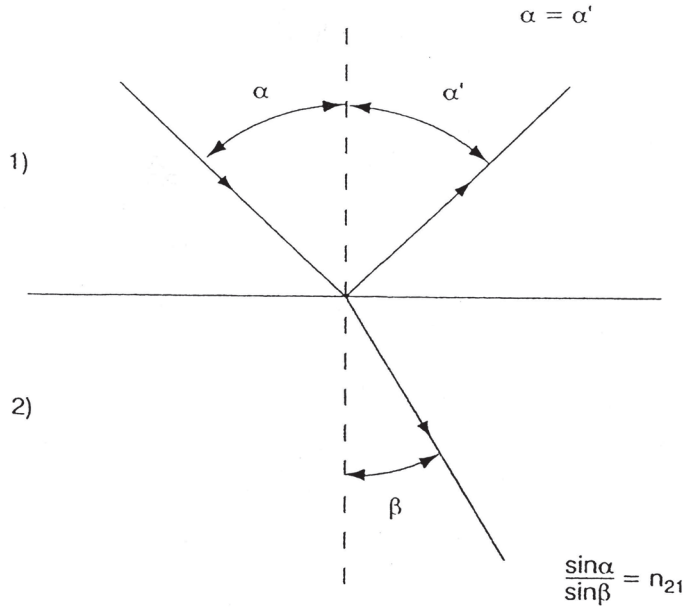
Prawa odbicia

1. Promień padający, odbity i normalna (prostopadła) do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie.
2. Kąt padania jest równy kątowi odbicia.

Prawa załamania

1. Promień padający, załamany i normalna do powierzchni granicznej leżą w jednej płaszczyźnie.

2. Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest wielkością stałą. Prawa odbicia i załamania przedstawiono na rysunku 1.1.



1 – ośrodek pierwszy; 2 – ośrodek drugi; α – kąt padania; α' – kąt odbicia; β – kąt załamania; n_{21} – współczynnik załamania ośrodka drugiego względem pierwszego.

Rysunek 1.1. Odbicie i załamanie światła na granicy dwóch ośrodków

Współczynnik załamania światła ośrodka drugiego względem pierwszego spełnia następujące zależności:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (1.1)$$

oraz

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.2)$$

gdzie: v_1 – prędkość światła w ośrodku pierwszym,
 v_2 – prędkość światła w ośrodku drugim.

Bezwzględny współczynnik załamania światła to współczynnik załamania danego ośrodka względem próżni:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.3)$$

gdzie: c – prędkość światła w próżni,
 v – prędkość światła w danym ośrodku.

Zatem

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

gdzie: n_{21} – współczynnik załamania ośrodka drugiego względem pierwszego,
 n_1 – współczynnik załamania ośrodka pierwszego,
 n_2 – współczynnik załamania ośrodka drugiego.

Prawo załamania można więc także zapisać w postaci:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (1.5)$$

Dla niewielkich kątów stosuje się niekiedy przybliżenie pierwszego rzędu: $\sin \alpha \cong \alpha$, $\sin \beta \cong \beta$. Wtedy prawo załamania można zapisać:

$$n_1 \cdot \alpha = n_2 \cdot \beta \quad (1.6)$$

Oczywiście wartości kątów należy wówczas podawać w mierze łukowej, czyli w radianach. Prawa odbicia i załamania światła zostały sformułowane na podstawie prostych pomiarów przez Snella (Snelliusa). Prawa te można wyprowadzić także z zasady Fermata, według której światło przebiega z jednego punktu do następnego wzdłuż drogi, na której przebycie potrzebuje jak najmniej czasu.

Posługując się pojęciem długości drogi optycznej, można także stwierdzić, zgodnie z zasadą Fermata, że światło podąża trasą, której długość drogi optycznej jest najmniejsza, przy czym długość drogi optycznej ℓ_o to rzeczywista odległość ℓ , jaką światło pokonuje w danym ośrodku, pomnożona przez współczynnik załamania światła n danego ośrodka: $\ell_o = \ell \cdot n$.

Warto podkreślić, że współczynnik załamania światła nie zależy od wartości kąta padania i kąta załamania. Natomiast zależy on od rodzaju substancji, a dla danej substancji od barwy światła, czyli od długości fali świetlnej λ lub

jej częstotliwości ν . Zależność wartości współczynnika załamania od długości fali określany jest dyspersją współczynnika załamania. Współczynnik załamania w praktyce optyki okularowej nazywany jest także indeksem.

Współczynniki załamania gazów bardzo mało różnią się od jedności. Dlatego przyjmuje się, że współczynnik załamania powietrza $n = 1,00$ (jak dla próżni). Praktycznie więc soczewka w próżni i w powietrzu będzie mieć jednakową moc. Przykładowe wartości współczynnika załamania światła (indeksu) dla barwy żółtej przedstawiono w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Wartości współczynnika załamania (dla żółtej linii sodu)

Nazwa materiału	n
Woda	1,33
Alkohol etylowy	1,36
Szkło kwarcowe	1,46
Polimetakrylan metylu (PMMA)	1,49
Szkło crown (BK7)	1,52
Chlorek sodu	1,54
Szkło ołowiane (SF4)	1,75
Diamant	2,42

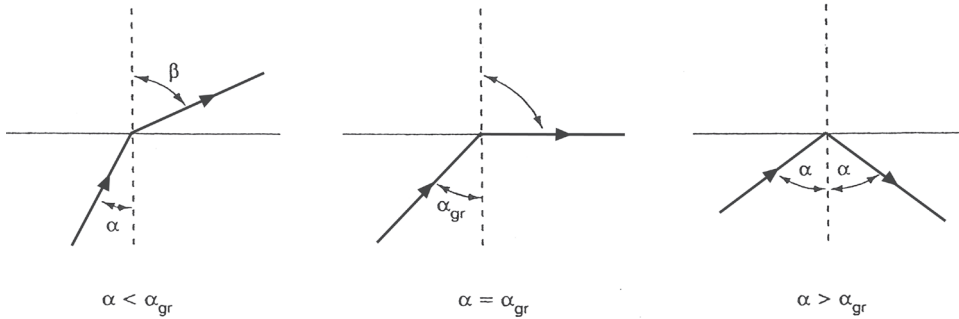
Przykład 1

Współczynnik załamania szkła crown n_{sz} wynosi w powietrzu (lub w próżni) 1,52. Natomiast współczynnik załamania tego szkła względem wody n_{szw} wynosi:

$$n_{szw} = \frac{n_{sz}}{n_w} = \frac{1,52}{1,33} = 1,14.$$

1.2. Całkowite wewnętrzne odbicie

Gdy światło przechodzi z ośrodka optycznie gęstszego, czyli o większym współczynniku załamania (np. szkła), do ośrodka optycznie rzadszego, czyli o mniejszym współczynniku załamania (np. powietrza), kąt załamania jest większy niż kąt padania (rys. 1.2).



Rysunek 1.2. Przejście światła z ośrodka optycznie gęstszego do ośrodka optycznie rzadszego

Kąt padania, któremu odpowiada w takiej sytuacji kąt załamania 90° , nazywa się kątem granicznym α_{gr} .

Jeżeli więc $n = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$, to dla $\alpha = \alpha_{gr}$,

$$n = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \alpha_{gr}} = \frac{1}{\sin \alpha_{gr}} \quad (1.7)$$

Zatem gdy światło biegnie ze szkła do powietrza, a kąt padania jest większy od kąta granicznego, następuje całkowite wewnętrzne odbicie.

Przykład 2

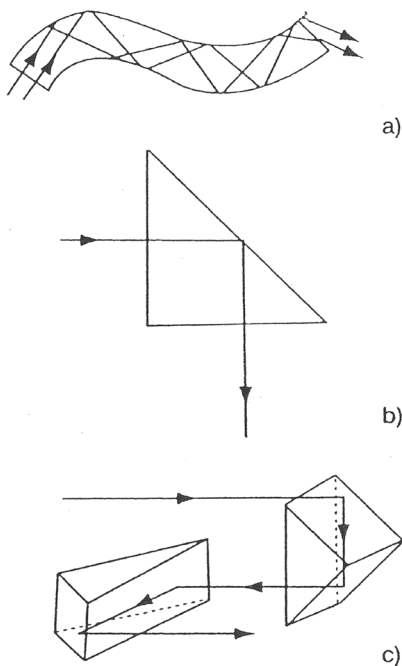
Dla szkła ($n_{sz} = 1,52$) i powietrza ($n_p = 1,00$) kąt graniczny wynosi:

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{1}{1,52} = 0,658, \text{ więc } \alpha_{gr} = 41^\circ.$$

Natomiast dla szkła ($n_{sz} = 1,52$) i wody ($n_w = 1,33$) kąt graniczny wynosi:

$$\sin \alpha_{gr} = \frac{1}{1,14} = 0,877, \text{ więc } \alpha_{gr} = 61^\circ.$$

Całkowite wewnętrzne odbicie znalazło praktyczne zastosowanie między innymi w światłowodach lub różnych układach pryzmatycznych do zmiany kierunku biegu światła.



Rysunek 1.3. Zastosowanie całkowitego odbicia wewnętrznego: a) światłowod; b) pryzmat zmieniający kierunek biegu promienia o 90° ; c) odwracający układ pryzmatów

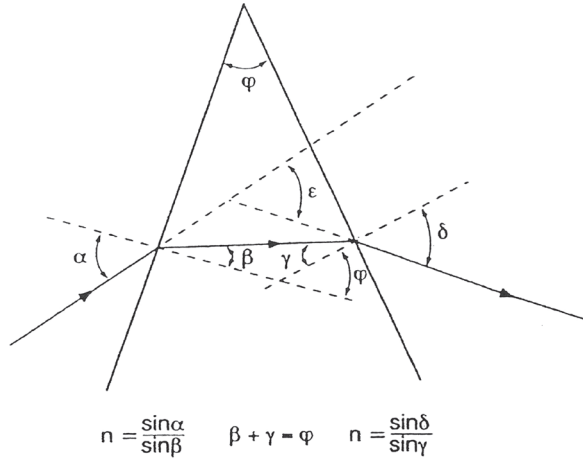
1.3. Załamanie światła w pryzmacie

Proste zależności geometryczne pomiędzy zaznaczonymi na rysunku 1.4 kątami pozwalają wyrazić kąt odchylenia promienia świetlnego przez pryzmat następująco:

$$\varepsilon = \alpha + \delta - \varphi \quad (1.8)$$

Jeśli przyjąć w przybliżeniu, że $\alpha = n\beta$ oraz $\delta = n\gamma$, to otrzymujemy:

$$\varepsilon = (n-1)\varphi \quad (1.9)$$



φ – kąt łamiący pryzmatu; ε – kąt odchylenia; α – kąt padania na pierwszą ścianę; δ – kąt załamania na drugiej ścianie; n – współczynnik załamania pryzmatu.

Rysunek 1.4. Bieg promieni w pryzmacie

Jest to najczęściej stosowany, choć uproszczony wzór określający odchylenie promienia przez pryzmat. Zależy ono od kąta łamiącego pryzmatu i współczynnika załamania materiału, z którego pryzmat został wykonany. Wielkość kąta odchylenia można wyrażać w stopniach lub dioptriach pryzmatycznych, czyli pryzmodioptriach (pdpt).

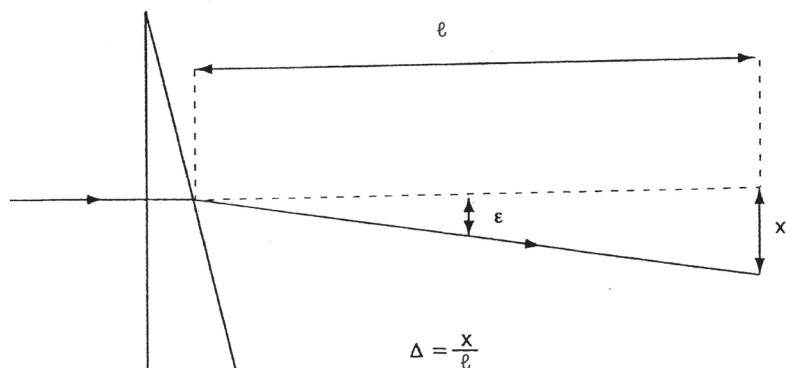
Moc pryzmatu wynosi 1 pdpt, jeżeli w odległości 1 m od niego promień odchyła się o 1 cm w kierunku prostopadłym do przedłużenia promienia padającego (rys. 1.5). Moc pryzmatu wyrażoną w pryzmodioptriach można więc zapisać:

$$\Delta = 100 \operatorname{tg} \varepsilon \quad (1.10)$$

Przeliczenie stopni na dioptrie pryzmatyczne lub odwrotnie jest proste:

$$\Delta = 1,75 \varepsilon \text{ lub } \varepsilon = 0,57 \Delta \quad (1.11)$$

gdzie: Δ – kąt odchylenia wyrażony w pryzmodioptriach,
 ε – kąt odchylenia wyrażony w stopniach.

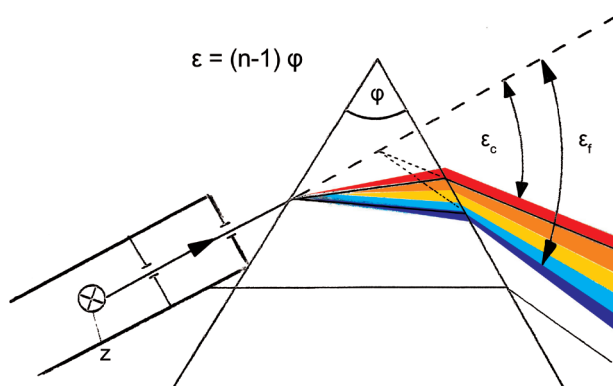


Rysunek 1.5. Jeżeli w odległości ℓ metrów od pryzmatu odchylenie promienia wynosi x centymetrów, to moc pryzmatyczna $\Delta = \frac{x}{\ell}$ przyzmodioptrii

Przykład 3

Dla $n = 1,52$ i $\varphi = 10^\circ$ mamy $\varepsilon = (n-1)\varphi = 5,2^\circ$, więc $\Delta = 1,75\varepsilon = 9$ pdpt.

Ponieważ współczynnik załamania wykazuje dyspersję, czyli zależność od długości fali świetlnej, białe światło przechodząc przez pryzmat, ulega rozszczepieniu (rys. 1.6).



φ – kąt łamiący pryzmatu; Z – źródło światła białego; ε_c – kąt odchylenia dla barwy czerwonej; ε_f – kąt odchylenia dla barwy fioletowej.

Rysunek 1.6. Rozszczepienie światła białego przez pryzmat

Rozszczepienie światła w układach optycznych nie jest na ogół zjawiskiem pożądanym. Dotyczy to w szczególności soczewek okularowych. Dlatego materiały, z których wykonywane są soczewki, powinny charakteryzować się niską dyspersją. Praktycznie stosowanym parametrem określającym dyspersję współczynnika załamania danego materiału jest liczba Abbego L_A :

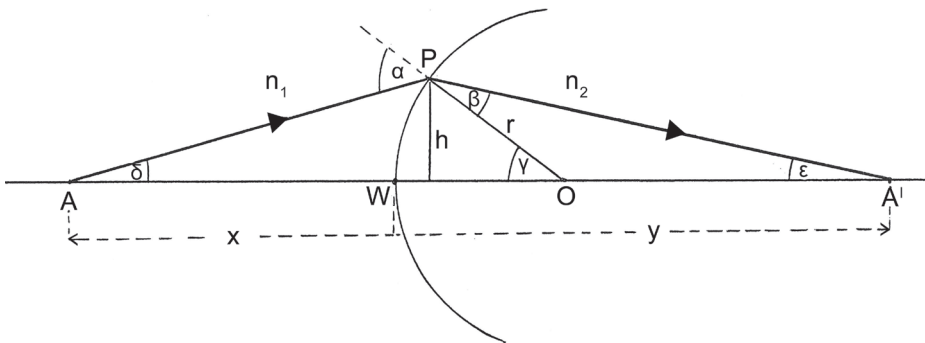
$$L_A = \frac{n_z - 1}{n_f - n_{cz}} \quad (1.12)$$

gdzie: n_z – współczynnik załamania dla barwy żółtej,
 n_f – współczynnik załamania dla barwy fioletowej,
 n_{cz} – współczynnik załamania dla barwy czerwonej.

Dla materiałów o liczbie Abbego $L_A > 40$ aberracja chromatyczna soczewek okularowych jest zwykle niewielka.

1.4. Załamanie światła na powierzchni sferycznej

Dla zrozumienia i opisu matematycznego działania soczewek lub bardziej złożonych układów optycznych przydatne jest rozpatrzenie załamania światła na powierzchni sferycznej rozgraniczającej dwa różne ośrodki o współczynnikach załamania n_1 i n_2 .



Rysunek 1.7. Załamanie światła na powierzchni sferycznej rozgraniczającej dwa różne ośrodki o współczynnikach załamania n_1 i n_2

Między zaznaczonymi na rysunku 1.7 kątami zachodzą następujące zależności:

$$\alpha = \gamma + \delta, \beta = \gamma - \varepsilon \quad (1.13)$$

Dla małych kątów (promień przyosiowy) wyrażonych w radianach można zastosować przybliżoną postać prawa załamania (1.6):

$$n_1 \alpha = n_2 \beta,$$

wówczas:

$$n_1(\gamma + \delta) = n_2(\gamma - \varepsilon), \text{ więc } n_1 \delta + n_2 \varepsilon = (n_2 - n_1) \gamma \quad (1.14)$$

podstawiając:

$$\delta \approx \tan \delta \approx -\frac{h}{WA}, \varepsilon \approx \tan \varepsilon \approx \frac{h}{WA'}, \gamma \approx \tan \gamma \approx \frac{h}{WO} \quad (1.15)$$

oraz $WA = x$, $WA' = y$, $WO = r$, otrzymujemy:

$$\frac{n_2}{y} = \frac{n_1}{x} + \frac{n_2 - n_1}{r} \quad (1.16)$$

Wyrażenie $D = \frac{n_2 - n_1}{r}$ określa zdolność skupiającą (moc) sferycznej powierzchni o promieniu krzywizny r rozdzielającej ośrodki o współczynnikach załamania n_1 i n_2 .

1.5. Soczewki

Określony zbiór promieni świetlnych tworzy wiązkę. Wiązka promieni może być rozbieżna ($\Psi < 0$), zbieżna ($\Psi > 0$) lub równoległa ($\Psi = 0$). Przechodząc przez soczewkę, wiązka promieni zmienia swoją zbieżność. Pomiędzy zbieżnościami wiązki padającej na soczewkę Ψ i wiązki po przejściu przez soczewkę Ψ' zachodzi zależność:

$$\psi' - \psi = D \quad (1.17)$$

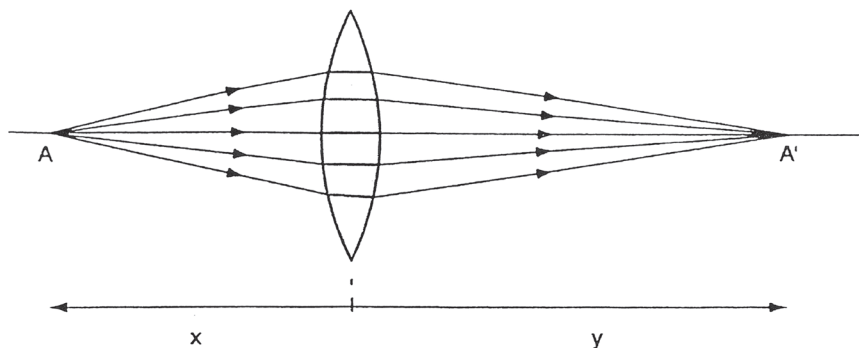
gdzie:

$$\psi = \frac{1}{x}, \psi' = \frac{1}{y} \quad (1.18)$$

oraz

$$D = \frac{1}{f'} \quad (1.19)$$

jest zdolnością skupiającą, czyli mocą soczewki o ogniskowej obrazowej f' .



A – punktowe źródło światła; A' – obraz punktu A utworzony przez soczewkę; x – odległość punktu A od soczewki; y – odległość obrazu A' od soczewki.

Rysunek 1.8. Zmiana zbieżności wiązki promieni przy przejściu przez soczewkę dodatnią

Podstawowy wzór dla soczewki (wzór Kartezjusza) określający związek między odległością x przedmiotu od soczewki, odległością y obrazu od soczewki i jej ogniskową obrazową f' przyjmuje więc postać:

$$\frac{1}{y} - \frac{1}{x} = \frac{1}{f'} \quad (1.20)$$

Warto przypomnieć, że w optyce geometrycznej (a zwłaszcza okularowej) zwykle przyjmuje się następujące reguły znaków:

1. Odległość od jednego punktu leżącego na osi optycznej do drugiego jest dodatnia, jeżeli jest mierzona zgodnie z kierunkiem biegu światła, a ujemna w przeciwnym wypadku.
2. Odcinki mierzone w górę względem osi optycznej są dodatnie, w dół ujemne.
3. Promień krzywizny jest dodatni, gdy powierzchnia jest zwrócona wypukłością do światła padającego, a w przeciwnym wypadku – ujemny.
4. Kąt mierzony zgodnie z kierunkiem obrotu wskazówek zegara jest ujemny, a mierzony przeciwnie – dodatni. Kąt utworzony przez promień z osią optyczną mierzy się od promienia do osi.
5. Soczewki skupiające (dodatnie) mają ogniskową dodatnią, a soczewki rozpraszające (ujemne) – ujemną (mówiąc o ogniskowej bez dodatkowych objaśnień, mamy na myśli ogniskową obrazową f').

Przykład 4

Przedmiot umieszczono w odległości 50 cm od soczewki sferycznej o mocy +10 dpt. W jakiej odległości od soczewki powstanie jego obraz?

Przyjmujemy: $x = -50$ cm, $f' = \frac{1}{D} = 0,1$ m = 10 cm. Z równania soczewkowego otrzymujemy:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{x} + \frac{1}{f'} = -\frac{1}{50} + \frac{1}{10} = \frac{4}{50},$$

a więc $y = \frac{50}{4}$ cm = 12,5 cm. Obraz powstanie w odległości 12,5 cm od soczewki.

Soczewkami cienkimi nazywamy soczewki, których grubość jest mała w porównaniu z promieniami krzywizny ich powierzchni lub długością ogniskowej. Na schematycznych rysunkach cienkie soczewki przedstawia się zwykle w postaci strzałek dwustronnych. Na rysunku 1.9 zaprezentowano sposób wykreślania obrazów dla cienkiej soczewki skupiającej. Taka graficzna konstrukcja pozwala na określenia charakterystyki obrazu.

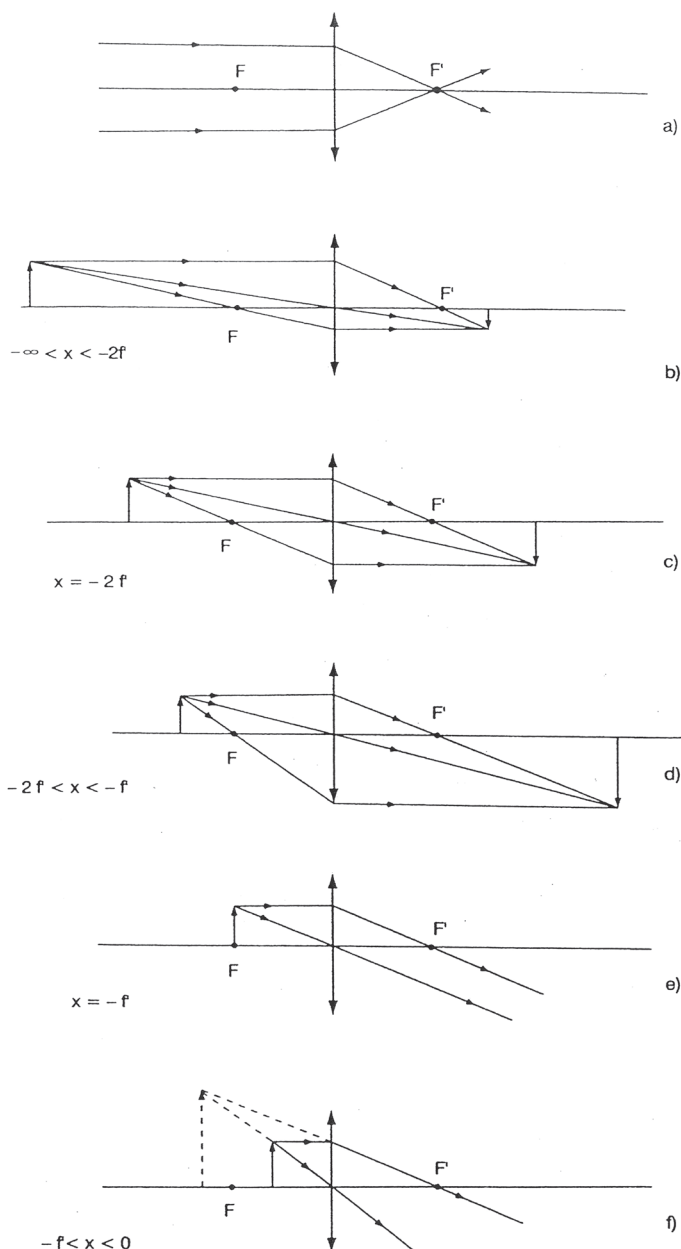
Na rysunku 1.10 przedstawiono wykres zależności odległości obrazu od odległości przedmiotu dla soczewki skupiającej.

Soczewka rozpraszająca (ujemna) zawsze tworzy obraz pozorny, pomniejszony i prosty (rys. 1.11).

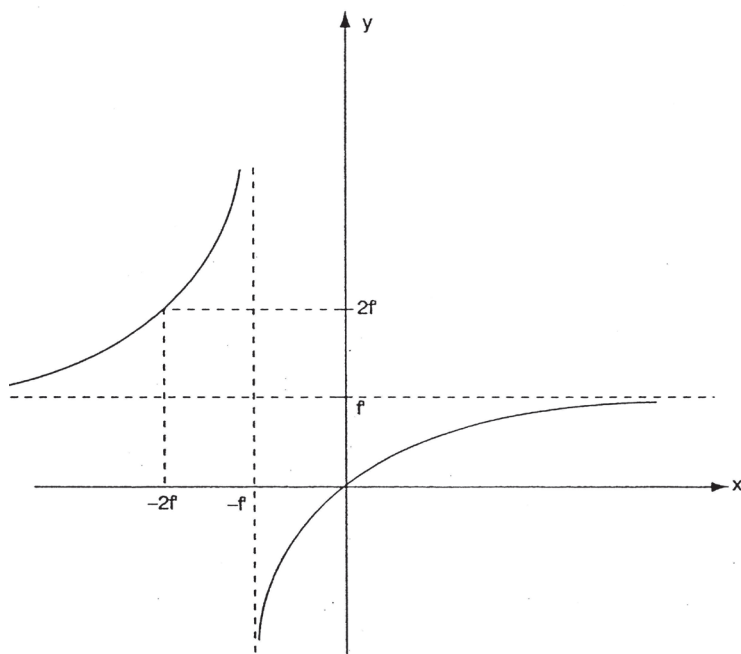
Zdolność skupiającą (moc) sferycznej soczewki cienkiej (rys. 1.12) można przedstawić wzorem zwanym wzorem szlifierzy:

$$D = \left(\frac{n}{n_0} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.21)$$

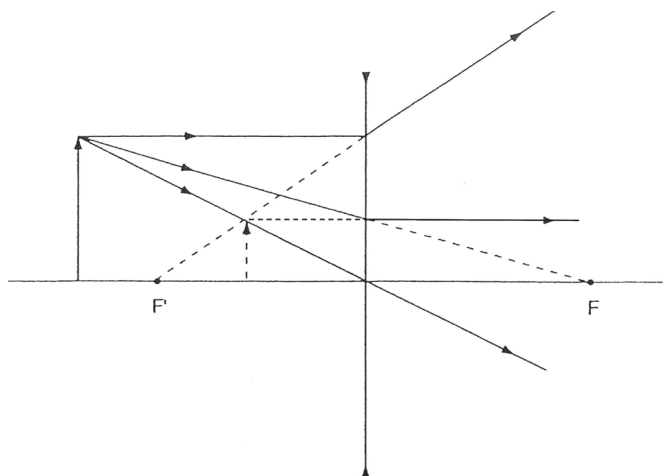
gdzie: n – współczynnik załamania szkła, z którego wykonana jest soczewka,
 n_0 – współczynnik załamania ośrodka, w którym znajduje się soczewka,
 r_1, r_2 – promienie krzywizny odpowiednich powierzchni.



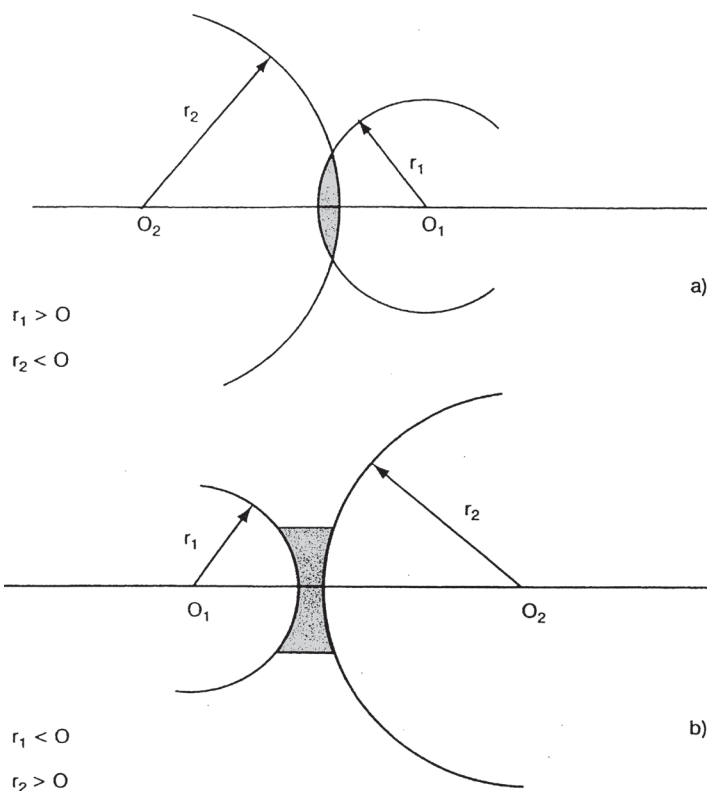
Rysunek 1.9. Przypadki położenia przedmiotu i obrazu dla soczewki skupiającej: a) przedmiot nieskończenie odległy, obraz utworzony w ognisku, rzeczywisty, punktowy; b) obraz rzeczywisty, pomniejszony, odwrócony; c) obraz rzeczywisty, naturalnej wielkości, odwrócony; d) obraz rzeczywisty, powiększony, odwrócony; e) obraz nieskończenie odległy, nieskończenie duży; f) obraz pozorny, powiększony, prosty



Rysunek 1.10. Zależność odległości obrazu y od odległości przedmiotu x dla soczewki skupiającej. Część wykresu odpowiadająca wartościom $x > 0$ dotyczy przedmiotu pozornego



Rysunek 1.11. Obraz utworzony przez soczewkę rozpraszającą



r_1, r_2 – promienie krzywizny; O_1, O_2 – środki krzywizny.

Rysunek 1.12. Soczewka sferyczna: a) dwuwypukła; b) dwuwklęsła

Przykład 5

Oblicz moc dwuwypukłej soczewki sferycznej (rys. 1.12a) o promieniach krzywizny $r_1 = 10$ cm i $r_2 = -20$ cm, wykonanej ze szkła o współczynniku załamania $n = 1,4$ i znajdującej się:

- a) w powietrzu $n_p = 1,0$,
- b) w cieczy o współczynniku załamania $n_c = 1,6$.

Powyższa soczewka umieszczona w powietrzu ma moc:

$$D_1 = \left(\frac{n}{n_p} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \left(\frac{1,4}{1,0} - 1 \right) \left(\frac{1}{0,1} - \frac{1}{-0,2} \right) = 0,4(10 + 5) = +6,0 \text{ dpt.}$$

Jednak ta sama soczewka umieszczona w cieczy o współczynniku załamania większym od współczynnika załamania szkła staje się soczewką rozpraszającą o mocy:

$$D_2 = \left(\frac{n}{n_c} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \left(\frac{1,4}{1,6} - 1 \right) \left(\frac{1}{0,1} - \frac{1}{-0,2} \right) = -0,125(10 + 5) \cong -1,9 \text{ dpt.}$$

Przykład 6

Oblicz moc dwuwklęsłej soczewki sferycznej (rys. 1.12b) o promieniach krzywizny $r_1 = -10 \text{ cm}$ i $r_2 = 20 \text{ cm}$ wykonanej ze szkła o współczynniku załamania $n = 1,4$ i znajdującej się:

- w powietrzu $n_p = 1,0$,
- w cieczy o współczynniku załamania $n_c = 1,6$.

Powyższa soczewka umieszczona w powietrzu ma moc:

$$D_1 = \left(\frac{n}{n_p} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \left(\frac{1,4}{1,0} - 1 \right) \left(\frac{1}{-0,1} - \frac{1}{0,2} \right) = 0,4(-10 - 5) = -6,0 \text{ dpt.}$$

Ta sama soczewka umieszczona w cieczy o współczynniku załamania większym od współczynnika załamania szkła staje się soczewką skupiającą o mocy:

$$D_2 = \left(\frac{n}{n_c} - 1 \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \left(\frac{1,4}{1,6} - 1 \right) \left(\frac{1}{-0,1} - \frac{1}{0,2} \right) = -\frac{1}{8}(-15) \approx +1,9 \text{ dpt.}$$

W optyce okularowej najczęściej rozważamy sytuacje, w których soczewka znajduje się w powietrzu, i dlatego przyjmując przybliżenie soczewki cienkiej, można stosować wzór:

$$D = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.22)$$

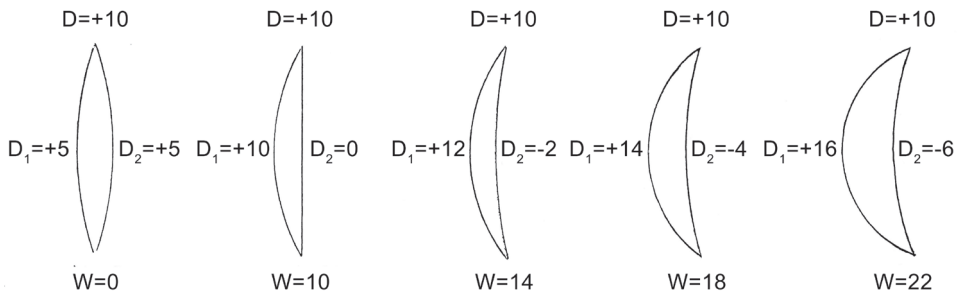
Jak widać z powyższego wzoru, w powietrzu moc cienkiej soczewki sferycznej wykonanej ze szkła o współczynniku załamania n jest sumą mocy jej powierzchni przedniej D_1 i mocy powierzchni tylnej D_2 :

$$D = D_1 + D_2 \quad (1.23)$$

gdzie: $D_1 = \frac{n-1}{r_1} = (n-1)R_1$, $D_2 = \frac{1-n}{r_2} = (1-n)R_2$,

a wielkości $R_1 = \frac{1}{r_1}$, $R_2 = \frac{1}{r_2}$, będące odwrotnościami promieni krzywizny, nazywane są krzywiznami.

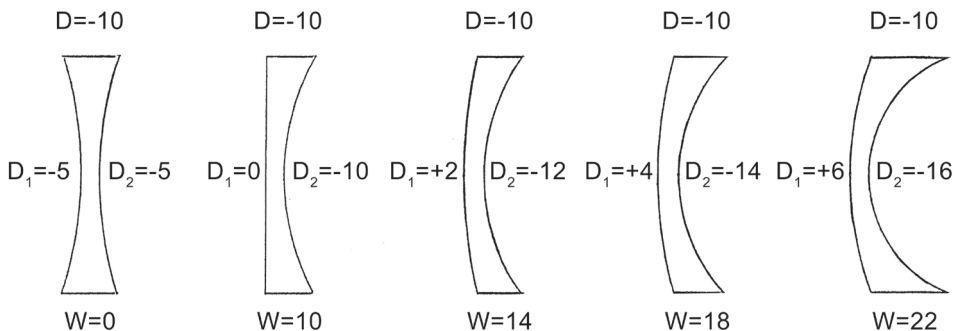
Z powyższego wynika, że soczewka z określonego materiału (współczynnik załamania n) i o określonej mocy D może zostać wykonana przy różnych wartościach mocy pierwszej powierzchni D_1 i drugiej powierzchni D_2 , czyli przy różnych wartościach odpowiednich promieni krzywizny r_1 i r_2 .



Rysunek 1.13. Różne rozwiązania konstrukcyjne dla przykładowej soczewki skupiającej o mocy +10 dpt: $D = D_1 + D_2$, $W = D_1 - D_2$

Na rysunku 1.13 przedstawiono poglądowo kilka możliwych rozwiązań konstrukcyjnych dla przykładowej soczewki skupiającej o mocy +10 dpt. Poszczególne soczewki mają tę samą moc, a różnią się wygięciem $W = D_1 - D_2$.

Podobne poglądowe przedstawienie dla przykładowej soczewki o mocy -10 dpt zamieszczono na rysunku 1.14.

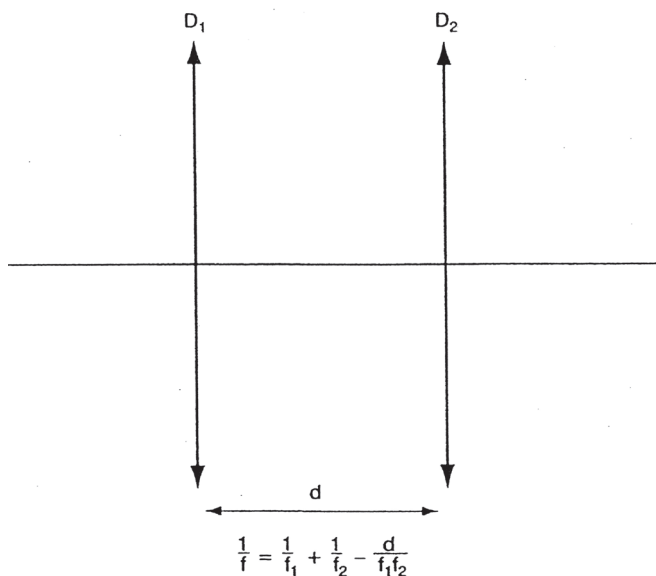


Rysunek 1.14. Różne rozwiązania konstrukcyjne dla przykładowej soczewki rozpraszającej o mocy -10 dpt: $D = D_1 + D_2$, $W = D_1 - D_2$

1.6. Układ dwóch soczewek

Dwie soczewki o mocach D_1 i D_2 znajdujące się w powietrzu w odległości d od siebie (rys. 1.15) tworzą układ, którego moc D wynosi:

$$D = D_1 + D_2 - dD_1D_2 \quad (1.24)$$



d – odległość między soczewkami; f – ogniskowa układu; f_1 – ogniskowa pierwszej soczewki; f_2 – ogniskowa drugiej soczewki

Rysunek 1.15. Układ dwóch soczewek o mocach D_1 i D_2

Przykład 7

Oblicz moc wypadkową układu soczewek o mocach $D_1 = +4,00$ dpt i $D_2 = +6,00$ dpt:

- przylegających do siebie ($d = 0$),
- znajdujących się w odległości $d = 5$ cm.

W pierwszym przypadku moc układu wynosi:

$$D = D_1 + D_2 = +4,00 + 6,00 = +10,00 \text{ dpt.}$$

W drugim przypadku moc wypadowa jest mniejsza:

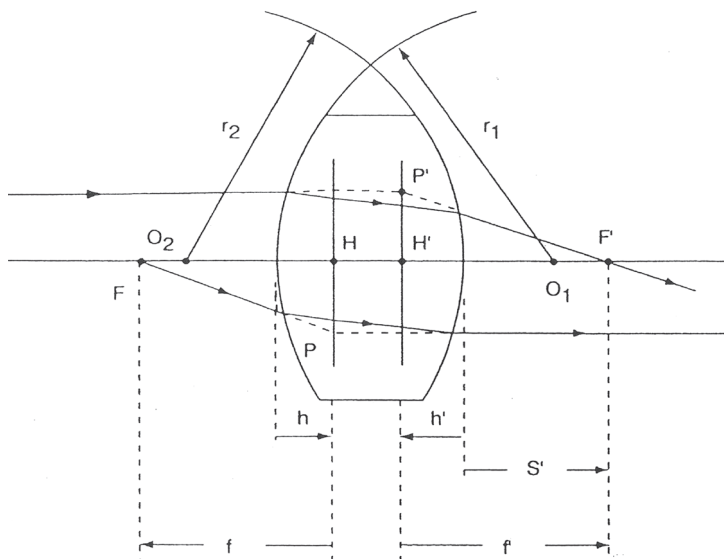
$$D = D_1 + D_2 - dD_1D_2 = +4,00 + 6,00 - 0,05 \cdot 24 = +10 - 1,20 = +8,80 \text{ dpt.}$$

1.7. Soczewka gruba

Jeżeli grubość soczewki nie jest bardzo mała w stosunku do długości ogniskowych i promieni krzywizn, to nie można jej pomijać bez narażania się na utratę odpowiedniej dokładności obliczeń. Dlatego dla dokładnego opisu tworzenia obrazów przez takie soczewki wprowadza się oprócz dwóch ognisk dwa punkty główne i dwa punkty węzłowe. Położenie tych trzech par punktów, zwanych punktami kardynalnymi, jednoznacznie określa bieg promieni przez soczewkę grubą lub bardziej złożony układ optyczny. Punktem kardynalnym, czyli ogniskom, punktem głównym i punktem węzłowym, odpowiadają przechodzące przez nie i jednocześnie prostopadłe do osi płaszczyzny: ogniskowe, główne i węzłowe.

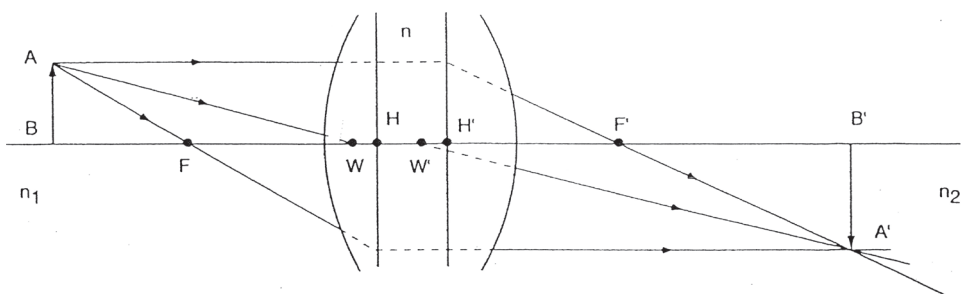
Na rysunku 1.16 przedstawiono położenie płaszczyzn głównych dla soczewki dwuwypukłej. Płaszczyzna główna obrazowa to płaszczyzna prostopadła do osi optycznej i przechodząca przez punkt P' przecięcia się przedłużeń promienia padającego równoległe do osi i promienia wychodzącego z soczewki. Płaszczyzna główna przedmiotowa to płaszczyzna prostopadła do osi optycznej i przechodząca przez punkt P przecięcia się przedłużeń promienia przechodzącego przez ognisko przedmiotowe F i wychodzącego z soczewki równoległe do osi. Punkty H i H' przecięcia płaszczyzn głównych z osią optyczną to punkty główne: przedmiotowy i obrazowy.

Ogniskowa obrazowa f' soczewki grubej to odległość od punktu głównego obrazowego H' do ogniska obrazowego F'. Ogniskowa przedmiotowa f to odległość od punktu głównego przedmiotowego H do ogniska przedmiotowego F. Natomiast ogniskowa czołowa s' to odległość ogniska obrazowego F' od wierzchołka drugiej powierzchni.



F – ognisko przedmiotowe; F' – ognisko obrazowe; H – punkt główny przedmiotowy; H' – punkt główny obrazowy; f – ogniskowa przedmiotowa; f' – ogniskowa obrazowa; s' – ogniskowa czołowa; h – odległość punktu głównego przedmiotowego H od wierzchołka pierwszej powierzchni; h' – odległość punktu głównego obrazowego H' od wierzchołka drugiej powierzchni; O_1, O_2 – środki krzywizny pierwszej i drugiej powierzchni; r_1, r_2 – promienie krzywizny pierwszej i drugiej powierzchni.

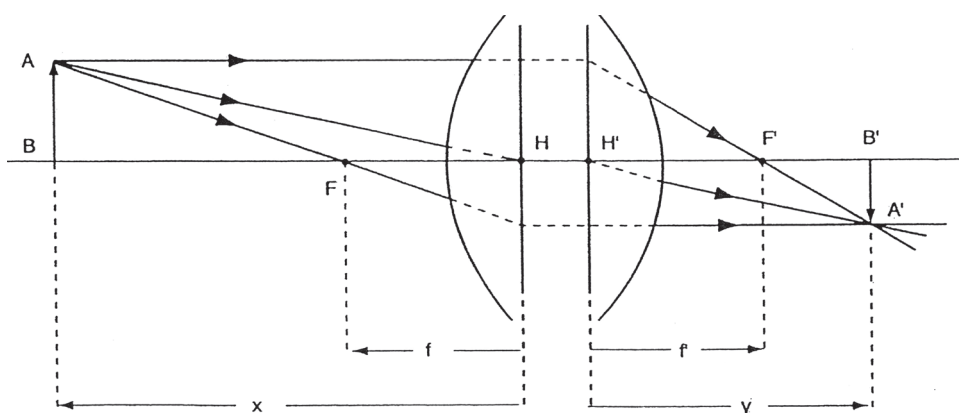
Rysunek 1.16. Położenie płaszczyzn głównych dla soczewki dwuwypukłej



F, F' – ogniska; H, H' – punkty główne; W, W' – punkty węzłowe; n – współczynnik załamania szkła; n_1 – współczynnik załamania ośrodka przed soczewką; n_2 – współczynnik załamania ośrodka za soczewką ($n_1 \neq n_2$); AB – przedmiot; A'B' – obraz.

Rysunek 1.17. Punkty kardynalne dla soczewki dwuwypukłej

W soczewce grubej (rys. 1.17) oprócz ognisk (przedmiotowego F i obrazowego F') i punktów głównych (przedmiotowego H i obrazowego H') występują jeszcze punkty węzłowe (przedmiotowy W i obrazowy W'). Istnieją bowiem takie promienie, które po przejściu przez soczewkę doznają tylko przesunięcia równoległego. Punkty przecięcia się przedłużeń takich promieni wchodzących i wychodzących z soczewki (układu) z osią optyczną nazywa się właśnie punktami węzłowymi, a płaszczyzny przechodzące przez te punkty prostopadłe do osi – płaszczyznami węzłowymi.



F, F' – ogniska; f, f' – ogniskowe; AB – przedmiot; $A'B'$ – obraz; x – odległość przedmiotu; y – odległość obrazu, $\frac{1}{y} = \frac{1}{x} + \frac{1}{f'}$.

Rysunek 1.18. Obraz utworzony przez soczewkę grubą (przed i za soczewką znajduje się taki sam ośrodek, więc punkty węzłowe pokrywają się z punktami głównymi H i H')

Wprowadzenie punktów węzłowych jest pożyteczne wtedy, gdy po obu stronach soczewki znajdują się ośrodki o różnych współczynnikach załamania (taka sytuacja występuje w układzie optycznym oka). Natomiast jeśli w przestrzeni przedmiotowej i obrazowej znajduje się taki sam ośrodek (np. powietrze), to punkty węzłowe pokrywają się z odpowiednimi punktami głównymi (rys. 1.18).

Moc (moc właściwą) soczewki grubej umieszczonej w powietrzu ($n_p = 1$) można obliczyć ze wzoru:

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} D_1 D_2 \quad (1.25)$$

gdzie:

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1}, \quad D_2 = \frac{1-n}{r_2} \quad (1.26)$$

są odpowiednio mocą pierwszej i drugiej powierzchni,
 r_1, r_2 – promieniami krzywizny pierwszej i drugiej powierzchni,
 d – grubością soczewki,
 n – współczynnikiem załamania szkła soczewki.

Dla soczewki znajdującej się w powietrzu $|f'| = |f|$.

Podstawiając odpowiednie wyrażenia na D_1 i D_2 , otrzymujemy następujące wyrażenie na moc soczewki grubej:

$$D = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \frac{d}{r_1 r_2} \quad (1.27)$$

Dla soczewki cienkiej ($d \ll r_1, r_2$) drugi składnik w powyższym wyrażeniu można pominąć.

Odległość h punktu głównego przedmiotowego H od wierzchołka pierwszej powierzchni soczewki wynosi:

$$h = \frac{d}{n} \frac{D_2}{D} \quad (1.28)$$

Odległość h' punktu głównego obrazowego H' od wierzchołka drugiej powierzchni wynosi:

$$h' = -\frac{d}{n} \frac{D_1}{D} \quad (1.29)$$

Oczywiście punkt główny znajduje się przed odpowiednim wierzchołkiem, gdy wartość obliczona ze wzoru jest ujemna, a za wierzchołkiem, gdy ta wartość jest dodatnia. Moc czołowa D_c jest to odwrotność odległości ogniska obrazowego od wierzchołka drugiej powierzchni, czyli odwrotność ogniskowej czołowej s' :

$$D_c = \frac{1}{s'} \quad (1.30)$$

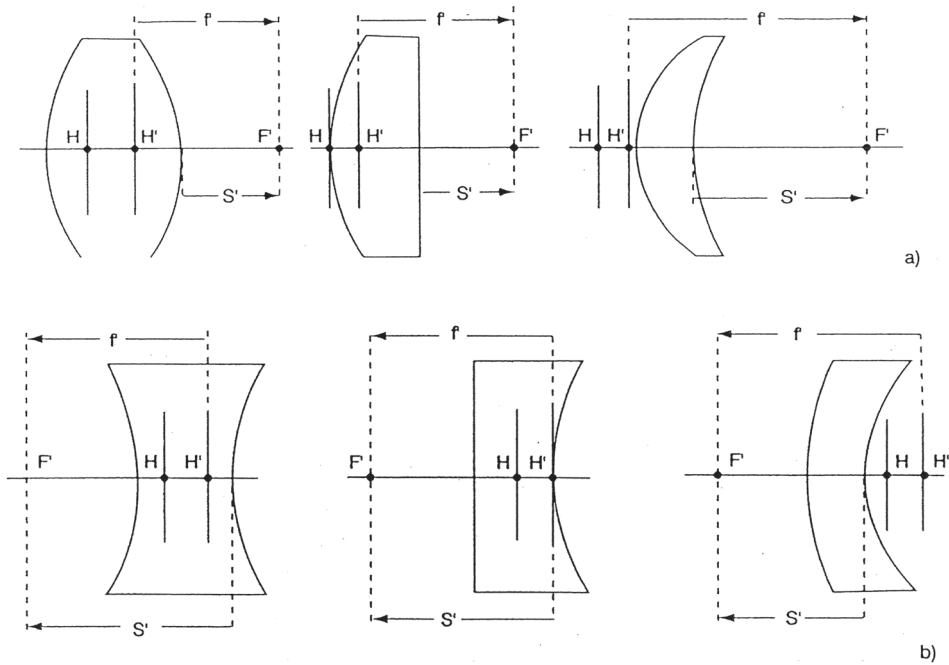
Moc czołową można obliczyć ze wzoru:

$$D_c = \frac{D_1}{1 - \frac{d}{n} D_1} + D_2 \quad (1.31)$$

W praktyce technicznej stosuje się niekiedy pojęcie mocy sferometrycznej D_s :

$$D_s = D_1 + D_2 \quad (1.32)$$

Na rysunku 1.19 przedstawiono położenie płaszczyzn głównych, a także ogniskową obrazową i czołową dla różnych soczewek.



F' – ognisko obrazowe; f' – ogniskowa obrazowa; s' – ogniskowa czołowa.

Rysunek 1.19. Położenie płaszczyzn głównych różnych soczewek: a) dodatnich; b) ujemnych

Warto zauważyć, że jeśli pierwsza powierzchnia soczewki jest płaska lub jeśli przyjmujemy, że jest cienka, to moc (moc właściwa) D , moc czołowa D_c i moc sferometryczna D_s są sobie równe.

W kolejnych czterech przykładach przedstawiono sposób obliczenia mocy D , ogniskowej f' ($|f'| = |f|$), odległości punktów głównych h i h' od odpowiednich wierzchołków soczewki o określonych wartościach promieni krzywizny r_1 i r_2 , grubości d , współczynnika załamania szkła n . Przyjęto, że soczewka znajduje się w powietrzu. Obliczono także wartości ogniskowej czołowej s' i mocy czołowej D_c .

Przykład 8

Soczewka dwuwypukła (rys. 1.19a) o parametrach:

$$r_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}, \quad r_2 = -10 \text{ cm} = -0,10 \text{ m}, \quad d = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}, \quad n = 1,52.$$

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1} = \frac{0,52}{0,05} = +10,4 \text{ dpt}, \quad D_2 = \frac{1-n}{r_2} = \frac{-0,52}{-0,1} = +5,2 \text{ dpt}$$

$$\frac{d}{n} = \frac{0,01}{1,52} = 0,0066 \text{ m}$$

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} D_1 D_2 = +10,4 + 5,2 - 0,0066 \cdot (10,4) \cdot (5,2) = +15,24 \text{ dpt}$$

$$f' = \frac{1}{D} = \frac{1}{15,24} = 0,0656 \text{ m}$$

$$h' = -\frac{d}{n} \frac{D_1}{D} = -0,0066 \frac{10,4}{15,24} = -0,0045 \text{ m}$$

$$h = \frac{d}{n} \frac{D_2}{D} = 0,0066 \frac{5,2}{15,24} = 0,0022 \text{ m}$$

$$s' = f' + h' = 0,0656 - 0,0045 = 0,0611 \text{ m}$$

$$D_c = \frac{1}{s'} = \frac{1}{0,0611} = 16,37 \text{ dpt}.$$

Przykład 9

Soczewka dwuwklęsła (rys. 1.19b):

$$r_1 = -5 \text{ cm} = -0,05 \text{ m}, \quad r_2 = +10 \text{ cm} = +0,1 \text{ m}, \quad d = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}, \quad n = 1,52.$$

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1} = \frac{0,52}{-0,05} = -10,4 \text{ dpt}, \quad D_2 = \frac{1-n}{r_2} = \frac{-0,52}{0,1} = -5,2 \text{ dpt}$$

$$\frac{d}{n} = \frac{0,01}{1,52} = 0,0066 \text{ m}$$

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} D_1 D_2 = -10,4 - 5,2 - 0,0066 \cdot (-10,4) \cdot (-5,2) = -15,96 \text{ dpt}$$

$$f' = \frac{1}{D} = \frac{1}{-15,96} = -0,0626 \text{ m}$$

$$h' = -\frac{d}{n} \frac{D_1}{D} = -0,0066 \frac{-10,4}{-15,96} = -0,0043 \text{ m}$$

$$h = \frac{d}{n} \frac{D_2}{D} = 0,0066 \frac{-5,2}{-15,96} = 0,0021 \text{ m}$$

$$s' = f' + h' = -0,0626 - 0,0043 = -0,0669 \text{ m}$$

$$D_c = \frac{1}{s'} = \frac{1}{-0,0669} = -14,95 \text{ dpt.}$$

Przykład 10

Soczewka wypukło-wklęsła dodatnia (rys. 1.19a):

$r_1 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$, $r_2 = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$, $d = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$, $n = 1,52$.

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1} = \frac{0,52}{0,05} = +10,4 \text{ dpt}, \quad D_2 = \frac{1-n}{r_2} = \frac{-0,52}{0,1} = -5,2 \text{ dpt}$$

$$\frac{d}{n} = \frac{0,01}{1,52} = 0,0066 \text{ m}$$

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} D_1 D_2 = +10,4 - 5,2 - 0,0066 \cdot (10,4) \cdot (-5,2) = +5,56 \text{ dpt}$$

$$f' = \frac{1}{D} = \frac{1}{5,56} = 0,179 \text{ m}$$

$$h' = -\frac{d}{n} \frac{D_1}{D} = -0,0066 \frac{10,4}{5,56} = -0,0123 \text{ m}$$

$$h = \frac{d}{n} \frac{D_2}{D} = 0,0066 \frac{-5,2}{5,56} = -0,0062 \text{ m}$$

$$s' = f' + h' = 0,179 - 0,0123 = 0,1667 \text{ m}$$

$$D_c = \frac{1}{s'} = \frac{1}{0,1667} = +6,00 \text{ dpt.}$$

Przykład 11

Soczewka wypukło-wklęsła ujemna (rys. 1.19b):

$r_1 = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$, $r_2 = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$, $d = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$, $n = 1,52$.

$$D_1 = \frac{n-1}{r_1} = \frac{0,52}{0,10} = +5,2 \text{ dpt}, D_2 = \frac{1-n}{r_2} = \frac{-0,52}{0,05} = -10,4 \text{ dpt}$$

$$\frac{d}{n} = \frac{0,01}{1,52} = 0,0066 \text{ m}$$

$$D = D_1 + D_2 - \frac{d}{n} D_1 D_2 = +5,2 - 10,4 - 0,0066 \cdot (5,2) \cdot (-10,4) = -4,84 \text{ dpt}$$

$$f' = \frac{1}{D} = \frac{1}{-4,84} \text{ m} = -0,207 \text{ m}$$

$$h' = -\frac{d}{n} \frac{D_1}{D} = -0,0066 \frac{5,2}{-4,84} = -0,0071 \text{ m}$$

$$h = \frac{d}{n} \frac{D_2}{D} = 0,0066 \frac{-10,4}{-4,84} = 0,0142 \text{ m}$$

$$s' = f' + h' = -0,207 + 0,0071 = -0,1999 \text{ m}$$

$$D_c = \frac{1}{s'} = \frac{1}{-0,1999} = -5,00 \text{ dpt.}$$

1.8. Układ dwóch soczewek grubych

Dla układu dwóch soczewek grubych można również określić położenie ognisk (moc) oraz punktów głównych. Na rysunku 1.20 przedstawiono układ dwóch soczewek (w tym przypadku skupiających). Moc takiego układu w powietrzu wynosi:

$$D = D_1 + D_2 - dD_1D_2 \quad (1.33)$$

gdzie: D_1, D_2 – moce soczewek,

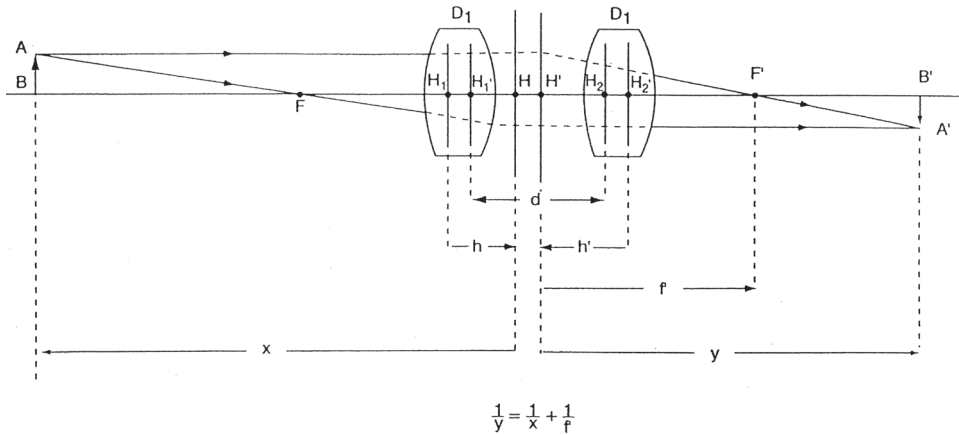
$d = H_1H_2$ – odległość pomiędzy punktem głównym obrazowym H'_1 pierwszej soczewki a punktem głównym przedmiotowym H_2 drugiej soczewki.

Odległość h' od punktu głównego obrazowego H'_2 drugiej soczewki do punktu głównego obrazowego H' układu oblicza się ze wzoru:

$$h' = -d \frac{D_1}{D} \quad (1.34)$$

Odległość h od punktu głównego przedmiotowego H_1 pierwszej soczewki do punktu głównego przedmiotowego H układu oblicza się ze wzoru:

$$h = d \frac{D_2}{D} \quad (1.35)$$



H_1, H'_1 – punkty główne pierwszej soczewki; H_2, H'_2 – punkty główne drugiej soczewki; H, H' – punkty główne układu; F – ognisko przedmiotowe układu; F' – ognisko obrazowe układu; f' – ogniskowa obrazowa układu; AB – przedmiot; $A'B'$ – obraz; x – odległość przedmiotu od układu (od punktu głównego przedmiotowego H); y – odległość obrazu od układu (od punktu głównego obrazowego H').

Rysunek 1.20. Układ dwóch soczewek o mocach D_1 i D_2

Przykład 12

Jeżeli przyjąć dla przykładu przedstawionego na rysunku 1.20 wartości:

$D_1 = +15$ dpt, $D_2 = +10$ dpt, $d = 30$ mm = 0,03 m, to

$$D = D_1 + D_2 - dD_1D_2 = 15 + 10 - 0,03 \cdot 15 \cdot 10 = 20,5 \text{ dpt}$$

$$f' = \frac{1}{D} = \frac{1}{20,5} = 0,049 \text{ m}$$

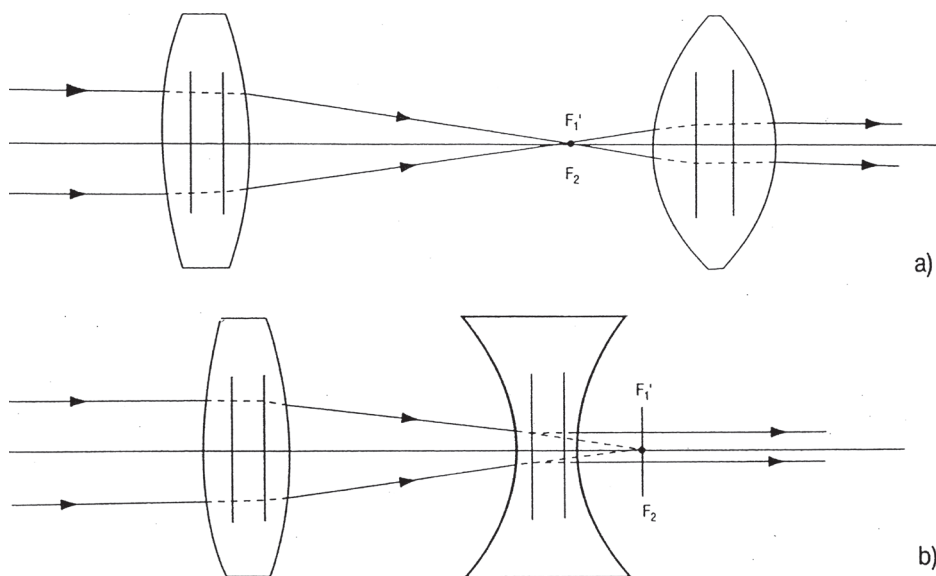
$$h' = -d \frac{D_1}{D} = -0,03 \frac{15}{20,5} = -0,022 \text{ m}$$

$$h = d \frac{D_2}{D} = 0,03 \frac{10}{20,5} = 0,015 \text{ m.}$$

Obraz przedmiotu ustawionego w odległości na przykład $x = -20$ cm przed takim układem (mierząc od punktu głównego przedmiotowego H układu) powstanie w odległości $y = 6,4$ cm za układem (licząc od punktu głównego obrazowego H' układu).

1.9. Układy Keplera i Galileusza

Szczególnymi przypadkami układów dwusoczewkowych są tzw. bezogniskowe układy Keplera i Galileusza. W układach tych ognisko przedmiotowe F_2 drugiej soczewki (okularu) znajduje się w ognisku obrazowym F_1' pierwszej soczewki (obiektywu). Układ Keplera składa się z dwóch soczewek dodatnich, a układ Galileusza jest złożony z soczewki dodatniej i soczewki ujemnej (rys. 1.21). Układy takie znajdują zastosowanie w lunetach.



F_1 – ognisko obrazowe obiektywu; F_2 – ognisko przedmiotowe okularu.

Rysunek 1.21. Układ bezogniskowy: a) układ Keplera; b) układ Galileusza

1.10. Aberracje układu optycznego

Analiza sposobu powstawania obrazu w prostych układach optycznych wymaga zwykle wykreślenia kilku promieni, a doskonały układ optyczny powinien odwzorować punkt jako punkt, prostą jako prostą, płaszczyznę jako płaszczyznę. Taka idealna transformacja przestrzeni przedmiotowej w przestrzeń obrazową jest trudna do osiągnięcia, gdyż rzeczywiste układy optyczne są obarczone błędami. Te wady odwzorowań noszą nazwę aberracji. W matematycznym opisie biegu promieni stosuje się przybliżenia nazywane przybliżeniem małego kąta, przybliżeniem przyosiowym lub przybliżeniem pierwszego rzędu. Wiąże się to z rozwinięciem wielomianowym funkcji sinus:

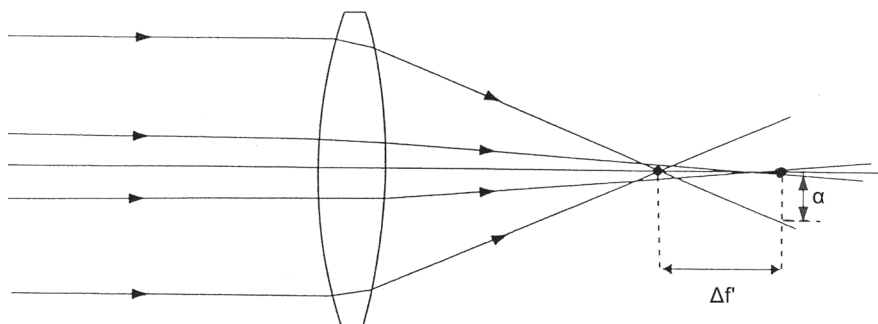
$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \dots \quad (1.36)$$

gdzie kąt α jest wyrażony w mierze łukowej, czyli w radianach.

Dla małych wartości kąta α drugi, trzeci i każdy następny wyraz powyższego wielomianu jest nieistotny i wtedy można przyjąć: $\sin \alpha \approx \alpha$, stąd określenie przybliżenie pierwszego rzędu. Przybliżenie to zostało zastosowane przy wyprowadzeniu wzoru określającego odchylenie promienia światła przez pryzmat, a także określeniu mocy powierzchni sferycznej. Przyjmując przybliżenie $\sin \alpha \approx \alpha - \frac{\alpha^3}{3!}$, Seidel opisał pięć podstawowych aberracji geometrycznych, które są nazywane monochromatycznymi aberracjami trzeciego rzędu Seidla. Są to: aberracja sferyczna, koma, astygmatyzm wiązki skośnej, krzywizna pola i dystorsja. Poza powyższymi aberracjami monochromatycznymi występuje także aberracja chromatyczna wynikająca z heterochromatycznej natury światła białego i dyspersji współczynnika załamania.

1.11. Aberracja sferyczna

Aberracja sferyczna (rys. 1.22) polega na tym, że promienie biegnące dalej od osi skupiają się bliżej soczewki niż promienie przyosiowe, co powoduje, że obraz punktu jest rozmaźany. Miarą aberracji sferycznej jest odległość między ogniskiem dla promieni przyosiowych a ogniskiem dla promieni skrajnych – aberracja podłużna ($\Delta f'$). Aberrację sferyczną można mierzyć także poprzecznie do osi w płaszczyźnie przechodzącej przez ognisko przyosiowe – aberracja poprzeczna (wielkość a na rys. 1.22). Aberrację sferyczną minimalizuje się, stosując w układach optycznych odpowiednie przysłony lub soczewki asferyczne.

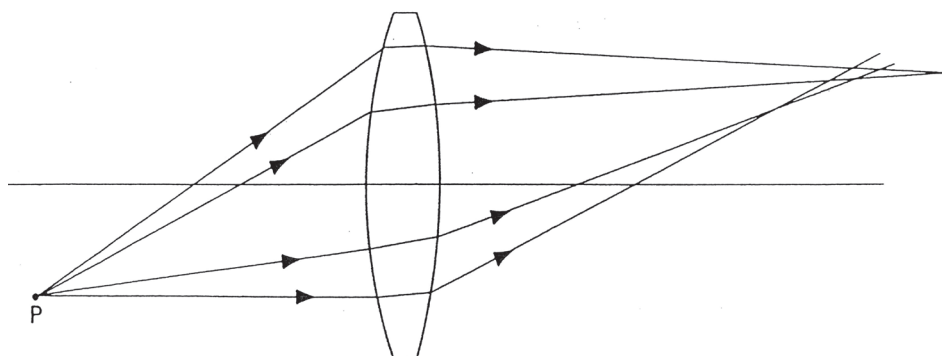


$\Delta f'$ – odległość między ogniskiem dla promieni przyosiowych a ogniskiem dla promieni skrajnych.

Rysunek 1.22. Aberracja sferyczna

1.12. Koma

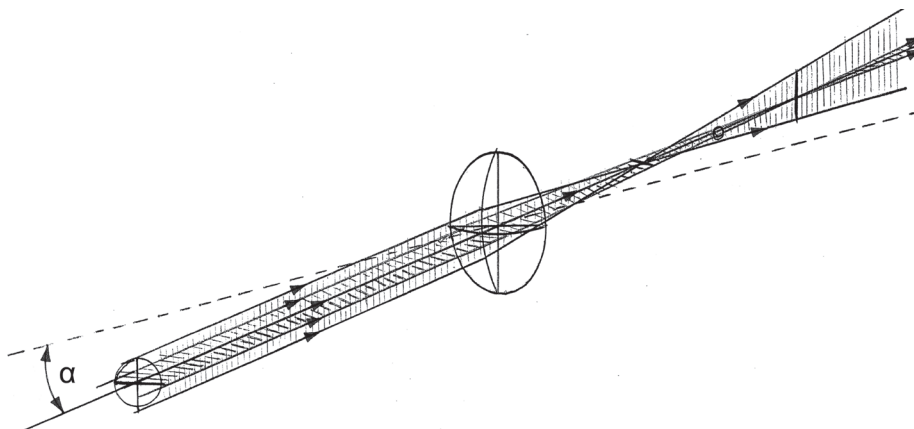
Promienie padające z punktu poza osią (rys. 1.23) po przejściu przez soczewkę tworzą nieostry obraz pozbawiony symetrii obrotowej, a kształtem przypominający przecinek lub kometę, stąd nazwa tej aberracji pozaosiowej. Układy optyczne wolne od aberracji sferycznej oraz komy nazywane są układami aplanacyjnymi.



Rysunek 1.23. Koma. Obraz nieosiowego punktu P utworzony przez soczewkę sferyczną kształtem przypomina przecinek (koma – z angielskiego przecinek)

1.13. Astygmatyzm wiązki skośnej

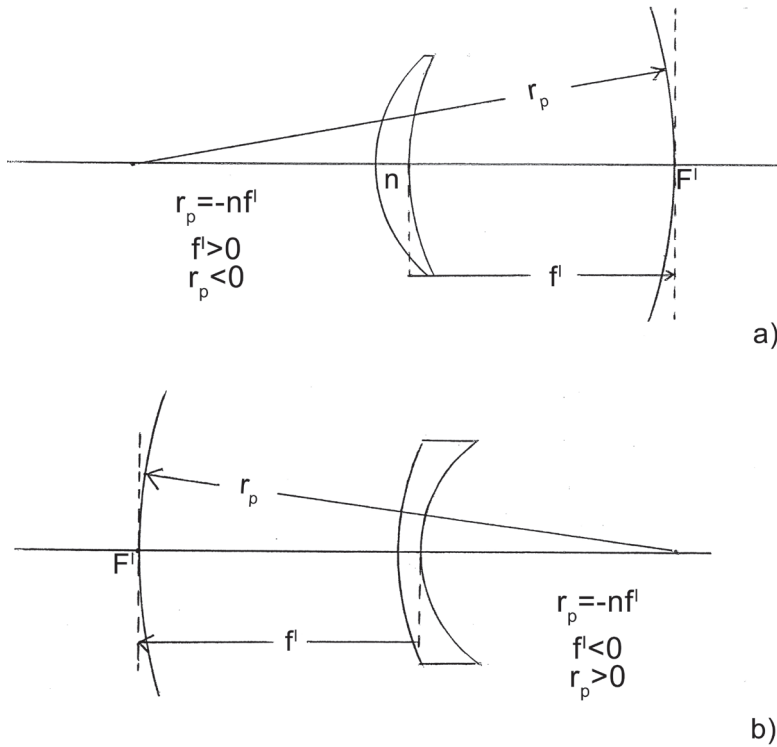
Astygmatyzm wiązki skośnej (rys. 1.24) polega na tym, że wiązka skośna padająca na soczewkę sferyczną pod kątem α względem jej osi nie skupia się w jednym punkcie, lecz w dwóch do siebie prostopadłych odcinkach, pomiędzy którymi tworzy się krążek najmniejszego rozmycia (podobnie jak dla soczewki torcyjnej). Obwiednia takiej wiązki daje charakterystyczną figurę nazywaną konoidem Sturma, a obrazy punktów utworzonych przez wiązki skośne przechodzące przez soczewkę sferyczną wykazują rozmycie w postaci elipsy. Astygmatyzm wiązki skośnej soczewek sferycznych można minimalizować, dobierając odpowiednie promienie krzywizny jej powierzchni. Układy wolne od astygmatyzmu nazywane są anastygmatami. Warto podkreślić, że astygmatyzm soczewki torcyjnej nie traktuje się jako aberracji. Jest on astygmatyzmem poosiowym i w przypadku torcyjnych soczewek okularowych służy do korekcji astygmatyzmu oka.



Rysunek 1.24. Astygmatyzm wiązki skośnej

1.14. Krzywizna pola

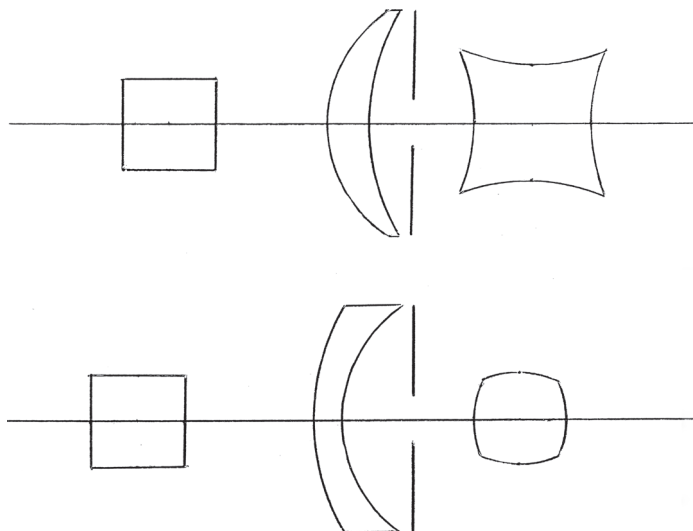
W przybliżeniach przyosiowych przyjmuje się, że obraz płaskiego przedmiotu utworzony przez soczewkę jest również płaski. W rzeczywistości obraz powstaje na powierzchni, której promień krzywizny zależy od mocy soczewki i jej współczynnika załamania. Powierzchnia ta nosi nazwę powierzchni Petzvala (rys. 1.25), a jej promień krzywizny wynosi $r_p = -n \cdot f'$, gdzie n oznacza współczynnik załamania materiału soczewki, f' – ogniskową obrazową soczewki. Szczegóły obrazu położone dalej od osi są rozmazane. Dla soczewki dodatniej powierzchnia Petzvala jest wklęsła ($r_p < 0$), dla soczewki ujemnej – wypukła ($r_p > 0$). Przez odpowiedni dobór promieni krzywizny pierwszej i drugiej powierzchni soczewki można zmniejszyć krzywiznę pola obrazu, ale wiąże się to ze zwiększeniem astygmatyzmu wiązki skośnej. Odpowiednia konstrukcja soczewek okularowych jest zwykle wynikiem kompromisu pomiędzy tymi dwiema aberracjami.



Rysunek 1.25. Krzywizna pola, powierzchnia Petzvala dla soczewki dodatniej (a) i ujemnej (b)

1.15. Dystorsja

Dystorsja wynika z zależności powiększenia poprzecznego obrazu od kąta nachylenia wiązki światła względem osi optycznej soczewki sferycznej. W rezultacie obraz kwadratowego przedmiotu wykazuje charakterystyczne zniekształcenie poduszkowe lub beczkowe. Jeżeli powiększenie poprzeczne rośnie wraz z kątem nachylenia wiązki, to występuje dystorsja poduszkowa, a jeżeli maleje – beczkowa.

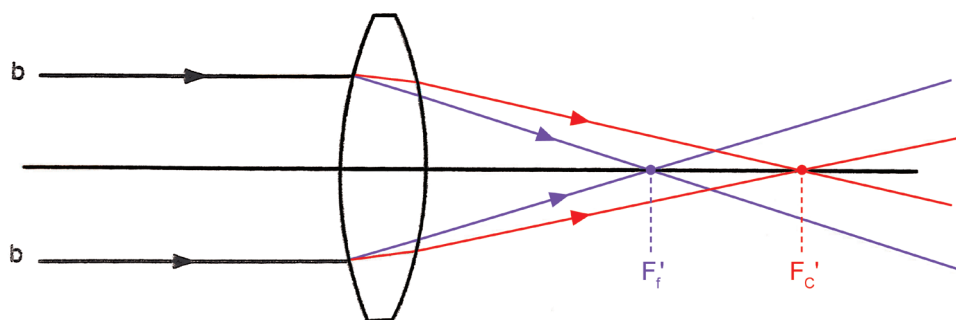


Rysunek 1.26. Dystorsja poduszkowa i beczkowa soczewki okularowej

Na wielkość dystorsji znacząco wpływa wielkość i położenie przysłony. Przysłona przed soczewką dodatnią może wywołać dystorsję beczkową, a przysłona za soczewką dodatnią – dystorsję poduszkową. W przypadku soczewki ujemnej jest odwrotnie. Dla soczewek okularowych funkcję przysłony pełni źrenica oka, a więc ewentualna dystorsja dla soczewki dodatniej będzie poduszkowa, a dla soczewki ujemnej beczkowa. W obiektywie aparatu fotograficznego przysłona jest umieszczona w środku symetrycznego układu optycznego i dlatego dystorsja jest na ogół skorygowana. Układ optyczny ze skorygowaną dystorsją nazywany jest układem ortoskopowym.

1.16. Aberracja chromatyczna

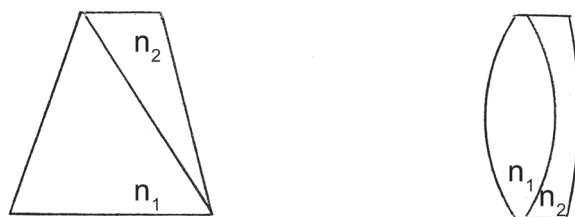
Aberracja chromatyczna wynika z dyspersji współczynnika załamania światła. Światło białe, przechodząc przez soczewkę, ulega rozszczepieniu (rys. 1.27). Dla barwy fioletowej ognisko położone jest najbliżej soczewki, dla barwy czerwonej najdalej, a więc moc soczewki zależy od długości fali (częstotliwości). Wyróżnia się tzw. aberrację chromatyczną położenia (podłużną) i aberrację chromatyczną powiększenia (poprzeczną).



b – światło białe; F'_c – ognisko dla barwy czerwonej; F'_f – ognisko dla barwy fioletowej.

Rysunek 1.27. Aberracja chromatyczna

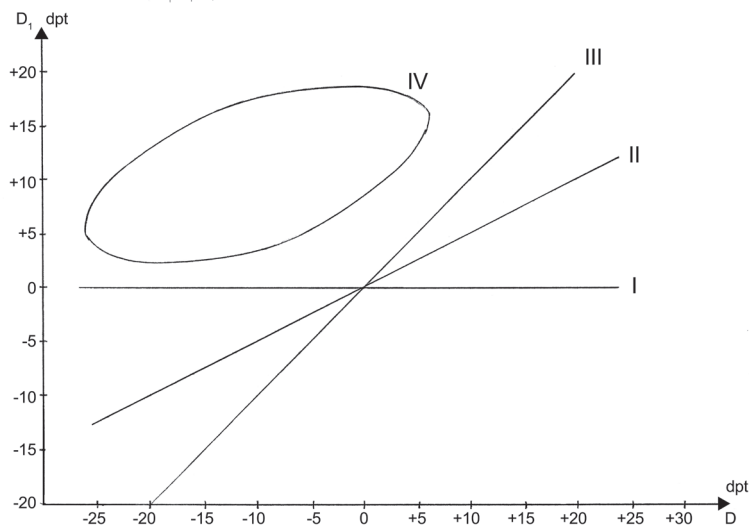
Jednym ze sposobów minimalizacji aberracji chromatycznej, zwłaszcza w soczewkach okularowych, jest stosowanie materiałów o dużej liczbie Abbego. W innych układach optycznych można także stosować soczewki i pryzmaty achromatyczne, a więc nierozszczepiające, wykonane z dwóch rodzajów szkła o różnych współczynnikach załamania (rys. 1.28).



Rysunek 1.28. Pryzmat achromatyczny i soczewka achromatyczna

Optyk okularowy powinien mieć świadomość tego, że rodzaj konstrukcji soczewki wpływa w istotny sposób na jakość odwzorowania obrazu i że w soczewkach okularowych może wystąpić łączne działanie wszystkich aberracji. Wynika to z faktu, że soczewka okularowa tworzy z okiem szczególny układ optyczny. Specyfika tego układu polega na tym, że soczewka okularowa jest nieruchoma, natomiast gałka oczna znajduje się w ciągłym ruchu, czyli oś optyczna oka tworzy z osią soczewki okularowej co chwila inny kąt. Gdy oko patrzy przez peryferyjne obszary soczewki okularowej, wpływ aberracji na jakość obrazu utworzonego na dnie oka jest duży. Dlatego głównym celem projektowania współczesnych soczewek okularowych jest takie zminimalizowanie aberracji, aby zapewnić

użytkownikom okularów dobry komfort widzenia. Dla osiągnięcia tego celu należy odpowiednio dostosować dla soczewki o określonej mocy krzywiznę pierwszej i drugiej powierzchni. W przemyśle okularowym produkowane są obecnie tzw. soczewki meniskowe, czyli wypukło-wklęsłe. Przednia powierzchnia nazywana powierzchnią bazową jest wypukła, druga jest wklęsła. Moc powierzchni bazowej D_1 stanowi podstawę, od której oblicza się moc drugiej powierzchni D_2 . Nie można skorygować wszystkich aberracji jednocześnie, jednak przez optymalny dobór krzywizny pierwszej powierzchni (bazowej) można znacznie zminimalizować przynajmniej jedną z aberracji. Na rysunkach 1.29 i 1.30 przedstawiono poglądowo zależność pomiędzy mocą soczewki D a mocą przedniej powierzchni D_1 dla soczewek o różnej konstrukcji.

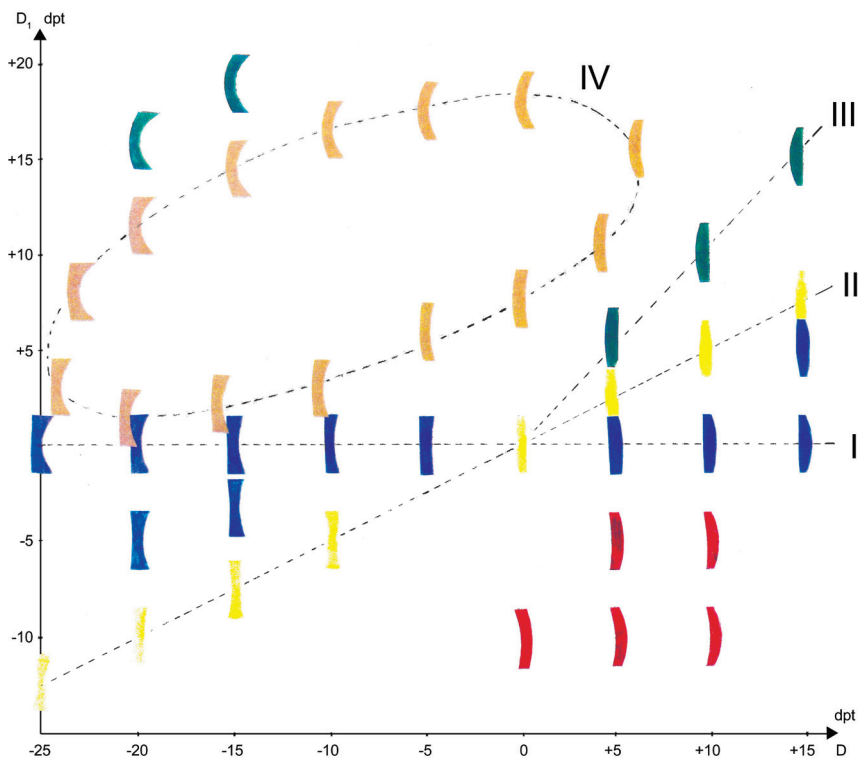


I – soczewki płasko-wklęsłe (*plano-concave*) i płasko-wypukłe (*plano-convex*); II – soczewki dwuwklęsłe (*bi-concave*) i dwuwypukłe (*bi-convex*); III – soczewki wklęsło-płaskie i soczewki wypukło-płaskie; IV – elipsa Tscherninga dla soczewek o konstrukcji meniskowej, w której druga powierzchnia (wklęsła) soczewki ma zawsze moc ujemną o wartości bezwzględnej mniejszej od mocy pierwszej powierzchni dla soczewek dodatnich ($|D_2| < |D_1|$) i większej dla soczewek ujemnych ($|D_2| > |D_1|$).

Rysunek 1.29. Zależność między mocą powierzchni przedniej (bazowej) D_1 a mocą soczewki D dla soczewek sferycznych o różnej konstrukcji

Jest rzeczą oczywistą, że soczewka o określonej mocy wykonana ze szkła o współczynniku załamania n teoretycznie może mieć dowolną liczbę rozwiązań

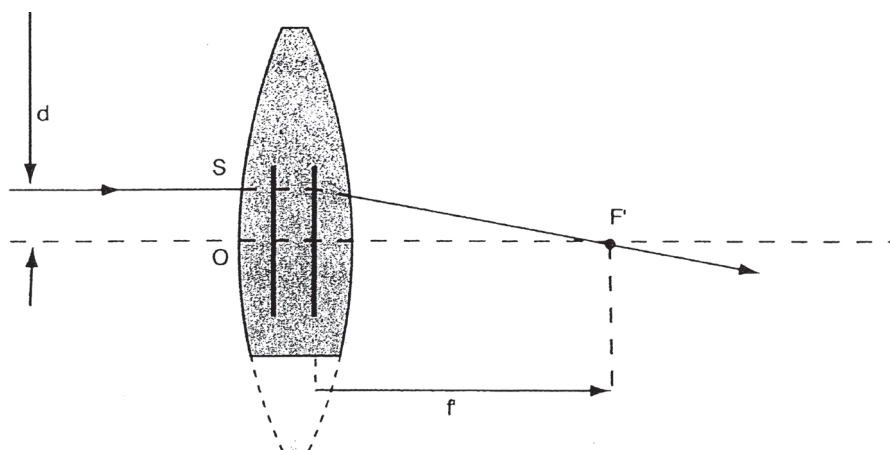
konstrukcyjnych. Tscherning, Wollaston i Ostwalt przeprowadzili obliczenia pozwalające określić moc pierwszej powierzchni D_1 i moc soczewki D , przy których astygmatyzm wiązki skośnej redukuje się prawie do zera. Soczewkom wypukło-wklęsłym o zminimalizowanym astygmatyzmie wiązki skośnej odpowiada na wykresie tzw. elipsa Tscherninga. Górna część elipsy odpowiada rozwiązaniom Wollastona (soczewki meniskowe o większym wygięciu), a dolna część elipsy rozwiązaniom Ostwalda (soczewki meniskowe o mniejszym wygięciu). Przebieg i położenie elipsy Tscherninga zależy od współczynnika załamania światła materiału, z którego wykonane są soczewki, od odległości soczewki okularowej od oka, a także od tego, czy soczewka służy do dali, czy do bliży. Konstrukcja Ostwalta jest bardziej płaska i łatwiejsza w produkcji, dlatego ten typ okularowych soczewek sferycznych jest najczęściej produkowany.



Rysunek 1.30. Poglądowe przedstawienie zależności między mocą powierzchni przedniej D_1 a mocą soczewki D dla soczewek sferycznych o różnej konstrukcji

1.17. Działanie pryzmatyczne soczewki sferycznej

Działanie pryzmatyczne soczewki sferycznej powstaje przez przesunięcie jej środka optycznego O (czyli punktu przejścia osi optycznej przez soczewkę) względem środka obwodu S soczewki (rys. 1.31). Przesunięcie to nazywa się decentracją (niecentralnością) soczewki.



d – decentracja; f' – ogniskowa; F' – ognisko; O – środek optyczny (oś optyczna); S – środek obwodu soczewki (środek geometryczny).

Rysunek 1.31. Decentracja soczewki sferycznej

Moc pryzmatyczna Δ zdecentrowanej soczewki wynosi (wzór Prentice'a):

$$\Delta = \frac{d}{f'} \text{ lub } \Delta = d \cdot D \quad (1.37)$$

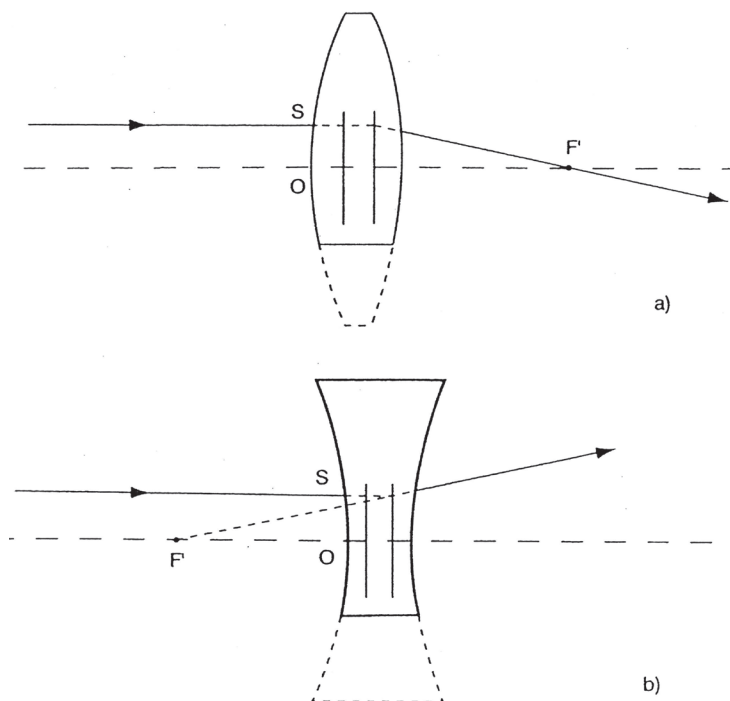
gdzie: f' – ogniskowa soczewki (w metrach),

$$D = \frac{1}{f'} \text{ – moc soczewki,}$$

d – decentracja (w centymetrach).

Zatem dla uzyskania mocy pryzmatycznej Δ soczewki sferycznej o mocy D należy jej środek optyczny O przesunąć o $d = \frac{\Delta}{D}$ centymetrów względem środka S

obwodu soczewki. Jeżeli soczewka jest dodatnia, to podstawa pryzmatu leży po stronie środka optycznego (rys. 1.32a). Jeżeli soczewka jest ujemna, podstawa pryzmatu leży po stronie środka obwodu soczewki (rys. 1.32b).



Rysunek 1.32. Przesunięcie środka optycznego soczewki względem środka jej obwodu celem uzyskania mocy pryzmatycznej soczewki dla soczewki dodatniej (a) i soczewki ujemnej (b)

Przykład 13

U pacjenta z nadwzrocznością i zezem zbieżnym zastosowano obustronnie korekcję sph +5,00 dpt. Jak uzyskać jednocześnie działanie pryzmatyczne 2,5 pdpt baza skroń przed każdym okiem?

Ponieważ soczewka jest dodatnia i podstawa pryzmatu leży po stronie środka optycznego, soczewkę należy decentrować do skroni. Wartość decentracji wynosi:

$$d = \frac{\Delta}{D} = \frac{2,5}{5} = 0,5 \text{ cm}.$$

Zatem soczewkę należy decentrować obustronnie o 5 mm do skroni.

Łatwo zauważyć, że decentracja soczewek dodatnich w stronę skroni pobudza konwergencję, czyli zbieżność osi widzenia, natomiast decentracja soczewek dodatnich w stronę nosa hamuje konwergencję. Odwrotnie działa decentracja ujemnych soczewek sferycznych. Decentracja ujemnych soczewek sferycznych w stronę skroni hamuje konwergencję, a decentracja tych soczewek w stronę nosa pobudza konwergencję. Pryzmatyczne działanie obwodu soczewek okularowych może być główną przyczyną dyskomfortu odczuwanego przez osoby z różnoroźnością.

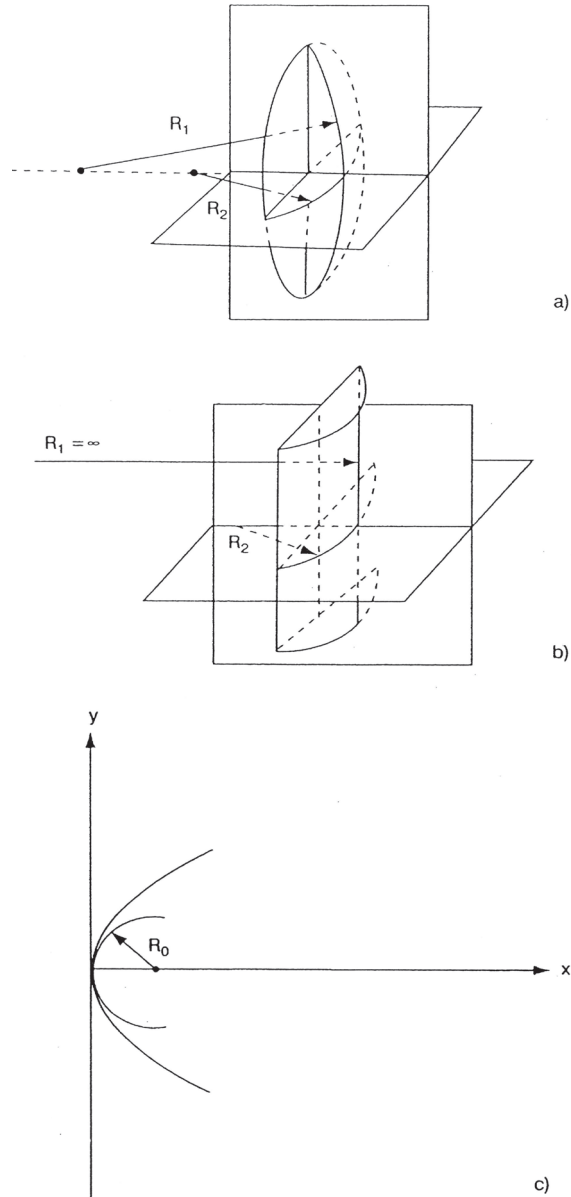
1.18. Soczewki asferyczne

W soczewkach asferycznych przynajmniej jedna powierzchnia ma kształt niekułisty (asferyczny). Powierzchnie asferyczne, a tym samym soczewki asferyczne, można podzielić na dwie grupy:

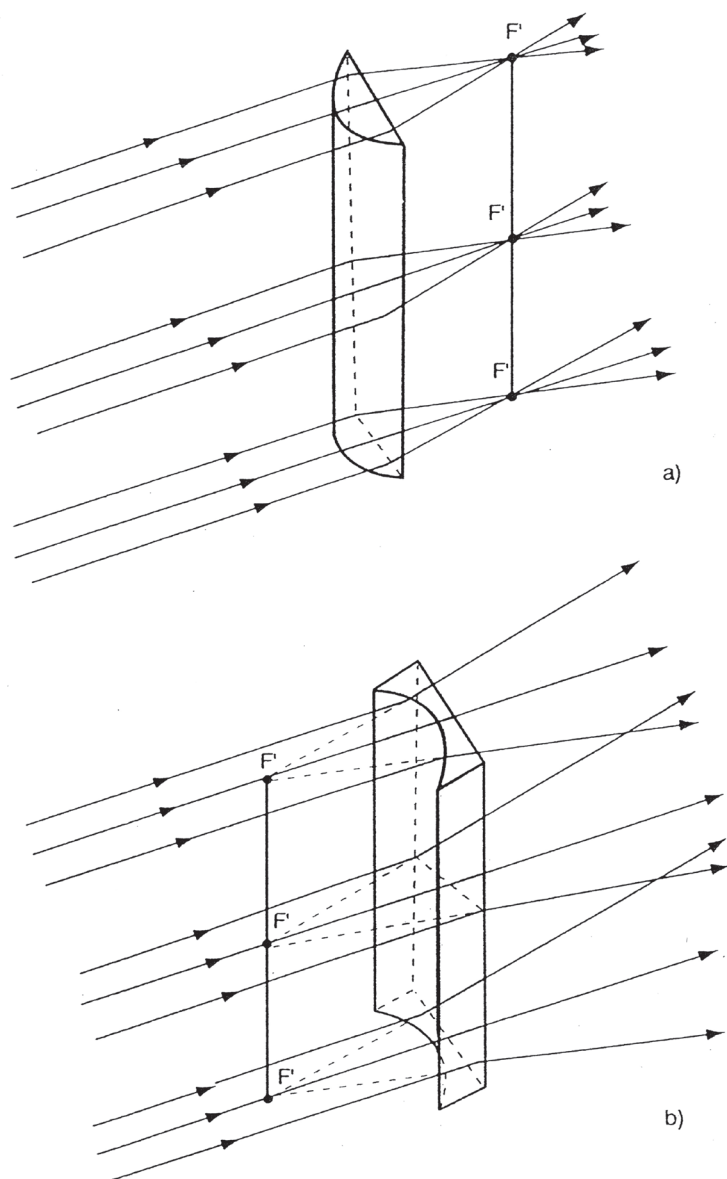
1. Powierzchnie (soczewki) mające dwie wzajemnie prostopadłe płaszczyzny symetrii (przekroje główne). Są to powierzchnie toryczne (rys. 1.33a) i cylindryczne (rys. 1.33b).
2. Powierzchnie (soczewki) mające symetrię osiową (rys. 1.33c). Taka powierzchnia asferyczna może powstać w wyniku obrotu odpowiedniej krzywej stożkowej (elipsy, hiperboli, paraboli).

Soczewka cylindryczna ma w optyce okularowej szczególne znaczenie, gdyż służy do korekcji astygmatyzmu oka. Powierzchnią łamiącą soczewki cylindrycznej jest pobocznicą walca, która może być powierzchnią wypukłą i tworzy wtedy soczewkę skupiającą (rys. 1.34a), lub wklęsłą i tworzy soczewkę rozpraszającą (rys. 1.34b). Moc soczewki cylindrycznej zależy oczywiście od promienia krzywizny i współczynnika załamania światła. Moc cylindra określa się, podając jego zdolność skupiającą D_c w kierunku prostopadłym do osi cylindra. W kierunku równoległym do osi cylindra jego moc wynosi zero. Natomiast moc cylindra D_α w kierunku tworzącym kąt α z osią cylindra wynosi:

$$D_\alpha = D_c \cdot \sin^2 \alpha \quad (1.38)$$



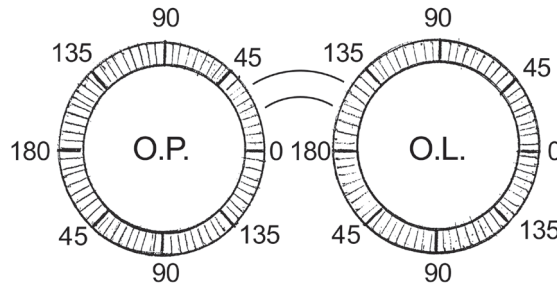
Rysunek 1.33. Powierzchnie asferyczne: a) powierzchnia toryczna, R_1 , R_2 – promienie krzywizny w przekrojach głównych; b) powierzchnia cylindryczna, w jednym z przekrojów głównych $R_1 = \infty$; c) powierzchnia asferyczna o symetrii obrotowej, obrót okręgu wokół osi x tworzy sferę, natomiast obrót paraboli ($y^2 = 2R_0x$) wokół osi x tworzy odpowiednią powierzchnię asferyczną



Rysunek 1.34. Działanie soczewki cylindrycznej: a) dodatniej; b) ujemnej

Dla soczewek cylindrycznych i torycznych nie wystarczy określenie ich mocy w przekrojach głównych. Jednoznaczny opis ich działania wymaga określenia położenia osi cylindra lub położenia przekrojów głównych według podziałki

TABO (Technischer Ausschuß für Brillenoptik), która jest stosowana powszechnie przez optyków okularowych, okulistów i optometrystów (rys. 1.35).



Rysunek 1.35. Podziałka TABO

Przykład 14

Sposób zapisu cylindra o mocy $-2,50$ dpt z osią ustawioną poziomo:

cyl $-2,50$ oś 180, cyl $-2,50$ ax 180, cyl $-2,50 \times 180$

albo

cyl $-2,50$ oś 0, cyl $-2,50$ ax 0, cyl $-2,50 \times 0$.

Sposób zapisu cylindra o mocy $+1,50$ dpt z osią ustawioną pionowo:

cyl $+1,50$ oś 90, cyl $+1,50$ ax 90, cyl $+1,50 \times 90$.

Sposób zapisu cylindra o mocy $-1,75$ dpt z osią ustawioną w kierunku 120° :

cyl $-1,75$ oś 120, cyl $-1,75$ ax 120, cyl $-1,75 \times 120$.

Sposób zapisu korekcji sfero-cylindrycznej: sfera $+2,25$ dpt z cylindrem $-1,50$ dpt ustawionym w kierunku 45° :

sph $+2,25$ cyl $-1,50$ oś 45, sph $+2,25$ cyl $-1,50$ ax 45, sph $+2,25$ cyl $-1,50 \times 45$,
a najczęściej $+2,25/-1,50 \times 45$.

Przykład 15

Wypukło-płaska soczewka cylindryczna o pionowym położeniu osi cylindra (rys. 1.34a) i promieniu krzywizny $r = 10$ cm jest wykonana ze szkła o współczynniku załamania $n = 1,5$. Określ moc tej soczewki w powietrzu.

Moc soczewki w przekroju pionowym $D_I = 0$.

Moc soczewki w przekroju poziomym $D_{II} = \frac{n-1}{r} = \frac{1,5-1}{0,1} = +5$ dpt.

Moc omawianej soczewki można także przedstawić następująco: cyl $+5,00 \times 90$.

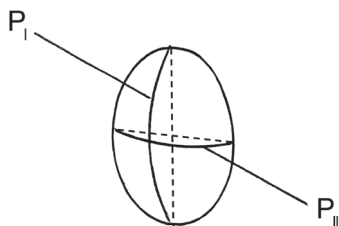
Powierzchnia 1		Powierzchnia 2		Soczewka
0,00		0,00		0,00
$\dagger +5,00$	+	$\dagger 0,00$	=	$\dagger +5,00$

Przykład 16

Wypukło-płaska soczewka toryczna o pionowo-poziomym ustawieniu przekrojów głównych jest wykonana ze szkła o współczynniku załamania $n = 1,5$. Promienie krzywizny pierwszej powierzchni (torycznej) wynoszą:

w przekroju pionowym $r_I = 10$ cm = 0,1 m,

w przekroju poziomym $r_{II} = 20$ cm = 0,2 m.



Rysunek 1.36. Przekroje główne wypukło-płaskiej soczewki torycznej

Moc pierwszej powierzchni w przekroju pionowym (wertykalnym):

$$D_I = \frac{n-1}{r_I} = \frac{1,5-1}{0,1} = +5,00 \text{ dpt.}$$

Moc pierwszej powierzchni w przekroju poziomym (horyzontalnym):

$$D_{II} = \frac{n-1}{r_{II}} = \frac{1,5-1}{0,2 \text{ m}} = +2,50 \text{ dpt.}$$

Moc drugiej powierzchni (płaszczyzny) wynosi zero.

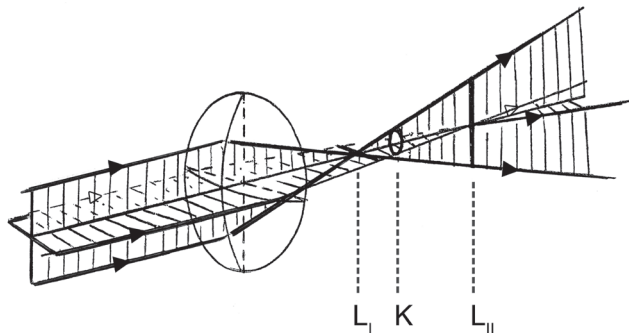
Moc omawianej soczewki można przedstawić następująco:

Powierzchnia 1		Powierzchnia 2		Soczewka
+5,00		0,00		+5,00
$\begin{array}{c} \perp \\ +2,50 \end{array}$	+	$\begin{array}{c} \perp \\ 0,00 \end{array}$	=	$\begin{array}{c} \perp \\ +2,50 \end{array}$

Omawianą soczewkę toryczną można zapisać na dwa sposoby:

$$+2,50/+2,50 \times 180 \text{ } (+2,50/+2,50 \times 0) \text{ lub } +5,00/-2,50 \times 90.$$

Jak wynika z powyższego przykładu, soczewkę toryczną można traktować jako złożenie soczewki sferycznej (sfery) i soczewki cylindrycznej (cylindra). Zapisu mocy można dokonać, stosując cylinder ujemny lub dodatni. Oba zapisy są równoważne, gdyż określają soczewkę sfero-cylindryczną (toryczną) o takich samych mocach w przekrojach głównych. Jednak z zapisu sfero-cylindrycznego nie wynika, jaka jest konstrukcja soczewki, czyli rodzaj i moc pierwszej i drugiej powierzchni soczewki.



L_I, L_{II} – odcinki ogniskowe; K – koło najmniejszego rozmycia.

Rysunek 1.37. Przejście wiązki światła przez soczewkę toryczną

Na rysunku 1.37 przedstawiono przejście równoległej do osi wiązki światła przez soczewkę toryczną omawianą w przykładzie 16. Równoległa do osi wiązka światła nie skupia się w jednym punktowym ognisku, lecz w dwóch ogniskach odcinkowych, które są do siebie prostopadłe i przesunięte względem siebie

(tzw. odcinki wichrowate). Pomiędzy nimi znajduje się krążek najmniejszego rozmycia. W przeciwieństwie do astygmatyzmu wiązki skośnej dotyczącego soczewki sferycznej astygmatyzm soczewki torycznej jest pożądany, gdyż soczewka toryczna służy do korekcji astygmatyzmu oka. Podobnie jak w przypadku soczewek sferycznych soczewki cylindryczne i sfero-cylindryczne (toryczne) mogą mieć różne konstrukcje meniskowe, o różnym stopniu wygięcia i różnym stopniu zminimalizowania aberracji. W przykładzie 17 przedstawiono istotę tzw. transpozycji dla soczewek torycznych. Zwiększenie w każdym przekroju mocy pierwszej powierzchni soczewki o określoną wartość przy jednoczesnym zmniejszeniu mocy drugiej powierzchni o tę samą wartość nie powoduje zmiany mocy właściwej (czołowej) soczewki, ale wywołuje istotną zmianę konstrukcji, a tym samym właściwości optycznych soczewki, które mogą wpływać na komfort widzenia.

Przykład 17

Transpozycja soczewki torycznej o mocy $+2,00/+1,00 \times 90$ ($+3,00/-1,00 \times 180$):

Powierzchnia 1		Powierzchnia 2		Soczewka
+2,00		0,00		+2,00
+3,00	+	+0,00	=	+3,00
+3,00		-1,00		+2,00
+4,00	+	-1,00	=	+3,00
+4,00		-2,00		+2,00
+5,00	+	-2,00	=	+3,00
+6,00		-4,00		+2,00
+7,00	+	-4,00	=	+3,00
0,00		+2,00		+2,00
+0,00	+	+3,00	=	+3,00
+2,00		0,00		+2,00
+2,00	+	+1,00	=	+3,00

$$\begin{array}{rclclcl}
 +3,00 & & -1,00 & & +2,00 \\
 \text{+} +3,00 & + & \text{+} 0,00 & = & \text{+} +3,00 \\
 \\
 +4,00 & & -2,00 & & +2,00 \\
 \text{+} +4,00 & + & \text{+} -1,00 & = & \text{+} +3,00 \\
 \\
 +6,00 & & -4,00 & & +2,00 \\
 \text{+} +6,00 & + & \text{+} -3,00 & = & \text{+} +3,00
 \end{array}$$

Powyższy i następne przykłady jeszcze raz wykazują, że soczewka toryczna o określonej mocy, podobnie jak soczewka sferyczna, może być wykonana na dowolną liczbę sposobów konstrukcyjnych. Ponadto można wyróżnić tzw. soczewkę zewnątrztoryczną (pierwsza powierzchnia toryczna, druga sferyczna), soczewkę wewnątrztoryczną (pierwsza powierzchnia sferyczna, druga toryczna), a także soczewkę o przedniej i tylnej powierzchni torycznej.

Przykład 18

Transpozycja soczewki torycznej o mocy $-3,00/+2,00 \times 90$ ($-1,00/-2,00 \times 180$)

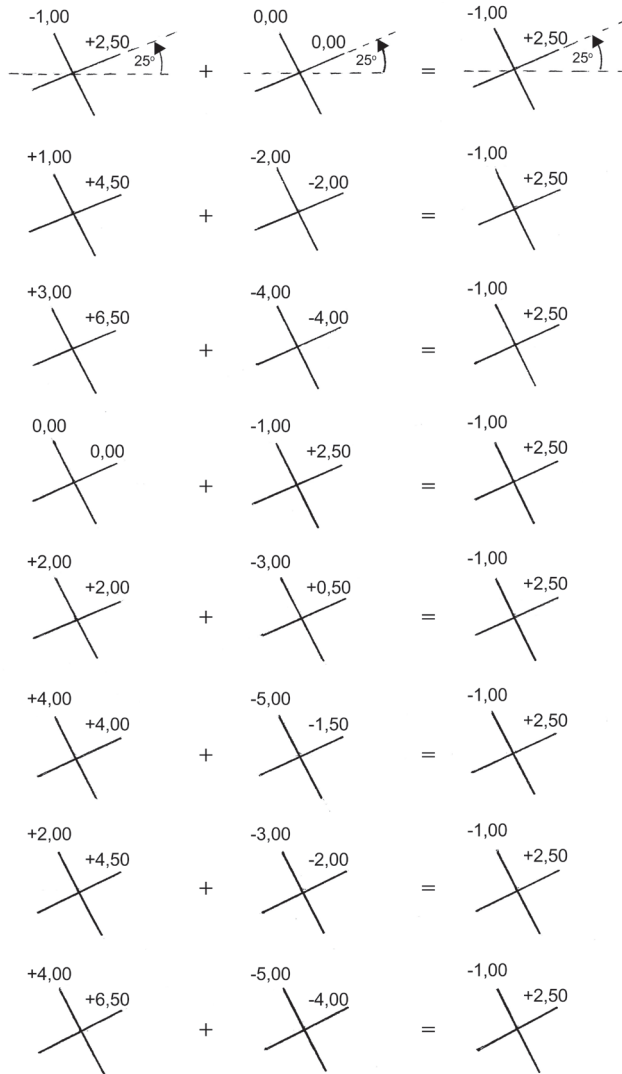
Powierzchnia 1		Powierzchnia 2		Soczewka
$-3,00$		$0,00$		$-3,00$
$\text{+} -1,00$	+	$\text{+} 0,00$	=	$\text{+} -1,00$
$+2,00$		$-5,00$		$-3,00$
$\text{+} +4,00$	+	$\text{+} -5,00$	=	$\text{+} -1,00$
$0,00$		$-3,00$		$-3,00$
$\text{+} 0,00$	+	$\text{+} -1,00$	=	$\text{+} -1,00$
$+5,00$		$-8,00$		$-3,00$
$\text{+} +5,00$	+	$\text{+} -6,00$	=	$\text{+} -1,00$

$$\begin{array}{c} +2,00 \\ \text{+} +3,00 \end{array} \quad + \quad \begin{array}{c} -5,00 \\ \text{+} -4,00 \end{array} \quad = \quad \begin{array}{c} -3,00 \\ \text{+} -1,00 \end{array}$$

$$\begin{array}{c} +4,00 \\ \text{+} +5,00 \end{array} \quad + \quad \begin{array}{c} -7,00 \\ \text{+} -6,00 \end{array} \quad = \quad \begin{array}{c} -3,00 \\ \text{+} -1,00 \end{array}$$

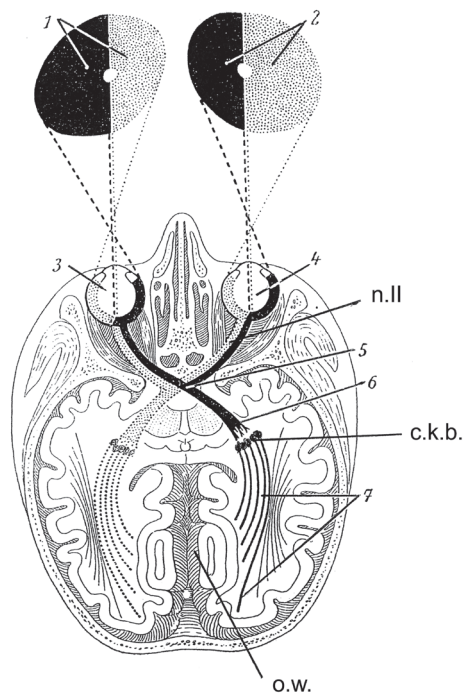
Przykład 19

Transpozycja soczewki torycznej o mocy $+2,50/-3,50 \times 25$ ($-1,00/+3,50 \times 115$)



2. Układ wzrokowy

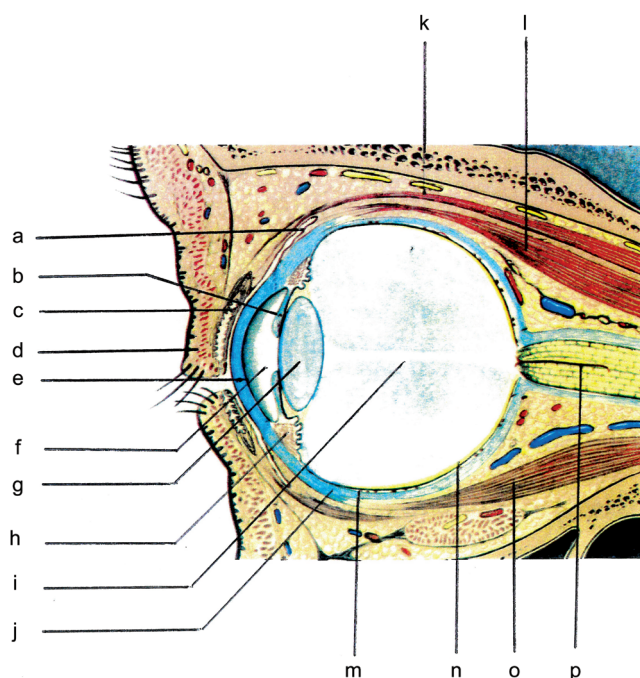
W skład układu wzrokowego wchodzi gałki oczne, drogi wzrokowe oraz korowe ośrodki wzrokowe. Do układu wzrokowego należą także oczodół, mięśnie gałki ocznej tworzące jej aparat ruchowy oraz powieki, spojówki i narząd łzowy. Zadaniem układu optycznego oka jest tworzenie ostrych obrazów na dnie oka,



1, 2 – pole widzenia odpowiednio oka lewego i oka prawego; 3, 4 – gałki oczne lewa i prawa; 5 – skrzyżowanie nerwów wzrokowych; 6 – pasmo wzrokowe; 7 – promienistość wzrokowa; n.II – nerw wzrokowy; c.k.b. – ciało kolankowate boczne; o.w. – ośrodek wzrokowy kory mózgowej.

Rysunek 2.1. Uproszczony schemat układu wzrokowego

czyli na siatkówce. Komórki receptorowe siatkówki (czopki i pręciki), absorbując fotony światła, przekształcają ich energię w impulsy nerwowe o charakterze elektrycznym. Z gałki ocznej ta impulsacja nerwowa wywołana pobudzeniem receptorów biegnie drogą wzrokową obejmującą nerw wzrokowy, pasmo wzrokowe i promienistość wzrokową do ośrodków wzrokowych kory mózgu. W korowych ośrodkach wzrokowych zachodzi percepcja, czyli postrzeganie polegające na uświadomieniu obrazów obserwowanej przestrzeni przedmiotowej. Ponadto z korowych ośrodków wzrokowych wysyłane są impulsy do innych ośrodków mózgu. Umożliwia to nie tylko przestrzenne widzenie obuczne, lecz także prawidłową koordynację postrzeganych obrazów i ruchów ciała.



a – sklepienie górne worka spojówkowego; b – tęczęwka; c – tarczka powieki górnej; d – powieka górna; e – rogówka; f – komora przednia; g – soczewka; h – ciało rzęskowe; i – ciało szkliste; j – twardówka; k – mięsień dźwigacz powieki górnej; l – mięsień prosty górny; m – naczyńiówka; n – siatkówka; o – mięsień prosty dolny; p – nerw wzrokowy.

Rysunek 2.2. Przekrój pionowy oka

2.1. Gałka oczna

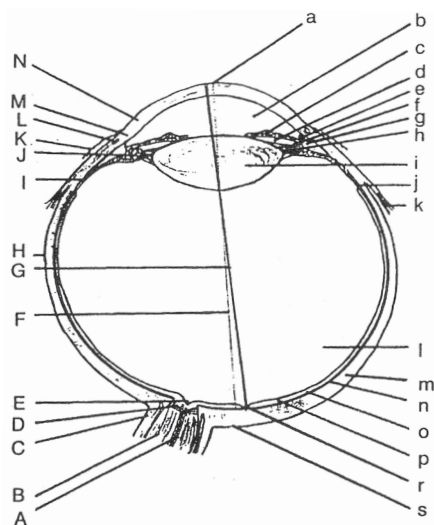
Gałka oczna ma w przybliżeniu kształt kulisty i dlatego dla opisu położenia szczegółów anatomicznych lub zmian chorobowych stosuje się następujące nazwy:

- biegun przedni jest położony w szczycie rogówki,
- biegun tylny leży w geometrycznym środku tylnego uwypuklenia twardówki, nieco skroniowo od wyjścia nerwu wzrokowego,
- oś gałki to linia łącząca oba bieguny, w przybliżeniu pokrywa się z osią optyczną,
- oś wzrokowa (oś widzenia) łączy punkt fiksacji (punkt, na który oko patrzy) z tzw. dołkiem środkowym siatkówki,
- równik to obwód największego przekroju leżącego w płaszczyźnie prostopadłej do osi gałki, dzieli gałkę oczną na przednią i tylną półkulę,
- południki to linie przebiegające na powierzchni gałki ocznej od bieguna przedniego do bieguna tylnego, oznaczone są według godzin tarczy zegara liczbami od 1 do 12; południki pionowe (godziny 6 i 12) oraz poziome (godziny 3 i 9) dzielą gałkę oczną na cztery ćwiartki zwane kwadrantami.

Gałka oczna nie jest jednak dokładnie kulista, lecz składa się z dwóch kulistych części o różnym promieniu krzywizny. Mniejsza część przednia (1/6 powierzchni całej gałki) odpowiada rogówce i jest bardziej wypukła. Jej promień krzywizny wynosi 7,5–8,0 mm. Znacznie większa tylna część (5/6 powierzchni gałki) odpowiada twardówce, a jej promień krzywizny wynosi około 12 mm. Najdłuższy wymiar przednio-tylny (oś gałki) wynosi średnio 24,5 mm, najmniejszy pionowy 23,00 mm, natomiast poprzeczny 23,5 mm. Przeciętna objętość gałki mieści się w przedziale od 6,0 do 7,0 cm³, a masa od 6,3 do 7,8 g. W przypadkach wysokiej krótkowzroczności oś gałki ocznej jest na ogół wyraźnie dłuższa od podanej wartości średniej, natomiast w wysokiej nadwzroczności jest ona krótsza. Z oczywistych powodów powyższe wartości są u dzieci odpowiednio do ich wieku mniejsze.

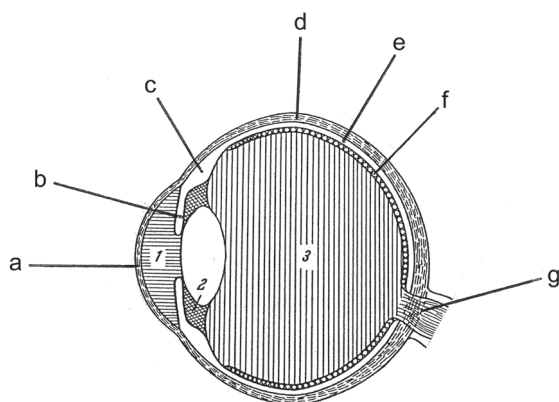
Gałka oczna jest zbudowana z trzech błon tworzących jej ścianę i trzech komór, w których rozmieszczona jest zawartość gałki ocznej. Koncentrycznie ułożonymi błonami ściany gałki ocznej (od zewnątrz do wewnątrz) są:

- błona zewnętrzna zwana błoną włóknistą,
- błona środkowa zwana błoną naczyniową,
- błona wewnętrzna zwana błoną nerwową.



a – biegun przedni; b – komora przednia; c – tęczówka; d – komora tylna; e – kąt tęczówkowo-rogowkowy; f – wyrostek ciała rzęskowego; g – mięsień rzęskowy; h – obwódka rzęskowa; i – soczewka; j – rąbek zębaty; k – mięsień prosty boczny; l – ciało szkliste; m – twardówka; n – naczyniówka; o – nabłonek barwnikowy; p – siatkówka; r – dołek środkowy plamki; s – biegun tylny; A – tętnica i żyła środkowa siatkówki; B – włókna nerwu wzrokowego; C – pochewka zewnętrzna nerwu wzrokowego; D – blaszka sitowa; E – tarcza nerwu wzrokowego; F – oś gałki; G – oś wzrokowa; H – równik; I – część płaska (obraczka rzęskowa ciała rzęskowego); J – ciało rzęskowe; K – spojówka; L – zatoka żylna twardówki (kanał Schlemma); M – rąbek rogówki; N – rogówka.

Rysunek 2.3. Przekrój poziomy gałki ocznej



a – rogówka; b – tęczówka; c – ciało rzęskowe; d – twardówka; e – naczyniówka; f – siatkówka; g – nerw wzrokowy; 1 – komora przednia; 2 – komora tylna; 3 – komora ciała szklistego.

Rysunek 2.4. Przekrój pionowy gałki ocznej

2.2. Błona zewnętrzna

Błona zewnętrzna, czyli błona włóknista, to **rogówka i twardówka**, które tworzą zrąb gałki stanowiący elastyczny i ochronny szkielet. Do twardówki przyczepiają się mięśnie gałki ocznej. Mimo ich pociągania gałka utrzymuje swój kształt i niezmienną krzywiznę rogowki. Twardówka stanowi większą, nieprzezroczystą część błony włóknistej oka. Grubość twardówki jest największa w tylnym odcinku w okolicy wyjścia nerwu wzrokowego (1,3 mm), a najmniejsza w odcinku przednim (0,5 mm), w pobliżu przyczepów mięśni. W odcinku tylnym znajduje się kanał twardówki zawierający tzw. blaszkę sitową, przez którą wychodzą włókna nerwu wzrokowego. Rogówka jest przezroczysta. Przez rogowkę widać barwną tęczęwkę i źrenicę. Średnica rogowki mierzona w poziomie wynosi 11–12 mm, a w pionie jest około 1 mm mniejsza. Jej grubość w części centralnej wynosi od 0,5 do 0,6 mm, na obwodzie jest większa i wynosi około 1 mm. Promień krzywizny przedniej powierzchni części środkowej rogowki wynosi przeciętnie 7,7 mm, część obwodowa rogowki jest bardziej płaska. Średni promień tylnej powierzchni rogowki jest krótszy i wynosi około 6,8 mm. Współczynnik załamania światła dla rogowki wynosi średnio 1,376.

Przytoczone powyżej wartości pozwalają na obliczenie **zdolności skupiającej rogowki**:

- promień krzywizny przedniej powierzchni $r_1 = 7,7 \text{ mm} = 0,0077 \text{ m}$,
- promień krzywizny tylnej powierzchni $r_2 = 6,8 \text{ mm} = 0,0068 \text{ m}$,
- grubość rogowki $d = 0,5 \text{ mm} = 0,0005 \text{ m}$,
- współczynnik załamania rogowki $n_r = 1,376$,
- współczynnik załamania cieczy wodnistej $n_c = 1,336$,
- współczynnik załamania powietrza $n_p = 1,0$.

$$\text{Moc powierzchni przedniej } D_1 = \frac{n_r - n_p}{r_1} = \frac{1,376 - 1,0}{0,0077} = 48,83 \text{ dpt.}$$

$$\text{Moc powierzchni tylnej } D_2 = \frac{n_c - n_r}{r_2} = \frac{1,336 - 1,376}{0,0068} = -5,88 \text{ dpt.}$$

Moc rogowki

$$D_r = D_1 + D_2 - \frac{d}{n_r} D_1 D_2 = 48,83 - 5,88 + \frac{0,0005}{1,376} 48,83 \cdot 5,88 = 43,05 \text{ dpt.}$$

Do pomiaru promienia krzywizny rogówki, a także jej mocy służą przyrządy zwane keratometrami. Również współczesne autorefraktometry pozwalają na przeprowadzenie tych pomiarów. Warto podkreślić, że rogówka nie ma własnych naczyń krwionośnych. Substancji odżywczych i tlenu dostarczają jej twardówka, ciecz wodnista komory przedniej i łzy.

2.3. Błona środkowa

Błona środkowa, czyli błona naczyniowa gałki ocznej, jest tkanką bogatą w naczynia krwionośne i składa się z trzech części: naczyniówki, ciała rzęskowego i tęczówki. **Naczyniówka** jest tylnym i największym odcinkiem błony naczyniowej, położonym między twardówką a siatkówką. Służy głównie do odżywiania zewnętrznych warstw siatkówki. Jest także miękkim podłożem amortyzującym wstrząsy, przez co zabezpiecza w pewnym stopniu siatkówkę przed urazami mechanicznymi. Przyleganie siatkówki do naczyniówki sprawia, że zmiany patologiczne w obu tych warstwach często przebiegają łącznie. Na przykład zapalenie naczyniówki występuje wraz z zapaleniem siatkówki, a pęknięcie naczyniówki wskutek stłuczenia gałki ocznej powoduje znaczne upośledzenie funkcji siatkówki, toteż jeśli siatkówka i naczyniówka chorują, to zwykle razem.

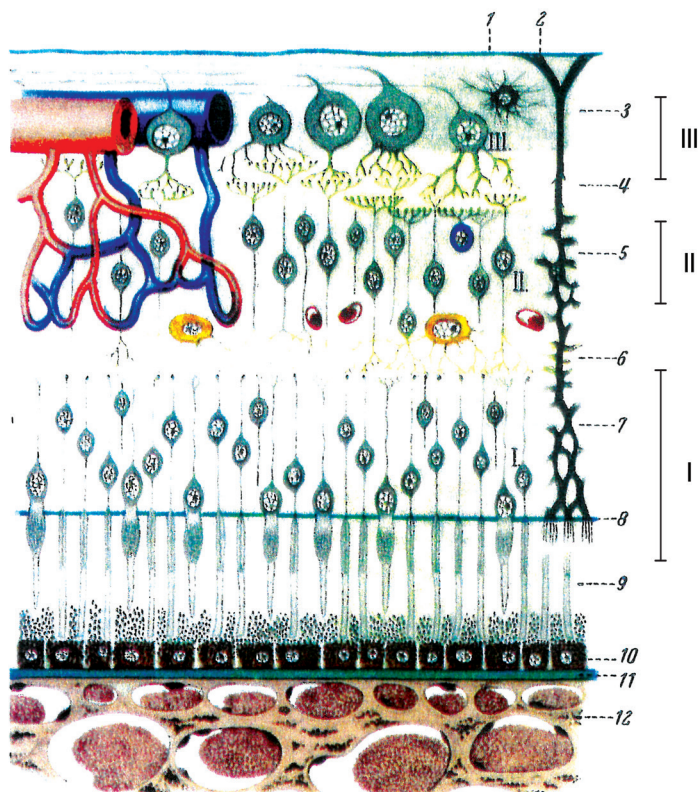
Ciało rzęskowe jest środkową częścią błony naczyniowej. Na przekroju południkowym ma kształt trójkąta, którego najdłuższy bok przylega do twardówki. Część tylna ciała rzęskowego przechodzi w naczyniówkę. W części przedniej występują promieniście ułożone wyrostki rzęskowe (ok. 70). Od nich odchodzą liczne cienkie włókna przyczepiające się do obwodu soczewki. Włókna te noszą nazwę obwódki rzęskowej. W ciele rzęskowym występuje mięsień rzęskowy, który bierze udział w akomodacji. Skurcz włókien okrężnych tego mięśnia powoduje zmniejszenie naprężenia obwódki rzęskowej. W następstwie tego soczewka staje się bardziej wypukła (tzn. zmniejsza się promień krzywizny jej przedniej i tylnej powierzchni) i wzrasta jej zdolność skupiająca. Jednocześnie soczewka przemieszcza się nieznacznie ku przodowi. W takim stanie odpowiedniego napięcia akomodacyjnego oko widzi wyraźnie przedmioty położone blisko. Natomiast skurcz włókien południkowych mięśnia rzęskowego powoduje wzrost naprężenia obwódki rzęskowej i spłaszczenie soczewki. W ten sposób zdolność skupiająca soczewki maleje, co umożliwia ostre widzenie przedmiotów położonych daleko.

Oprócz udziału w akomodacji oka ważną funkcją ciała rzęskowego jest produkcja płynu komorowego, czyli cieczy wodnistej.

Tęczówka to najbardziej ku przodowi położona część błony naczyniowej. Jest błoną w kształcie krążka o średnicy około 12 mm i grubości około 0,5 mm. Tęczówka pełni funkcję przysłony z otworem źrenicznym o zmieniającej się szerokości. Jej podstawa łączy się z przednim odcinkiem ciała rzęskowego, a brzeg źreniczny opiera się na soczewce. Tęczówka jest zanurzona w cieczy wodnistej i dzieli przestrzeń zawartą między rogówką a soczewką na komorę przednią i tylną. Obie komory łączą się przez otwór źreniczny. Barwa tęczówki zależy od ilości barwnika zawartego w jej zrębie. Przy dużej jego ilości tęczówka przyjmuje brunatne zabarwienie, a w oczach niebieskich barwnika jest mniej. W tęczówce występują dwa mięśnie: zwieracz i rozwieracz źrenicy. Ich działanie jest antagonistyczne – zwieracz zwęża, rozwieracz poszerza źrenicę. Zwężenie źrenicy chroni oko przed nadmiernym strumieniem światła i zmniejsza rozmycie obrazów na siatkówce, gdyż częściowo kompensuje aberracje układu optycznego oka oraz wady refrakcji. Źrenice zwężają się nie tylko pod wpływem światła, lecz także przy patrzeniu na przedmioty bliskie (współruch towarzyszący konwergencji i akomodacji). Również niektóre leki mogą znacznie zwęzić lub rozszerzyć źrenicę. Na przykład pilokarpina (parasympatykomimetyk) zwęża źrenicę i pobudza akomodację. Atropina (parasympatykolityk) rozszerza źrenicę i poraża akomodację.

2.4. Błona wewnętrzna

Błona wewnętrzna (zwana nerwową lub czuciową) gałki ocznej to **siatkówka**. Przylegając do naczyniówki, wyściela od wewnątrz gałkę oczną w tylnej połowie, sięgając około 10 mm do przodu od równika, i dochodzi do ciała rzęskowego. Siatkówka jest cienką, przezroczystą, nieco różową błoną. Jej grubość zależy od okolicy dna oka. W otoczeniu bieguna tylnego wynosi około 0,4 mm, w okolicy równika około 0,2 mm, a na obwodzie, a więc przy ciele rzęskowym (rąbku zębatym) – około 0,1 mm. Różnice te wynikają z budowy mikroskopijnej siatkówki.

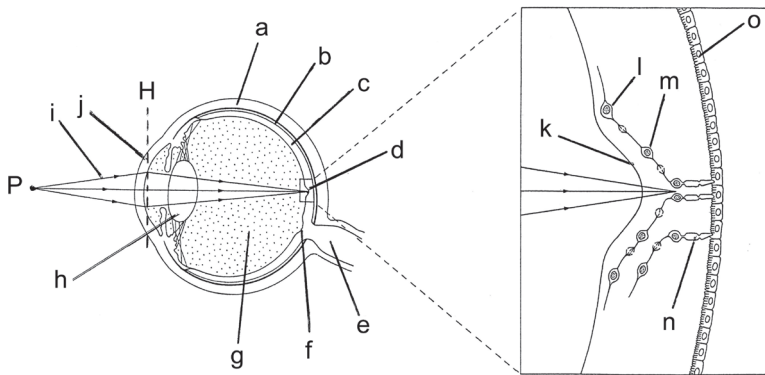


I – pierwszy neuron; II – drugi neuron; III – trzeci neuron; 1 – błona graniczna wewnętrzna; 2 – komórka Müllera; 3 – warstwa włókien nerwowych i warstwa komórek zwojowych; 4 – warstwa spłotowa wewnętrzna, czyli połączenia synaptyczne komórek dwubiegunowych i amakrynowych z komórkami zwojowymi; 5 – warstwa jądrowa wewnętrzna (zawiera komórki dwubiegunowe oraz odgrywające rolę asocjacyjną komórki poziome i komórki amakrynowe); 6 – warstwa spłotowa zewnętrzna, czyli połączenia synaptyczne komórek dwubiegunowych i poziomych z komórkami fotoreceptorowymi; 7 – warstwa jądrowa zewnętrzna (zawiera segmenty wewnętrzne komórek fotoreceptorowych wraz z ich jądrami); 8 – błona graniczna zewnętrzna; 9 – warstwa nabłonka wzrokowego utworzona przez segmenty zewnętrzne fotoreceptorów, tj. pręcików i czopków; 10 – nabłonek barwnikowy; 11 – blaszka podstawowa naczyńiówki; 12 – naczyńiówka.

Rysunek 2.5. Przekrój przez siatkówkę (wg Thiela)

Cechą charakterystyczną budowy i działania siatkówki jest jej zróżnicowanie na trzy neurony, czyli trzy rodzaje komórek nerwowych, które pełnią różne funkcje. Pierwszym neuronem i receptorem odbierającym widzialne fale świetlne (380–740 nm) są komórki wzrokowe wyposażone w wypustki w kształcie pręcików i czopków. **Pręciki i czopki** są położone zewnętrznie, a poprzez nabłonek barwnikowy przylegają do naczyńiówki. Impulsy z komórek wzrokowych odbierają

komórki dwubiegunowe, stanowiące drugi neuron. Jedna z wypustek komórki dwubiegunowej odbiera pobudzenie z komórki wzrokowej (czopkowej lub pręcikowej), a druga wypustka łączy się z **komórką zwojową**. Wypustki komórek zwojowych (zwane aksonami lub neurytami) tworzą w siatkówce warstwę włókien nerwowych, które zbiegając się, formują nerw wzrokowy łączący siatkówkę z mózgiem.

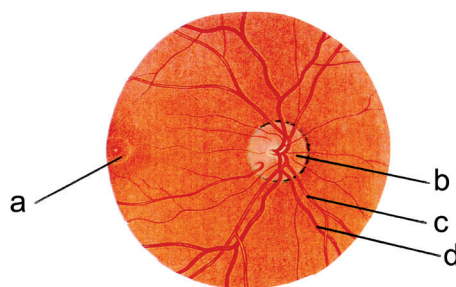


a – twardówka; b – naczyniówka; c – siatkówka; d – dołek plamki; e – nerw wzrokowy; f – tarcza nerwu wzrokowego; g – ciało szkliste; h – soczewka; i – wiązka światła pochodząca z obserwowanego przedmiotu P; j – rogówka; H – wypadkowa (równoważna) płaszczyzna główna; k – plamka; l – komórka zwojowa; m – komórka dwubiegunowa; n – fotoreceptor (czopki); o – nabłonek barwnikowy siatkówki.

Rysunek 2.6. Tworzenie obrazu w centrum plamki

Miejsce siatkówki, w którym zbiegają się włókna nerwowe komórek zwojowych, jest wyraźnie widoczne na dnie oka jako **tarcza nerwu wzrokowego**. Blisko tarczy nerwu wzrokowego znajduje się inne szczególne miejsce. Jest to **plamka** (zwana plamką żółtą), czyli miejsce siatkówki odpowiedzialne za ostrość wzroku. W centrum plamki znajduje się dołek środkowy. Właśnie przez dołek środkowy biegnie oś wzrokowa (oś widzenia). Bódcotwórcze działanie światła odbywa się dzięki jego absorpcji przez fotopigmenty, które znajdują się w pręcikach i czopkach. W pręcikach znajduje się rodopsyna. Natomiast w czopkach występują trzy inne rodzaje fotopigmentów (porfiryropsyna, jodopsyna, cyjanopsyna), stąd przyjmuje się istnienie trzech rodzajów czopków o odpowiednio zróżnicowanej wrażliwości na światło czerwone (czopki L), zielone (czopki M) i niebieskie (czopki S). Rodopsyna w pręcikach i fotopigmenty w czopkach mają zbliżoną budowę chemiczną – zbudowane są z białka (opsyna) i chromoforu, czyli

grupy prostetycznej będącej aldehydową pochodną witaminy A (retinal). Porfiry-nopsyna (erythrolabe) – barwnik czopków L wykazuje maksimum absorpcji dla 590 nm, jodopsyna (chlorolabe) – barwnik czopków M ma maksimum absorpcji przy 540 nm, a cyjanopsyna (cyanolabe) – barwnik czopków S przy 430 nm.



a – plamka (plamka żółta); b – tarcza nerwu wzrokowego; c – naczynie tętnicze; d – naczynie żyłne.

Rysunek 2.7. Obraz centralnego dna oka

Absorpcja światła przez fotopigment jest przyczyną jego rozkładu, który w konsekwencji prowadzi do hiperpolaryzacji odpowiedniej komórki receptorowej – czopka lub pręcika. Hiperpolaryzacja inicjuje pobudzenie, które przez łańcuch neuronów (czyli komórek nerwowych) siatkówki i mózgu dociera ostatecznie do ośrodka wzrokowego w korze mózgowej. Właśnie w ośrodkach wzrokowych zachodzi analiza docierających impulsów i powstaje wrażenie wzrokowe. Jednak zanim impulsy dotrą do korowych ośrodków wzrokowych, podlegają wstępnej modulacji już na poziomie siatkówki, w czym biorą udział także komórki poziome i amakrynowe. W siatkówce człowieka znajduje się około 7 mln czopków i 120 mln pręcików. W dołku środkowym plamki występują wyłącznie czopki. Im dalej od dołka plamki ku obwodowi siatkówki, tym bardziej maleje liczba czopków, a rośnie liczba pręcików. Układ receptorów czopkowych odbiera bodźce wysoko zróżnicowane i odpowiada za dokładne widzenie drobnych elementów, najwyższą ostrość wzroku oraz widzenie barwne. Warunkiem tego jest odpowiednio duże natężenie oświetlenia (widzenie fotopowe). Układ pręcików odbiera bodźce o niskim natężeniu światła (widzenie skotopowe) i bierze udział w powstawaniu wrażeń prostych, orientacji przestrzennej. Przy słabym oświetleniu czułość siatkówki przesuwana jest w stronę fal krótkich (przesunięcie Purkiniego). Skoro w warstwie nerwowo-nabłonkowej siatkówki znajduje się około 130 mln fotoreceptorów, natomiast liczba komórek zwojowych, a tym samym

liczba włókien nerwowych w nerwie wzrokowym, który łączy siatkówkę z mózgiem, wynosi niewiele ponad milion, więc w strukturze i czynności siatkówki musi występować swoista redukcja. Polega ona na tym, że wiele receptorów dołączonych jest do jednej komórki zwojowej, a interneurony (komórki dwubiegunkowe, poziome i amakrynowe) biorą istotny udział w modulacji bodźca na poziomie siatkówki.

Dla wyjaśnienia mechanizmu tej modulacji wprowadza się tzw. pola recepcyjne, czyli obszary siatkówki, których pobudzenie wywołuje aktywność konkretnej komórki zwojowej. Pola recepcyjne komórek zwojowych mają kształt owalny, ale inaczej zachowuje się centrum tego pola, a inaczej jego obwód. Istnieją dwa rodzaje pól recepcyjnych komórek zwojowych – z centrum typu ON i typu OFF. Komórki zwojowe dzieli się ponadto na dwie klasy: *magno* i *parvo*. Zadaniem komórek typu *magno* jest sygnalizowanie szybkich zmian w polu widzenia, natomiast komórki typu *parvo* przenoszą informację o barwie i drobnych szczegółach w polu widzenia.

Podstawową funkcją większości komórek zwojowych jest przekazywanie informacji z siatkówki do mózgu. Jednak niewielka (ok. 1%) subpopulacja komórek zwojowych wykazuje właściwości zbliżone do komórek fotoreceptorowych. Te komórki zwojowe, które bezpośrednio pochłaniają fotony światła i oznaczane są symbolem ipRGCs (*intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells*), zawierają niedawno odkryty barwnik wzrokowy – melanopsynę. Te światłoczułe komórki zwojowe są najbardziej wrażliwe na widzialne światło niebieskie o długości fali 460–480 nm. Obecnie przyjmuje się, że komórki ipRGCs biorą udział w regulacji rytmów dobowych i szerokości żrenic. Przypuszcza się ponadto, że mogą brać udział w widzeniu barwnym.

Barwa to wrażenie psychofizyczne odczuwane pod wpływem światła o określonym składzie widmowym. Wrażenie barwy zależy zatem od:

- długości (częstotliwości) fali światła, która określa tzw. chromatyczność (ton, odcień),
- nasycenia (czystości), czyli różnej domieszki światła białego,
- natężenia światła (jasności).

Przyjęto rozróżniać dwa rodzaje barw:

- chromatyczne (kolorowe),
- achromatyczne (niekolorowe).

Achromatyczne wrażenia barwne obejmują skalę od bieli poprzez różne odcienie szarości do czerni. Odcienie uporządkowane są w ciąg liniowy 10 stopni szarości.

Wszystkie powierzchnie szare mają wspólną cechę – ich zdolność odbijania światła nie zależy od długości fali.

Barwy widma światła białego przechodzą od czerwieni poprzez kolor pomarańczowy, żółty, zielony, niebieski do fioletu. Barwy widmowe nie obejmują purpury i różnych odcieni barwy różowej. Różne odcienie barwne można otrzymać nie tylko przez użycie czystych barw widmowych, lecz także przez ich mieszanie (tzw. mieszanie addytywne). Mieszanie addytywne polega na równoczesnym działaniu na oko dwiema lub więcej wiązkami monochromatycznymi o różnych barwach. Taki sam odcień barwy, jaki ma jedna z barw widma, otrzymuje się również przez zmieszanie w odpowiedniej proporcji innych barw widmowych. Takie samo wrażenie barwy można zatem wywołać w rozmaity sposób. Przez zmieszanie wszystkich barw widmowych w odpowiedniej proporcji uzyskuje się kolor biały. Dwie barwy, które w sumie dają barwę białą, nazywają się dopełniającymi. Są nimi na przykład barwy czerwona i zielononiebieska, pomarańczowa i niebieska, żółtozielona i fioletowa. Mieszanie addytywne, o którym mowa, dotyczy nakładania wiązek światła o różnej barwie na biały ekran, a nie mieszania barwników. Barwa wypadkowa w przypadku mieszania farb jest inna niż w wyniku nakładania wiązek promieni barwnych na ekranie, gdyż przy mieszaniu barwników istotną rolę odgrywa pochłanianie światła.

Różne odcienie barwne dają się ułożyć w szereg. Przyjęto przedstawiać go jako zamknięty krąg barw. Wzdłuż tego kręgu następuje przejście ciągłe od jednej barwy do drugiej, przy czym między czerwienią a fioletem mieści się purpura, której nie ma w widmie światła białego.

Na użytek modeli doświadczalnych można traktować światło białe jako sumę jednakowego natężenia trzech barw podstawowych: czerwonej R (red, $\lambda_R = 700$ nm), zielonej G (green, $\lambda_G = 546$ nm), niebieskiej B (blue, $\lambda_B = 435$ nm).

Ogólny wzór barwy można wyrazić następująco:

$$W = xR + yG + zB \quad (2.1)$$

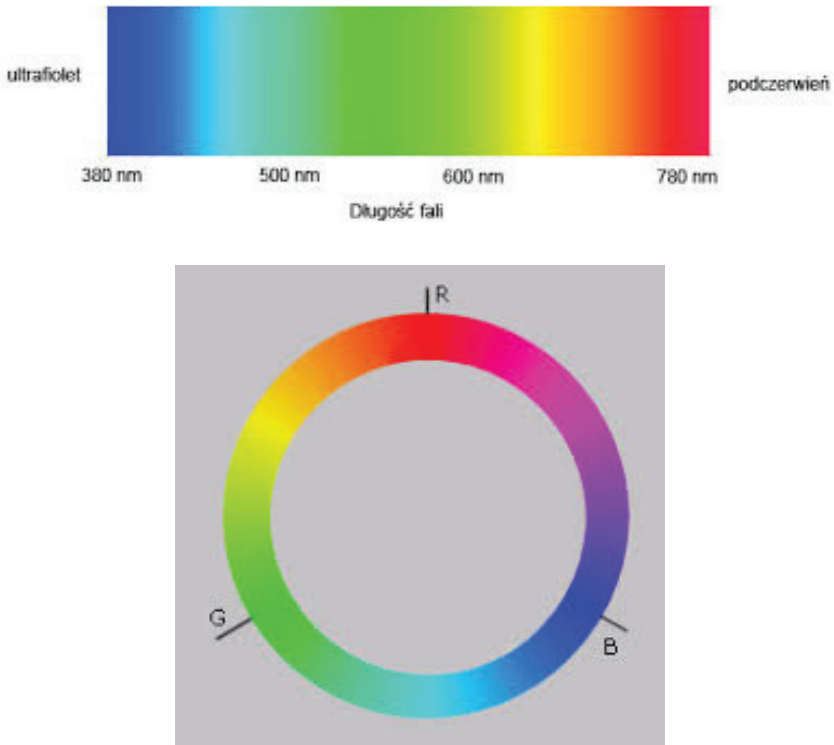
przy czym $x + y + z = 1$.

Dla barwy czerwonej: $x = 1, y = 0, z = 0$.

Dla barwy zielonej: $x = 0, y = 1, z = 0$.

Dla barwy niebieskiej: $x = 0, y = 0, z = 1$.

Dla barwy białej: $x = y = z = 1/3$.



Rysunek 2.8. Widmo światła białego i krąg barw

Do pełnej charakterystyki barwy nie wystarcza podanie składu widmowego. Każda barwa może występować w różnym stopniu nasycenia, czyli domieszki światła białego. Ponadto każda barwa może występować z różnym natężeniem.

Postrzeganie barw jest procesem złożonym. Zgodnie z teorią Younga-Helmholtza-Heringa prawidłowe widzenie barw wynika z obecności trzech rodzajów czopków, których maksimum wrażliwości występuje przy różnych długościach fali światła. Ocenia się, że w warunkach prawidłowych oko ludzkie jest zdolne rozróżnić około 150 odcieni barw będących mieszaniną trzech barw podstawowych: czerwonej, zielonej, niebieskiej. Równomierne pobudzenie wszystkich trzech rodzajów czopków wywołuje wrażenie barwy białej.

Zaburzenia widzenia barw (dyschromatopsje) dzieli się na wrodzone i nabyte. Wrodzone dyschromatopsje są uwarunkowane genetycznie i spowodowane wrodzonym brakiem poszczególnych fotopigmentów lub nieprawidłową budową

ich cząsteczek. Szacuje się, że dyschromatopsja wrodzona występuje u około 8% mężczyzn i 0,5% kobiet.

Achromatopsja polega na całkowitym braku postrzegania barw, występuje rzadko i łączy się z innymi zaburzeniami rozwojowymi oczu. Anomalny trichromatyzm jest spowodowany obniżoną percepcją jednej barwy (przesunięciem maksimum czułości jednego rodzaju czopka):

- protanomalia – obniżona percepcja barwy czerwonej,
- deuteranomalia – obniżona percepcja barwy zielonej,
- tritanomalia – obniżona percepcja barwy niebieskiej.

W przypadku całkowitej niezdolności postrzegania jednej barwy mamy do czynienia z dichromatyzmem:

- protanopia – nierozpoznawanie barwy czerwonej, brak czopka L,
- deuteranopia – nierozpoznawanie barwy zielonej, brak czopka M,
- tritanopia – nierozpoznawanie barwy niebieskiej, brak czopka S.

Najczęściej występującym zaburzeniem jest deuteranomalia, a zaburzenia widzenia barwy niebieskiej występują rzadko.

Oprócz wrodzonych zaburzeń widzenia barw występują zaburzenia nabyte. Dyschromatopsje nabyte występują nie tylko u osób z chorobami narządu wzroku, lecz także u osób z chorobami ogólnoustrojowymi, zatrutych lekami i innymi środkami chemicznymi.

Badanie widzenia barwnego przeprowadza się za pomocą odpowiednich testów. W Europie najczęściej stosowane są tablice pseudoizochromatyczne Ishihary lub test Farnswortha-Munsella. Badanie widzenia barwnego można wykonać także, stosując aparat – anomaloskop.

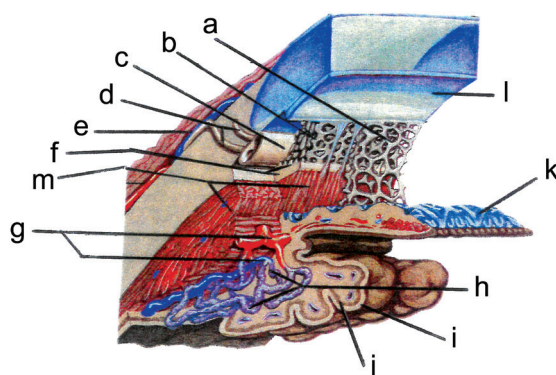
2.5. Komory w gałce ocznej

W obrębie gałki ocznej wyróżnia się:

- komorę przednią,
- komorę tylną,
- komorę ciała szklanego.

Komora przednia gałki ocznej zawarta jest pomiędzy rogówką i płaszczyzną tęczówki. Komora tylna ograniczona jest z przodu przez tylną powierzchnię

tęczówki, z tyłu przez ciało szkliste, na obwodzie przez ciało rzęskowe. Obie komory wypełnione są cieczą wodnistą (zwaną płynem komorowym), która składa się głównie (96%) z wody. Podstawowym zadaniem cieczy wodnistej jest odżywanie tych elementów gałki ocznej, które nie mają własnych naczyń krwionośnych, czyli soczewki, rogówki i ciała szklistego. Ciecz wodnista jest wytwarzana przez nabłonek ciała rzęskowego do komory tylnej. Z komory tylnej przepływa przez otwór źreniczny do komory przedniej, skąd przez beleczkowanie kąta tęczówkowo-rogówkowego przemieszcza się do zatoki żyłnej twardówki (kanału Schlemma). Z zatoki żyłnej twardówki ciecz wodnista przez żyły wodne przedostaje się do naczyń żylnych gałki ocznej. Na ogół przyjmuje się, że prawidłowe wartości ciśnienia wewnątrzgałkowego powinny mieścić się w przedziale od 10 do 22 mm Hg.



a – warstwa naczyniówkowa beleczkowania; b – warstwa twardówkowa beleczkowania; c – zatoka żylna twardówki (kanał Schlemma); d – żyły wodne; e – spojówka; f – ostroga twardówki; g – naczynia tętnicze ciała rzęskowego; h – naczynia żylnie ciała rzęskowego; i – warstwa wewnętrzna nabłonka rzęskowego (przedłużenie siatkówki sensorycznej); j – warstwa zewnętrzna nabłonka rzęskowego (przedłużenie nabłonka barwnikowego siatkówki); k – tęczęwka; l – rogówka; m – mięsień rzęskowy.

Rysunek 2.9. Kąt tęczówkowo-rogówkowy

O wysokości ciśnienia wewnątrzgałkowego decydują:

- objętość cieczy wodnistej wydzielanej przez ciało rzęskowe,
- opór naczyniowy drogi odprowadzającej ciecz wodnistą.

Na drogę odprowadzającą ciecz wodnistą składają się przede wszystkim:

- beleczkowanie kąta tęczówkowo-rogówkowego,
- zatoka żylna twardówki (kanał Schlemma),

- żyły wodne,
- nadtwardówkowy spłot żylny.

Jest to główna, zwana klasyczną, droga odpływu cieczy wodnistej. W warunkach prawidłowych drogą tą odpływa około 90% objętości cieczy wodnistej. Pozostała część (10%) objętości cieczy wodnistej odpływa drogą zwrotną przez ciało rzęskowe i tęczówkę do przestrzeni nadnaczyniówkowej.

Objętość cieczy wodnistej odpływającej z gałki ocznej w jednostce czasu jest proporcjonalna do różnicy pomiędzy ciśnieniem wewnątrzgałkowym a ciśnieniem w żyłach nadtwardówkowych. Stąd zależność:

$$\frac{V}{t} = C(p_w - p_z) \quad (2.2)$$

gdzie: V – objętość cieczy wodnistej (μl),

t – czas (min),

p_w – ciśnienie wewnątrzgałkowe (mm Hg),

p_z – ciśnienie w żyłach nadtwardówkowych (mm Hg),

C – współczynnik proporcjonalności zwany współczynnikiem łatwości odpływu ($\mu\text{l}/\text{min} \cdot \text{mm Hg}$).

Oszacowano, że ciało rzęskowe wytwarza średnio 2 mm^3 cieczy wodnistej w czasie jednej minuty, czyli

$$\frac{V}{t} = 2 \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \quad (2.3)$$

Dla prawidłowych warunków można przyjąć średnie wartości:

$$\frac{V}{t} = 2 \frac{\mu\text{l}}{\text{min}}, \quad p_w = 15 \text{ mm Hg}, \quad p_z = 5 \text{ mm Hg} \quad (2.4)$$

Dla powyższych wartości można także określić średnią wartość współczynnika łatwości odpływu:

$$C = \frac{V}{t(p_w - p_z)} = 0,2 \frac{\mu\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm Hg}} \quad (2.5)$$

Omawiając biofizykę przepływu cieczy wodnistej w oku, stosuje się niekiedy (zamiast współczynnika łatwości odpływu C) współczynnik oporu odpływu R , który jest odwrotnością C :

$$R = \frac{1}{C} \quad (2.6)$$

Prawidłowe wartości współczynników łatwości odpływu i oporu odpływu mieszczą się w przedziałach:

$$C = (0,15; 0,32) \frac{\mu\text{l}}{\text{min} \cdot \text{mm Hg}}, \quad R = (3,1; 6,7) \frac{\text{min} \cdot \text{mm Hg}}{\mu\text{l}} \quad (2.7)$$

Z oczywistych powodów taka sama ilość cieczy wodnistej, jaka została wyprodukowana przez ciało rzęskowe, musi z gałki odpłynąć. W patologicznym procesie rozwoju jaskry maleje współczynnik łatwości odpływu, czyli wzrasta współczynnik oporu R . W takich warunkach odpływ cieczy wodnistej z gałki ocznej może odbywać się przy odpowiednio podwyższonym ciśnieniu wewnątrzgałkowym. Jednak przy podwyższonym ciśnieniu wewnątrzgałkowym dochodzi do ucisku włókien nerwowych i tkanki podporowej przedniego odcinka nerwu wzrokowego, a także zmniejsza się przepływ krwi przez nerw wzrokowy i siatkówkę. W rezultacie nieleczona jaskra prowadzi do zaniku nerwu wzrokowego i znacznego pogorszenia widzenia, a nawet nieodwracalnej ślepoty.

2.6. Soczewka

Soczewka znajduje się w komorze tylnej pomiędzy tęczówką a przednią powierzchnią ciała szklanego. Obwodowa część soczewki nazywa się równikiem. Jak już wspomniano przy omawianiu ciała rzęskowego, soczewka utrzymuje swoje położenie za pomocą obwódki rzęskowej, która rozpościera się od równika soczewki do wyrostków ciała rzęskowego. Soczewka otoczona jest sprężystą torebką. Pod torebką przednią znajduje się nabłonek soczewki. Z komórek nabłonka powstają włókna soczewki, z których zbudowana jest istota właściwa soczewki. Soczewka wzrasta w ciągu niemalże całego życia. Rozwojowo najstarsze jest centrum soczewki (jądro), włókna obwodowe soczewki są młodsze i tworzą korę soczewki. Średnia wartość współczynnika załamania soczewki wynosi 1,40. Jest ona różna w różnych warstwach soczewki, zmienia się także wraz z wiekiem. Znając wartości współczynnika załamania soczewki, cieczy wodnistej i ciała szklanego oraz wartości promienia krzywizny przedniej powierzchni,

tylnej powierzchni, a także grubość soczewki, można obliczyć jej moc podobnie jak dla rogówki. Obliczenia dla średnich wartości osoby dwudziestoletniej:

- promień krzywizny pierwszej powierzchni soczewki $r_1 = 10 \text{ mm} = 0,01 \text{ m}$,
- promień krzywizny drugiej powierzchni soczewki $r_2 = -6 \text{ mm} = -0,006 \text{ m}$,
- grubość soczewki $d = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$,
- współczynnik załamania soczewki $n_s = 1,40$,
- współczynnik załamania cieczy wodnistej i ciała szklanego $n_c = 1,33$.

Dla tych wartości moc przedniej powierzchni soczewki wynosi:

$$D_1 = \frac{n_s - n_c}{r_1} = \frac{1,40 - 1,33}{0,01} = 7 \text{ dpt} \quad (2.8)$$

a moc tylnej powierzchni soczewki

$$D_2 = \frac{n_c - n_s}{r_2} = \frac{1,33 - 1,40}{-0,006} = 11,67 \text{ dpt} \quad (2.9)$$

Moc soczewki wynosi więc

$$D_s = D_1 + D_2 - \frac{d}{n_s} D_1 D_2 = 7 + 11,67 - \frac{0,004}{1,4} 7 \cdot 11,67 = 18,44 \text{ dpt} \quad (2.10)$$

Oczywiście wartość mocy soczewki nieakomodującej zależy od przyjętych do obliczeń odpowiednich wartości. Na ogół przyjmuje się, że moc soczewki nieakomodującej wynosi około 19 dpt. W czasie akomodacji skurcz włókien okrężnych mięśnia rzęskowego zmniejsza napięcie włókien obwódki rzęskowej i powoduje wzrost zdolności skupiającej soczewki. Wzrost ten wynika ze zmniejszenia promienia krzywizny obu powierzchni soczewki. Możliwości akomodacyjne oka określa tzw. amplituda akomodacji. U osoby w wieku dwudziestu lat osiąga ona wartość około 10 dpt. Wraz z wiekiem soczewka traci elastyczność, co powoduje zmniejszenie możliwości akomodacyjnych oka. Stan, w którym amplituda akomodacji zmniejszy się do około 4 dpt, nazywamy przeziopią. Wtedy dla wyraźnego widzenia z bliska potrzebny jest odpowiedni „dodatek do blizy”. Soczewka podobnie jak rogówka nie ma naczyń krwionośnych, a substancji odżywczych i tlenu dostarcza jej ciecz wodnista. Najczęściej występującą zmianą patologiczną soczewki jest zaćma starcza, czyli zmętnienie soczewki związane z wiekiem. Leczenie polega na operacyjnym usunięciu zmętniałej soczewki i wszczepieniu sztucznej soczewki o odpowiedniej mocy.

2.7. Ciało szkliste

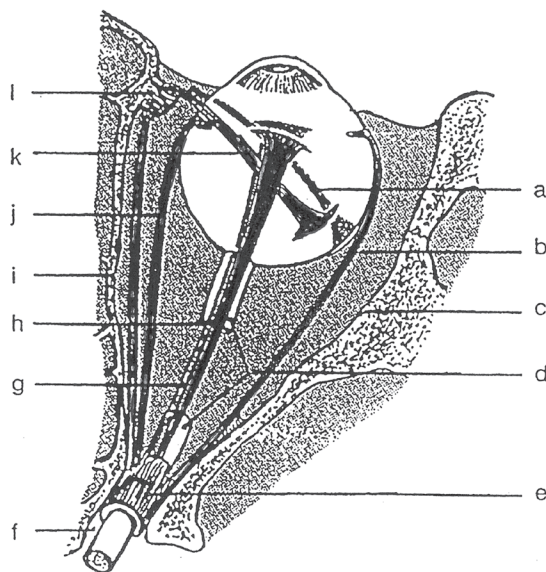
Ciało szkliste zajmuje około dwóch trzecich objętości gałki ocznej i wypełnia przestrzeń między soczewką a siatkówką (komora ciała szklistego). Ciało szkliste pełni w oku wielorakie funkcje:

- zapewnia utrzymanie kształtu i odpowiedniego napięcia gałki ocznej,
- jest ważnym elementem układu optycznego oka, gdyż jest najdłuższym odcinkiem wewnątrzgałkowej drogi światła (współczynnik załamania wynosi 1,338),
- przypiera siatkówkę do podłoża,
- amortyzuje wstrząsy i jest izolatorem termicznym stabilizującym temperaturę siatkówki,
- poprzez transport różnych substancji bierze udział w metabolizmie siatkówki i soczewki.

Głównym składnikiem ciała szklistego jest woda (98%), pozostałe to kolagen, hialuronian, rozpuszczalne białka i elektrolity. Dzięki tym składnikom ciało szkliste odznacza się szczególnymi właściwościami biofizycznymi – ma strukturę żelową. Galaretowata konsystencja i duża lepkość ciała szklistego wynikają z obecności sieci włókien kolagenowych i zwojów kwasu hialuronowego. Na obwodzie ciało szkliste tworzy warstwę bardziej skondensowaną, czyli korę szklistą zwaną błoną szklistą. Ciało szkliste dostosowuje swój kształt do otoczenia. Tylna jego powierzchnia jest kulista i wypukła, a przednia, przylegająca do soczewki, wklęsła. Przy ciele rzęskowym (w okolicy rąbka zębatego) ciało szkliste tworzy tzw. podstawę ciała szklistego. Jest to pas szerokości około 4 mm, w którego obrębie jest ono ściśle połączone z błoną wewnętrzną siatkówki. Podobne ściśle połączenia ciała szklistego z siatkówką występują na obwodzie tarczy nerwu wzrokowego i w obszarze okołodołkowym plamki. Na pozostałym obszarze ciało szkliste nie jest połączone z siatkówką, ale przylega do niej i w ten sposób przypiera ją do podłoża. Podobnie jak soczewka ciało szkliste nie ma naczyń krwionośnych, a jego odżywienie zależy przede wszystkim od błony naczyniowej oka. W rezultacie procesu starzenia może pojawić się zwyrodnienie w postaci rozwodnienia żelu ciała szklistego. Zwyrodnienie to polega na rozpadzie sieci i tworzeniu skupisk włókien kolagenowych. Pojawiają się niejednorodności optyczne o różnej wielkości nazywane mętami, zmętnieniami, cieniami, którym niekiedy towarzyszą błyski. Zdarza się, na szczęście rzadko, że te dostrzegane przez pacjenta ruchome męty poprzedzają wystąpienie odwarstwienia siatkówki.

2.8. Mięśnie zewnętrzne gałki ocznej

Gałka oczna jest otoczona w części środkowej i tylnej pochewką, która ułatwia jej obroty w różnych osiach. Ruchy te odbywają się pod wpływem sześciu mięśni: czterech prostych (przyśrodkowy, boczny, górny i dolny) oraz dwóch skośnych (górny i dolny). Środek obrotu gałki znajduje się w ciele szklistym na osi optycznej około 14 mm od środka rogówki. Mięśnie proste oraz mięsień skośny górny rozpoczynają się krótkimi ścięgnami u szczytu oczodołu w pierścieniu ścięgnistym wspólnym i kierują się ku przodowi, tworząc stożek mięśniowy, w którego osi przebiega nerw wzrokowy. Ścięgna końcowe przyczepiają się do twardówki. Przyczepy mięśni prostych znajdują się przed równikiem gałki, natomiast mięśni skośnych za jej równikiem.



a – mięsień skośny dolny; b – mięsień prosty boczny; c – ściana boczna oczodołu; d – nerw wzrokowy; e – pierścień ścięgnisty wspólny; f – kanał wzrokowy; g – mięsień prosty dolny; h – mięsień prosty górny; i – ściana przyśrodkowa oczodołu; j – mięsień prosty przyśrodkowy; k – mięsień skośny górny; l – błoczek.

Rysunek 2.10. Aparat ruchowy oka

Mięsień prosty przyśrodkowy, biegnący wzdłuż przyśrodkowej ściany oczodołu, obraca gałkę dookoła osi pionowej. Pod jego wpływem biegun przedni gałki kieruje się w stronę nosa (przywodzenie).

Mięsień prosty boczny biegnie wzdłuż ściany bocznej oczodołu i także obraca gałkę dookoła osi pionowej. Jego skurcz powoduje ruch bieguna przedniego gałki w stronę skroni (odwodzenie).

Mięsień prosty górny, biegnący wzdłuż górnej ściany oczodołu, leży pod mięśnieniem dźwigaczem powieki górnej. Ponieważ (przy patrzeniu na wprost) tworzy z osią gałki kąt około 25° , jego skurcz podnosi, przywodzi i obraca gałkę do wewnątrz (obróć gałki dookoła jej osi do wewnątrz oznacza, że punkt na godzinie 12 rąbka rogówki zbliża się do nosa).

Mięsień prosty dolny biegnie wzdłuż dolnej ściany oczodołu. Również on, przy patrzeniu na wprost, tworzy z osią gałki kąt około 25° . Jego skurcz obniża, przywodzi i obraca gałkę na zewnątrz (obróć gałki na zewnątrz oznacza, że punkt na godzinie 12 rąbka rogówki oddala się od nosa).

Mięsień skośny górny jest najdłuższym mięśniem gałki ocznej. Od pierścienia ścięgnistego wspólnego biegnie między górną a przyśrodkową ścianą oczodołu do bloczka zbudowanego z chrząstki włóknistej. Przy bloczku mięsień ten przechodzi w zaokrąglone ścięgno, zagina się pod kątem około 60° i biegnąc dalej pod mięśniem prostym górnym, przyczepia się do twardówki poza równikiem gałki w jej kwadrancie górno-bocznym. Przy patrzeniu na wprost (jako wyjściowej pozycji) mięsień prosty górny obniża i odwodzi biegun przedni, także obraca gałkę do wewnątrz.

Mięsień skośny dolny, najkrótszy mięsień gałki ocznej, zaczyna się na ścianie dolnej oczodołu, biegnie do boku i nieco do tyłu między mięśniem prostym dolnym a dnem oczodołu i przyczepia się do twardówki za równikiem gałki w kwadrancie dolno-bocznym. Jego skurcz podnosi i odwodzi biegun przedni oraz obraca gałkę na zewnątrz.

Od pierścienia ścięgnistego wspólnego pod ścianą górną oczodołu i nad mięśniem prostym górnym przebiega ku przodowi do powieki górnej **mięsień dźwigacz powieki górnej**. Jego skurcz powoduje unoszenie powieki górnej. Działanie mięśni jest możliwe dzięki ich pobudzeniu, które dociera drogą nerwową. Mięśnie proste z wyjątkiem bocznego, mięsień skośny dolny, a także mięsień dźwigacz powieki górnej są zaopatrzone przez nerw okoruchowy (n. III). Mięsień prosty boczny jest unerwiony przez nerw odwodzący (n. VI), a mięsień skośny górny przez nerw bloczkowy (n. IV). Uszkodzenie funkcji któregoś z powyższych

nerwów powoduje nieprawidłowe ustawienie oka określane jako zez porażenny, na przykład porażenie nerwu odwodzącego objawia się zezem zbieżnym.

2.9. Powieki

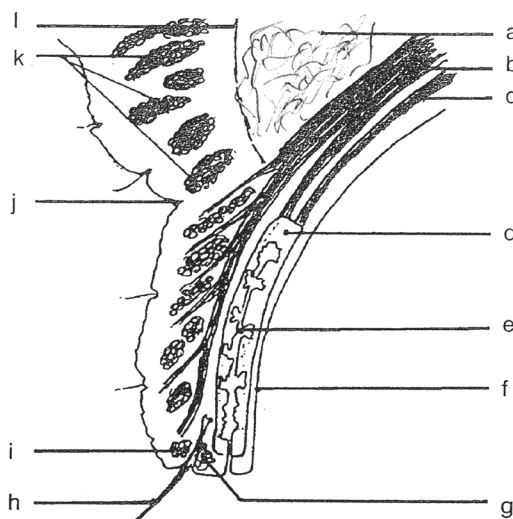
Powieki i oczodół to główne elementy aparatu ochronnego oka. Powieki są ruchomymi fałdami skóry osłaniającymi gałkę oczną od przodu i chronią ją przed urazami i wysychaniem. Granicę powieki górnej stanowi brew. Granica powieki dolnej jest słabo zaznaczona, odpowiada dolnej krawędzi oczodołu. Przestrzeń między brzegami wolnymi powiek, czyli szpara powiek, ma średnio u osoby dorosłej długość około 3 cm i szerokość (przy patrzeniu na wprost) około 1 cm. Na brzegach powiek wyrastają rzęsy ustawione zwykle w dwa rzędy. Liczba rzęs na powiece górnej wynosi średnio około 100, na dolnej 50. Do mieszków włosowych rzęs uchodzą gruczoły łojowe i gruczoły potowe. Na brzegach powiek znajdują się także ujścia gruczołów tarczowych wydalających substancję natłuszczającą brzegi powiek. W pobliżu kąta przyśrodkowego na brzegu powieki znajduje się otvorek łzowy, który jest początkiem drogi odprowadzającej łzy.

W powiece wyróżnia się następujące warstwy:

- skórę wraz z tkanką podskórną,
- mięsień okrężny oka,
- tarczkę wraz z przegrodą oczodołową,
- spojówkę.

Skóra powiek jest cienka, a tkanka podskórna luźna i uboga w tłuszcz. Mięsień okrężny oka zamyka szparę powiek. Jej otwarcie wywołuje dźwigacz powieki górnej. Tarczki, które nadają powiekom odpowiedni kształt, są zbudowane ze zbitej tkanki łącznej. W tarczce znajdują się gruczoły łojowe (Meiboma).

Tylną powierzchnię powiek wyściela delikatna błona śluzowa zwana spojówką. Przez ciągłość przechodzi ona na powierzchnię gałki ocznej, dochodząc do rąbka rogówki, dlatego rozróżnia się spojówkę powiekową i spojówkę gałkową. Fałdy stanowiące miejsca przejścia spojówki gałkowej w spojówkę powieki górnej i powieki dolnej noszą nazwę sklepienia (załamka) spojówkowego, odpowiednio górnego i dolnego. Szczelinowata przestrzeń zawarta między spojówką powiek a spojówką gałki nazywa się workiem spojówkowym. Najczęstszą chorobą dotyczącą spojówek jest zapalenie spojówek.



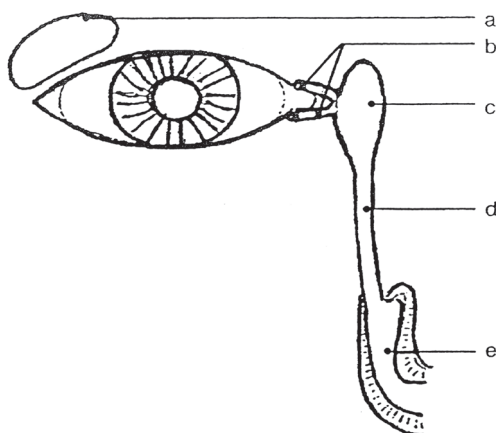
a – tkanka tłuszczowa oczodołu; b – mięsień dźwigacz powieki górnej; c – mięsień tarczkowy; d – tarczka; e – gruczoł tarczkowy (Meiboma); f – spojówka powiekowa; g – gruczoł łzowy (Zeissa); h – rzęsa; i – gruczoł potowy (Molla); j – bruzda powiekowa; k – mięsień okrężny oka; l – przegroda oczodołowa.

Rysunek 2.11. Przekrój przez powiekę górną

Powieki chronią gałkę oczną przed różnymi czynnikami szkodliwymi. W warunkach prawidłowych mruganie odbywa się z przeciętną częstotliwością 15 razy na minutę (0,25 Hz). Natężona uwaga wzrokowa podczas prowadzenia samochodu lub w czasie pracy przy monitorze ekranowym zmniejsza częstotliwość mrugania. Natomiast czynniki drażniące (np. silne światło, dotknięcie rzęs, ciało obce) zwiększają częstotliwość mrugania. Znaczenie mrugania polega na zwilżaniu i oczyszczaniu powierzchni gałki ocznej oraz ułatwianiu odpływu łez. Spojówki pełnią funkcję ochronną i wydzielniczą. Gładkość i śliskość powierzchni spojówek ułatwia ruchy gałek i mruganie.

2.10. Narząd łzowy

Narząd łzowy składa się z części wydzielniczej, czyli gruczołowej, i części odprowadzającej, czyli drogi łzowej.



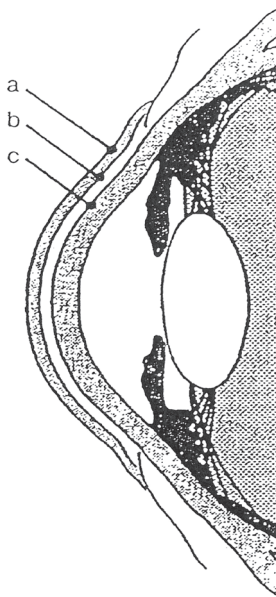
a – gruczoł łzowy; b – kanaliki łzowe; c – woreczek łzowy; d – przewód nosowo-łzowy; e – przewód nosowy.

Rysunek 2.12. Narząd łzowy

Gruczoł łzowy znajduje się w górno-bocznej okolicy oczodołu i składa się z dwóch części – większej oczodołowej i mniejszej powiekowej. Gruczoł łzowy ma około 15 przewodników odprowadzających, a ich ujścia znajdują się w bocznej części górnego sklepienia spojówki. Oprócz gruczołu łzowego istnieją drobne gruczoły dodatkowe znajdujące się w spojówce. Niektóre z nich, podobnie jak główny gruczoł łzowy, produkują wodnisty płyn łzowy, inne – wydzielinę śluzową (mucynową). Dla prawidłowego działania narządu łzowego potrzebne są substancje tłuszczowe (lipidowe) produkowane głównie przez gruczoły tarczowe (Meiboma), których ujścia znajdują się na wolnym brzegu powiek.

Drogi odprowadzające obejmują kanaliki łzowe, woreczek łzowy i przewód nosowo-łzowy. Kanaliki łzowe rozpoczynają się dwoma punktami (otworkami) łzowymi, które leżą na krawędzi obu powiek przy kącie przyśrodkowym. Punkty łzowe prowadzą do kanalików łzowych o średnicy około 0,2 mm. Kanalik powieki górnej i kanalik powieki dolnej zbliżają się do siebie i uchodzą do woreczka łzowego. Woreczek łzowy leży w zagłębieniu przyśrodkowej ściany oczodołu. Przewód nosowo-łzowy jest przedłużeniem woreczka łzowego i uchodzi do przewodu nosowego dolnego. Zadaniem łez jest stałe zwilżanie rogówki i spojówki. Zdrowe i niepodrażnione oko w ciągu dnia produkuje średnio około 0,7 ml łez, w czasie snu wydzielanie łez praktycznie ustaje. Wzmoczone wydzielanie łez drogą odruchową następuje w wyniku pobudzenia działającego na nerw wzrokowy

(silne światło) lub nerw trójdzielny (podrażnienie rogówki i spojówki), a także pod wpływem takich bodźców psychicznych, jak smutek lub radość (płacz spowodowany emocjami).



a – warstwa lipidowa; b – warstwa wodnista; c – warstwa mucynowa.

Rysunek 2.13. Schematyczne przedstawienie przedrogówkowego filmu łzowego

Spokojne, stacjonarne odprowadzanie łez polega na ich spływaniu przez wąską rynienkę zawartą między przednią powierzchnią gałki ocznej a wolnym brzegiem powiek. Część płynu łzowego wyparowuje, a pozostała zbiera się w kącie przyśrodkowym szpary powiek, w tzw. jezioru łzowym. Mechanizm odpływu łez polega na działaniu ssąco-tłoczącym kanalików i woreczka łzowego. Podczas otwierania powiek kanaliki rozszerzają się i płyn łzowy wnika do kanalików i woreczka łzowego (działanie ssące). Przy zamykaniu powiek kanaliki zwężają się, ściana woreczka rozluźnia się i łyzy przechodzą dalej do przewodu nosowo-łzowego (działanie tłoczące).

Łzy pokrywają gałkę oczną warstwą zwaną filmem łzowym, który jest rozprowadzany równomiernie po powierzchni gałki ocznej wraz z każdym mrugnięciem.

Film łzowy pełni bardzo ważne funkcje:

- chroni rogówkę i spojówkę przed wysychaniem, a także w znacznym stopniu przed infekcjami,
- bierze udział w dostarczaniu rogówce tlenu z powietrza atmosferycznego,
- jest istotną warstwą optyczną rogówki, zapewniającą gładkość jej powierzchni.

Ocenia się, że grubość filmu łzowego jest osobniczo zmienna i wynosi od 10 μm do 20 μm . Film łzowy składa się z trzech warstw:

- zewnętrznej – lipidowej (tłuszczowej),
- środkowej – wodnistej,
- wewnętrznej – mucynowej (śluzowej), która przylega bezpośrednio do nabłonka rogówki.

Warstwa lipidowa filmu łzowego wytwarzana jest głównie przez gruczoły Meiboma, znajdujące się w tarczce powieki, a ich ujścia widoczne są na brzegu powieki. Składa się z trójglicerydów, wolnych kwasów tłuszczowych i cholesterolu. Warstwa lipidowa hamuje parowanie łez oraz zapewnia optyczną gładkość powierzchni rogówki. Warstwa wodnista jest najgrubszą warstwą filmu łzowego. Zawiera przede wszystkim wodę (97%), a ponadto elektrolity, hormony, a także inne białka i cząsteczki organiczne oraz rozpuszczone gazy (tlen, azot, dwutlenek węgla). Przyjmuje się, że podstawowe (stacjonarne) wydzielanie warstwy wodnistej zapewniają tzw. dodatkowe gruczoły łzowe, które znajdują się w spojówce gałkowej i powiekowej. Natomiast duże odruchowe wydzielanie łez następuje z głównego gruczołu łzowego. Warto podkreślić, że łzy dzięki obecności w nich lizozymu, betalizyny, laktoferyny oraz przeciwciał pełnią ważną funkcję obronną przeciw drobnoustrojom. Warstwa mucynowa przylega bezpośrednio do nabłonka rogówki i obniża napięcie powierzchniowe, ułatwia przez to przyleganie warstwy wodnistej do hydrofobowej powierzchni nabłonka rogówki i spojówki. Śluz tworzący warstwę mucynową wydzielany jest przez komórki kubkowe spojówki. Choroby narządu łzowego można podzielić na dwie podstawowe grupy:

- choroby spowodowane upośledzeniem wydzielania łez,
- choroby spowodowane utrudnieniem odpływu łez.

Zespół suchego oka, czyli tzw. suche oko, jest obecnie najczęściej występującym zaburzeniem dotyczącym narządu łzowego. Przyczyną zespołu suchego oka może być:

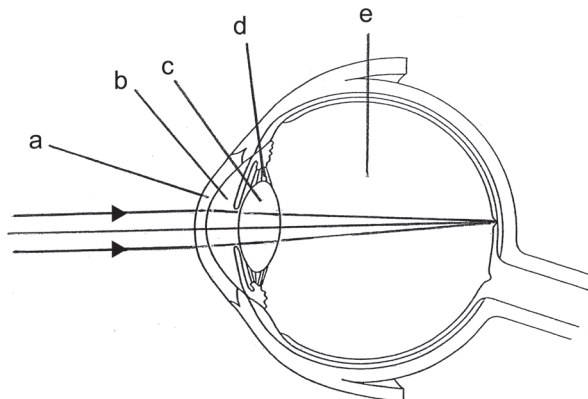
- zmniejszenie wydzielania łez,
- nieprawidłowy ich skład,
- nadmierne ich parowanie.

Podstawą terapii jest stosowanie preparatów substytucyjnych, czyli tzw. sztucznych łez. Upośledzenie odpływu łez jest najczęściej spowodowane niedrożnością dróg łzowych, a głównym objawem niedrożności jest łzawienie. Niedrożność dróg łzowych może być wrodzona lub nabyta. Wrodzona niedrożność występująca u niemowląt może ustąpić po masażu okolicy woreczka łzowego. Większość przypadków nabytej niedrożności wymaga jednak leczenia operacyjnego.

3. Układ optyczny oka

3.1. Moc układu optycznego oka. Miarowość i niemiarowość. Niezborność

Układ optyczny oka składa się z dwóch zasadniczych elementów: rogówki i soczewki. Ich moc i wzajemne odległości są osobniczo zmienne. Przy omawianiu budowy gałki ocznej, przyjmując uśrednione wartości dla promieni krzywizny odpowiednich powierzchni, grubości i współczynników załamania, można obliczyć moc rogówki D_r i soczewki D_s . Różnice wartości podawanych przez poszczególnych autorów wynikają z przyjętych do obliczeń nieco odmiennych wartości promieni krzywizny, grubości i współczynników załamania. Według Gullstranda moc rogówki $D_r = 43,05$ dpt, a moc soczewki $D_s = 19,11$ dpt.



a – rogówka; b – komora przednia; c – soczewka; d – komora tylna; e – ciało szkliste.

Rysunek 3.1. Elementy układu optycznego oka

Całkowitą moc układu optycznego oka określa wzór:

$$D = D_r + D_s - \frac{d}{n_c} D_r D_s \quad (3.1)$$

gdzie: D_r – moc rogówki ($D_r = 43,05$ dpt),

D_s – moc soczewki ($D_s = 19,11$ dpt),

d – odległość między płaszczyzną główną obrazową rogówki a płaszczyzną przedmiotową soczewki ($d = 5,73$ mm),

n_c – współczynnik załamania cieczy wodnistej ($n_c = 1,336$).

Podstawiając odpowiednie wartości, otrzymujemy:

$$D = 43,05 + 19,11 - \frac{0,00573}{1,336} 43,05 \cdot 19,11 = 58,64 \text{ dpt} \quad (3.2)$$

Stąd łatwo określić wartość ogniskowej przedmiotowej f i ogniskowej obrazowej f' oka:

$$f = -\frac{n_p}{D} = -\frac{1}{58,64} \text{ m} = -17,05 \text{ mm}, \quad f' = \frac{n_c}{D} = \frac{1,336}{58,64} \text{ m} = 22,78 \text{ mm} \quad (3.3)$$

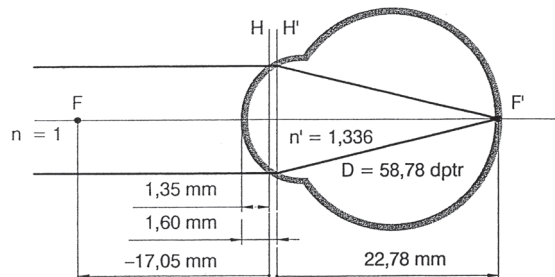
Uwaga: dla cieczy wodnistej i ciała szklistego przyjmujemy taką samą wartość współczynnika załamania $n_c = n_{sz} = 1,336$, a dla powietrza $n_p = 1$.

Podobnie proste obliczenia pozwalają także określić położenia płaszczyzn głównych układu optycznego oka. Wynoszą one:

$h = 1,35$ mm za wierzchołkiem rogówki dla płaszczyzny głównej przedmiotowej,

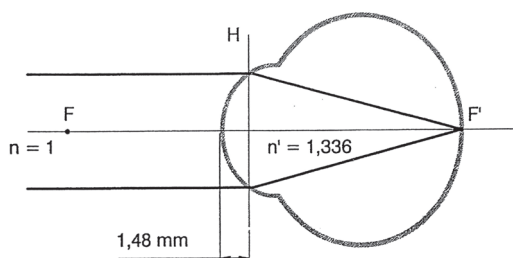
$h' = 1,60$ mm za wierzchołkiem rogówki dla płaszczyzny głównej obrazowej.

Na rysunku 3.2 przedstawiono schematycznie układ optyczny miarowego oka nieakomodującego.



Rysunek 3.2. Schemat układu optycznego oka miarowego

Dokonując dalszego uproszczenia, można zastąpić płaszczyzny główne – przedmiotową i obrazową – pojedynczą płaszczyzną główną równoważną, która znajduje się 1,48 mm za wierzchołkiem rogówki (rys. 3.3). Ten przybliżony sposób przedstawiania na rysunkach układu optycznego oka (z płaszczyzną główną równoważną) będzie stosowany przy omawianiu wad refrakcji oka i przebiegu procedur jej badania.



H – płaszczyzna główna; F' – ognisko obrazowe oka; n – współczynnik załamania dla powietrza; n' – uśredniony współczynnik załamania dla oka.

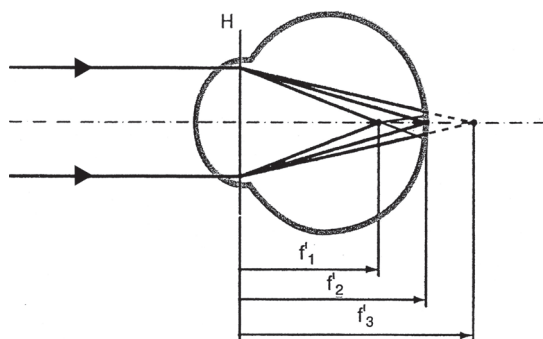
Rysunek 3.3. Uproszczony schemat układu optycznego

Jak każdą soczewkę grubą lub złożony układ optyczny, także układ optyczny oka określają tzw. punkty kardynalne: ogniska, punkty główne i punkty węzłowe. Gdy ośrodki przed i za soczewką mają jednakowy współczynnik załamania światła, punkty węzłowe pokrywają się z punktami głównymi. Oczywiście w oku tak nie jest. Punkty węzłowe w oku znajdują się na osi optycznej w ciele szklistym: punkt węzłowy przedmiotowy W w odległości 7,05 mm od wierzchołka rogówki, a punkt węzłowy obrazowy W' w odległości 7,30 mm od wierzchołka rogówki. Przedstawiony powyżej układ optyczny oka dotyczy oka miarowego.

Miarowość, czyli **normowzroczność (emmetropia)**, polega na tym, że równoległe do osi optycznej promienie świetlne biegnące od odległych przedmiotów (znajdujących się w nieskończoności) zostają w oku nieakomodującym skupione na siatkówce. Innymi słowy – moc układu optycznego oka miarowego odpowiada długości osiowej gałki ocznej.

Wada wzroku, czyli **niemiarowość (ametropia)**, to odstępstwo od miarowości. Moc układu optycznego oka krótkowzrocznego jest zbyt duża w stosunku do długości osiowej gałki ocznej, a w oku nadwzrocznym nieakomodującym zbyt mała w stosunku do tej długości. Zatem w nieakomodującym oku niemiarowym promienie wychodzące z nieskończonej odległości przedmiotów nie skupiają się

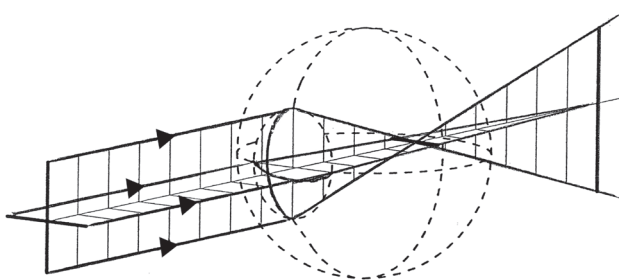
na siatkówce. W oku **krótkowzrocznym (myopia)** skupiają się przed siatkówką, a w oku **nadwzrocznym**, nazywanym także **dalekowzrocznym (hypermetropia)**, za siatkówką (rys. 3.4).



f'_1 – ogniskowa dla oka krótkowzrocznego; f'_2 – ogniskowa dla oka miarowego; f'_3 – ogniskowa dla oka nadwzrocznego; H – płaszczyzna główna równoważna.

Rysunek 3.4. Schematyczne przedstawienie położenia ognisk obrazowych oka krótkowzrocznego, miarowego i nadwzrocznego

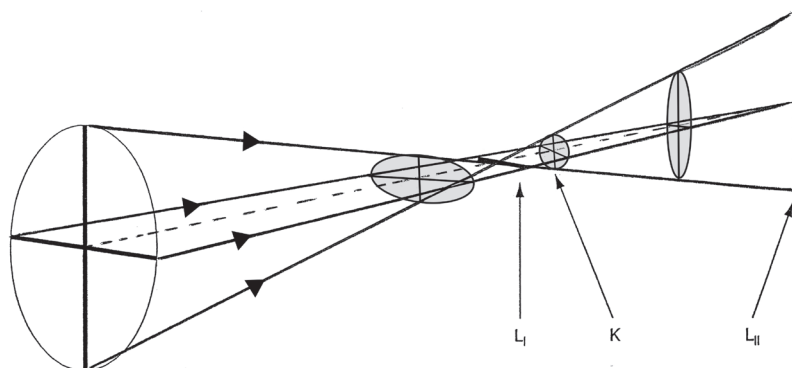
Istota **astygmatyzmu**, czyli **niezborności**, polega na tym, że dla różnych południków gałki ocznej skupienie promieni światła następuje w różnej odległości od siatkówki (rys. 3.5).



Rysunek 3.5. Bieg promieni w oku astygmatycznym

Astygmatyzm jest najczęściej spowodowany niesferycznym kształtem centralnego obszaru rogówki. Na ogół mamy do czynienia z astygmatyzmem regularnym, w którym można wyróżnić dwa główne południki (przekroje główne),

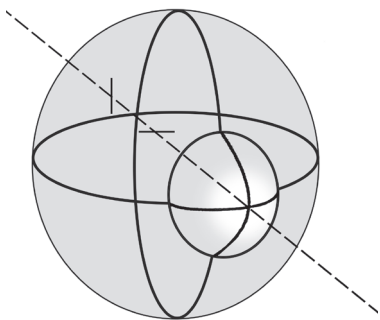
położone prostopadłe względem siebie. W tych przekrojach głównych rogówka ma odpowiednio najkrótszy i najdłuższy promień krzywizny. Południki główne wyznaczają wzajemnie prostopadłe osie astygmatyzmu, a każda z osi ma ognisko położone w innej odległości, czyli ma inną ogniskową (rys. 3.6). Położenie przekrojów głównych oka astygmatycznego określa się według podziałki TABO.



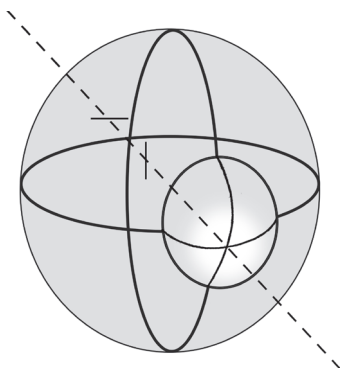
Rysunek 3.6. Bieg promieni w oku astygmatycznym. Wiązka światła w przekroju prostopadłym do osi optycznej oka przyjmuje kształt elipsy, za wyjątkiem linii ogniskowych L_I i L_{II} oraz koła najmniejszego rozmycia (rozproszenia) K . Przekrój główny największej mocy – pionowy, a najmniejszej mocy – poziomy

Ze względu na położenie przekrojów głównych rozróżnia się (rys. 3.7–3.9):

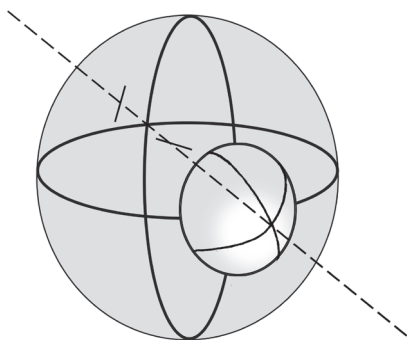
1. Astygmatyzm prosty (zgodny z regułą), gdy przekrój główny największej mocy jest pionowy ($90^\circ \pm 15^\circ$), przednia linia ogniskowa L_I jest pozioma, tylna L_{II} pionowa.
2. Astygmatyzm odwrotny (przeciwny regule), gdy przekrój główny największej mocy jest poziomy ($0^\circ \pm 15^\circ$), przednia linia ogniskowa L_I jest pionowa, a tylna L_{II} pozioma.
3. Astygmatyzm skośny, gdy przekroje główne są nachylone względem poziomu i pionu ($15\text{--}75^\circ$ lub $105\text{--}165^\circ$).



Rysunek 3.7. Astygmatyzm prosty (zgodny z regułą). Przekrój największej mocy – pionowy ($90^\circ \pm 15^\circ$)



Rysunek 3.8. Astygmatyzm odwrotny (przeciwny regule). Przekrój główny największej mocy – poziomy ($0^\circ \pm 15^\circ$)

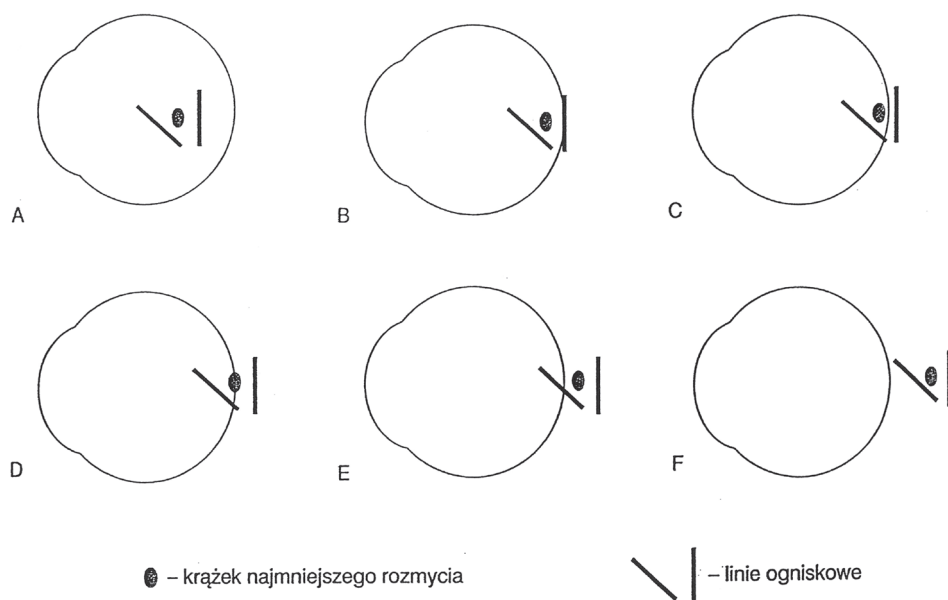


Rysunek 3.9. Astygmatyzm skośny

Ze względu na położenie ognisk w przekrojach głównych rozróżnia się (rys. 3.10):

1. Astygmatyzm krótkowzroczny złożony, gdy obydwa ogniska leżą przed siatkówką (w obu przekrojach głównych oko jest krótkowzroczne).
2. Astygmatyzm krótkowzroczny zwykły, gdy jedno z ognisk leży na siatkówce, a drugie przed siatkówką (w jednym przekroju głównym oko jest miarowe, a w drugim krótkowzroczne).
3. Astygmatyzm mieszany, gdy jedno z ognisk leży przed siatkówką, a drugie za nią (w jednym przekroju głównym oko jest krótkowzroczne, a w drugim nadwzroczne).
4. Astygmatyzm nadwzroczny zwykły, gdy jedno oko leży na siatkówce, a drugie za siatkówką (w jednym przekroju głównym oko jest miarowe, a w drugim nadwzroczne).
5. Astygmatyzm nadwzroczny złożony, gdy obydwa ogniska leżą za siatkówką (w obu przekrojach głównych oko jest nadwzroczne).

Miarą astygmatyzmu oka jest różnica A mocy układu optycznego oka w obu przekrojach głównych.



Astygmatyzm: A – krótkowzroczny złożony; B – krótkowzroczny zwykły; C – mieszany; D – mieszany symetryczny; E – nadwzroczny zwykły; F – nadwzroczny złożony.

Rysunek 3.10. Astygmatyzm zgodny z regułą. Położenie linii ogniskowych i krążka najmniejszego rozproszenia

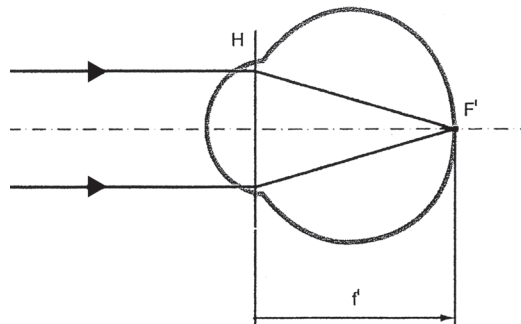
Jak już wspomniano, astygmatyzm oka jest najczęściej spowodowany niesferycznym kształtem centralnego obszaru rogówki. Mówi się wtedy o astygmatyzmie rogówkowym A_r . Rzadko przy sferycznym kształcie rogówki przyczyną astygmatyzmu może być nieosiowe ustawienie soczewki lub jej deformacja. Wtedy występuje astygmatyzm wewnętrzny. Według Javala pomiędzy astygmatyzmem całkowitym A_c a rogówkowym A_r zachodzi empirycznie ustalony związek (nazywany regułą Javala):

$$A_c = 1,25A_r + P \quad (3.4)$$

gdzie: $P = +0,50$ dpt dla astygmatyzmu prostego,
 $P = -0,50$ dpt dla astygmatyzmu odwrotnego,
 $P = 0$ dla astygmatyzmu skośnego.

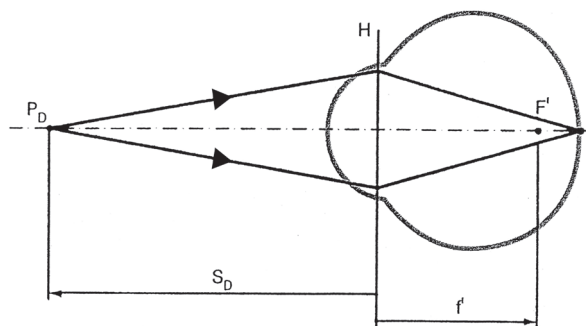
3.2. Punkt daleki

Dla charakterystyki niemiarkowości wprowadzono pojęcie punktu dalekiego. Punkt daleki (P_D) to punkt osi optycznej (osi widzenia) oka, którego ostry obraz powstaje na siatkówce, gdy oko nie akomoduje, a więc moc układu optycznego oka jest najmniejsza. Dla oka miarowego punkt daleki leży w nieskończoności (rys. 3.11), dla oka krótkowzrocznego w skończonej odległości przed okiem (rys. 3.12), a dla oka nadwzrocznego w skończonej odległości za okiem (rys. 3.13).



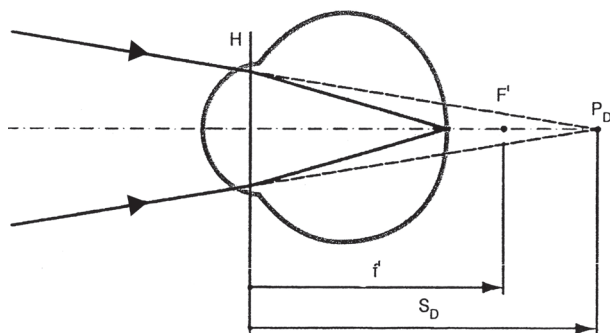
Rysunek 3.11. Oko miarowe. Punkt daleki P_D znajduje się w nieskończoności, a ognisko F' na siatkówce

Oko krótkowzroczne, nie akomodując, skupia na siatkówce wiązkę promieni rozbieżnych wychodzących z punktu dalekiego P_D , a akomodując wiązki promieni bardziej rozbieżne, wychodzące z punktów położonych bliżej. Obrazy punktów położonych w odległości s większej niż punkt daleki są nieostre, gdyż wiązki promieni z nich wychodzące zostają skupione przed siatkówką, w odległości tym większej, im $|s| > |s_D|$.



Rysunek 3.12. Oko krótkowzroczne. P_D znajduje się w odległości s_D przed okiem, a ognisko F' przed siatkówką

Oko nadwzroczne, nie akomodując, ma moc zbyt małą, aby skupić na siatkówce wiązkę promieni równoległych (biegnących z nieskończoności), a tym bardziej wiązkę promieni rozbieżnych. Nie akomodując, jest w stanie skupić na siatkówce wiązkę promieni zbieżnych w kierunku punktu dalekiego P_D , leżącego w dodatniej odległości za okiem.



Rysunek 3.13. Oko nadwzroczne (nieakomodujące). P_D jest punktem pozornym, powstałym w odległości s_D za okiem na przecięciu linii stanowiących przedłużenie promieni skupiających na siatkówce. Ognisko F' leży także za siatkówką

Natomiast akomodując, tzn. zwiększając moc swego układu optycznego, jest w stanie ostro odwzorować na siatkówce przedmioty znajdujące się w nieskończoności, a nawet w skończonej (ujemnej) odległości przed okiem, jeżeli jego możliwości akomodacyjne są wystarczające (jeżeli amplituda akomodacji jest większa od refrakcji). Tłumaczy to fakt, że większość osób z niewielką nadwzrocznością widzi ostro zarówno w dali, jak i w odległościach bliższych. Jeżeli amplituda akomodacji jest równa refrakcji oka nadwzrocznego, oko jest w stanie odwzorować ostro na siatkówce przedmioty znajdujące się w nieskończoności, lecz nie jest w stanie odwzorować przedmiotów znajdujących się bliżej – w skończonej odległości przed okiem. Jeżeli amplituda akomodacji jest mniejsza od refrakcji oka nadwzrocznego, oko, akomodując, jest w stanie skupić na siatkówce wiązki promieni zbieżnych do punktów znajdujących się w odległościach większych niż punkt daleki (a więc o mniejszej zbieżności), lecz nie jest w stanie skupić wiązek promieni równoległych i ostro odwzorować na siatkówce przedmiotów znajdujących się w nieskończoności ani tym bardziej znajdujących się w skończonej odległości przed okiem. W takim przypadku osoba nadwzroczna bez korekcji nie widzi ostro ani w dali, ani w bliży.

3.3. Refrakcja oka

Miarą wady wzroku (ametropii) jest refrakcja R zdefiniowana jako odwrotność odległości s_D punktu dalekiego od oka:

$$R = \frac{1}{s_D} \quad (3.5)$$

Uwzględniając przyjętą w optyce regułę znaków orzekającą, że odległości mierzone zgodnie z kierunkiem padającego światła są dodatnie, a mierzone w kierunku przeciwnym – ujemne, otrzymujemy:

- dla oka miarowego $s_D = \infty$, $R = 0$,
- dla oka krótkowzrocznego $s_D < 0$, $R < 0$,
- dla oka nadwzrocznego $s_D > 0$, $R > 0$.

Przykład 20

Jeżeli punkt daleki oka krótkowzrocznego znajduje się w odległości 40 cm przed okiem, czyli $s_D = -40 \text{ cm} = -0,4 \text{ m}$, to refrakcja wynosi $R = -2,5 \text{ dpt}$.

Przykład 21

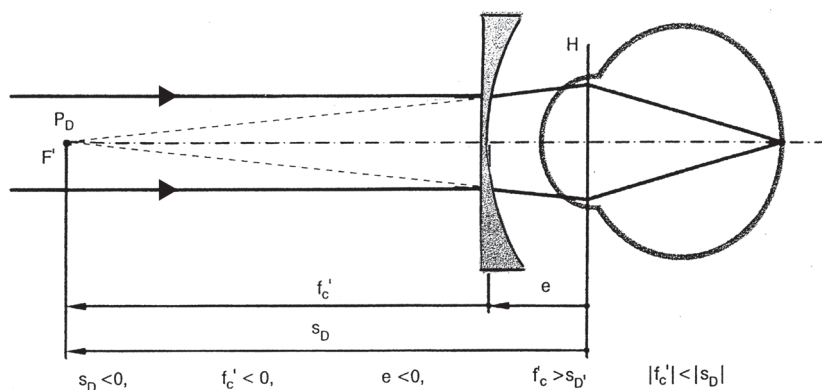
Jeśli punkt daleki oka nadwzrocznego znajduje się w odległości 25 cm za okiem, czyli $s_D = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$, to refrakcja wynosi $R = 4,0 \text{ dpt}$.

Przykład 22

Jeżeli refrakcja oka wynosi $R = -8,0 \text{ dpt}$, to $s_D = -0,125 \text{ m} = -12,5 \text{ cm}$, czyli punkt daleki znajduje się w odległości 12,5 cm przed okiem i oko to jest krótkowzroczne.

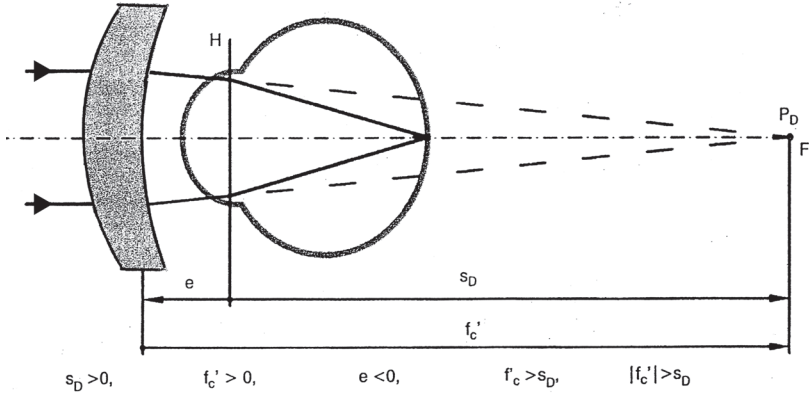
3.4. Zasada optycznej korekcji wad wzroku

Prawidłowe działanie soczewki korygującej polega na tym, że wraz z układem optycznym niemięrowego oka tworzy ona na siatkówce ostry obraz przedmiotu znajdującego się w nieskończoności. Aby tak było, ognisko obrazowe F' soczewki powinno znajdować się w punkcie dalekim P_D oka (rys. 3.14 i 3.15).



P_D – punkt daleki oka; F' – ognisko obrazowe soczewki korygującej; s_D – odległość punktu dalekiego; f'_c – ogniskowa czołowa soczewki korygującej; e – odległość soczewki od płaszczyzny głównej H układu optycznego oka.

Rysunek 3.14. Korekcja krótkowzroczności



P_D – punkt daleki oka; F' – ognisko obrazowe soczewki korygującej; s_D – odległość punktu dalekiego; f_c' – ogniskowa czołowa soczewki korygującej; e – odległość soczewki od płaszczyzny głównej H układu optycznego oka.

Rysunek 3.15. Korekcja nadwzroczności

Z rysunków 3.14 i 3.15 wynika, że ogniskowa czołowa (mierzona od wierzchołka tylnego soczewki) spełnia zależność:

$$f_c' = s_D - e \quad (3.6)$$

Moc czołowa soczewki korygującej wynosi zatem:

$$D_c = \frac{1}{f_c'} = \frac{1}{s_D - e} = \frac{\frac{1}{s_D}}{\frac{s_D - e}{s_D}} = \frac{\frac{1}{s_D}}{1 - e \frac{1}{s_D}} \quad (3.7)$$

Uwzględniając, że $\frac{1}{s_D} = R$, otrzymujemy ostatecznie:

$$D_c = \frac{R}{1 - eR} \quad (3.8)$$

Powyższy wzór stanowi ważną zależność pomiędzy mocą soczewki korygującej a refrakcją oka. Zachodzą następujące nierówności:

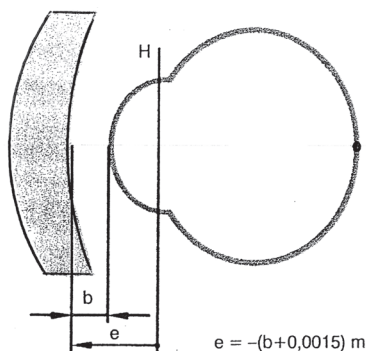
$$\begin{aligned} D_c < R \text{ oraz } |D_c| > |R| & \text{ – dla oka krótkowzrocznego,} \\ D_c < R \text{ oraz } |D_c| < |R| & \text{ – dla oka nadwzrocznego.} \end{aligned}$$

Tak więc dla oka krótkowzrocznego minusowa soczewka korygująca powinna być tym słabsza, im bliżej oka będzie się ona znajdować. Natomiast dla oka

nadwzrocznego plusowa soczewka korygująca powinna być tym silniejsza, im bliżej oka będzie się znajdować. Innymi słowy – wartość algebraiczna soczewki korygującej jest tym większa, im bliżej oka się znajduje. Przekształcając wzór (3.8), otrzymujemy:

$$R = \frac{D_c}{1 + eD_c} \quad (3.9)$$

Jeżeli jest znana moc D_c soczewki okularowej, korygującej prawidłowo niemierność, to można wyznaczyć refrakcję R oka, przy czym $e = -(b + 0,0015)$ m, gdzie b oznacza odległość pomiędzy tylnym wierzchołkiem soczewki korygującej a wierzchołkiem rogówki (rys. 3.16). Odległość b w praktyce optyki okularowej jest także oznaczana symbolem VD (*vertex distance*).



Rysunek 3.16. Odległość wierzchołkowa e soczewki korygującej przed okiem

Przykład 23

Przy odległości od oka $b_1 = 23$ mm moc soczewki korygującej wynosi $D_1 = +8,00$ dpt. Ile powinna wynosić moc soczewki okularowej dla tego oka, jeżeli będzie się znajdować w odległości $b_2 = 11$ mm przed okiem?

Odpowiedź

Jeżeli przy odległości $b_1 = 23$ mm ($e_1 = -0,0245$ m) moc soczewki korygującej wynosi $D_1 = +8,00$ dpt, to refrakcja oka ma wartość:

$$R = \frac{D_1}{1 + e_1 D_1} = \frac{8,00}{1 - 0,0245 \cdot 8,00} = 9,95 \approx +10,00 \text{ dpt.}$$

Znając refrakcję oka, można obliczyć moc soczewki D_2 dla odległości $b_2 = 11$ mm, czyli $e_2 = -0,0125$ m.

$$D_2 = \frac{R}{1 - e_2 R} = \frac{10}{1 + 0,0125 \cdot 10} = 8,89 \approx +9,00 \text{ dpt.}$$

Z powyższego przykładu wynika ważny praktyczny wniosek:

W przypadku znacznych wad wzroku ($|R| > 5,00$ dpt) recepta okularowa oprócz wartości mocy D_c soczewki korekcyjnej powinna zawierać odległość b (VD), przy której określono moc D_c . Tylko wtedy optyk wykonujący okulary będzie mógł wprowadzić odpowiednią poprawkę, wynikającą z innej odległości b soczewki umieszczonej w oprawie okularowej. Jeżeli moc soczewki korygującej dla odległości e_1 wynosi D_1 , to dla odległości e_2 moc soczewki korygującej D_2 określa wzór:

$$D_2 = \frac{D_1}{1 + (e_1 - e_2) D_1} \quad (3.10)$$

3.5. Korekcja astygmatyzmu

Astygmatyzm oka koryguje się soczewkami torycznymi (sfero-cylindrycznymi), których konstrukcja, jak już wiadomo (rozdz. 1.13), może być różna. Jeżeli refrakcja oka astygmatycznego w przekrojach głównych wynosi R_I i R_{II} , to moc torycznej soczewki korygującej powinna w tych przekrojach wynosić odpowiednio:

$$D_I = \frac{R_I}{1 - e R_I}, \quad D_{II} = \frac{R_{II}}{1 - e R_{II}} \quad (3.11)$$

Poprawki dla mocy soczewek okularowych w odpowiednich przekrojach głównych, przy odstępstwie od odległości e zapisanej na recepcie, wyznacza się według zasad przyjętych dla soczewek sferycznych.

Przykład 24

Wysoka krótkowzroczność skojarzona z astygmatyzmem:

$$\begin{array}{ll} -12,00 & R_I = -12,00 \text{ dpt,} \\ +10,00 & R_{II} = -10,00 \text{ dpt.} \end{array}$$

Jeżeli nie uwzględnimy odległości soczewki korekcyjnej od oka, otrzymamy korekcję:

$$-10,00/-2,00 \times 180.$$

Jeżeli jednak tę odległość uwzględnić, na przykład $e = -15 \text{ mm} = -0,015 \text{ m}$, to wtedy:

$$D_I = \frac{R_I}{1 - eR_I} = \frac{-12,00}{1 - (-0,015)(-12,00)} = \frac{-12,00}{1 - 0,18} = \frac{-12,00}{0,82} = -14,60 \text{ dpt},$$

$$D_{II} = \frac{R_{II}}{1 - eR_{II}} = \frac{-10,00}{1 - (-0,015)(-10,00)} = \frac{-10,00}{1 - 0,15} = \frac{-10,00}{0,85} = -11,80 \text{ dpt}.$$

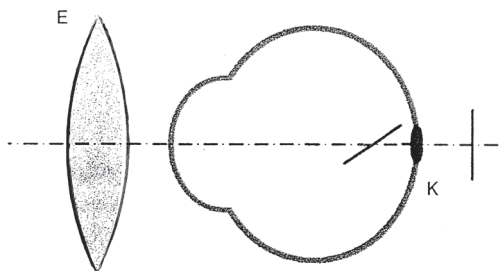
Przyjmując zatem przybliżenia $D_I = -14,50 \text{ dpt}$ i $D_{II} = -11,75 \text{ dpt}$, należy dla podanej odległości 15 mm zastosować soczewkę korekcyjną:

$$-11,75/-2,75 \times 180.$$

3.6. Ekwiwalent sferyczny soczewki korekcyjnej

Średnia arytmetyczna mocy D_I i D_{II} , które korygują astygmatyzm oka w jego przekrojach głównych, nazywana jest ekwiwalentem sferycznym E :

$$E = \frac{D_I + D_{II}}{2} \quad (3.12)$$



K – koło najmniejszego rozmycia; E – soczewka o mocy równej ekwiwalentowi sferycznemu.

Rysunek 3.17. Korekcja soczewką o mocy równej ekwiwalentowi sferycznemu

Ustawienie przed okiem astygmatycznym soczewki sferycznej o mocy równej ekwiwalentowi sferycznemu powoduje, że koło najmniejszego rozmycia znajduje się na siatkówce (rys. 3.17).

Przykład 25

Dla soczewki korygującej astygmatyzm mieszany $+3,00/-5,00 \times 180$ ($-2,00/+5,00 \times 90$) ekwiwalent sferyczny wynosi $E = +0,50$ dpt, gdyż:

$$D_I = -2,00 \text{ dpt}, \quad D_{II} = +3,00 \text{ dpt}, \quad E = \frac{D_I + D_{II}}{2} = +0,50 \text{ dpt}.$$

Przykład 26

Dla soczewki korygującej astygmatyzm nadwzroczny $+2,00/-1,00 \times 180$ ($+1,00/+1,00 \times 90$) otrzymuje się:

$$D_I = +1,00 \text{ dpt}, \quad D_{II} = +2,00 \text{ dpt}, \quad E = +1,5 \text{ dpt}.$$

Przykład 27

Dla soczewki korygującej astygmatyzm krótkowzroczny $-1,00/-2,00 \times 30$ ($-3,00/+2,00 \times 120$) otrzymujemy:

$$D_I = -3,00 \text{ dpt}, \quad D_{II} = -1,00 \text{ dpt}, \quad E = -2,00 \text{ dpt}.$$

Łatwo zauważyć, że ekwiwalent sferyczny E soczewki sfero-cylindrycznej można określić według wzoru:

$$E = D_s + \frac{1}{2}D_c \quad (3.13)$$

gdzie: D_s – moc sfery,
 D_c – moc cylindra.

3.7. Oko akomodujące

Akomodacja oka oznacza zdolność soczewki ocznej do zmiany mocy. W wyniku akomodacji przedmioty, które znajdują się w różnej odległości od oka, mogą zostać wyraźnie zobrazowane na siatkówce. Przez oko nieakomodujące określa się stan, w którym soczewka przyjmuje najmniejszą z możliwych mocy. Oznacza to, że ostry obraz punktu dalekiego zostanie utworzony na siatkówce. Jeśli soczewka osiąga największą moc, to mówi się o oku maksymalnie akomodującym.

Punkt bliski (P_B) to taki punkt osi optycznej (osi widzenia) oka, którego ostry obraz powstaje na siatkówce przy maksymalnej akomodacji oka.

Możliwości akomodacyjne oka określa amplituda akomodacji A_A :

$$A_A = \frac{1}{s_D} - \frac{1}{s_B} \quad (3.14)$$

gdzie: s_B – odległość punktu bliskiego od oka,

s_D – odległość punktu dalekiego od oka.

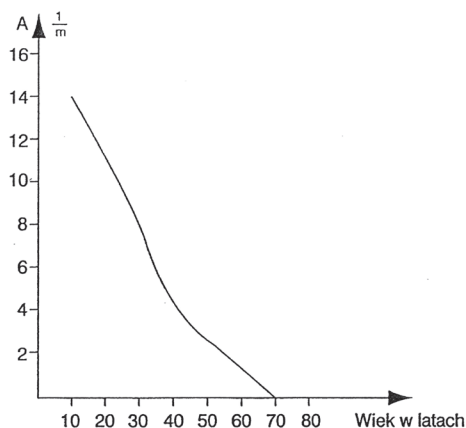
Ponieważ $\frac{1}{s_D} = R$, więc:

$$A_A = R - \frac{1}{s_B} \quad (3.15)$$

Dzięki akomodacji na siatkówce mogą tworzyć się obrazy punktów leżących w innych odległościach niż punkt daleki. Przy maksymalnej akomodacji na siatkówce powstaje obraz punktu bliskiego. Amplituda akomodacji maleje wraz z wiekiem. Przebieg tej zależności jest osobniczo zmienny, a zależność uśrednioną przedstawiono na rysunku 3.18.

Dla oka miarowego ($R = 0$) punkt bliski znajduje się przed okiem (punkt daleki w nieskończoności). Dla oka krótkowzrocznego ($R < 0$) punkt bliski znajduje się przed okiem i leży bliżej oka niż punkt daleki. Natomiast dla oka nadwzrocznego ($R > 0$) istnieją trzy możliwości:

- jeżeli $A_A > R$, to punkt bliski leży przed okiem ($s_B < 0$),
- jeżeli $A_A = R$, to punkt bliski leży w nieskończoności ($s_B = \infty$),
- jeżeli $A_A < R$, to punkt bliski leży za okiem, ale w odległości od oka większej niż punkt daleki ($s_B > 0$, $s_D > 0$, $s_B > s_D$).



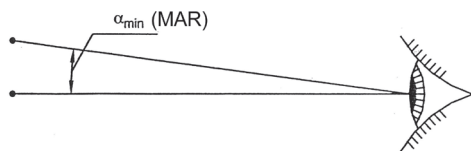
Rysunek 3.18. Zależność akomodacji od wieku

Prezbiopia (starczowzroczność) polega na zmniejszeniu amplitudy akomodacji w stopniu uniemożliwiającym obserwację blisko położonych przedmiotów bez odczuwanego dyskomfortu. Jest ona następstwem fizjologicznego procesu stopniowej utraty zdolności akomodacyjnych oka, spowodowanej twardnieniem i zmniejszeniem elastyczności soczewki. Dotyczy większości osób po 45. roku życia. Według Grosvenora prezbiopia zaczyna się, gdy amplituda akomodacji zmaleje do wartości $A_A = 5$ dpt. Wtedy odległość punktu bliskiego od oka miarowego lub skorygowanego wynosi $s_B = -0,20$ m = -20 cm. Natomiast według Goerscha prezbiopia zaczyna się, gdy $A_A = 4$ dpt i wtedy odległość punktu bliskiego od oka miarowego lub skorygowanego wynosi $s_B = -0,25$ m = -25 cm.

3.8. Ostrość wzroku

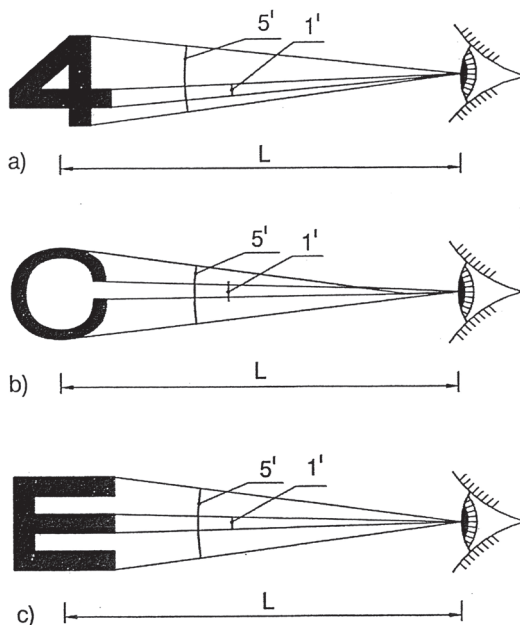
Podstawowym badaniem funkcji oka jest badanie ostrości wzroku. To ważne kryterium sprawności oka wiąże się z jego zdolnością rozdzielczą. Zdolność rozdzielcza układu optycznego oka i zdolność rozdzielcza siatkówki mają zbliżoną wartość określoną przez najmniejszy kąt $\alpha_{\min}$, przy którym dwa punkty są widziane jako oddzielne (rys. 3.19). Jako miarę ostrości wzroku V (visus) przyjmuje się odwrotność kąta $\alpha_{\min}$ wyrażonego w minutach kątowych:

$$V = \frac{1}{\alpha_{\min}} \quad (3.16)$$



Rysunek 3.19. Kąt zdolności rozdzielczej zwany kątem ostrości wzrokowej to najmniejsza odległość kątowa dwóch punktów, przy której te dwa punkty widać jeszcze oddzielnie

W warunkach prawidłowych kąt zdolności rozdzielczej wynosi przeciętnie $1' \left(1' = \frac{1}{60}^\circ \right)$, a więc $V = 1,0$. Wartość tę przyjęto jako normę. Na tej podstawie opracowano optotypy, czyli znaki testowe (cyfry, litery i inne znaki lub figury), aby każdy z ich elementów był widziany pod kątem $1'$, a cały znak pod kątem $5'$ z odległości L przewidzianej do jego rozpoznania (rys. 3.20). W języku angielskim kąt zdolności rozdzielczej nazywany jest *minimum angle of resolution* i oznaczany skrótem MAR, a więc $\alpha_{\min} = \text{MAR}$ i $V = \frac{1}{\text{MAR}}$.



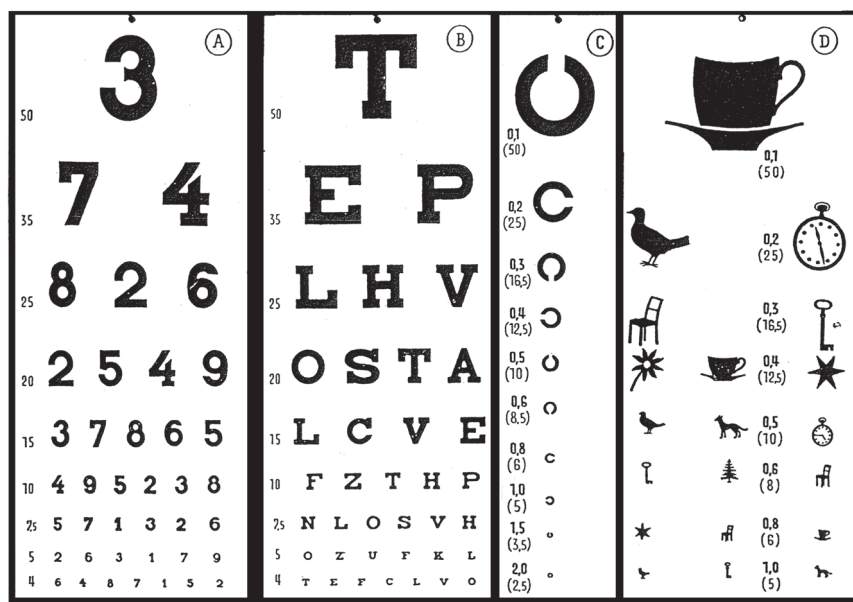
Rysunek 3.20. Zasada opracowania testów do badania ostrości wzroku: a) optotyp w postaci cyfry; b) pierścień Landolta; c) hak Snellena

W praktyce ostrość wzroku V określa się jako stosunek odległości ℓ , z której optotyp jest rozpoznawany (tj. odległości, z której wykonuje się badanie) do odległości L , z której poszczególne elementy tego optotypu są postrzegane pod kątem $1'$, a cały optotyp ma wymiar kątowy $5'$, czyli:

$$V = \frac{\ell}{L} \quad (3.17)$$

Ostrość wzroku może być przedstawiana zarówno w postaci ułamka właściwego, jak i ułamka dziesiętnego. Jako standardową odległość badania ostrości wzroku do dali i badania refrakcji przyjmuje się 5 lub 6 m, a w krajach anglosaskich 20 stóp. Stąd możliwe są różne zapisy, na przykład dla $V = 1,0$:

$\frac{5}{5}$; $\frac{6}{6}$; $\frac{20}{20}$.



Rysunek 3.21. Tablice do badania ostrości wzroku

Przykład 28

Jeżeli badany z odległości 5 m rozpoznaje jedynie największy optotyp (widziany pod kątem $5'$ z odległości 50 m), to:

$$V = \frac{5}{50} = 0,1.$$

Jeżeli badany z odległości 5 m rozpoznaje optotypy w drugim rzędzie (widziane pod kątem 5' z odległości 25 m), to:

$$V = \frac{5}{25} = 0,2.$$

Jeżeli badany z odległości 5 m rozpoznaje optotypy ostatniego rzędu (widziane pod kątem 5' z odległości 5 m), to:

$$V = \frac{5}{5} = 1,0.$$

W praktyce klinicznej za normalną ostrość wzroku przyjmuje się wartość $V = 1,0$. U wielu osób ostrość wzroku bywa jednak wyższa, dlatego niektóre tablice zawierają również optotypy, które mają wymiar kątowy 5' z odległości mniejszej niż 5 m. Zwykle takie rozszerzone tablice zawierają dodatkowe dwa rzędy optotypów, które odpowiadają ostrości wzroku $V = 1,5$ i $V = 2,0$. Jeżeli badany nie rozpoznaje największego optotypu z odległości 5 m, to badanie należy przeprowadzić z krótszej odległości. Jeżeli badany nadal nie rozpoznaje największego optotypu, wtedy sprawdza się zdolność dostrzegania ruchu ręki przed okiem i bada poczucie światła rzutowanego z różnych kierunków. $V = 0$ oznacza brak poczucia światła. Jeżeli badanie ostrości wzroku jest prowadzone z odległości a innej niż odległość b , dla której zaprojektowano tablicę, to rzeczywistą ostrość wzroku można określić z zależności:

$$V = \frac{a}{b} V_a \quad (3.18)$$

gdzie: a – odległość badania,

b – odległość, dla której zaprojektowano stosowaną tablicę,

V – rzeczywista ostrość wzroku,

V_a – ostrość wzroku stwierdzona przy odległości badania a .

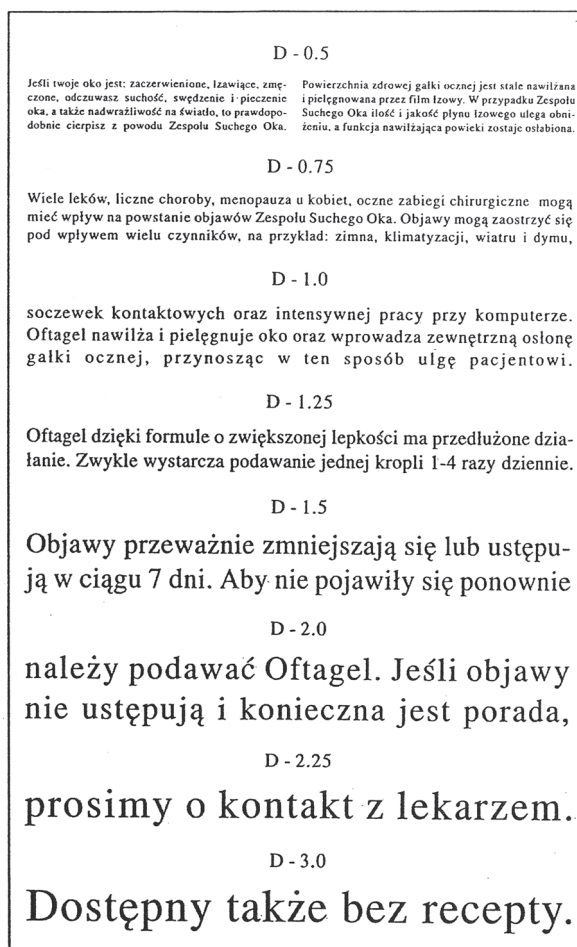
Przykład 29

Badając z odległości $a = 4$ m tablicą skonstruowaną dla $b = 6$ m, stwierdzono ostrość wzroku $V_a = 0,7$. Rzeczywista ostrość wzroku wynosi

$$V = \frac{4}{6} 0,7 = 0,67 \cdot 0,7 = 0,47 \approx 0,5.$$

Obecnie stosuje się różne sposoby prezentacji testów do badania ostrości wzroku:

- tablice kartonowe, białe matowe z nadrukowanymi czarnymi, matowymi znakami,
- tablice z podświetlanymi znakami,
- projektory rzutujące optotypy i inne testy na odpowiedni ekran,
- monitory ekranowe.



Rysunek 3.22. Tablica Snellena do blizy

Badanie ostrości wzroku z bliska przeprowadza się najczęściej za pomocą tzw. zredukowanych tablic Snellena z tekstem, który jest wydrukowany literami

o wzrastającej wielkości (rys. 3.22). Wielkość liter jest dobrana odpowiednio do określonej odległości D (od 0,5 do 3 m). Zasada doboru ich wielkości jest podobna jak w przypadku tablic do dali.

Poza ewentualnymi zmianami chorobowymi w zakresie układu wzrokowego wpływ na wynik badania ostrości wzroku zarówno oka nieskorygowanego, jak i skorygowanego ma wiele czynników. Najistotniejsze z nich to:

- kształt i kontrast optotypów,
- warunki oświetlenia optotypów i otoczenia,
- zdolność koncentracji badanego.

W ostatnich latach rozpowszechniony został inny sposób przedstawiania ostrości wzroku, który polega na podawaniu wartości logarytmu dziesiętnego z kąta zdolności rozdzielczej, czyli logMAR. Zgodnie ze skalą logMAR są ułożone tablice zaproponowane przez Bailey'a i Leviego zwane tablicami ETDRS (rys. 3.23).



Rysunek 3.23. Tablica ETDRS

Na podstawie wartości logMAR wprowadzono także procentowy wskaźnik ostrości wzroku VAR (*visual acuity rating*) określony zależnością:

$$\text{VAR} = 100 - 50 \cdot \log \text{MAR} \quad (3.19)$$

Przykład 30

Jeżeli $V = 0,1$, to $MAR = 10'$, $\log MAR = 1$, $VAR = 50\%$.

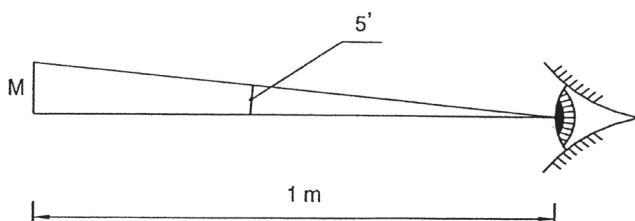
Jeżeli $V = 0,5$, to $MAR = 2'$, $\log MAR = 0,3$, $VAR = 85\%$.

Jeżeli $V = 1,0$, to $MAR = 1'$, $\log MAR = 0$, $VAR = 100\%$.

Jeżeli $V = 2,0$, to $MAR = 0,5'$, $\log MAR = -0,3$, $VAR = 115\%$.

Jak widać, $VAR \neq V \cdot 100\%$.

Dla określenia ostrości wzroku V stosuje się niekiedy tzw. **system M**. Jego istota polega na wprowadzeniu specyficznej jednostki wielkości optotypu.



Rysunek 3.24. Jednostka M

Taką jednostką M jest wysokość liniowa optotypu, który z odległości 1 m ma wymiar kątowy $5'$. Zatem jednostkowa wysokość optotypu w systemie M wynosi:

$$M = 1 \text{ m} \cdot \operatorname{tg} 5' = 1 \text{ m} \cdot 0,00145 = 1,45 \text{ mm} \quad (3.20)$$

Badany, który z odległości 5 m rozpoznaje optotypy o wielkości 5 M, ma ostrość wzroku $V = 1$. W systemie M ostrość wzroku określa się według wzoru:

$$V = \frac{\ell}{d} \quad (3.21)$$

gdzie: ℓ – odległość obserwacji w metrach,

d – wielkość rozpoznanych optotypów w jednostkach M.

Przykład 31

Jeżeli badany rozpoznaje z odległości 1 m optotypy o wielkości 5 M, to jego ostrość wzroku wynosi: $V = \frac{1}{5} = 0,2$.

Stosowanie systemu M jest szczególnie przydatne przy projektowaniu tablic optotypów do badania ostrości wzroku, a także przy określaniu odpowiedniego powiększenia kąтового pomocy optycznych dla słabowidzących.

Zwykle podczas badania ostrości wzroku, a więc także badania refrakcji, stosowane są optotypy o dużym kontraście: na białym tle – czarne cyfry lub litery. Kontrast K między optotypem a jego tłem określa wzór:

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (3.22)$$

gdzie: $L_{\max}$ – luminancja tła,
 $L_{\min}$ – luminancja optotypu.

Kontrast K może być także wyrażany w procentach:

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} 100\% \quad (3.23)$$



Rysunek 3.25. Test Pelli-Robson

Dla tablic z optotypami wydrukowanymi czarną matową farbą na białym papierze kontrast zbliżony jest do 100%. Jednak w życiu codziennym większość przedmiotów jest obserwowana przy mniejszym kontraście, stąd potrzeba stosowania także testów badających wrażliwość na kontrast. W kolumnowych testach badających wrażliwość na kontrast przedstawia się wydrukowane bodźce w postaci siatek o różnym kontraście i częstotliwości przestrzennej. Podobne testy mogą być generowane elektronicznie na ekranach. W praktyce okulistycznej czy optometrycznej zwykle stosowane są testy zawierające optotypy literowe prezentowane przy różnym kontraście. Przykładem jest test Pelli-Robson w postaci tablicy, na której wszystkie litery są tej samej wielkości, a kontrast zmniejsza się od góry do dołu.

4. Podmiotowe (subiektywne) badanie refrakcji

Określenie refrakcji metodą podmiotową, czyli subiektywną, polega na tym, że badany obserwuje z określonej (zwykle 5 lub 6 m) odległości optotypy o różnej wielkości, a badający ustawia bezpośrednio przed badanym okiem taką kombinację próbných soczewek sferycznych i cylindrycznych, która utworzy ostry obraz na siatkówce przy rozluźnionej akomodacji. W badaniu tym pacjent bierze aktywny udział, jest więc podmiotem, obserwuje optotypy i udziela informacji, jak je widzi (stąd subiektywność badania). Dobry kontakt między badanym a badającym to niezbędny warunek osiągnięcia celu, jakim jest określenie odpowiedniej kombinacji sfero-cylindrycznej, która zapewni najlepszą ostrość wzroku (przy rozluźnionej akomodacji). Badanie refrakcji prowadzi się oddzielnie dla każdego oka, lecz na koniec należy sprawdzić widzenie obuoczne. Sposób dobierania soczewek korygujących zależy od zastosowanej metody (procedury), a więc także wyposażenia, jakim dysponuje badający. Takim podstawowym wyposażeniem jest kasetka soczewek próbných, choć coraz częściej stosowany jest również foropter.

4.1. Ekwiwalent sferyczny

W każdym sposobie badania refrakcji pierwszym etapem jest określenie najlepszej korekcji sferycznej, czyli ekwiwalentu sferycznego. Określenie ekwiwalentu sferycznego można przeprowadzić metodą Dondersa lub za pomocą testu czerwono-zielonego.

Metoda Dondersa polega na ustaleniu ostrości wzroku oka patrzącego w dal (czyli obserwującego optotypy z odległości 5 m) bez korekcji, a następnie stosowaniu

coraz mocniejszych soczewek sferycznych aż do uzyskania najlepszej ostrości wzroku.

Najlepsza soczewka sferyczna (ekwiwalent sferyczny) to soczewka sferyczna o algebraicznie największej mocy:

- soczewką poprawnie korygującą nadwzroczność jest najmocniejsza soczewka dodatnia, która zapewnia najwyższą ostrość wzroku,
- soczewką poprawnie korygującą krótkowzroczność jest najsłabsza soczewka ujemna, dająca najwyższą ostrość wzroku.

Przykład 32

Ostrość wzroku oka nadwzrocznego bez korekcji wynosi $V = 0,9$. Przy wstawianych przed to oko dodatnich soczewkach sferycznych o coraz większej mocy D ostrość wzroku V zmieniała się następująco:

D:	0,00	+0,25	+0,50	+0,75	+1,00	+1,25	+1,50	+1,75	+2,00
V:	0,9	1,0	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,7

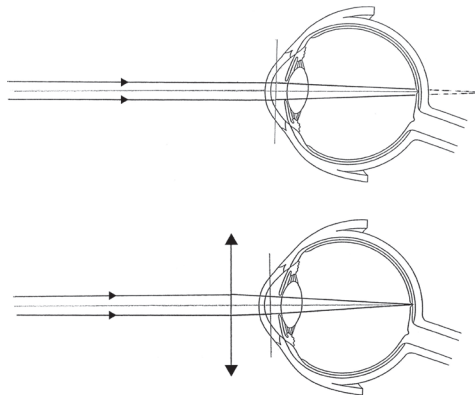
Najlepsza korekcja sferyczna wynosi w tym przypadku +1,50 dpt (przy rozluźnionej akomodacji).

Przy soczewce +0,75 dpt napięcie akomodacyjne wynosi 0,75 dpt.

Przy soczewce +1,00 dpt napięcie akomodacyjne wynosi 0,50 dpt.

Przy soczewce +1,25 dpt napięcie akomodacyjne maleje do 0,25 dpt.

Przy soczewce +1,50 dpt akomodacja jest rozluźniona (pod warunkiem, że nie występuje skurcz akomodacyjny!).



Rysunek 4.1. Korekcja nadwzroczności

Przykład 33

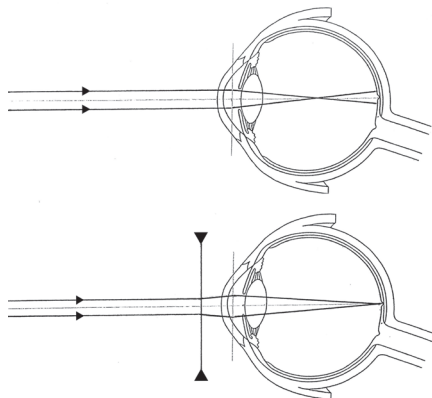
Ostrość wzroku oka krótkowzrocznego bez korekcji wynosi $V = 0,4$. Podczas umieszczania przed tym okiem coraz silniejszych ujemnych soczewek (algebraicznie o coraz mniejszej mocy) ostrość wzroku V zmieniała się następująco:

D:	0,00	-0,25	-0,50	-0,75	-1,00	-1,25	-1,50	-1,75	-2,00	-2,25
V:	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,2	1,5	1,5	1,5	1,2

Najlepsza korekcja sferyczna wynosi w tym przypadku $-1,50$ dpt (przy rozluźnionej akomodacji).

Soczewka $-1,75$ dpt pobudza akomodację o $0,25$ dpt.

Soczewka $-2,00$ dpt pobudza akomodację o $0,50$ dpt.



Rysunek 4.2. Korekcja krótkowzroczności

Przykłady 32 i 33 dotyczą oczu, w których astygmatyzm nie występuje, a więc ekwiwalent sferyczny określa pełną korekcję.

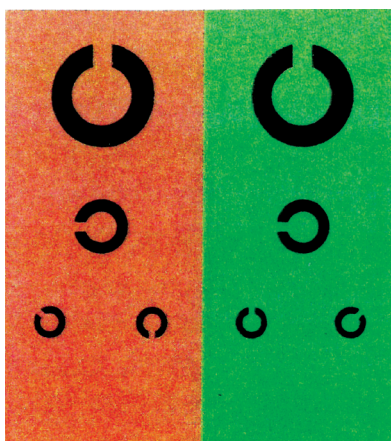
Przykład 34

Ostrość wzroku oka krótkowzrocznego obciążonego astygmatyzmem bez korekcji wynosi $V = 0,15$. Dobór najlepszej korekcji sferycznej przebiegał następująco:

D:	0,00	-0,50	-0,75	-1,00	-1,25	-1,50	-1,75	-2,00	-2,25
V:	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5

Najlepsza korekcja sferyczna, czyli ekwiwalent sferyczny, wynosi w tym przypadku $-1,50$ dpt, ale nie zapewnia pełnej ostrości wzroku. Dla uzyskania lepszego widzenia należy zastosować dodatkowo odpowiedni cylinder.

Dla określenia ekwiwalentu sferycznego można zastosować dwubarwną metodę zwaną testem czerwono-zielonym. **Test czerwono-zielony** wykorzystuje zależność mocy układu optycznego oka od długości (częstotliwości), czyli barwy fali świetlnej. Różnica mocy układu optycznego oka dla fal z czerwonego i zielonego przedziału widma wynosi około $1,0$ dpt, czyli ogniskowa obrazowa oka dla światła czerwonego jest odpowiednio dłuższa niż dla światła zielonego. Test czerwono-zielony składa się z dwóch pól: czerwonego i zielonego. Na obu polach umieszczone są czarne optotypy lub inne znaki testowe.

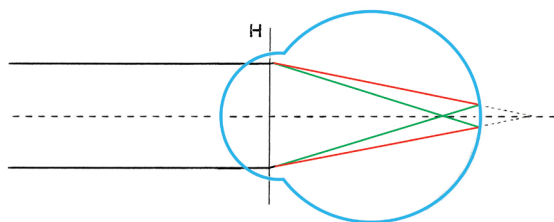


Rysunek 4.3. Test czerwono-zielony

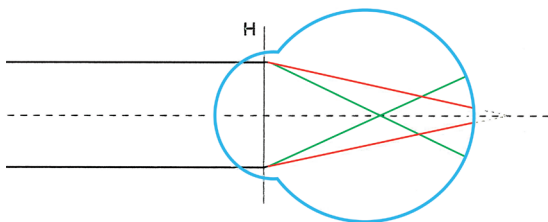
Test czerwono-zielony może być wyświetlany z rzutnika lub prezentowany na ekranie monitora i powinien być obserwowany przy zredukowanym oświetleniu. Określenie ekwiwalentu sferycznego oka za pomocą testu czerwono-zielonego polega na dobraniu takiej soczewki sferycznej, przy której optotypy na obu polach są postrzegane jednakowo.

W przypadku oka miarowego obraz pola zielonego zostanie utworzony przed siatkówką, a pola czerwonego za siatkówką (rys. 4.4). Znaki na obu polach są widziane z jednakowym kontrastem. Oko krótkowzroczne (rys. 4.5) widzi znaki pola czerwonego wyraźniej niż pola zielonego, gdyż skupienie promieni czerwonych

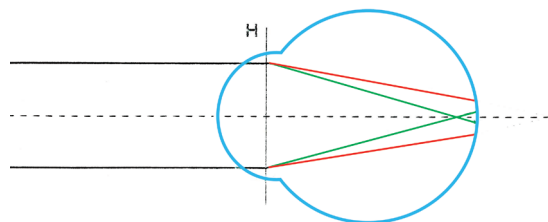
zachodzi bliżej siatkówki. W przypadku oka nadwzrocznego jest odwrotnie – widzi ono wyraźniej znaki na polu zielonym (rys. 4.6). Jeżeli przy ekwiwalencie sferycznym określonym metodą Dondersa lub za pomocą testu czerwono-zielonego ostrość wzroku wynosi $V < 1$, astygmatyzm jest bardzo prawdopodobny. W tabeli 4.1 przedstawiono zależność średnich wartości ostrości wzroku oka skorygowanego ekwiwalentem sferycznym (krążek najmniejszego rozmycia znajduje się na siatkówce) od wielkości astygmatyzmu (cylindra).



Rysunek 4.4. Zasada działania testu czerwono-zielonego w przypadku oka miarowego



Rysunek 4.5. Zasada działania testu czerwono-zielonego w przypadku oka krótkowzrocznego (nieakomodującego)



Rysunek 4.6. Zasada działania testu czerwono-zielonego w przypadku oka nadwzrocznego (nieakomodującego)

Tabela 4.1. Zależność ostrości wzroku od wielkości astygmatyzmu przy najlepszej korekcji sferycznej

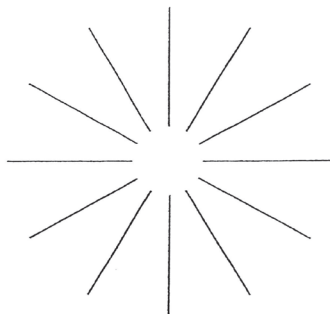
Ostrość wzroku	Moc cylindra
0,1	3,00
0,2	2,50
0,3	2,00
0,4	1,50
0,5	1,00
0,6	0,75
0,7	0,75
0,8	0,50
0,9	0,50
1,0	0,25

Źródło: A. Styszyński, *Korekcja wad wzroku – procedury badania refrakcji*, Alfa Medica Press, Bielsko-Biała 2009.

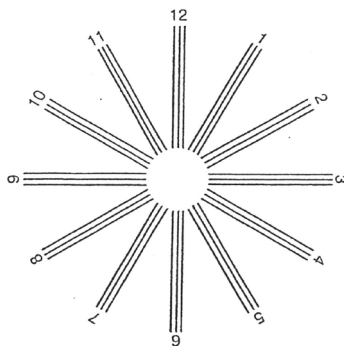
Powyższa tabela została opracowana na podstawie badania tysiąca oczu osób w różnym wieku, u których nie stwierdzono zmian chorobowych oka. Zawiera średnie wartości ostrości wzroku oka skorygowanego ekwiwalentem sferycznym i odpowiadające im średnie wartości cylindra korygującego astygmatyzm.

4.2. Tarcza do badania astygmatyzmu

Tarcza do badania astygmatyzmu, której działanie nawiązuje do figury promienistej Snellena (rys. 4.7), jest nadal podstawowym testem służącym do stwierdzenia i ilościowego określenia astygmatyzmu (oś i moc cylindra). Istnieją dwa podstawowe rodzaje tarcz: stałe i obrotowe. Obecnie stosowane są głównie tarcze stałe wyświetlane z rzutnika lub przedstawiane na monitorze ekranowym, a do najczęściej używanych należy tarcza Greena (rys. 4.8).



Rysunek 4.7. Figura promienista Snellena



Rysunek 4.8. Tarcza zegarowa Greena

Posługiwanie się tarczą do badania astygmatyzmu polega na jej prezentacji w warunkach przekorygowania „w plus”, najlepiej o połowę spodziewanego astygmatyzmu. Tarcza Greena składa się z dwunastu promieni mających orientację godzin tarczy zegara. Odległość kątowa najbliższych promieni wynosi więc 30° . Każdy z promieni składa się z trzech linii, których grubość i odległość odpowiada zwykle ostrości wzroku $V = 0,6$. Podczas prezentacji tarczy w warunkach przekorygowania badane oko widzi jej obraz niewyraźnie. Jeżeli wszystkie linie są przez badanego postrzegane jednakowo, to astygmatyzm nie występuje. Natomiast oko obarczone astygmatyzmem (regularnym) widzi na określonej godzinie linie najciemniejsze (najwyraźniejsze), a prostopadłe do nich – najjaśniejsze (najbardziej rozmyte). Oś ujemnego cylindra korygującego należy ustawić prostopadłe do linii

najciemniejszych (najwyraźniejszych), a więc równoległe do linii najjaśniejszych (najbardziej rozmytych). Położenie osi ujemnego cylindra korygującego łatwo określić, posługując się regułą:

$$\text{oś} = \text{godzina} \cdot 30^\circ \quad (4.1)$$

gdzie godzina oznacza godzinę na tarczy, na której badane oko widzi linie najciemniejsze.

Przykład 35

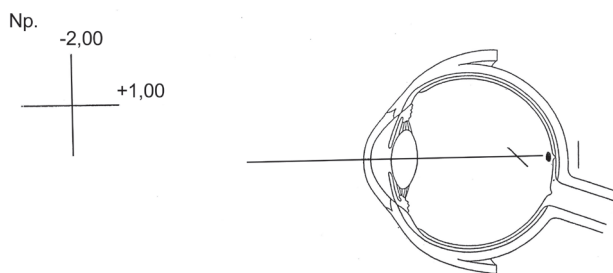
Jeżeli przekorygowane oko widzi jako najciemniejsze linie na godzinach 2–8, to położenie osi ujemnego cylindra korygującego wynosi $2 \cdot 30^\circ = 60^\circ$. Posługując się powyższą regułą, należy wziąć do obliczenia godzinę mniejszą, a więc 2, a nie 8.

Podobnie jeżeli przekorygowane oko widzi jako najciemniejsze linie na godzinach 4–10, to położenie osi ujemnego cylindra korygującego wynosi $4 \cdot 30^\circ = 120^\circ$.

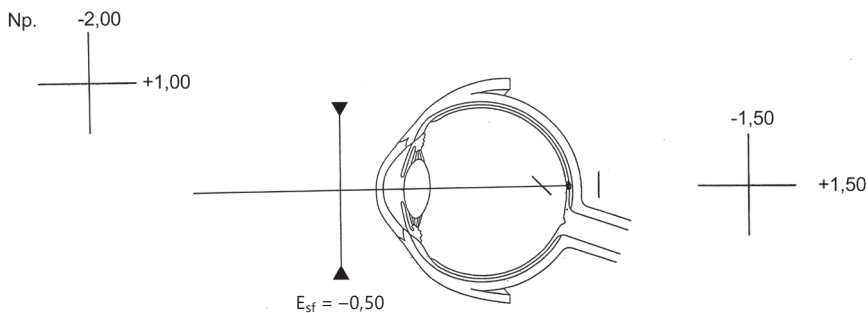
Dla określonej w powyższy sposób osi ujemnego cylindra należy tak dobrać jego moc, aby wszystkie linie na tarczy były widziane jednakowo.

Przykład 36

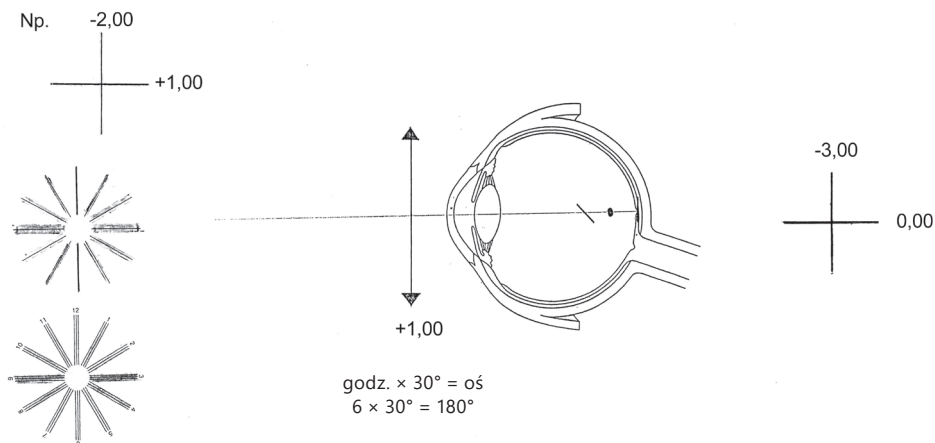
Na rysunkach 4.9–4.12 przedstawiono istotę badania i korekcji astygmatyzmu z użyciem tarczy na przykładzie astygmatyzmu krótkowzroczno-nadwzrocznego przy pionowym (90°) i poziomym (180°) położeniu przekrojów głównych.



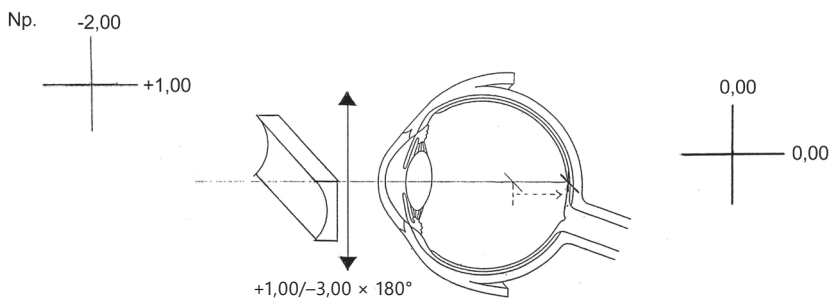
Rysunek 4.9. Astygmatyzm krótkowzroczno-nadwzroczny (przykład)



Rysunek 4.10. Przykład astygmatyzmu skorygowanego ekwiwalentem sferycznym (krążek najmniejszego rozmycia znajduje się na siatkówce)



Rysunek 4.11. Prezentacja tarczy do badania astygmatyzmu w warunkach przekorygowania (przykład)



Rysunek 4.12. Korekcja astygmatyzmu (przykład)

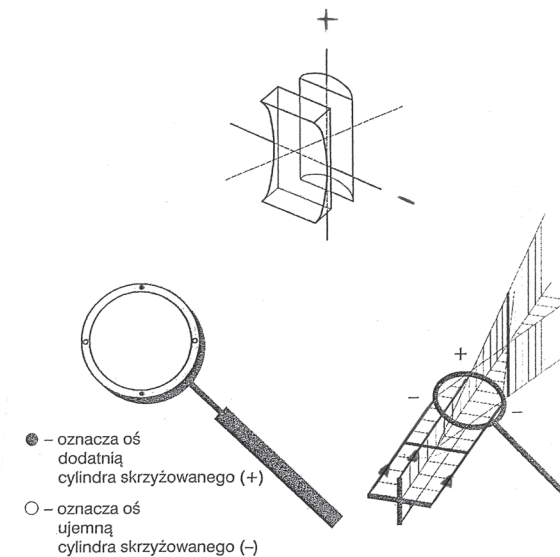
4.3. Cylinder skrzyżowany

Cylinder skrzyżowany (cylinder Jacksona) jest układem dwóch soczewek cylindrycznych o osiach wzajemnie prostopadłych, jednakowych mocach, ale przeciwnych znakach (rys. 4.13). Najczęściej stosowane są cylindry skrzyżowane o mocach $\pm 0,25$ dpt oraz $\pm 0,50$ dpt. Cylinder skrzyżowany $\pm 0,25$ odpowiada sfero-cylindrycznej kombinacji:

$$\text{sph} +0,25 \text{ cyl } -0,50 \text{ lub } \text{sph} -0,25 \text{ cyl } +0,50.$$

Natomiast cylinder skrzyżowany $\pm 0,50$ odpowiada kombinacji:

$$\text{sph} +0,50 \text{ cyl } -1,00 \text{ lub } \text{sph} -0,50 \text{ cyl } +1,00.$$



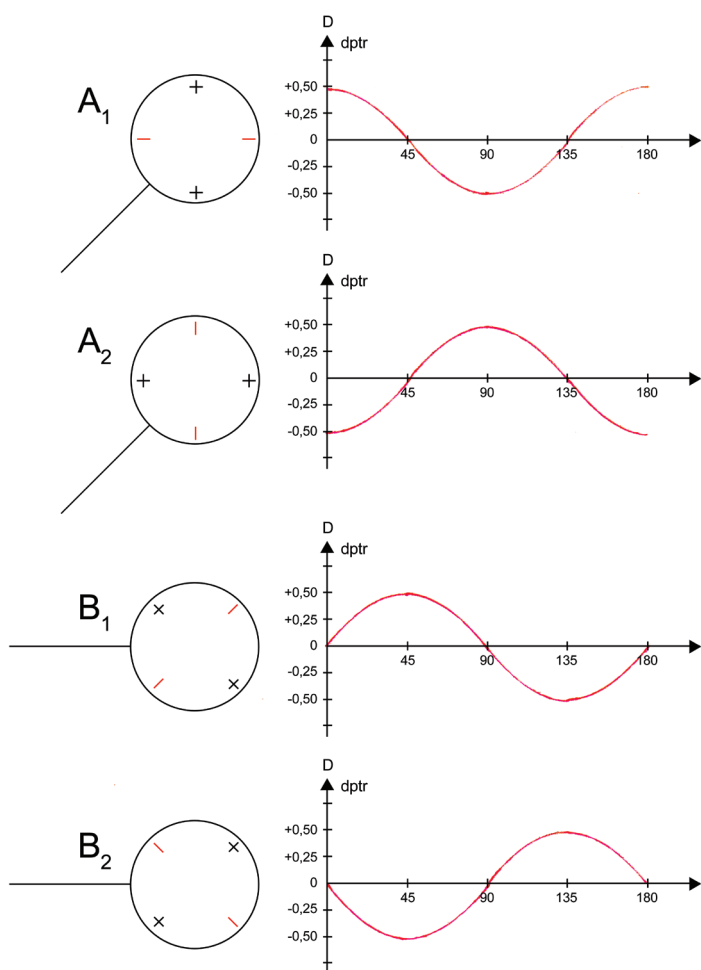
Rysunek 4.13. Zasada działania i budowy cylindra skrzyżowanego

Cylinder skrzyżowany działa na wiązkę światła jak soczewka toryczna: w płaszczyźnie osi cylindra dodatniego jak soczewka rozpraszająca, a w płaszczyźnie osi cylindra ujemnego jak soczewka skupiająca. Jeżeli cylinder skrzyżowany zostanie ustawiony przed okiem tak, że jego osie są zgodne z przekrojami głównymi oka, to następuje albo zmniejszenie astygmatyzmu i poprawa ostrości wzroku, albo zwiększenie astygmatyzmu i pogorszenie ostrości wzroku. Tę właściwość

cylindra skrzyżowanego wykorzystuje się do stwierdzenia astygmatyzmu i określenia osi i mocy cylindra korygującego.

Przykład 37

Na rysunku 4.14 przedstawiono moc cylindra skrzyżowanego $\pm 0,50$ w funkcji kąta (TABO) przy czterech podstawowych ustawieniach.



Rysunek 4.14. Moc cylindra skrzyżowanego $\pm 0,50$ w funkcji kąta TABO (dla podstawowych ustawień)

Przykład 38

Rozpatrywane jest oko o astygmatyzmie mieszanym, którego przekroje główne mają położenie pionowe i poziome:

$$\begin{array}{c} -0,50 \\ \perp +1,00. \end{array}$$

Ekwiwalent sferyczny tego oka wynosi:

$$E = \frac{R_I + R_{II}}{2} = \frac{-0,50 + 1,00}{2} = +0,25.$$

Jeżeli przed okiem ustawić soczewkę o mocy równej ekwiwalentowi sferycznemu, to jego wypadkowa refrakcja R_E będzie wynosić:

$$\begin{array}{c} -0,75 \\ \perp +0,75. \end{array}$$

Łatwo można zauważyć, że refrakcja oka przy ekwiwalencie sferycznym R_E wynosi:

$$R_E = R - E \quad (4.2)$$

Trzeba pamiętać jednocześnie, że ekwiwalent sferyczny powoduje w oku astygmatycznym umiejscowienie krążka najmniejszego rozmycia na siatkówce. Miarą odchylenia mocy układu optycznego oka od miarowości przy obecności ekwiwalentu sferycznego jest wyrażenie:

$$D_0 - D_m = -R_E \quad (4.3)$$

gdzie: D_0 – moc układu optycznego oka,

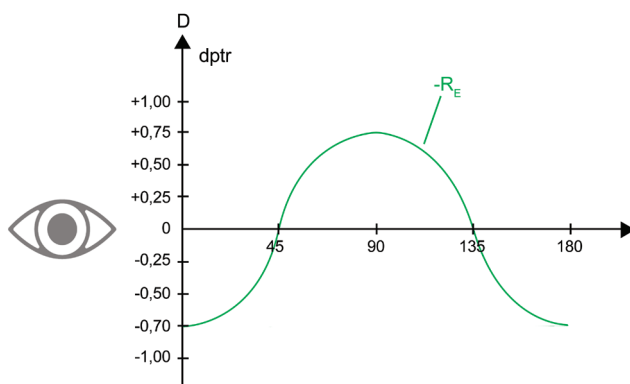
D_m – moc, jaką powinien mieć układ optyczny oka, aby było ono miarowe,

R_E – refrakcja oka przy obecności ekwiwalentu sferycznego ($R_E = R - E$).

Dla omawianego przykładu odchylenie mocy układu optycznego oka od miarowości (przy obecności ekwiwalentu sferycznego) można więc przedstawić:

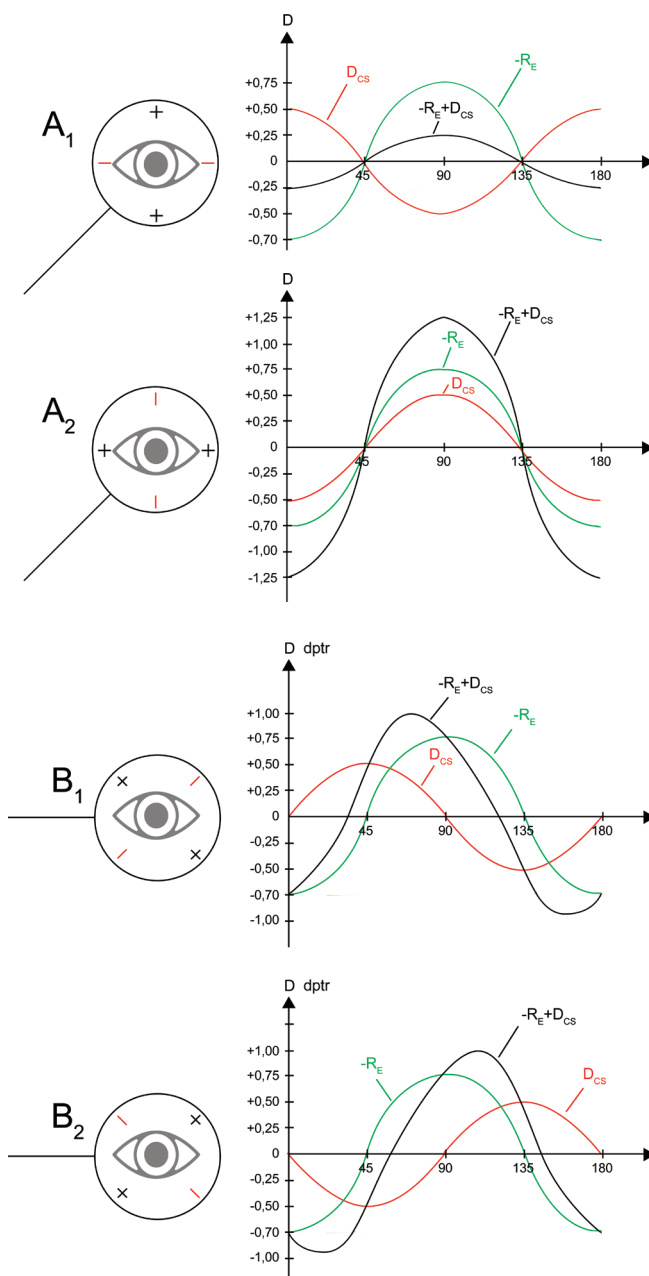
$$\begin{array}{c} +0,75 \\ \perp -0,75. \end{array}$$

Natomiast na rysunku 4.15 przedstawiono to odchylenie w funkcji kąta TABO.



Rysunek 4.15. Odchylenie mocy układu optycznego oka od miarowości (przy obecności ekwiwalentu sferycznego) dla oka o refrakcji $+1,00/-1,50 \times 180$

Ustawienie cylindra skrzyżowanego przed okiem może zmniejszyć lub zwiększyć jego astygmatyzm, co zilustrowano na rysunku 4.16. Tylko przy ustawieniu A_1 cylindra skrzyżowanego badany widzi lepiej.



Rysunek 4.16. Wpływ różnych ustawień cylindra skrzyżowanego $\pm 0,50$ na moc układu optycznego oka o refrakcji $+1,00/-1,50 \times 180$ (przy obecności ekwiwalentu optycznego)

4.4. Sposoby (procedury) badania refrakcji

Niezbędnym warunkiem opanowania procedur badania refrakcji jest dobra znajomość podstaw optyki geometrycznej i optyki fizjologicznej. W zależności od wyposażenia, jakim dysponuje badający, potrzebnego do przeprowadzenia procedury, można wyróżnić kilka sposobów badania refrakcji. Podstawowym wyposażeniem koniecznym do przeprowadzenia badania refrakcji jest kaseta okulistyczna, czyli kaseta soczewek próbnych.



Rysunek 4.17. Kaseta, oprawa próbna, cylindry skrzyżowane

Kaseta okulistyczna zawiera komplet soczewek próbnych, które są zamontowane w specjalnych oprawkach z oznaczeniami i uchwytami dla ułatwienia manipulacji. Do kompletu typowej kasety należą:

- soczewki sferyczne (dodatnie i ujemne):
0,25–3,00 dpt stopniowane co 0,25 dpt,
3,00–8,00 dpt stopniowane co 0,50 dpt,
8,00–16,00 dpt stopniowane co 1,00 dpt,
16,00–20,00 dpt stopniowane co 2,00 dpt;
- soczewki cylindryczne (dodatnie i ujemne):
0,25–3,00 dpt stopniowane co 0,25 dpt,
3,00–6,00 dpt stopniowane co 0,50 dpt;
- pryzmaty:
1,00–5,00 pdpt stopniowane co 1,00 pdpt,
6,00–10,00 pdpt stopniowane co 2,00 pdpt.

Soczewki próbne mają oznaczoną moc, ponadto soczewki cylindryczne mają naniesione kreski znaczące oś cylindra, a pryzmaty kreski wyznaczające przekrój główny pryzmatu. Kaseta zawiera także elementy dodatkowe: nieprzezroczystą

przesłone do zasłaniania oka, otwór stenopeiczny (1,5 mm), szczelinę stenopeiczną (1,5 mm) oraz służące do badania obuocznego filtry barwne (czerwony i zielony) i cylinder Maddoxa. Do niezbędnego wyposażenia kasety należą także cylindry skrzyżowane $\pm 0,25$ i $\pm 0,50$ oraz oprawa próbna.

Sposób 1

Wyposażenie: kasetka, tablice z optotypami.

Odległość badania: 5 m lub 6 m. Oświetlenie umiarkowane.

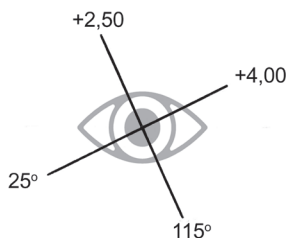
Ta technika, obecnie rzadko przez okulistów stosowana, chociaż w swej istocie optycznej prosta, była niegdyś wyrazem dużego doświadczenia w badaniu refrakcji. W procedurze tej soczewki sferyczne z kasety są osadzane w oprawie próbnej, badany obserwuje tablicę z optotypami, a do określenia astygmatyzmu wykorzystuje się szczelinę stenopeiczną.

Przebieg

1. Określenie ostrości wzroku V bez korekcji.
2. Określenie ekwiwalentu sferycznego metodą Dondersa i ostrości wzroku z ekwiwalentem sferycznym V' .
3. Przekorygowanie i osadzenie szczeliny stenopeicznej przed badanym okiem.
4. Określenie położenia przekrojów głównych i refrakcji w każdym z tych przekrojów:

Przez obrót szczeliny badający określa na podziałce TABO takie jej położenie, przy którym badany widzi optotypy najwyraźniej. W tej pozycji należy dobrać (uściślić) metodą Dondersa tę sferę, która daje najwyższą ostrość wzroku. Następnie należy szczelinę obrócić o 90° i w tym drugim położeniu dobrać sferę (metodą Dondersa), przy której badane oko ponownie osiąga najwyższą ostrość wzroku.

Wynikiem takiego badania refrakcji jest krzyż mocy dla dwóch przekrojów głównych, na przykład:



Stąd wynik: $+4,00/-1,50 \times 25 (+2,50/+1,50 \times 115)$.

5. Umieszczenie w oprawce odpowiedniej sfery i cylindra i ostateczne uściślenie sfery.

W czasie tego badania szczelina powinna być dokładnie ustawiona przed źrenicą, a badany dobrze współpracować z badającym. Z powodu niepewnej dokładności procedura ta jest obecnie rzadko wykonywana.

Sposób 2

Wyposażenie: kaseta, tablice z optotypami, tarcza do badania astygmatyzmu.

Odległość badania: 5 m lub 6 m. Oświetlenie umiarkowane.

W przeszłości procedura ta była wykonywana powszechnie, a obecnie jest stosowana jako badanie zgrubne lub wstępne. Podobnie jak w poprzedniej procedurze soczewki z kasety osadzane są w oprawie próbnej, badany obserwuje tablicę z optotypami, a do określenia astygmatyzmu wykorzystuje się odpowiednią tarczę, na przykład tarczę Greena.

Przebieg

1. Określenie ostrości wzroku V bez korekcji.
2. Określenie ekwiwalentu sferycznego metodą Dondersa i ostrości wzroku z ekwiwalentem sferycznym V' .
3. Przekorygowanie i prezentacja tarczy.
4. Należy zapytać badanego, na której godzinie (jak na zegarze) linie w obserwowanym przez niego obrazie tarczy są najwyraźniejsze (najciemniejsze). Oś ujemnego cylindra korygującego określa reguła: oś = godzina $\cdot 30^\circ$.
5. Wstawienie w określonej osi ujemnego cylindra korygującego wyrównującego obraz tarczy.
6. Uściślenie sfery metodą Dondersa.

Sposób 3

Wyposażenie: kaseta, tablice z optotypami, cylindry skrzyżowane $\pm 0,25$ i $\pm 0,50$.

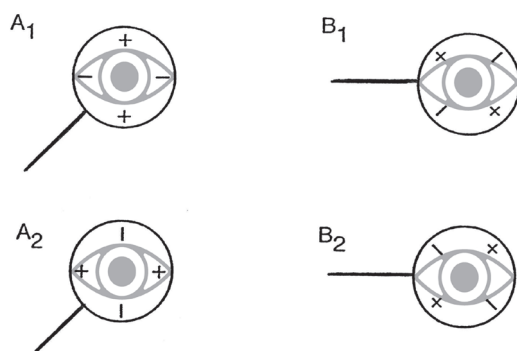
Odległość badania: 5 m lub 6 m. Oświetlenie umiarkowane.

Soczewki z kasety osadzane są w oprawie próbnej przed badanym okiem, badany obserwuje tablicę z optotypami, a do określenia astygmatyzmu badający stosuje ręczny cylinder skrzyżowany. Obecnie procedura ta należy do najczęściej wykonywanych.

Przebieg

1. Określenie ostrości wzroku V bez korekcji.
2. Określenie ekwiwalentu sferycznego metodą Dondersa i ostrości wzroku z ekwiwalentem sferycznym V' .
3. Określenie położenia osi ujemnego cylindra korygującego.

Jeżeli ostrość wzroku z ekwiwalentem sferycznym $V' \geq 0,5$, należy użyć cylindra skrzyżowanego $\pm 0,25$, a jeżeli $V' < 0,5$, należy najpierw zastosować cylinder skrzyżowany $\pm 0,50$. Sposób ustawiania cylindra skrzyżowanego przedstawiono na rysunku 4.18.



Rysunek 4.18. Podstawowe ustawienia cylindra skrzyżowanego przed badanym okiem

Cylinder skrzyżowany należy ustawić najpierw w położeniach A_1 i A_2 (trzonek po stronie skroniowej nachylony jest 45° względem poziomu). Obserwując optotypy, badany informuje, przy którym z tych położen (zmiana następuje przez obrót wokół osi trzonka) widzi lepiej, lub stwierdza, że przy obu położeniach A widzi jednakowo. Następnie cylinder skrzyżowany należy ustawić w położeniach B_1 i B_2 (trzonek trzymać poziomo), a badany podobnie jak poprzednio określa, przy którym położeniu widzi lepiej lub że widzi w obu położeniach B jednakowo. Położenie osi ujemnego cylindra korygującego wyznacza położenie ujemnej osi cylindra skrzyżowanego (znaki minus lub czerwone plamki), przy którym badany widział wyraźniej. Występują tu cztery możliwości:

- Badany stwierdził, że widział lepiej tylko przy jednym z położen A, a przy obu położeniach B widział jednakowo (gorzej). Położenie osi ujemnego cylindra korygującego jest zatem 0° (180°), gdy lepiej widział przy A_1 , albo 90° , gdy lepiej widział przy A_2 .

- Badany stwierdził, że lepiej widział tylko przy jednym z położen B, natomiast przy obu położeniach A widział jednakowo (gorzej). Położenie osi ujemnego cylindra korygującego jest więc 45° , gdy widział lepiej przy B_1 , lub 135° , gdy widział lepiej przy B_2 .
- Zarówno przy jednym z położen A, jak i przy jednym z położen B badany widział wyraźniej. Oś ujemnego cylindra korygującego przyjmuje wtedy odpowiednie położenie pośrednie, a więc:

dla A_1 i B_1 $22,5^\circ$,

dla A_1 i B_2 $157,5^\circ$,

dla A_2 i B_1 $67,5^\circ$,

dla A_2 i B_2 $112,5^\circ$.

- Przy wszystkich położeniach cylindra skrzyżowanego badane oko widzi jednakowo. Astygmatyzm nie występuje.
4. Wstawienie odpowiedniego cylindra wraz z poprawką na sferę.

Przed badane oko należy wstawić ujemny cylinder korygujący w określonej (jak wyżej) osi. Moc tego cylindra wynika z ostrości wzroku V' z ekwiwalentem sferycznym (tab. 4.1). W wyniku ustawienia tego cylindra znajdująca się wewnątrz oka linia ogniskowa przemieszcza się w kierunku siatkówki, a krążek najmniejszego rozmycia poza siatkówkę. Dlatego aby utrzymać położenie krążka najmniejszego rozmycia na siatkówce, należy jednocześnie wraz z wstawieniem ujemnego cylindra korygującego zmienić moc soczewki sferycznej o dodatnią wartość będącą połową wartości mocy cylindra.

Na przykład: jeżeli przy ekwiwalencie sferycznym $V' = 0,5$, to należy wstawić cylinder $-1,00$ dpt i zwiększyć sferę o $+0,50$ dpt.

5. Uściślenie osi cylindra korygującego.

Do czynności tej używamy cylindra skrzyżowanego $\pm 0,25$. Badany obserwuje rząd optotypów odpowiadający uzyskanej ostrości wzroku. Cylinder skrzyżowany należy trzymać tak, aby jego trzonek był stale równoległy do osi ujemnego cylindra korygującego. Obracając cylinder skrzyżowany wokół trzonka, należy określić pozycję lepszego widzenia i odpowiednio obrócić oś ujemnego cylindra korygującego w stronę lepszego widzenia (wskazaną przez ujemną oś cylindra skrzyżowanego). Postępowanie to należy powtarzać do uzyskania jednakowego widzenia w obu ustawieniach cylindra skrzyżowanego. Wartość kąta, o który należy obrócić oś ujemnego cylindra korygującego, wynosi w kolejnych krokach odpowiednio: 15° , 10° , 5° , $2,5^\circ$ – jeżeli kolejne zmiany położenia osi cylindra korygującego odbywają się w przeciwnych kierunkach. Jeżeli

przy kolejnym kroku badany wybierze ten sam kierunek, należy powtórzyć poprzednią wartość zmiany kąta.

6. Uściślenie mocy cylindra korygującego.

Do czynności tej stosujemy cylinder skrzyżowany $\pm 0,25$. Badany nadal obserwuje rząd optotypów odpowiadający jego ostrości wzroku. Cylinder skrzyżowany należy ustawić tak, aby jego ujemna oś była równoległa do osi ujemnego cylindra korygującego. Następnie należy wykonać obrót wokół osi trzonka, aby jego dodatnia oś była równoległa do osi cylindra korygującego. Jeżeli przy obrocie wokół osi trzonka cylindra skrzyżowanego jedno jego ustawienie daje lepsze widzenie niż drugie, to mogą wystąpić dwa przypadki:

- Lepsze widzenie występuje wtedy, gdy ujemna oś cylindra skrzyżowanego jest równoległa do osi ujemnego cylindra korygującego. Oznacza to, że moc ujemnego cylindra korygującego jest za mała. Należy zwiększyć moc cylindra korygującego $-0,50$ dpt (algebraicznie zmniejszyć) i jednocześnie zwiększyć moc sfery o $+0,25$ dpt (tj. o połowę zmiany mocy cylindra).
- Lepsze widzenie występuje wtedy, gdy dodatnia oś cylindra skrzyżowanego jest równoległa do osi ujemnego cylindra korygującego. Oznacza to, że moc ujemnego cylindra korygującego jest za duża. Należy więc zmniejszyć moc ujemnego cylindra korygującego o $-0,50$ dpt (algebraicznie zwiększyć) i jednocześnie zmniejszyć moc sfery o $+0,25$ dpt. Jeżeli obserwując optotypy przy obu położeniach cylindra skrzyżowanego, badany wahał się, ale ostatecznie wybrał jako lepsze położenie pierwsze, to należy zwiększyć tylko moc ujemnego cylindra korygującego o $-0,25$ dpt. Gdyby jednak w takim przypadku wybrał jako lepsze położenie drugie, to należy zmniejszyć moc ujemnego cylindra korygującego o $-0,25$ dpt. Jeżeli przy obu pozycjach cylindra skrzyżowanego badany widzi jednakowo, to moc ujemnego cylindra korygującego jest dobrana optymalnie.

7. Uściślenie mocy sfery.

Uściślenie mocy sfery wykonuje się metodą Dondersa. Badany obserwuje najmniejsze optotypy, jakie potrafi rozpoznać. Zmieniając moc sfery o $0,25$ dpt, należy ostatecznie zastosować algebraicznie największą (najmocniejszy plus, najsłabszy minus), przy której badane oko osiąga najwyższą ostrość wzroku.

Sprawność badania refrakcji powyższą metodą zależy od dobrego porozumienia pomiędzy badanym a badającym. Badany powinien jednoznacznie rozumieć, który obraz jest „pierwszy”, a który „drugi”. Ponadto należy przestrzegać następujących praktycznych wskazówek:

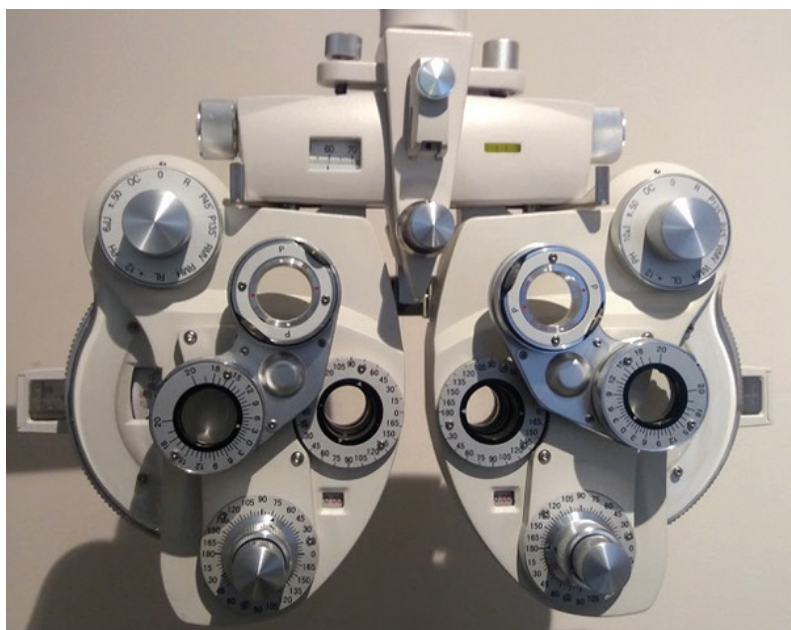
- jak najmniej soczewek próbnych wkładać jednocześnie do oprawy,
- soczewka o największej mocy powinna być bliżej oka,
- powierzchnie soczewek próbnych i cylindra skrzyżowanego powinny być czyste, a badający powinien unikać dotykania palcami tych powierzchni,
- cylinder skrzyżowany powinien być dokładnie ustawiany w należytnej pozycji.

Sposób 4

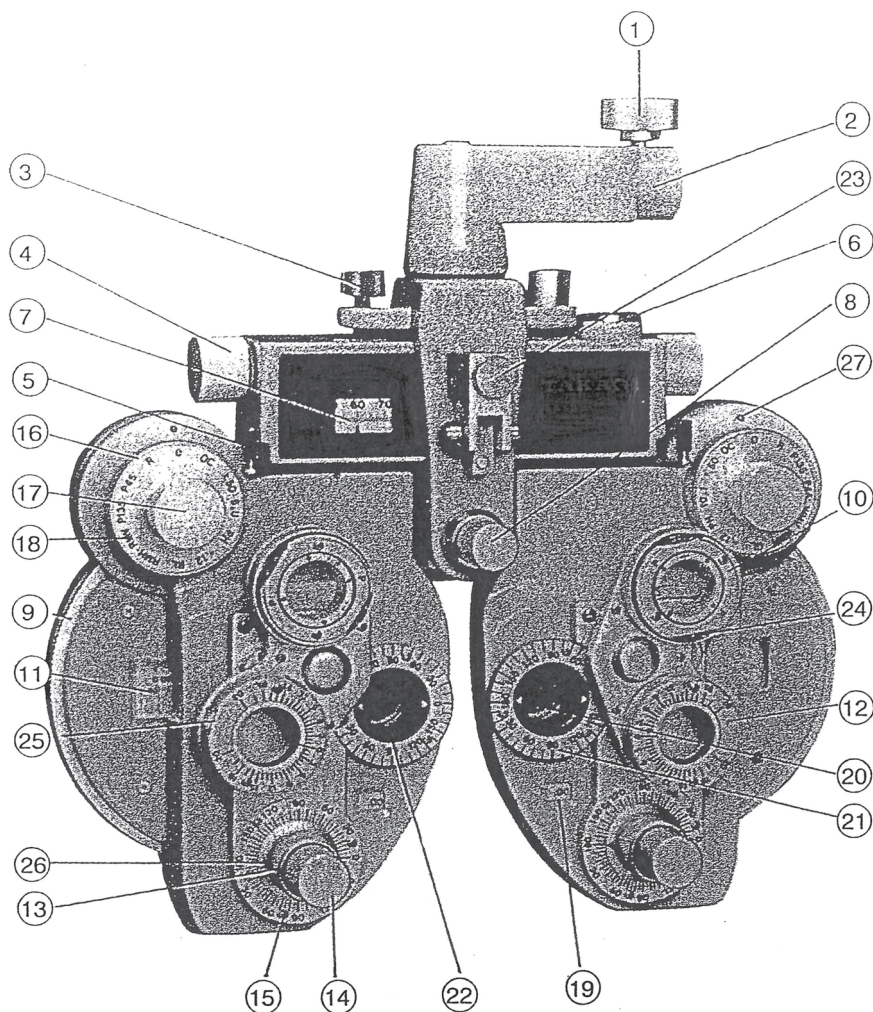
Wyposażenie: foropter, rzutnik optotypów (lub monitor ekranowy).

Odległość badania: 5 m lub 6 m. Oświetlenie umiarkowane.

Foropter jest urządzeniem wyposażonym obustronnie w magazyny soczewek, które dzięki systemowi pokręteł mogą być szybko i łatwo ustawione w odpowiedniej kombinacji. Ponadto istnieje możliwość ustawienia cylindra skrzyżowanego, pryzmatu o zmiennej mocy i kierunku podstawy, filtra polaryzacyjnego lub barwnego, a także innych elementów pomocniczych. Procedura badania refrakcji za pomocą foroptera w swej istocie łączy omówione powyżej sposoby 2 i 3.



Rysunek 4.19. Foropter



1 – pokrętło mocujące; 2 – ramię mocujące; 3 – pokrętło poziomujące; 4 – pokrętło nastawienia rozstawu źrenic; 5 – dźwignia zbieżności; 6 – poziomnica; 7 – skala rozstawu źrenic; 8 – pokrętło regulacji podpórki czoła; 9 – pierścień nastawny mocy sferycznej; 10 – cylinder skrzyżowany; 11 – okienko odczytu mocy sferycznej; 12 – pryzmat pomiarowy (kompensator); 13 – pierścień nastawny osi soczewki cylindrycznej; 14 – pokrętło nastawy mocy soczewki cylindrycznej; 15 – skala osi soczewki cylindrycznej A; 16 – pierścień szybkiej zmiany mocy soczewki; 17 – pokrętło nastawy soczewek pomocniczych; 18 – oznaczenia soczewek pomocniczych; 19 – okienko odczytu mocy cylindrycznej; 20 – wskaźnik osi soczewki cylindrycznej; 21 – skala osi soczewki cylindrycznej B; 22 – otwór obserwacyjny; 23 – gniazdo do zamontowania podziałki punktu bliskiego; 24 – pokrętło obrotu cylindra skrzyżowanego; 25 – pokrętło pryzmatu pomiarowego (kompensatora); 26 – wskaźnik osi cylindra; 27 – znaczek ustawienia soczewki pomocniczej.

Rysunek 4.20. Wygląd foroptera z zaznaczeniem elementów jego wyposażenia

Przebieg

1. Określenie ostrości wzroku V bez korekcji.
2. Określenie ekwiwalentu sferycznego metodą Dondersa i ostrości wzroku V' z tą korekcją.
3. Test czerwono-zielony, czyli sprawdzenie ekwiwalentu sferycznego.

Badanie to przeprowadza się przy ciemnym oświetleniu. Moc sfery należy tak dobrać, aby optotypy na obu tłach (czerwonym i zielonym) były widoczne jednakowo (jednakowo czarne). Najlepiej najpierw nieco przekorygować, na przykład o $+0,50$ dpt (znaki na polu czerwonym są nieco czarniejsze), i wychodząc z tego przekorygowania, doprowadzić do wyrównania zaczerwienienia znaków na obu polach.

4. Przekorygowanie, prezentacja tarczy, wstępna korekcja astygmatyzmu.

Jeżeli astygmatyzm nie występuje, wszystkie linie tego testu są widoczne jednakowo. Natomiast oko obarczone astygmatyzmem widzi linie na określonej godzinie najciemniejsze. Należy wtedy zapytać, na której godzinie linie są najciemniejsze. Otrzymując konkretną odpowiedź, należy odpowiednim pokrętełłem ustawić oś cylindra według reguły: $oś = \text{godzina} \cdot 30^\circ$, a następnie stopniowo zwiększać moc ujemnego cylindra korygującego co $0,25$ dpt, aż wszystkie linie tarczy będą widoczne jednakowo. W ten sposób zostaje wstępnie określona oś i moc ujemnego cylindra korygującego.

5. Uściślenie sfery metodą Dondersa lub testem czerwono-zielonym.
6. Uściślenie osi ujemnego cylindra korygującego za pomocą cylindra skrzyżowanego $\pm 0,25$.

Przebieg tego etapu procedury jest podobny do uściśniania położenia osi ujemnego cylindra korygującego za pomocą ręcznego cylindra skrzyżowanego. Zamontowany na foropterze cylinder skrzyżowany należy ustawić tak, że jego oś obrotu jest równoległa do osi ujemnego cylindra korygującego (wtedy oś ujemna i oś dodatnia cylindra skrzyżowanego tworzą kąt 45° z osią ujemnego cylindra korygującego). Badany obserwuje optotypy dwa rzędy wyżej od uzyskanej ostrości wzroku. Należy ustalić, przy której z dwóch pozycji cylindra skrzyżowanego badany widzi lepiej. Jeżeli nie dostrzega różnicy, to dotychczasowe położenie osi ujemnego cylindra korygującego jest prawidłowe. Jeżeli jednak przy jednym z położów cylindra skrzyżowanego badany widzi lepiej, oś ujemnego cylindra korygującego należy obrócić o 15° w kierunku ujemnej osi cylindra skrzyżowanego w położeniu wybranym przez badanego jako lepsze. Czynność tę należy powtórzyć, przy czym dalsze kolejne zmiany położenia osi ujemnego cylindra korygującego powinny wynosić 10° , 5° , $2,5^\circ$.

Przy sekwencji 15°, 10°, 5°, 2,5° należy zatem metodą kolejnych przybliżeń ustalić takie położenie osi ujemnego cylindra korygującego, przy którym badany nie dostrzega różnicy przy dwóch ustawieniach cylindra skrzyżowanego. Oznacza to, że zostało osiągnięte optymalne położenie osi ujemnego cylindra korygującego.

7. Uściślenie mocy ujemnego cylindra korygującego za pomocą cylindra skrzyżowanego $\pm 0,25$.

Czynność tę przeprowadza się podobnie jak ręcznym cylindrem skrzyżowanym. Zamontowany na foropterze cylinder skrzyżowany należy ustawić tak, aby jedna z jego osi pokryła się z osią ujemnego cylindra korygującego, a badany powinien obserwować optotypy dwa rzędy wyżej od osiągniętej ostrości wzroku. Przy obrocie cylindra skrzyżowanego należy zapytać, w której pozycji widzi lepiej: pierwszej czy drugiej. Jeżeli badany widział lepiej, gdy ujemna oś cylindra skrzyżowanego była zgodna z osią ujemnego cylindra korygującego, to moc ujemnego cylindra korygującego jest za mała. Należy wtedy zwiększyć cylinder korygujący o $-0,50$ dpt (algebraicznie zmniejszyć), a sferę zwiększyć o $+0,25$ dpt. Jeżeli badany widział lepiej, gdy dodatnia oś cylindra skrzyżowanego była zgodna z osią ujemnego cylindra korygującego, moc ujemnego cylindra korygującego jest zbyt duża. Należy wtedy zmniejszyć moc cylindra o $-0,50$ dpt (algebraicznie zwiększyć), a sferę zmniejszyć o $+0,25$ dpt. Jeżeli badany widział jednakowo w obu pozycjach, to znaczy, że moc ujemnego cylindra korygującego jest optymalna.

Podczas uściśniania osi i mocy ujemnego cylindra korygującego można posługiwać się testem „solniczki” (rys. 4.21). Test ten składa się z kilkunastu małych czarnych kółek na białym tle. Podczas uściśniania osi i mocy cylindra korygującego lepsze widzenie oznacza mniej zdeformowane (bardziej okrągłe) kółeczka testu.

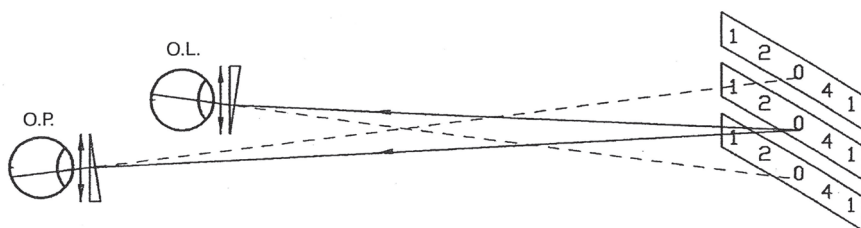


Rysunek 4.21. Test „solniczka”

8. Uściślenie sfery (metoda Dondersa, test czerwono-zielony).
9. Badanie refrakcji drugiego oka (przebieg jak wyżej).

10. Zrównoważenie bodźca do akomodacji.

Po przeprowadzeniu badania refrakcji (dla każdego z oczu oddzielnie) wskazane jest wykonanie dodatkowego uściślenia sfery, podczas którego badany patrzy obuocznie. Czynność ta nazywana równoważeniem bodźca do akomodacji (bilansem obuocznym, bilansem akomodacyjnym) ma dodatkowo zapewnić rozluźnienie akomodacji do dali i jednakową akomodację do bliży obu oczu. Istnieje kilka metod równoważenia bodźca do akomodacji, jednak najczęściej jest stosowana metoda zdwojenia pryzmatycznego, która przebiega następująco:



Rysunek 4.22. Zdwojenie rzędu optotypów przez wprowadzenie pryzmatów: 2 pdpt BD przed oko prawe i 2 pdpt BG przed oko lewe. Oko prawe widzi rząd położony wyżej, a oko lewe rząd położony niżej

W foropterze pozostają soczewki po badaniu refrakcji każdego oka oddzielnie. Przed jedno oko należy wprowadzić pryzmat 2 pdpt bazą do dołu (BD), a przed drugie oko pryzmat 2 pdpt bazą do góry (BG). Badany obserwuje poziomy rząd optotypów odpowiadający osiągniętej ostrości wzroku (rys. 4.22). Oczywiście dzięki pryzmatom widzi go podwójnie. Jedno oko należy przekorygować, a więc zwiększyć dodatkowo sferę o $+0,50$ dpt, aby optotypy widziane tym okiem uległy zamazaniu. Następnie należy przekorygować drugie oko, zwiększając stopniowo sferę co $+0,25$ dpt, aby optotypy widziane tym okiem były tak samo zamazane jak optotypy widziane okiem pierwszym. Przy przekorygowaniu jednego oka o $+0,50$ dpt przekorygowanie drugiego oka (dające jednakowe zamazanie) może wynosić $+0,25$ dpt, $+0,50$ dpt, $+0,75$ dpt, $+1,00$ dpt. Następnie należy usunąć pryzmaty (badany widzi ponownie jeden rząd optotypów) i wycofać się z przekorygowania do maksymalnej ostrości wzroku (zmniejszając sferę przed każdym okiem jednocześnie o tę samą wartość). To usunięcie przekorygowania można także przeprowadzić,

posługując się testem czerwono-zielonym. Gdyby różnica w przekorygowaniu (do jednakowego zamazania) pomiędzy pierwszym i drugim okiem była większa niż 0,50 dpt, najlepiej badanie refrakcji powtórzyć.

4.5. Korekcja prezbiopii

Przez korekcję prezbiopii rozumie się zwykle zastosowanie mocy dodatkowej do bliży, dzięki której przedmioty znajdujące się w bliskiej odległości od oka, mimo zmniejszonej jego zdolności akomodacyjnej, mogą być wyraźnie widziane z poczuciem odpowiedniego komfortu. Ten dodatek do bliży zależy od odległości, na jaką ma służyć, i od amplitudy akomodacji, która maleje wraz z wiekiem. Przy założeniu, że trzy czwarte amplitudy akomodacji może być trwale wykorzystane do pracy z bliska, dość często stosuje się moce dodatkowe według tabeli 4.2. Jednak w tabeli tej zawarto średnie wartości orientacyjne, a dodatek do bliży należy określić dla każdej osoby indywidualnie.

Tabela 4.2. Moc dodatkowa dla oczu miarowych w zależności od wieku i odległości obserwacji

Wiek (lata)	Moc dodatkowa (dpt)				
	25 cm	29 cm	33 cm	40 cm	50 cm
40	0,50	–	–	–	–
41	0,75	0,25	–	–	–
42–43	1,00	0,50	–	–	–
44	1,25	0,75	0,25	–	–
45–46	1,50	1,00	0,50	–	–
47–48	1,75	1,25	0,75	0,25	–
49–50	2,0	1,50	1,00	0,50	–
51–52	2,25	1,75	1,25	0,75	0,25
53–54	2,50	2,00	1,50	1,00	0,50
55–56	2,75	2,25	1,75	1,25	0,75
57–60	3,00	2,50	2,00	1,50	1,00
61–65	3,50	3,00	2,50	2,00	1,50
65+	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00

Skorygowane do dali osoby nadwzroczne zwykle nieco wcześniej wymagają mocy dodatkowej do bliży niż skorygowane do dali osoby krótkowzroczne. Oczywiście przeziopia dotyczy także oczu miarowych, a więc osób, które nie wymagają korekcji do dali. Zmniejszanie się sprawności akomodacyjnej oka pozostaje początkowo przez pacjenta niezauważane. Do świadomości jego dociera dopiero wówczas, gdy punkt bliski oddala się od oka na odległość czytania lub innych precyzyjnych czynności manualnych: litery stają się zamazane, widzenie z bliska się pogarsza. Stan ten pojawia się zwykle między 42. a 45. rokiem życia. Obecnie najczęściej przyjmuje się empirycznie ustaloną regułę, że do obserwacji przedmiotów bliskich w warunkach komfortu nie wykorzystuje się więcej niż jedną drugą amplitudy akomodacji. Dlatego odpowiedni dodatek do bliży D_B określony jest wzorem:

$$D_B = \frac{1}{|\ell|} - \frac{A_A}{2} \quad (4.4)$$

gdzie: ℓ – odległość obserwacji z bliska,
 A_A – amplituda akomodacji.

Na ogół dodatek do bliży zwany addycją jest jednakowy dla obu oczu, jednak zwykle dobiera się go oddzielnie dla oka prawego i oka lewego. W celu określenia amplitudy akomodacji należy zmierzyć położenie punktu bliskiego dla oka skorygowanego do dali.

Badany z korekcją do dali i przy umiarkowanym oświetleniu obserwuje najmniejsze optotypy na zredukowanej tablicy Snellena (rys. 3.22), którą badający zbliża powoli z odległości 50 cm. Badający mierzy odległość s_B punktu bliskiego od oka, przy której badany przestał widzieć ostro. Ponieważ z korekcją do dali

$A_A = \frac{1}{|s_B|}$, więc moc dodatku do bliży dla odległości l wynosi:

$$D_B = \frac{1}{|\ell|} - \frac{1}{2|s_B|} \quad (4.5)$$

Przykład 39

Dla oka w pełni skorygowanego do dali punkt bliski znajduje się w odległości 40 cm przed okiem. Określ dodatek do bliży dla odległości 30 cm.

$$s_B = -40 \text{ cm} = -0,4 \text{ m}, |s_B| = 0,4 \text{ m},$$

$$\ell = -30 \text{ cm} = -0,3 \text{ m}, |\ell| = 0,3 \text{ m},$$

$$A_A = 2,50 \text{ dpt}.$$

$$D_B = \frac{1}{0,3} - \frac{1}{2 \cdot 0,4} = 3,33 - 1,25 = 2,08 \approx 2,00 \text{ dpt}.$$

Zawsze po przeprowadzonym badaniu refrakcji należy w oprawie próbnej umieścić najpierw korekcję do dali i uzyskać od badanego akceptację tej korekcji. Następnie u osób z prezbiopią należy umieścić odpowiednią korekcję do bliży i upewnić się, czy ta korekcja spełnia oczekiwania badanego. Ważnym momentem badania jest jednoznaczne uzgodnienie, na jaką odległość okulary do bliży mają służyć.

Istnieją także sposoby określania mocy dodatkowej do bliży przy obserwacji obucocznej. W szczególności jest to możliwe przy korzystaniu z foroptera, gdy badanie refrakcji zostało zakończone równoważeniem bodźca do akomodacji.

Do szybkiego określenia korekcji do bliży można zastosować test Wilmsa w postaci tzw. kraty cylindra skrzyżowanego zamieszczonej na tablicy foroptera do bliży (rys. 4.23). Ustalenie korekcji do bliży tą metodą przebiega następująco:

- pozostawić obustronnie odpowiednią korekcję do dali,
- wprowadzić przed każde oko cylinder skrzyżowany $\pm 0,50$ (o stałej osi ujemnego cylindra),
- ustawić zbieżność foroptera do bliży,
- w ustalonej z badanym odległości umieścić test Wilmsa przy umiarkowanym oświetleniu, w przypadku prezbiopii linie poziome kratownicy są ciemniejsze,
- stopniowo zwiększać obustronnie co $+0,25$ dpt moc sfery, aż linie pionowe i poziome będą widziane jednakowo.



1 – zdania (0,4–1,0); 2 – litery alfabetu (0,5–1,0); 3 – kratka cylindra skrzyżowanego (cienkie linie); 4 – zdania; 5 – litery alfabetu; 6 – test astygmatyzmu; 7 – zdania (0,1–0,3); 8 – litery alfabetu (0,1–0,4); 9 – kratka cylindra skrzyżowanego (grube linie); 10 – zdanie pionowe; 11 – litery alfabetu; 12 – test na odległość pośrednią (odległość badania 70 cm).

Rysunek 4.23. Tablice foroptera do blizy

5. Przedmiotowe (obiektywne) badanie refrakcji

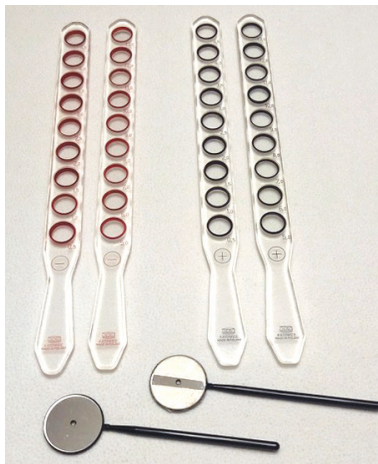
Obiektywne badanie refrakcji pozwala na szybkie jej określenie bez konieczności uzyskiwania od pacjenta informacji o jego wrażeniach wzrokowych. W przypadku dzieci oraz pacjentów niewspółpracujących z badającym metody obiektywne są niezbędne, gdyż tylko na ich podstawie można określić należną korekcję okularową. Innym osobom wyniki otrzymane metodą przedmiotową powinny służyć jako dane wyjściowe do badania subiektywnego. Podstawowymi metodami obiektywnymi są skiaskopia i refraktometria.

5.1. Skiaskopia

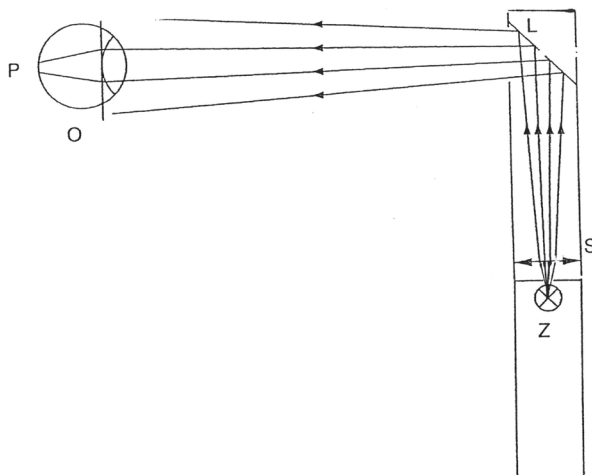
Optyczna zasada skiaskopii polega na oświetleniu dna badanego oka i utworzeniu za pomocą soczewki o odpowiedniej mocy obrazu dna w określonej (zwykle 1 m) odległości od tego oka. Miarą refrakcji jest więc moc soczewki potrzebnej do utworzenia obrazu dna oka w tej odległości, w której znajduje się oko badającego.

Do przeprowadzenia badania refrakcji metodą skiaskopii potrzebne są:

- kaseta soczewek próbnych wraz z oprawą lub tzw. linijki do skiaskopii, w które wprawione są sferyczne soczewki próbne (rys. 5.1),
- płaski wziernik, czyli okrągłe lustro o średnicy około 20 mm z otworem w środku (rys. 5.1), lub skiaskop (rys. 5.2).



Rysunek 5.1. Lusterko i linijka do skioskopii

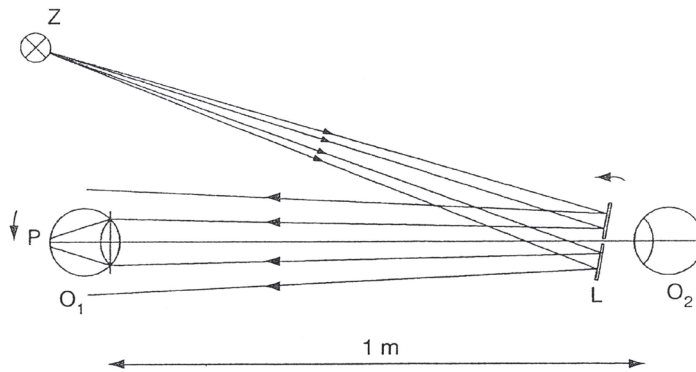


Z – źródło światła; S – soczewka kondensatora; L – zwierciadło; O – oko badanego; P – plama świetlna na siatkówce.

Rysunek 5.2. Schemat budowy skioskopu

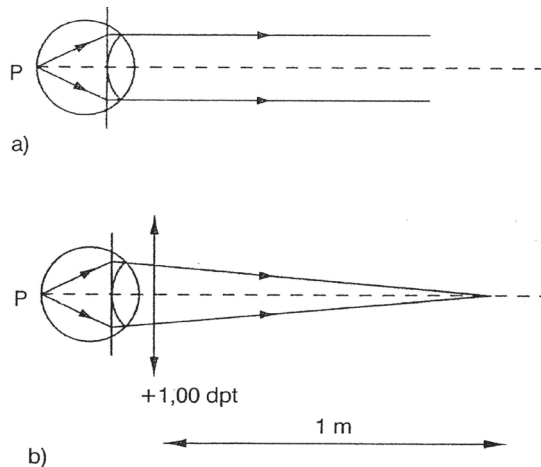
Obserwując przez otworek lusterka (lub zwierciadła skioskopu) badane oko, badający kieruje z odległości 1 m nieco rozbieżną wiązkę światła na dno oka badanego, gdzie tworzy się plama świetlna (rys. 5.3). Plamę tę można traktować jako nowe źródło światła wracającego do oka badającego. Właśnie na podstawie

obserwacji tego refleksu z dna oka można określić refrakcję oka badanego. Jeżeli oko jest miarowe, wychodząca z oka wiązka światła jest równoległa (rys. 5.4). Dla oka krótkowzrocznego wiązka będzie zbieżna (rys. 5.5), a dla oka nadwzrocznego – rozbieżna (rys. 5.6).

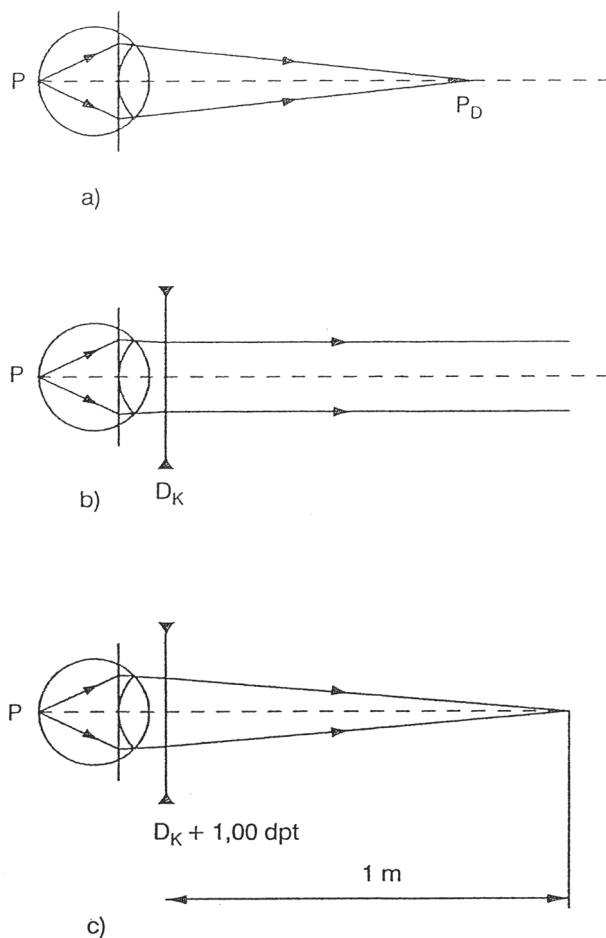


O_1 – oko badanego; O_2 – oko badającego; P – plama świetlna na siatkówce; L – lusterko; Z – źródło światła.

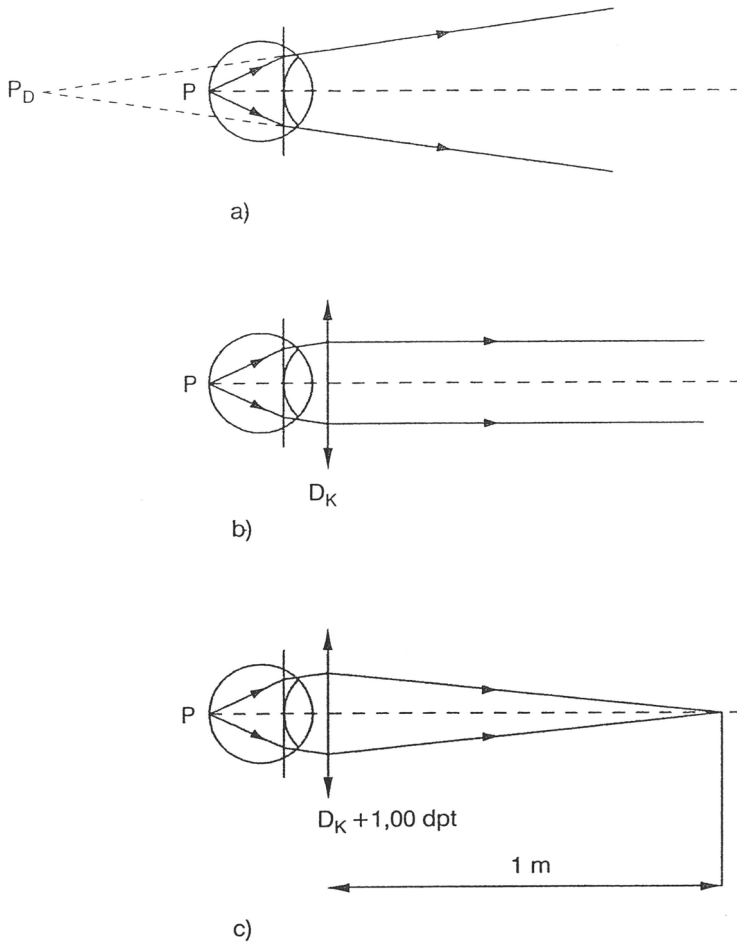
Rysunek 5.3. Skiaskopia. Badający kieruje z odległości 1 m nieco rozbieżną wiązkę światła na dno badanego oka. Kierunek ruchu plamki na siatkówce jest zgodny z kierunkiem lusterka



Rysunek 5.4. Skiaskopia – oko miarowe. W przypadku oka miarowego obraz plamy świetlnej P z dna oka tworzy się w nieskończoności (a). Aby jej obraz utworzył się w odległości 1 m, przed oko należy wstawić soczewkę +1,00 dpt (b)



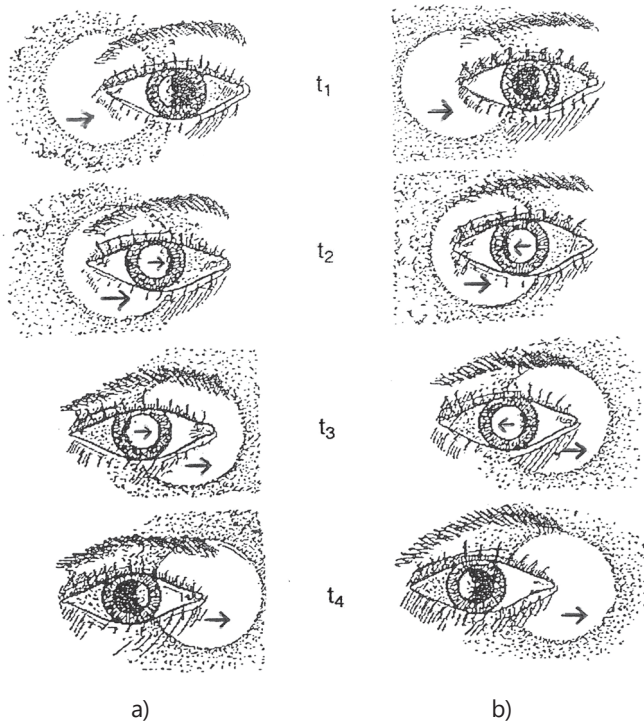
Rysunek 5.5. Skiaskopia – oko krótkowzroczne. W przypadku oka krótkowzrocznego obraz płamy świetlnej P z dna oka tworzy się w punkcie dalekim P_D przed okiem i jest obrazem rzeczywistym (a). Wstawienie przed badane oko ujemnej soczewki korygującej o mocy D_K spowoduje utworzenie obrazu płamy P w nieskończoności (b), natomiast soczewka o mocy $D_K + 1 \text{ dpt}$ utworzy obraz płamy P w odległości 1 m od badanego oka (c)



Rysunek 5.6. Skiaskopia – oko nadwzroczne. W przypadku nieakomodującego oka nadwzrocznego obraz plamy świetlnej P z dna oka powstaje w punkcie dalekim P_D za okiem i jest obrazem pozornym (a). Wstawienie przed badane oko dodatniej soczewki korygującej o mocy D_K spowoduje utworzenie obrazu plamy P w nieskończoności (b), natomiast soczewka o mocy $D_K + 1,00 \text{ dpt}$ daje obraz plamy P w odległości 1 m od badanego oka (c)

Badający porusza lekko lusterkiem w różnych płaszczyznach (w przekrojach poziomym, pionowym, skośnym), co powoduje ruch plamy po dnie oka. Kierunek ruchu tej plamy jest zgodny z kierunkiem ruchu lusterka (rys. 5.3). Natomiast światło odbite od dna oka, przechodząc przez jego układ optyczny, utworzy obraz

plamy świetlnej z dna oka w różnej odległości od oka, co zależy od jego refrakcji. Przy rozluźnionej akomodacji obraz plamy świetlnej z dna oka powstanie oczywiście w punkcie dalekim. Zwykle skioskopię wykonuje się metodą statyczną, to znaczy w warunkach wyłączonej akomodacji. Badanie to należy przeprowadzać w zaciemnionym pomieszczeniu. Badany patrzy w dal, obok głowy badającego. Wskazane jest umieszczenie naprzeciw badanego w odległości 5–6 m słabo świecącego punktu fiksacyjnego. Poruszając lusterkiem (skioskopem) z odległości pomiarowej (zwykle 1 m), badający obserwuje przez otworek zgodność lub niezgodność poruszania się w obszarze źrenicy refleksu z dna z kierunkiem ruchu światła rzutowanego na oko (rys. 5.7).



Rysunek 5.7. Skioskopia – położenie refleksu. Obserwując przez otworek w lusterku skioskopu badane oko, badający stwierdza zgodność (a) lub niezgodność (b) kierunku poruszania się refleksu z dna oka z kierunkiem ruchu światła rzutowanego na oko. Na rysunku przedstawiono położenie refleksu w kolejnych chwilach $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$

W przypadkach miarowości, nadwzroczności, a także krótkowzroczności mniejszej niż $-1,00$ dpt refleks z dna porusza się w źrenicy zgodnie z ruchem rzutowanego światła. W przypadku krótkowzroczności wyższej niż $-1,00$ dpt odbłask z dna oka w obszarze źrenicy porusza się przeciwnie do kierunku ruchu wiązki światła padającego na oko. Natomiast w przypadku krótkowzroczności $-1,00$ dpt światło skierowane lusterkiem skiaskopu do oka po odbiciu od siatkówki zostaje skupione w źrenicy badającego. Badający zauważy wtedy, że cała źrenica badanego oka wypełniła się równomiernie światłem i ruch refleksu w obrębie źrenicy nie występuje. Stan taki nazywa się neutralizacją. Istota techniki skiaskopii polega zatem na określeniu takiej mocy D_S soczewki próbnej umieszczonej przed badanym okiem, przy której obraz plamy świetlnej z dna tego oka zostanie utworzony w odległości pomiarowej 1 m, czyli w obszarze źrenicy badającego (a ściślej biorąc w otworze lusterka). Sprowadzenie obrazu siatkówki oka badanego na odległość pomiarową manifestuje się nagłym wypełnieniem światłem jego źrenicy.

Przy odległości badania 1 m moc D_K soczewki korygującej wadę wynosi:

$$D_K = D_S - 1 \quad (5.1)$$

Jednak odległość badania 1 m nie zawsze jest możliwa, zwłaszcza gdy skiaskopię wykonuje się przy użyciu linijek (u dzieci). Wtedy odległość a pomiędzy badanym i badającym jest mniejsza ($a < 1$ m).

Dlatego ostatecznie:

$$D_K = D_S - \frac{1}{a} \quad (5.2)$$

gdzie: D_K – moc soczewki korygującej wadę refrakcji,

D_S – moc soczewki neutralizującej,

a – odległość pomiędzy okiem badanego i okiem badającego.

Przykład 40

Przy odległości badania 1 m badający stwierdził zanik ruchu plamy świetlnej w źrenicy i wypełnienie się jej światłem przy mocy soczewki neutralizującej $D_S = +3,50$ dpt.

Refrakcja oka wynosi:

$$D_K = D_S - \frac{1}{a} = +3,50 - \frac{1}{1} = +2,50 \text{ dpt.}$$

Przykład 41

Przy odległości badania 1 m moc soczewki neutralizującej wynosi $D_S = +1,00$ dpt. Oko jest miarowe, gdyż:

$$D_K = D_S - \frac{1}{a} = +1,00 - \frac{1}{1} = 0.$$

Przykład 42

Przy wykonywaniu skiaskopii z odległości 50 cm uzyskano neutralizację za pomocą soczewki $D_S = -1,50$ dpt.

Refrakcja oka wynosi:

$$D_K = D_S - \frac{1}{a} = -1,50 - \frac{1}{0,5} = -1,50 - 2,00 = -3,50 \text{ dpt.}$$

Przykład 43

Przy odległości badania $a = 67 \text{ cm} = 0,67 \text{ m}$ neutralizacja wystąpiła przy soczewce $D_S = +0,50$ dpt.

Refrakcja oka wynosi:

$$D_K = D_S - \frac{1}{a} = +0,50 - \frac{1}{0,67} = +0,50 - 1,50 = -1,00 \text{ dpt.}$$

Przykład 44

Wykonując skiaskopię w odległości $a = 67 \text{ cm}$, uzyskano neutralizację w przekroju pionowym $D_{SI} = -0,50$ dpt i poziomym $D_{SII} = +1,00$ dpt.

Badane oko jest obarczone astygmatyzmem, a refrakcja w przekroju pionowym i poziomym wynosi odpowiednio:

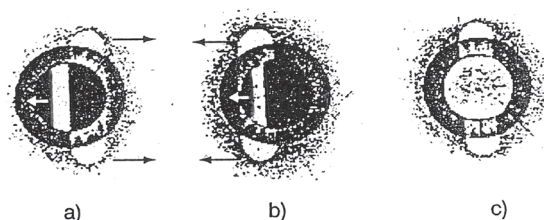
$$D_{KI} = D_{SI} - \frac{1}{a} = -0,50 - \frac{1}{0,67} = -2,00, \quad D_{KII} = D_{SII} - \frac{1}{a} = +1,00 - \frac{1}{0,67} = -0,50.$$

W tym przypadku wynik badania refrakcji można przedstawić następująco:

$$\begin{array}{c} -2,00 \\ \perp -0,50. \end{array}$$

Moc soczewki korygującej wynosi: $-0,50/-1,50 \times 180 (-2,00/+1,50 \times 90)$.

Badanie refrakcji należy prowadzić w warunkach wyłączonej akomodacji, a więc badany powinien obserwować dostatecznie odległy punkt fiksacji. U dzieci konieczne jest farmakologiczne porażenie akomodacji, a więc skiaskopię należy przeprowadzić po zakropleniu odpowiednich preparatów, takich jak atropina lub tropikamid. Istotnym ułatwieniem badania refrakcji metodą skiaskopii jest zastosowanie skiaskopu szczelinowego (prążkowego, rys. 5.8).



Rysunek 5.8. Skiaskopia z odległości 67 cm przy użyciu skiaskopu prążkowego: a) oko krótkowzroczne (krótkowzroczność wyższa niż $-1,5$ dpt); b) oko nadwzroczne, miarowe lub krótkowzroczność niższa niż $-1,5$ dpt; c) neutralizacja, czyli wypełnienie źrenicy światłem przy krótkowzroczności równej $-1,5$ dpt lub przy odpowiedniej soczewce neutralizującej

Skiaskop prążkowy jest szczególnie przydatny przy badaniu oka astygmatycznego, gdyż umożliwia szybkie określenie położenia przekrojów głównych i refrakcji w tych przekrojach. Można to wykonać na dwa sposoby:

- stosując tylko próbne soczewki sferyczne (np. w linijkach do skiaskopii),
- stosując soczewki sferyczne i cylindryczne (w oprawkach próbnych lub w foropterze).

Niekiedy, zwłaszcza dla oceny możliwości akomodacyjnych oka, skiaskopię przeprowadza się metodą dynamiczną. Różni się ona od metody statycznej tym, że w trakcie badania oko akomoduje, patrząc na blisko położone punkty. Skiaskopia dynamiczna jest przydatna w badaniu zaburzeń akomodacji.

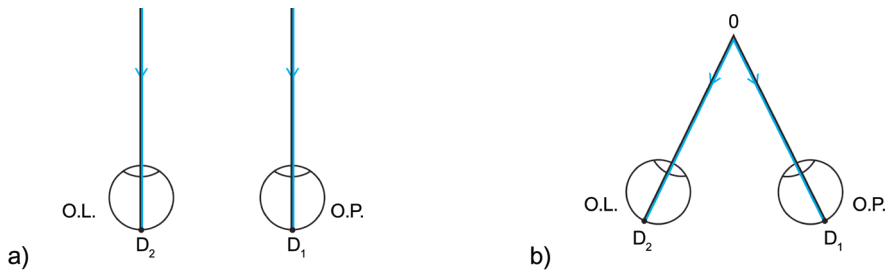
5.2. Refraktometria

Refraktometria to pomiar refrakcji za pomocą odpowiedniego aparatu. Obecnie stosowane są autorefraktometry, czyli refraktometry automatyczne, w których

wykorzystuje się różne rozwiązania optyczne, elektroniczne i optometryczne. W autorefraktometrach stosuje się promieniowanie podczerwone (ok. 880 nm), dzięki czemu unika się oślnienia badanego. Budowa tych aparatów jest złożona, a zasada działania różna, zależnie od producenta. Znaczna część tych urządzeń wykorzystuje metodę skiaskopii. Obsługa autorefraktometru nie wymaga wiedzy specjalistycznej. Po ustawieniu głowy badanego na odpowiedniej podpórce następuje justowanie, badany widzi obraz, który utrzymuje fiksację do dali. Po naciśnięciu odpowiedniego przycisku następuje pomiar, a po kilku sekundach wydruk jego wyniku. Liczba refraktometrów automatycznych stosowanych przez okulistów, optometrystów i optyków wzrasta, gdyż autorefraktometria stała się alternatywną metodą wobec innych metod przedmiotowych, a zwłaszcza skiaskopii, niemniej nie powinna być traktowana jako metoda dająca ostateczny wynik, na podstawie którego wykonuje się okulary. Jedynie w przypadku dzieci i osób niewspółpracujących z badającym uzasadnione jest wykonanie okularów na podstawie wyniku autorefraktometrii (lub skiaskopii) z pominięciem badania podmiotowego.

6. Korekcja pryzmatyczna

Korekcja okularowa dotyczy przede wszystkim wad refrakcji i prezbiopii. Jednak w przypadkach zaburzeń widzenia obuocznego, takich jak zez towarzyszący (zwykle u dzieci) lub zez porażenny (najczęściej u starszych osób), a także w niektórych przypadkach heteroforii (zez ukryty), występuje potrzeba korekcji pryzmatycznej. Wtedy korekcja okularowa może być określona przez sferę, cylinder i pryzmat. W warunkach prawidłowych obraz oglądanego przedmiotu tworzy się jednocześnie w dołku płamki obu oczu: przy patrzeniu w dal osie widzenia są równoległe, przy patrzeniu z bliska przecinają się w obserwowanym punkcie (punkcie fiksacji).



O.P. – oko prawe; O.L. – oko lewe; D_1 – dołek płamki oka prawego; D_2 – dołek płamki oka lewego; O – punkt fiksacji.

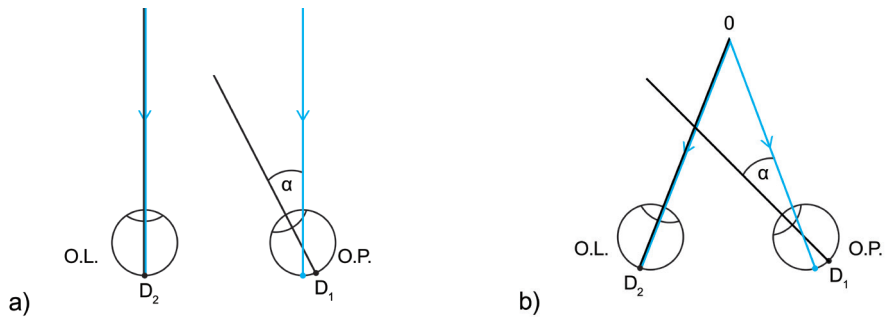
Rysunek 6.1. Prawidłowe ustawienie osi widzenia do dali (a) i do bliży (b) w płaszczyźnie poziomej (horyzontalnej)

W zezie oczu są tak ustawione, że obraz obserwowanego obiektu powstaje w dołku płamki jednego oka, a drugie jest w odchyleniu, czyli zez to anomalia widzenia obuocznego, przy której stale lub naprzemiennie oś widzenia jednego oka jest

skierowana na fiksovany obiekt. Oś widzenia drugiego oka (zezującego) może być odchylona względem osi oka fiksującego:

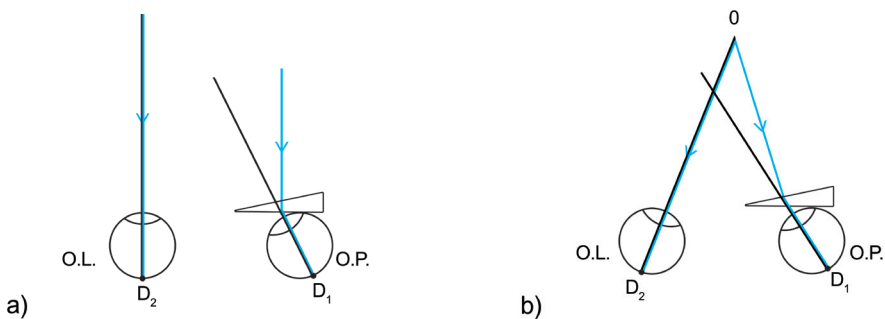
- w płaszczyźnie horyzontalnej (poziomej) zbieżnie lub rozbieżnie,
- w płaszczyźnie wertykalnej (pionowej) rozbieżnie,
- skośnie.

Właśnie w takich stanach pojawia się potrzeba zastosowania pryzmatu.



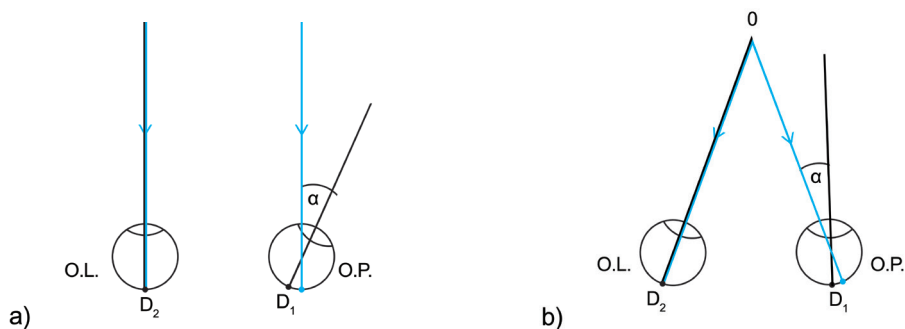
O.P. – oko prawe; O.L. – oko lewe; D₁ – dołek plamki oka prawego; D₂ – dołek plamki oka lewego; O – punkt fiksacji; α – kąt zezu.

Rysunek 6.2. Zez zbieżny (ezotropia) oka prawego przy patrzeniu w dal (a) i na bliski punkt fiksacji (b) w płaszczyźnie poziomej (horyzontalnej). W zezującym oku prawym obraz obserwowanego punktu jest położony nosowo względem dołka plamki



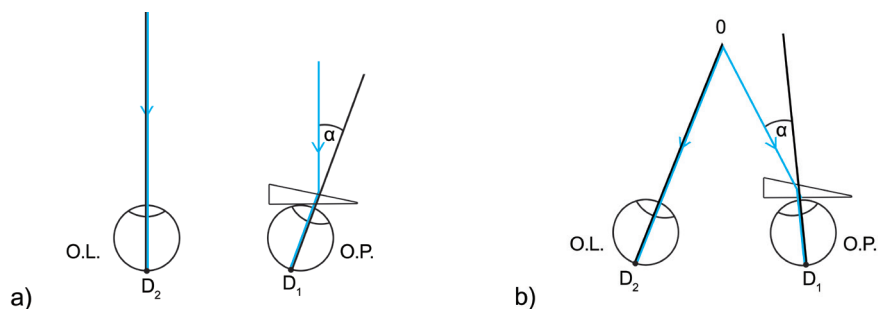
O.P. – oko prawe; O.L. – oko lewe; D₁ – dołek plamki oka prawego; D₂ – dołek plamki oka lewego; O – punkt fiksacji; α – kąt zezu.

Rysunek 6.3. Korekcja przyzmatyczna zezu zbieżnego (pryzmat baza skroń) przy patrzeniu w dal (a) i na bliski punkt fiksacji (b) w płaszczyźnie poziomej (horyzontalnej). Dzięki pryzmatowi, mimo nieprawidłowego ustawienia oka prawego, obraz obserwowanego przedmiotu jest utworzony jednocześnie w dołku plamki obu oczu



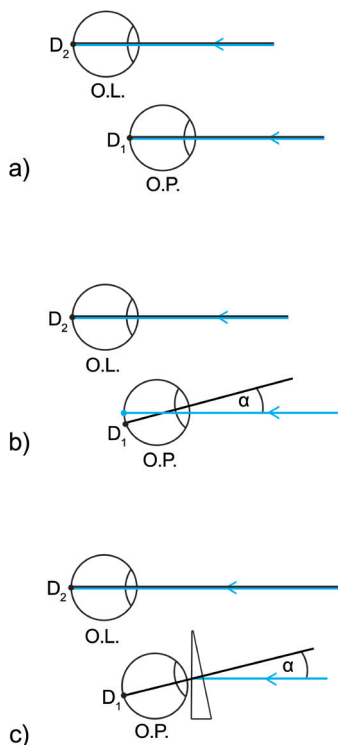
O.P. – oko prawe; O.L. – oko lewe; D₁ – dołek plamki oka prawego; D₂ – dołek plamki oka lewego; O – punkt fiksacji; α – kąt zezu.

Rysunek 6.4. Zez rozbieżny (egzotropia) oka prawego przy patrzeniu w dal (a) i na bliski punkt fiksacji (b) w płaszczyźnie poziomej (horyzontalnej). W zezującym oku prawym obraz obserwowanego przedmiotu jest położony skroniowo względem dołka plamki



O.P. – oko prawe; O.L. – oko lewe; D₁ – dołek plamki oka prawego; D₂ – dołek plamki oka lewego; O – punkt fiksacji; α – kąt zezu.

Rysunek 6.5. Korekcja pryzmatyczna zezu rozbieżnego (pryzmat baza nos). Dzięki pryzmatowi obraz obserwowanego przedmiotu jest utworzony jednocześnie w dołku plamki dwojga oczu mimo nieprawidłowego ustawienia oka prawego

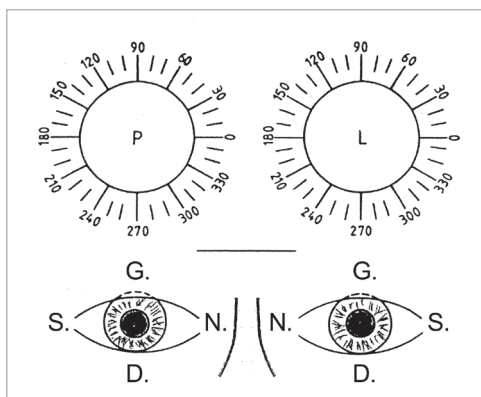


O.P. – oko prawe; O.L. – oko lewe; D₁ – dołek plamki oka prawego; D₂ – dołek plamki oka lewego; O – punkt fiksacji; α – kąt zez.

Rysunek 6.6. Zez ku górze (hipertropia) oka prawego w płaszczyźnie pionowej (wertykalnej): a) ustawienie oczu prawidłowe; b) w zezującym ku górze oku prawym obraz obserwowanego przedmiotu tworzy się powyżej dołka plamki; c) dzięki pryzmatowi (baza dół) obraz obserwowanego przedmiotu tworzy się jednocześnie w dołku plamki dwojga oczu

Głównym celem korekcji pryzmatycznej jest wtedy utworzenie obrazu obserwowanego przedmiotu jednocześnie w dołku plamki obu oczu mimo ich nieprawidłowego ustawienia. U dzieci z zezem towarzyszącym korekcja pryzmatyczna jest potrzebna dla rozwoju prawidłowego widzenia obuocznego: jednoczesnej percepcji, fuzji, stereopsji. U osób z zezem porażennym korekcja pryzmatyczna pozwala na wyeliminowanie widzenia podwójnego. W przypadku zalecenia korekcji pryzmatycznej na receptie okularowej podaje się (oprócz sfery i cylindra) moc pryzmatu i kierunek przekroju głównego pryzmatu (prostopadłego do jego

krawędzi i podstawy) przez określenie położenia podstawy. Należy wtedy stosować pełny schemat kątomierza TABO (rys. 6.7).



Rysunek 6.7. Pełna podziałka kątomierza TABO

Dlatego stosowany jest następujący sposób zapisu:

Dla oka prawego (O.P.):

pryzmat baza skroń:	BS lub B180
pryzmat baza nos:	BN lub B0
pryzmat baza góra:	BG lub B90
pryzmat baza dół:	BD lub B270

Dla oka lewego (O.L.):

pryzmat baza skroń:	BS lub B0
pryzmat baza nos:	BN lub B180
pryzmat baza góra:	BG lub B90
pryzmat baza dół:	BD lub B270

Zwykle pryzmat rozdzielany jest równomiernie na dwoje oczu.

Przykład 45

Zez zbieżny oka prawego. Kąt zeza $\alpha = 8^\circ$.

Moc pryzmatu korygującego $\Delta = 1,75 \alpha = 1,75 \cdot 8 = 14$ pdpt.

Pryzmat można rozdzielić na dwoje oczu, a więc po 7 pdpt BS na każde oko.

Przykład 46

Zez oka prawego ku górze. Kąt zeza $\alpha = 7^\circ$.

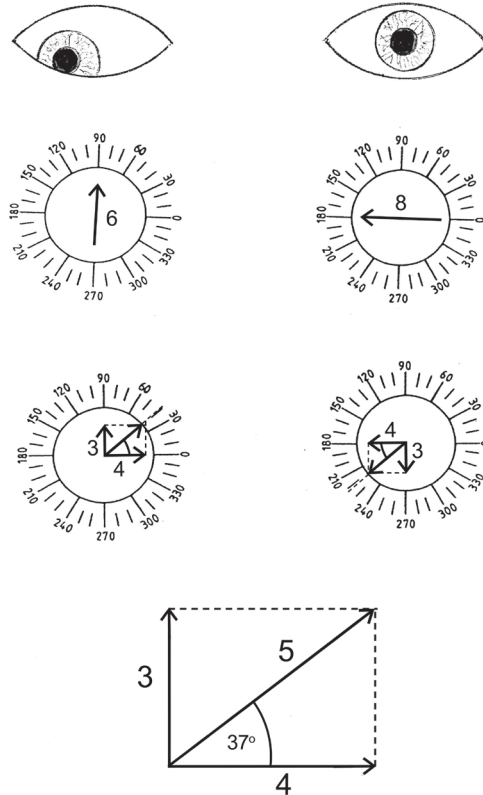
Moc pryzmatu korygującego $\Delta = 1,75$ $\alpha = 1,75 \cdot 7 \approx 12$ pdpt.

Pryzmat można rozdzielić na dwoje oczu, czyli po 6 pdpt na każde oko:

O.P. 6 pdpt BD, O.L. 6 pdpt BG.

Przykład 47

Porażenie nerwu okoruchowego (n. III) prawego. W rezultacie przewagi mięśnia prostego bocznego i mięśnia skośnego górnego oko prawe odchyła się do skroni i ku dołowi (rys. 6.8), a u pacjenta występuje widzenie podwójne (diplopia).



Rysunek 6.8. Zez skośny oka prawego i jego korekcja pryzmatyczna (przykład)

Dwojenie przy patrzeniu na wprost ustępuje, gdy stosuje się pryzmaty:

O.P. 6 pdpt BG, O.L. 8 pdpt BN.

Powyższą korekcję pryzmatyczną można rozdzielić równomiernie na dwoje oczu i wówczas korekcja pryzmatyczna eliminująca podwójne widzenie przy patrzeniu na wprost wynosi:

O.P. 5 pdpt B37°, O.L. 5 dpt B217°.

Jak widać na rysunku 6.8, wartości mocy pryzmatów, a także położenie bazy można określić prostą metodą graficzną przez pomiar mocy wypadkowej i wartości odpowiedniego kąta (kątomierzem). Oczywiście odpowiednie wartości mocy wypadkowej pryzmatów można także łatwo wyliczyć, posługując się twierdzeniem Pitagorasa, a położenie bazy określić, uwzględniając, że $3/4 = 0,75$ jest wartością tangensa dla kąta 37° . Należy także pamiętać, że istnieje możliwość wywołania niedużego pryzmatycznego działania soczewki sferycznej poprzez jej decentrację (przykład 13).

Tradycyjny podział zezu zakłada istnienie trzech jego postaci:

- zez towarzyszący,
- zez porażenny,
- zez ukryty, czyli heteroforia.

W heteroforii nie obserwuje się na ogół łatwo dostrzegalnego odchylenia osi widzenia od prawidłowego położenia (ortopozycji), gdyż układ wzrokowy dysponuje mechanizmem kompensującym występującą tendencję do nieprawidłowego ustawiania osi widzenia. Tym mechanizmem jest fuzja, która przymusza heteroforyczną parę oczu do prawidłowego ustawienia, zapewniającego pojedyncze widzenie obuoczne. Dlatego aby ujawnić heteroforię, należy wykonać badanie w warunkach wyeliminowanej fuzji. Prosty sposób wyeliminowania fuzji jest zasłonięcie jednego oka. Właśnie ten sposób wykorzystuje test naprzemiennego zasłaniania (*cover test*). Podczas testu badany patrzy prosto przed siebie (w dal) lub na punkt fiksacji (w bliży), a badający nieprzeźroczystą zasłonką przykrywa na przemian prawe i lewe oko. Jeżeli gałki oczne nie zmieniają ustawienia i nie wykonują ruchów nastawczych, mamy do czynienia z ortoforią. Natomiast jeśli po odsłonięciu oka wykonuje ruch nastawczy, z położenia spoczynkowego do prawidłowego (do ortopozycji), oznacza to, że występuje heteroforia.

Heteroforia dotyczy pary oczu, więc po zakryciu każde oko ma tendencję do zbaczania do pozycji spoczynkowej. Jeżeli zasłonić oko (aby wyeliminować fuzję),

to w nieprawidłowe ustawienie zbacza oczywiście tylko oko zasłonięte, a drugie utrzymuje prawidłową fiksację. Kąt odchylenia przykrytego oka od prawidłowej pozycji nazywa się forią.

Rozróżniamy:

1. Heteroforie horyzontalne, czyli przeciwstawne poziome odchylenia osi widzenia:
 - ezoforia – odchylenie do nosa,
 - egzoforia – odchylenie do skroni.
2. Heteroforie wertykalne, czyli przeciwstawne pionowe odchylenia osi widzenia:
 - heteroforia wertykalna dodatnia – odchylenie oka prawego ku górze (hiperforia), oka lewego ku dołowi (hipoforia),
 - heteroforia wertykalna ujemna – odchylenie oka prawego ku dołowi (hipoforia), oka lewego ku górze (hiperforia).
3. Cykloforie – przeciwstawne obroty:
 - incykloforia – obrót oczu do wewnątrz,
 - ekscykloforia – obrót oczu na zewnątrz.

Istnienie ortoforii do dali nie gwarantuje ortoforii do bliży. Również występowanie heteroforii do dali nie wyklucza ortoforii do bliży. W znacznej części przypadków heteroforii mamy do czynienia z jej kompensacją przez fuzję, dzięki której nie występują dolegliwości. Jednak u osób z heteroforią wymagającą znacznego i trwałego natężenia fuzji może się pojawiać astenopia, czyli zespół objawów takich jak bóle głowy, zamazywanie obrazu, okresowe dwojenie, pieczenie oczu, uczucie zmęczenia. Część przypadków heteroforii wymaga korekcji pryzmatycznej (np. heteroforia wertykalna), w innych korekcję pryzmatyczną można zastąpić ćwiczeniami (np. egzoforia do bliży) lub odpowiednim dodatkiem sferycznym do bliży (ezoforia do bliży).

Obecnie istniejące testy i metody (test Maddoxa, test Schobera, testy Haasego, test Malletta, metoda analityczna i inne) pozwalają na stwierdzenie heteroforii, pomiar forii, a także określenie należytnej korekcji pryzmatycznej. Wyboru i realizacji najkorzystniejszej dla pacjenta metody korekcji heteroforii i innych zaburzeń widzenia obuocznego może dokonać tylko doświadczony okulista czy optometrysta – przy dobrej współpracy z profesjonalnym optykiem.

7. Szczególne problemy optyki okularowej

7.1. Korekcja krótkowzroczności

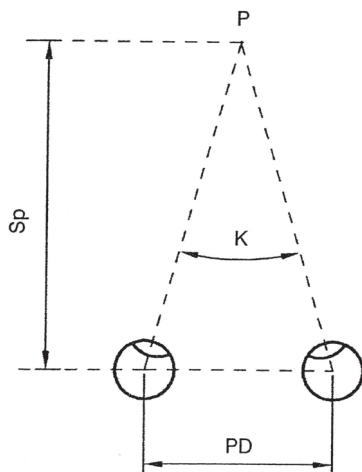
Krótkowzroczność jest uważana za jedną z głównych przyczyn upośledzenia widzenia. Występuje na całym świecie i może dotyczyć osób w każdym wieku. W ostatnich dziesięcioleciach stwierdza się wzrost częstości występowania krótkowzroczności, w szczególności u młodzieży w wieku szkolnym. Krótkowzroczność jest na ogół uwarunkowana genetycznie. Wskazuje na to zróżnicowanie częstości jej występowania w różnych regionach świata (największa w krajach Azji Wschodniej), a także występowanie rodzinne. Krótkowzroczność u znacznej części pacjentów ma charakter postępujący. Okuliści mają świadomość nie tylko genetycznego uwarunkowania krótkowzroczności, lecz także wpływu czynników środowiskowych. Dlatego od dziesięcioleci poszukują optymalnego sposobu korekcji, który zapewni odpowiedni komfort widzenia, a jednocześnie będzie hamował postępowanie tej wady. Wysoka krótkowzroczność jest prawie zawsze związana z nadmierną długością gałki ocznej. Aby w pełni skorygować krótkowzroczność, należy zastosować najsłabszą soczewkę ujemną, która zapewnia najlepszą ostrość wzroku. Wtedy tak skorygowane oko patrzące w dal nie powinno akomodować, natomiast akomoduje, patrząc na przedmioty położone blisko – tym bardziej, im bliżej oka znajduje się obserwowany przedmiot.

W latach 50. i 60. ubiegłego stulecia podkreślano istnienie związku pomiędzy krótkowzrocznością a pracą z bliska. Wskazywano na nadmierną akomodację jako przyczynę krótkowzroczności, zwłaszcza u młodzieży szkolnej. Z tego okresu pochodzi pogląd, że korekcję okularową u młodych krótkowidzów należy stosować rozważnie. Okuliści dość często stosowali niedokorygowanie, bo skoro krótkowzroczność jest odpowiedzią akomodacyjną, to zastosowanie niepełnej

korekcji soczewkami minusowymi wydaje się korzystne, gdyż zmniejsza tę akomodację. Późniejsze badania ujawniły jednak nieskuteczność takiego postępowania. Wykazano, że u młodych krótkowidzów niedokorygowanych wada na ogół postępowała szybciej niż u osób z pełną korekcją. Należy zatem dążyć do pełnej korekcji krótkowzroczności, przy czym dotyczy to zarówno sfery, jak i cylindra. W przypadkach dużej dynamiki postępowania krótkowzroczności (1dpt w ciągu roku) można zastosować odpowiedni dodatek do bliży (2 dpt), najlepiej w okularach progresywnych. Obecnie nie istnieje skuteczne leczenie farmakologiczne hamujące postępowanie krótkowzroczności. Natomiast warto zachęcać dzieci i młodzież do częstszego przebywania na dworze przy dobrym nasłonecznieniu. U osób obarczonych krótkowzrocznością częściej występują jaskra i zmiany zwyrodnieniowe siatkówki, które mogą prowadzić do jej odwarstwienia, stąd potrzeba okresowych badań okulistycznych tych pacjentów.

7.2. Korekcja nadwzroczności

Na ogół przyjmuje się, że nadwzroczność podobnie jak krótkowzroczność jest uwarunkowana genetycznie. Z biofizycznego punktu widzenia istota obu tych wad polega na niedostosowaniu mocy układu optycznego oka do długości osi gałki ocznej. W oku krótkowzrocznym moc ta jest zbyt duża, w oku nadwzrocznym zbyt mała. Aby w pełni skorygować nadwzroczność, należy zastosować najsilniejszą soczewkę dodatnią, przy której oko osiąga najwyższą ostrość wzroku. U większości niemowląt, a także małych dzieci stwierdza się niewielką nadwzroczność mieszczącą się w przedziale od +1,00 do +1,50 dpt. Przy tej wielkości refrakcji nadwzroczność na ogół nie wymaga korekcji, gdyż w rezultacie dalszego rozwoju oko staje się miarowe. Mówimy wtedy o fizjologicznym procesie emmetropizacji, czyli umiarowieniu. Jednak u niektórych dzieci wada nadwzroczności może być większa, nierzadko różna w oku prawym i lewym (różnowzroczność, czyli anizometropia), niekiedy skojarzona z astygmatyzmem, a ponadto emmetropizacja w oczach tych nie zachodzi. Brak korekcji w takich warunkach wiąże się ze znacznie nasiloną akomodacją, a to może powodować zaburzenia widzenia obuocznego w postaci zezu, zwłaszcza zezu akomodacyjnego. W warunkach prawidłowych (ortoforia) osie widzenia przecinają się w punkcie fiksacji, a przy patrzeniu w dal są równoległe. Zbieżność osi widzenia przy obserwacji obuocznej określa kąt zwany konwergencją K (rys. 7.1).



Rysunek 7.1. Kąt konwergencji pomiędzy osiami widzenia przecinającymi się w punkcie fiksacji P

Wartość kąta konwergencji K wyrażona w dioptriach pryzmatycznych wynosi:

$$K = \frac{PD}{s_p} \quad (7.1)$$

gdzie: PD – odległość pomiędzy środkami obrotu oczu, czyli rozstaw źrenic do dali wyrażony w centymetrach,
 s_p – odległość punktu fiksacji wyrażona w metrach.

Przy zbliżaniu obserwowanego punktu P akomodacja A_p i konwergencja K rosną. Zależność pomiędzy akomodacją A_p a odległością s_p punktu fiksacji można zapisać:

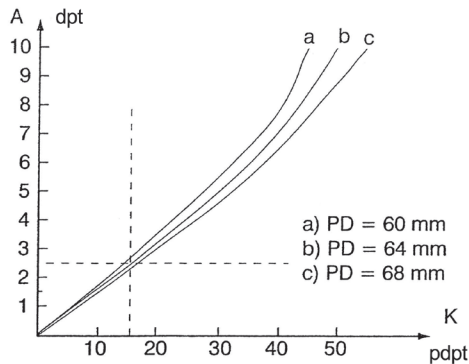
$$A_p = R - \frac{1}{s_p} \quad (7.2)$$

gdzie R oznacza refrakcję oka.

Dla oka miarowego lub skorygowanego należy przyjąć $R = 0$ i wtedy:

$$A_p = \frac{K}{PD} \quad (7.3)$$

Przybliżoną zależność między akomodacją a konwergencją można przedstawić jako linię prostą. W rzeczywistości zależność ta nie jest dokładnie liniowa (rys. 7.2).



Rysunek 7.2. Zależność między akomodacją a konwergencją

Zależność między akomodacją a konwergencją po raz pierwszy przedstawił Donders, stąd wykres ten jest nazywany linią Dondersa. Stosunek konwergencji akomodacyjnej do akomodacji nazywany jest ułamkiem AC/A (ACA). Jak widać z linii Dondersa, jego średnia wartość w warunkach prawidłowych wynosi:

$$ACA = \frac{K}{A} = 6 \frac{\text{pdpt}}{\text{dpt}} \quad (7.4)$$

Oznacza to, że w warunkach prawidłowych zmiana akomodacji o 1 dpt wywołuje zmianę konwergencji o 6 pdpt. W stanach zaburzonej relacji pomiędzy akomodacją i konwergencją ułamek ten może być większy (ezoforia, zez zbieżny) lub mniejszy (egzoforia, zez rozbieżny). Zależność między akomodacją a konwergencją można zmienić, stosując soczewki sferyczne lub pryzmaty. Soczewki dodatnie hamują akomodację, natomiast soczewki ujemne ją pobudzają. Pryzmaty ustawione bazami do skroni pobudzają konwergencję, a ustawione bazami do nosa hamują ją. Jak wynika z powyższego, odpowiednia korekcja nadwzroczności dziecięcej może być bardziej skomplikowana niż korekcja krótkowzroczności. Dzieci ze znaczną nadwzrocznością ($R > 5,00$ dpt) mimo należytej korekcji mogą mieć często gorszą ostrość wzroku niż skorygowane dzieci krótkowzroczne. Jeżeli zez nie występuje, to nawet znaczna nadwzroczność nierzadko pozostaje długo niewykryta i nieskorygowana. Dzieci w wieku przedszkolnym nie skarżą się na słabe widzenie ze względu na ich dużą amplitudę akomodacji, która

pozwała na kompensowanie nadwzroczności. A ponadto jeśli nadwzroczności nie towarzyszy astygmatyzm, proste badanie przesiewowe polegające na sprawdzaniu ostrości wzroku pierwszoklasistów przez szkolną higienistkę również nie wykazuje gorszej ostrości wzroku. Dzieje się tak dlatego, że nadwzroczność jest skompensowana przez akomodację i dlatego mówimy o ukrytej nadwzroczności oraz skurczu akomodacyjnym. Dzieci z niewykrytą i nieskorygowaną nadwzrocznością mają problemy z czytaniem i pisanem, co może powodować gorsze wyniki w nauce. Jeśli nadwzroczności towarzyszy zez (zwykle zbieżny), należy zastosować pełną korekcję wady, niekiedy z pryzmatem, a także dodatkiem do bliży. W oku zezującym występuje często niedowidzenie, które wymaga zaślania oka prowadzącego. Leczenie zezu ma na celu uzyskanie pełnej ostrości wzroku dwójga oczu przy ich prawidłowym ustawieniu, jednoczesnej percepcji, fuzji i stereopsji. Wymaga to zastosowania odpowiedniego programu ćwiczeń ortoptycznych, a w uzasadnionych przypadkach operacji. Bez względu na rodzaj wady badanie refrakcji u dzieci musi być przeprowadzone w stanie porażenia akomodacji (cykloplegii).

7.3. Odległość wierzchołkowa

Odległość wierzchołkowa VD (*vertex distance*) to odległość między wierzchołkiem rogówki a tylną powierzchnią soczewki okularowej. Przy wadach refrakcji większych niż $\pm 5,00$ dpt ($|R| > 5,00$ dpt) należy przy zapisywaniu korekcji okularowej uwzględnić odległość wierzchołkową. Recepta okularowa dla pacjenta z wysokimi wartościami refrakcji powinna zawierać nie tylko wartości określające sferę i cylinder, lecz także odległość wierzchołkową, przy której zostały one określone. Optyk wykonujący okulary musi niekiedy przeliczyć moc soczewek, gdy odległość wierzchołkowa właściwa dla wybranej przez klienta oprawy będzie różna od tej, przy której określono refrakcję. W przypadku braku na recepcie wartości VD optyk powinien uściślić moc soczewki okularowej tak, aby była ona odpowiednia dla aktualnej wartości VD.

Doświadczeni okuliści, optometryści i optycy mają świadomość, że młodsze dzieci łatwo adaptują się do dobranej korekcji sfero-cylindrycznej. Dlatego tym dzieciom zapisuje się pełną korekcję astygmatyzmu w odpowiedniej osi. Natomiast dorośli, u których cylinder zastosowano po raz pierwszy, mogą odczuwać dyskomfort wynikający z dystorsji, czyli zniekształcenia spowodowanego

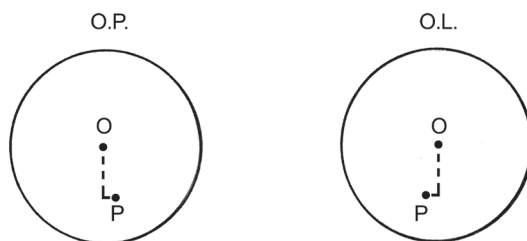
obecnością cylindra. Przed wypisaniem recepty, a także przed jej realizacją, warto pozwolić pacjentowi pospacerować w oprawie próbnej zawierającej dobrą korekcję, aby przekonać się, jak on ją akceptuje. Jeżeli zachodzi taka potrzeba, moc cylindra można zmniejszyć do wartości niewywołującej dyskomfortu. Z oczywistych powodów podczas badania refrakcji należy zadbać, aby oprawa próbna była prawidłowo osadzona. Dotyczy to odległości wierzchołkowej i rozstawu źrenic, jak również kąta pantoskopowego.

7.4. Różnowzroczność

Różnowzroczność (anizometropia) oznacza stan, w którym występują istotne różnice wartości refrakcji pomiędzy okiem prawym i lewym ($|R_1 - R_2| > 1,50$ dpt). W takich przypadkach okuliści, kierując się doświadczeniem klinicznym, starają się unikać zapisywania recepty okularowej, w której różnica mocy sferycznej między obu oczami jest większa niż 1,50 dpt. Pod koniec badania refrakcji i przy obuocznym patrzeniu na wprost (wzdłuż osi optycznej soczewek korygujących), gdy obraz tworzy się w dołku płamki obu oczu, badany z anizometropią może nie odczuwać dyskomfortu, mimo występującej anizeikonii, czyli różnej wielkości obrazów na siatkówce. Jednak gdy patrzy w różnych kierunkach, a w szczególności w bliży, może odczuwać znaczny dyskomfort – wywołany pryzmatycznym działaniem obwodu soczewki (rys. 1.32), które utrudnia fuzję, czyli łączenie obrazów z dwojga oczu w jedną całość.

Przykład 48

Różnowzroczność nadwzroczna: O.P. +1,00 dpt, O.L. +4,00 dpt.



W punkcie czytania P położonym 10 mm poniżej środka optycznego O soczewki okularowej i 2 mm przyśrodkowo (w kierunku nosa) występuje, zgodnie z wzorem Prentice'a (1.36), działanie pryzmatyczne:

- w kierunku pionowym
dla O.P. $\Delta_P = 1\text{ cm} \cdot 1\text{ dpt} = 1\text{ pdpt}$,
dla O.L. $\Delta_L = 1\text{ cm} \cdot 4\text{ dpt} = 4\text{ pdpt}$;
- w kierunku poziomym
dla O.P. $\Delta_P = 0,2\text{ cm} \cdot 1\text{ dpt} = 0,2\text{ pdpt}$,
dla O.L. $\Delta_L = 0,2\text{ cm} \cdot 4\text{ dpt} = 0,8\text{ pdpt}$.

W tym przypadku pojawia się zaburzenie ustawienia oczu (heteroforia wywołana):

- w kierunku pionowym: 3 pdpt,
- w kierunku poziomym: 1 pdpt,

czyli u osoby z anizometrią, przy czytaniu z bliska przez obszary soczewek poniżej ich środków optycznych, pojawia się heteroforia wywołana (indukowana), spowodowana różnicą odchyłeń pryzmatycznych.

Wielkość forii pionowej określa się, odejmując od większego odchylenia pryzmatycznego odchylenie mniejsze, jeśli obie soczewki korygujące są dodatnie (obustronna nadwzroczność) lub obie są ujemne (obustronna krótkowzroczność). Jeśli jednak w jednym oku występuje nadwzroczność, a w drugim krótkowzroczność (antymetropia, czyli różnowzroczność mieszana), to wielkość forii pionowej określa się przez dodanie obu odchyłeń. W celu określenia forii poziomej odpowiednie odchylenia należy dodać, gdy występuje obustronna nadwzroczność lub krótkowzroczność, a odjąć od siebie, gdy mamy do czynienia z antymetrią. Dyskomfort spowodowany heteroforią wywołaną w różnowzroczności przez korekcję okularową może się nasilać, gdy stosowane są dodatki do bliży, a więc w okularach dwuogniskowych lub progresywnych. Pacjent może odczuwać bóle głowy, okolicy łuków brwiowych, a przy czytaniu zamazywanie tekstu i dwojenie. Pacjenci zwykle adaptują się do niewielkiej heteroforii w poziomie (duży zakres fuzji w poziomie), ale dyskomfort nasila się przy patrzeniu w dół, a więc zwłaszcza przy czytaniu lub innej precyzyjnej czynności. Najprostszym rozwiązaniem tego problemu często stosowanym przez okulistów jest zredukowanie różnicy mocy soczewek przez zmniejszenie mocy dla oka obciążonego większą wadą, zwykle o niższej ostrości wzroku. Najskuteczniejsza metoda kompensowania heteroforii wywołanej przez różnowzroczność to technologia szlifowania bi-centrycznego, która likwiduje efekt pryzmatycznego działania. Innym

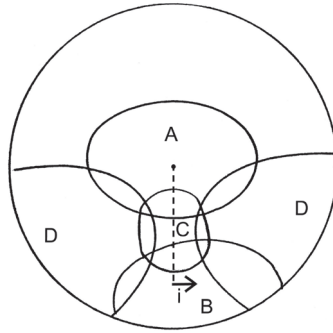
sposobem pozwalającym na pełną korekcję anizotropii jest zastosowanie soczewek kontaktowych.

7.5. Okulary progresywne

Soczewki progresywne (PAL – *progressive addition lenses*) stosowane są przede wszystkim do korekcji prezbiopii. Koncepcje konstrukcyjne soczewki progresywnej opierają się na założeniu, że realizuje ona korekcję widzenia dali, korekcję widzenia bliży, a także korekcję widzenia na odległości pośrednie, jednocześnie zapewniając estetyczny wygląd, bez wyraźnej linii podziału obszaru widzenia dali i bliży, jak to ma miejsce w soczewkach dwuogniskowych. W soczewkach dwuogniskowych, gdy przenosi się wzrok z jednego segmentu do drugiego, następuje skokowa zmiana mocy, więc obraz też zmienia się skokowo, a w obszarze linii podziału może pojawić się двоjenie. Natomiast promień krzywizny powierzchni soczewki progresywnej zmienia się w sposób ciągły od wartości wymaganej dla korekcji widzenia dali do wartości dla korekcji widzenia bliży. Ta płynna zmiana następuje wzdłuż obszaru przeznaczonego na odległości pośrednie. Głównym problemem, który musieli rozwiązać projektanci soczewek progresywnych, było określenie wielkości i wzajemnego położenia poszczególnych obszarów na powierzchni soczewki. Niezależnie od tego, czy powierzchnia progresywna jest umieszczona na powierzchni przedniej soczewki, czy na jej powierzchni tylnej lub jest rozłożona na obydwu powierzchniach, jest ona płynnym połączeniem obszaru o dłuższym promieniu krzywizny z obszarem o krótszym promieniu krzywizny.

W soczewce progresywnej wyróżniamy cztery obszary o różnej geometrii, a więc o różnych właściwościach optycznych (rys. 7.3):

- obszar widzenia dali (moc optyczna do korekcji dali),
- obszar widzenia bliży (moc optyczna do korekcji bliży),
- obszar widzenia na odległości pośrednie zwany strefą lub kanałem progresji (płynny wzrost mocy korekcji dali do mocy korekcji bliży),
- obszary peryferyjne, czyli boczne obszary soczewki progresywnej, w której występują aberracje powodujące deformację obrazu (łączą w geometryczną całość obszary o różnych promieniach krzywizny).



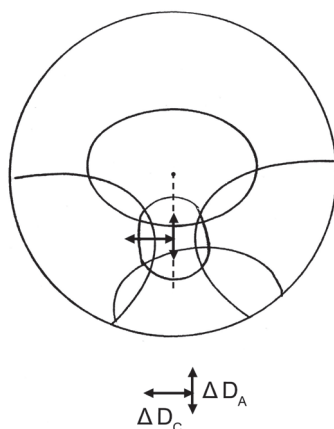
A – obszar do dali; B – obszar do bliży; C – strefa progresji; D – obszar peryferyjny; i – inset.

Rysunek 7.3. Schemat soczewki progresywnej

Danymi wejściowymi do projektu powierzchni progresywnej są szerokości obszarów widzenia dali, bliży, strefy progresji i długość strefy progresji oraz wartość przesunięcia obszaru widzenia bliży w stosunku do obszaru widzenia dali (inset).

Szerokość poszczególnych obszarów widzenia wpływa na wielkość aberracji w obszarach peryferyjnych. Im szersze obszary widzenia dali, bliży i strefy progresji, tym wyższe aberracje w obszarach peryferyjnych. Ponadto im krótsza strefa progresji, a więc szybszy wzrost mocy w strefie progresji, tym niepożądany astygmatyzm w obszarach peryferyjnych jest większy lub poszczególne obszary widzenia są węższe. Poza tym wielkość aberracji zależy od wartości dodatku do bliży (addycji). Im wyższy dodatek, tym wyższy astygmatyzm w obszarach peryferyjnych. Powyższe zależności ujmują reguła Minkwitza, która mówi, że przyrost astygmatyzmu (mocy cylindra) w kierunku poziomym ΔD_C w pewnej odległości od linii progresji jest równy dwukrotnemu wzrostowi mocy addycji ΔD_A w strefie progresji na odcinku o takiej samej długości jak przesunięcie poziome, czyli $\Delta D_C \approx 2\Delta D_A$.

Należy zdecydowanie podkreślić, że istnienie aberracji w strefach peryferyjnych jest nieodłączną cechą konstrukcyjną przypisaną soczewkom progresywnym. Doświadczony optyk okularowy powinien dopasować konstrukcję soczewek progresywnych odpowiednio do potrzeb użytkownika. Dokonując pewnego uproszczenia problemu, można przyjąć istnienie dwóch typów konstrukcji soczewek progresywnych, które nazywane są umownie twardymi lub miękkimi. Soczewki twarde mają szerokie obszary widzenia dali i bliży, a stosunkowo wąską i krótką



Rysunek 7.4. Reguła Minkwitza

strefę progresji. Konstrukcje te są przeznaczone głównie dla osób wymagających dobrego widzenia dali i bliży, z ograniczonym widzeniem na odległości pośrednie. Soczewki miękkie charakteryzują się szeroką i długą strefą pośrednią, z zawężonym obszarem do dali i bliży. Tego typu konstrukcja może być stosowana u osób wymagających dobrego widzenia na odległości pośrednie. Najnowsza idea optymalnego dopasowania soczewki progresywnej nie polega na tym, aby z istniejących już konstrukcji wybrać tę, która jest najbardziej przydatna dla danej osoby. Ta najnowsza koncepcja to koncepcja indywidualizacji konstrukcji, a to oznacza, że dla określonego użytkownika soczewki progresywne powinny być projektowane indywidualnie. Dzięki temu oś widzenia oka przy patrzeniu w dal znajduje się w centrum tego obszaru, przy obserwacji bliży w centrum obszaru do bliży, a dla odległości pośrednich przemieszcza się po linii środkowej strefy progresji. Praktyczna realizacja koncepcji indywidualizacji soczewki progresywnej jest możliwa pod warunkiem profesjonalizmu optyków okularowych. Po dobraniu odpowiedniej dla użytkownika oprawy okularowej optyk, składając u producenta zamówienie na soczewki, musi określić oprócz mocy do dali i odpowiedniego dodatku do bliży także odległość soczewki od rogówki, kąt pantoskopowy, kąt oprawy, rozstaw źrenic do dali i do bliży. Są także producenci, którzy przy projektowaniu soczewek uwzględniają postawę użytkownika oraz to, czy jest on osobą praworęczną, czy leworęczną. Komputerowy program obliczeniowy generuje konstrukcję soczewki z uwzględnieniem wszystkich powyższych parametrów wejściowych. Kolejnym etapem jest wykonanie soczewki, które

umożliwia cyfrowa technologia obróbki (*free form*). Na koniec optyk powinien dokonać poprawnego montażu soczewek progresywnych do uprzednio wybranej oprawy.

7.6. Optyczne pomoce dla słabowidzących

Osoba słabowidząca to ta, której ostrość wzroku dwojga oczu $V \leq 0,3$ mimo zastosowania pełnej korekcji okularowej. Do słabowidzących zalicza się także osoby o znacznie ograniczonym polu widzenia (poniżej 10°).

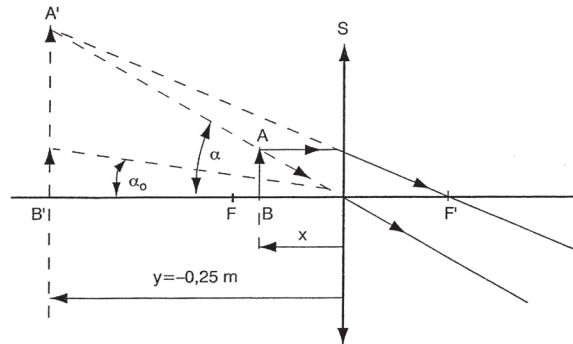
Spośród wielu możliwych przyczyn tak znacznego i trwałego ograniczenia funkcji układu wzrokowego jako najczęstsze należy wymienić:

- zwyrodnienie plamki związane z wiekiem (powodujące ubytki w obszarze centralnym pola widzenia),
- retinopatię cukrzycową (z centralnymi i obwodowymi ubytkami w polu widzenia),
- zmiany zwyrodnieniowe, pozapalne i pourazowe w odcinku przednim gałki ocznej,
- zmiany zwyrodnieniowe, pozapalne, pourazowe i naczyniowe na dnie oka,
- zmiany zwyrodnieniowe, pozapalne, pourazowe i naczyniowe nerwu wzrokowego i dalszych odcinków drogi wzrokowej, a także ośrodka wzrokowego w korze mózgowej.

Aby osoba słabowidząca, u której w układzie wzrokowym występują określone zmiany patologiczne, mogła dostatecznie dobrze widzieć obserwowany przedmiot lub czytać tekst, dąży się do uzyskania odpowiedniego powiększenia jego obrazu na siatkówce. Powiększenie obrazu siatkówkowego można osiągnąć przez:

- zwiększenie samego obiektu obserwacji (np. zastosowanie dużej czcionki druku lub otrzymanie powiększonego tekstu na ekranie telewizora),
- zmniejszenie odległości obserwacji (np. czytanie z odległości 20 cm, co przy małej amplitudzie akomodacji wymaga zastosowania dużego dodatku do blizy),
- optyczne powiększenie obrazu na siatkówce (np. przez zastosowanie lupy lub lunetowego układu powiększającego).

Lupa jest najczęściej stosowaną pomocą optyczną. Wynika to z faktu, że czytanie i pisanie jest najpilniejszą potrzebą zgłaszaną przez osoby słabowidzące. Lupa daje obraz pozorny, prosty i powiększony (rys. 7.5).



S – lupa; F, F' – ogniska; AB – przedmiot; A'B' – obraz; γ – powiększenia kątowe.

Rysunek 7.5. Obraz utworzony przez lupę

Powiększeniem kątowym γ lupy nazywa się stosunek tangensa kąta α , pod jakim widać dany przedmiot przez lupę, do tangensa kąta widzenia przedmiotu α_0 bez lupy z odległości 250 mm:

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{\frac{AB}{x}}{\frac{AB}{0,25}} = \frac{0,25}{x} \quad (7.5)$$

Przy założeniu, że oglądany przedmiot znajduje się bardzo blisko ogniska przedmiotowego lupy ($x \approx f$), otrzymujemy:

$$\gamma = \frac{D}{4} \quad (7.6)$$

gdzie: γ – powiększenie kątowe lupy,

$$D = \frac{1}{f} \text{ – moc lupy, } f \text{ – ogniskowa lupy.}$$

Zgodnie z powyższym wzorem powiększenie kątowe lupy o mocy na przykład 16 dpt jest czterokrotne ($\gamma = 4$). W rzeczywistości powiększenie lupy zależy od

jej mocy, odległości przedmiotu od lupy oraz odległości oka obserwatora od lupy. Dlatego optyk okularowy proponujący osobie słabowidzącej lupę do czytania powinien także praktycznie zaprezentować sposób posługiwania się nią. Ważne jest, aby używać lupy ręcznej w odległości od oka zbliżonej do jej ogniskowej. Osoby z przeziopią powinny jednocześnie korzystać z okularów do bliży. Istotnym udogodnieniem przy korzystaniu z lupy jest stosowanie podstawki, która pozwala na utrzymanie tekstu w odległości ogniskowej od lupy.

Lunety służą jako optyczne pomoce przede wszystkim do dali, chociaż przy zastosowaniu dodatkowej soczewki nasadkowej mogą być wykorzystane także do bliży. Stosowane są zarówno luneta Galileusza, jak i luneta Keplera.

Powiększenie kątowe γ lunety wynosi:

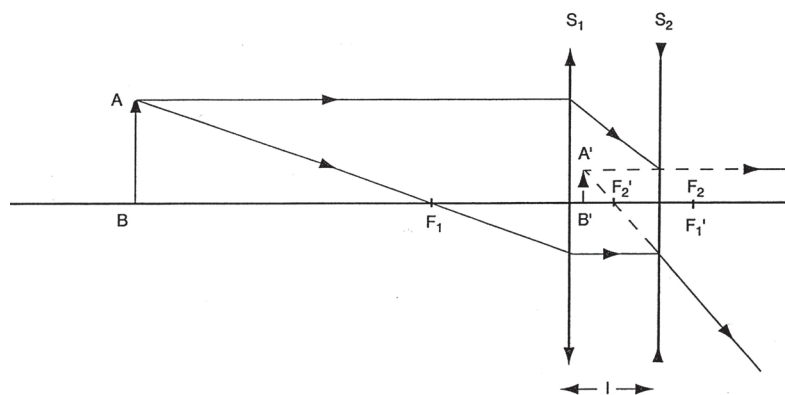
$$\gamma = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (7.7)$$

gdzie: f_1 – ogniskowa obiektywu,

f_2 – ogniskowa okularu,

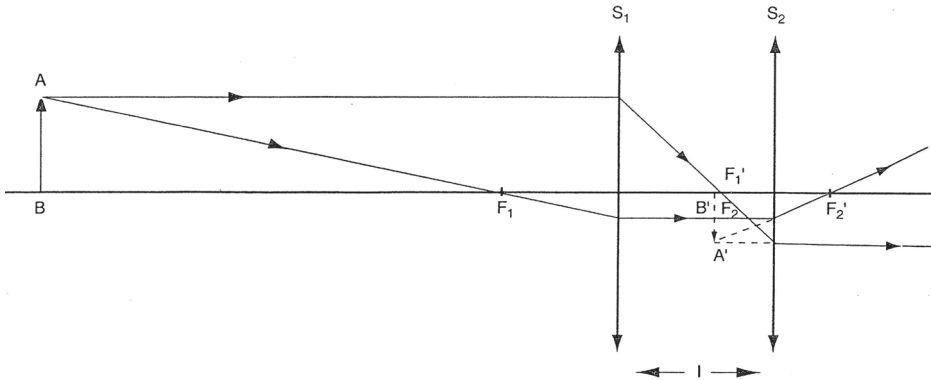
D_1 – moc obiektywu,

D_2 – moc okularu.



S_1 – obiektyw; S_2 – okular; F_1, F_1' – ogniska obiektywu; F_2, F_2' – ogniska okularu; AB – przedmiot; $A'B'$ – obraz; l – długość lunety.

Rysunek 7.6. Bieg promieni w lunecie Galileusza



S_1 – obiektyw; S_2 – okular; F_1, F_1' – ogniska obiektywu; F_2, F_2' – ogniska okularu; AB – przedmiot; $A'B'$ – obraz; l – długość lunety.

Rysunek 7.7. Bieg promieni w lunecie Keplera

Długość lunety Galileusza wynosi $\ell = f_1 - f_2$, a lunety Keplera $\ell = f_1 + f_2$. Ponadto luneta Keplera tworzy obraz odwrócony i dlatego wymaga zastosowania odpowiedniego pryzmatycznego układu odwracającego. Niezbędne powiększenie kątowe γ stosowanego układu powiększającego określa stosunek pożądanej ostrości wzroku (potrzebnej do wykonania danej czynności) V_p do aktualnej ostrości wzroku (przy skorygowanej wadzie) V :

$$\gamma = \frac{V_p}{V} \quad (7.8)$$

Przykład 49

Ostrość wzroku lepiej widzącego oka pacjenta ze zwyrodnieniem siatkówki po skorygowaniu wynosi $V = 0,1$. Określ powiększenie kątowe lupy pozwalającej na czytanie druku wymagającego ostrości wzroku $V_p = 0,3$.

Ze wzoru (7.8) wynika, że należy zastosować lupę o powiększeniu kątowym

$$\gamma = \frac{0,3}{0,1} = 3.$$

Trzykrotne powiększenie kątowe lupy odpowiada mocy $D = 12$ dpt.

Należy pamiętać o tym, że wraz z rosnącym powiększeniem zmniejsza się średnica pola przedmiotowego. Ponadto w przypadku lupy zmniejsza się także

odległość pomiędzy oglądanym przedmiotem a lupą oraz lupą a okiem użytkownika. Dlatego zastosowanie powiększenie pomocy optycznej powinno być tylko tak duże, jak to jest konieczne, aby niepotrzebnie nie zmniejszać pola przedmiotowego. O wyborze układu powiększającego decyduje cel jego stosowania, ogólna kondycja fizyczna i nastawienie psychiczne pacjenta. Ważne jest, aby przy wyborze konkretnego układu pacjent mógł przekonać się osobiście o jego efektywności działania.

7.7. Okulary dla nurkujących

Coraz częściej do zakładów optycznych zgłaszają się klienci, których ulubionym hobby jest nurkowanie. Proszą, aby w masce do nurkowania zamontować im takie soczewki, które zapewnią równie skuteczną korekcję, jak ich normalne okulary. Spełnienie tych oczekiwań klienta wymaga od optyka dobrej znajomości podstaw optyki geometrycznej. Z oczywistych powodów zamontowanie w masce takich samych soczewek jak w zwykłych okularach nie zapewni dobrego widzenia, gdyż po zanurzeniu do przedniej powierzchni soczewek będzie przylegać woda, a to sprawia, że moc przedniej powierzchni maleje. Przy meniskowej konstrukcji soczewek algebraicznie maleje także całkowita moc, czyli soczewka dodatnia działa słabiej, a ujemna silniej. Tylko płasko-wklęsła soczewka zamontowana w masce dla krótkowidza po zanurzeniu nie zmienia swojej mocy.

Teoretycznie problem ujmując, możliwe jest zastosowanie w masce dalekowidza soczewek wypukło-płaskich o takiej samej konstrukcji jak w okularach, ale wykonanych ze szkła o odpowiednio większym współczynniku załamania (indeksie) n' o wartości:

$$n' = n + n_w - 1 \quad (7.9)$$

gdzie: n – współczynnik załamania soczewki w zwykłych okularach,
 n_w – współczynnik załamania wody ($n_w = 1,33$).

Przykład 50

Indeks materiału soczewki okularowej $n = 1,5$. Aby soczewka o takiej samej konstrukcji wypukło-płaskiej zamontowana w masce do nurkowania zachowała moc soczewki okularowej, powinna być wykonana z materiału o indeksie:

$$n' = 1,5 + 1,33 - 1 = 1,83,$$

gdyż $n' - n_w = n - 1$.

Ponieważ uzyskanie materiału o dowolnym współczynniku załamania i nadającego się do produkcji soczewek nie jest łatwe, do maski należy zamontować soczewki o innych parametrach konstrukcyjnych.

Przykład 51

Dla dalekowidza z korekcją do dali $D = +5,00$ dpt można zastosować jako przykładową soczewkę o konstrukcji meniskowej i mocach powierzchni $D_1 = +6,00$ dpt i $D_2 = -1,00$ dpt, wykonaną ze szkła o indeksie $n = 1,5$.

Soczewka taka powinna mieć promień krzywizny:

$$r_1 = \frac{n-1}{D_1} = \frac{1,5-1}{6} = 0,083 \text{ m} = 8,3 \text{ cm},$$

$$r_2 = \frac{1-n}{D_2} = \frac{1-1,5}{-1} = 0,5 \text{ m} = 50 \text{ cm}.$$

Gdyby taka soczewka została zamontowana w masce do nurkowania, jej moc pod wodą byłaby mniejsza, gdyż do przedniej powierzchni przylegałaby woda o współczynniku załamania $n_w = 1,33$.

W takiej sytuacji moc przedniej powierzchni wynosiłaby:

$$D_{1w} = \frac{n-n_w}{r_1} = \frac{1,5-1,33}{0,083} = \frac{0,17}{0,083} = +2,00 \text{ dpt}.$$

Ponieważ moc powierzchni tylnej się nie zmienia, ostatecznie moc powyższej soczewki pod wodą wynosiłaby:

$$D_w = D_{1w} + D_2 = +2,00 - 1,00 = +1,00 \text{ dpt}.$$

Aby jednak soczewka zamontowana w masce pod wodą miała moc $+5,00$ dpt (przy zachowanej takiej samej powierzchni tylnej), należy zastosować powierzchnię przednią o odpowiednio krótszym promieniu,

by jej moc pod wodą wynosiła $D'_{1w} = +6,00$ dpt. Skoro $D'_{1w} = \frac{n-n_w}{r'_1}$, to

$$r'_1 = \frac{n-n_w}{D'_{1w}} = \frac{1,55-1,33}{6} = \frac{0,17}{6} = 0,028 \text{ m} = 2,8 \text{ cm}.$$

Warto zauważyć, że ostatecznie soczewka wykonana ze szkła o indeksie $n = 1,5$ i promieniach krzywizny $r_1' = 0,028$ m i $r_2 = 0,5$ m ma pod wodą moc w pełni korygującą omawianą wadę, czyli $D = +5,00$ dpt. Natomiast w powietrzu jej moc D_n jest znacznie większa, gdyż:

$$D_1' = \frac{n-1}{r_1'} = \frac{1,5-1}{0,028} = \frac{0,5}{0,028} = +17,85 \text{ dpt} \approx +18 \text{ dpt}, \quad D_2 = -1,00 \text{ dpt},$$

więc:

$$D_n = D_1' + D_2 = +18,00 - 1 = +17,00 \text{ dpt}.$$

Łatwo zauważyć, że wyniki obliczeń byłyby inne dla soczewki o tej samej mocy $+5,00$ dpt, lecz o innej konstrukcji, choć także meniskowej:

$$D = +5,00 \text{ dpt}, \quad D_1 = +7,00 \text{ dpt}, \quad D_2 = -2,00 \text{ dpt}, \quad n = 1,5.$$

Soczewka ta ma promień krzywizny (odpowiednio przedniej i tylnej powierzchni):

$$r_1 = \frac{n-1}{D_1} = \frac{1,5-1}{7} = \frac{0,5}{7} = 0,071 \text{ m} = 7,1 \text{ cm}$$

oraz

$$r_2 = \frac{1-n}{D_2} = \frac{1-1,5}{-2} = \frac{-0,5}{-2} = 0,25 \text{ m} = 25 \text{ cm}.$$

Gdyby taką soczewkę zamontować w masce, jej moc pod wodą będzie wynosić:

$$D_{1w} = \frac{n-n_w}{r_1} = \frac{1,5-1,33}{0,071} = \frac{0,17}{0,071} = +2,39 \text{ dpt} \approx +2,40 \text{ dpt}, \quad D_2 = -2,00 \text{ dpt},$$

$$D_w = D_{1w} + D_2 = +2,40 - 2,00 = +0,40 \text{ dpt}.$$

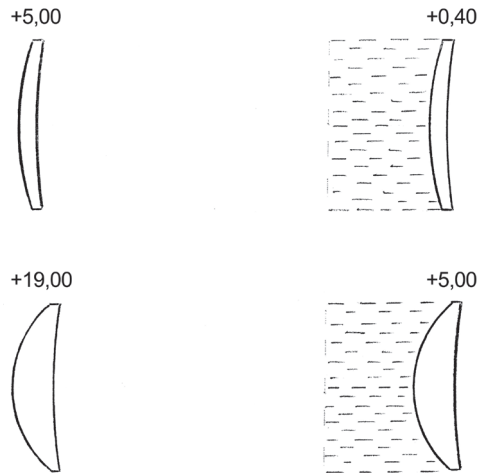
Aby soczewka zamontowana w masce miała pod wodą moc $+5,00$ dpt, czyli moc przedniej powierzchni $+7,00$ dpt (przy zachowanej mocy tylnej powierzchni $-2,00$ dpt), należy zastosować powierzchnię przednią o odpowiednio krótszym promieniu:

$$r_1' = \frac{n-n_w}{D_{1w}} = \frac{1,5-1,33}{7} = \frac{0,17}{7} = 0,024 \text{ m} = 2,4 \text{ cm}.$$

Oczywiście moc tej soczewki w powietrzu będzie wynosić:

$$D'_1 = \frac{n-1}{r'_1} = \frac{1,5-1}{0,024} = \frac{0,5}{0,024} = +20,83 \frac{1}{\text{m}} \approx +21,00 \text{ dpt}, \quad D_2 = -2,00 \text{ dpt},$$

$$D_n = D'_1 + D_2 = +21,00 - 2,00 = +19,00 \text{ dpt}.$$



Dotąd rozważano zmianę mocy soczewki przez modyfikację promienia krzywizny jej przedniej powierzchni, jednak zmiana może dotyczyć promienia krzywizny obu powierzchni oraz współczynnika załamania światła. Można więc zaproponować osobie z nadwzrocznością +5,00 dpt zamontowanie w masce soczewki wykonanej ze szkła o indeksie $n = 1,6$ i promieniach krzywizny:

$$r'_1 = \frac{n-n_w}{D_1} = \frac{1,6-1,33}{6} = \frac{0,27}{6} = 0,045 \text{ m} = 4,5 \text{ cm},$$

$$r_2 = \frac{1-n}{D_2} = \frac{1-1,6}{-1} = \frac{-0,6}{-1} = 0,6 \text{ m} = 60 \text{ cm}.$$

Moc powyższej soczewki będzie pod wodą wynosić +5,00 dpt, natomiast w powietrzu:

$$D'_1 = \frac{n-1}{r'_1} = \frac{1,6-1}{0,045} = \frac{0,6}{0,045} = +13,33 \frac{1}{\text{m}} \approx +13,25 \text{ dpt}, \quad D_2 = -1,00 \text{ dpt},$$

$$D_n = D'_1 + D_2 = +13,25 - 1,00 = +12,25 \text{ dpt}.$$

Przykład 52

Rozpatrzmy teraz krótkowzroczność z korekcją $-5,00$ dpt.

Jako przykład posłużmy soczewką meniskową o mocy powierzchni przedniej $D_1 = +2,00$ dpt i powierzchni tylnej $D_2 = -7,00$ dpt.

Dla indeksu $n = 1,5$ odpowiednie promienie krzywizny tej soczewki powinny wynosić:

$$r_1 = \frac{n-1}{D_1} = \frac{1,5-1}{2} = \frac{0,5}{2} = 0,25 \text{ m} = 25 \text{ cm}$$

oraz

$$r_2 = \frac{1-n}{D_2} = \frac{1-1,5}{-7} = \frac{-0,5}{-7} = 0,071 \text{ m} = 7,1 \text{ cm}.$$

Gdyby taką soczewkę zamontować w masce do nurkowania, jej moc pod wodą wynosiłaby:

$$D_{1w} = \frac{n-n_w}{r_1} = \frac{1,5-1,33}{0,25} = \frac{0,17}{0,25} = +0,68 \text{ dpt} \approx +0,7 \text{ dpt}, \quad D_2 = -7,00 \text{ dpt},$$

więc

$$D_w = D_{1w} + D_2 = +0,70 - 7,00 = -6,30 \text{ dpt}.$$

$-5,00$



$-6,30$



$-1,00$



$-5,00$



Aby soczewka zamontowana w masce miała pod wodą moc $-5,00$ dpt (przy zachowaniu niezmiennionej powierzchni tylnej), należy zastosować krótszy promień krzywizny powierzchni przedniej:

$$r'_1 = \frac{n - n_w}{D'_{1w}} = \frac{1,5 - 1,33}{2} = \frac{0,17}{2} = 0,085 \text{ m} = 8,5 \text{ cm}.$$

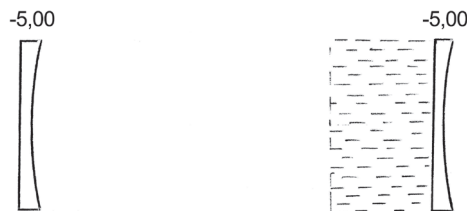
Oczywiście w powietrzu soczewka taka będzie miała moc:

$$D'_1 = \frac{n - 1}{r'_1} = \frac{1,5 - 1}{0,085} = \frac{0,5}{0,085} = +5,88 \frac{1}{\text{m}} \approx +6,00 \text{ dpt}, \quad D_2 = -7,00 \text{ dpt},$$

$$D_n = D'_1 + D_2 = +6,00 - 7,00 = -1,00 \text{ dpt}.$$

Jak wynika z powyższych przykładów, kontakt wody z przednią powierzchnią soczewki meniskowej zamontowanej w masce do nurkowania sprawia, że jej moc (pod wodą) staje się algebraicznie mniejsza w porównaniu z mocą w powietrzu: plusowa soczewka będzie słabsza, minusowa – silniejsza.

Nietrudno zauważyć, że w przypadku soczewki, której przednia powierzchnia jest płaszczyzną, jej moc po zanurzeniu się nie zmienia. W praktyce dotyczy to przede wszystkim ujemnych soczewek płasko-wklęsłych.



Optyk przygotowujący odpowiednie soczewki do zamontowania w masce dla nurkującego powinien uwzględnić to, że dotycząca przedniej powierzchni zmiana mocy po zanurzeniu zależy od konstrukcji soczewki.

Proste obliczenia podobne do przedstawionych powyżej pozwalają na określenie odpowiednich mocy także w przypadku soczewek sfero-cylindrycznych (torycznych) stosowanych u osób z astygmatyzmem, a nawet z przeziopią. Inną z technicznego punktu widzenia możliwością dostosowania soczewek korygujących dla osób nurkujących jest naklejanie soczewki dodatkowej na soczewkę produkowaną seryjnie.

Podsumowanie

Realizując receptę okularową wystawioną przez okulistę czy optometrystę, optyk znajduje się w szczególnej sytuacji, wykonuje bowiem okulary na podstawie badania refrakcji, którego osobiście nie przeprowadził. A zdarzają się w zakładzie optycznym sytuacje, kiedy klient już przy odbiorze tak wykonanych okularów zgłasza zastrzeżenia dotyczące komfortu widzenia. Przyczyny niezadowolenia klienta mogą być różne. Należą do nich techniczne niedoskonałości wykonania okularów, które doświadczony optyk powinien usunąć. Znacznie większy problem jest wówczas, gdy klient twierdzi, że przez nowe okulary źle widzi, mimo że okulary zostały wykonane dokładnie według recepty lekarskiej. Skoro okulary zostały wykonane zgodnie z zaleceniami okulisty, to być może okulista określił należą korekcję z niewystarczającą dokładnością. Może być jednak tak, że moc soczewki w pełni korygującej wadę została określona przez okulistę przy innej odległości soczewki próbnej od oka niż odległość, w jakiej od oka znajduje się soczewka właśnie wykonanych okularów. Po czyjej stronie leży niedopatrzenie? Czy optyk wykonał niestarannie okulary, czy okulista niedokładnie zbadał refrakcję? A może u klienta występują zaburzenia widzenia obuocznego (np. heteroforia), które sprawiają, że komfort widzenia w nowych okularach jest niewystarczający? Może być i tak, że w oczach klienta pojawiły się zmiany chorobowe, na przykład zaćma lub zwyrodnienie siatkówki, i to one ograniczają skuteczność korekcji okularowej.

Dla optyka i klienta sprawa jest ważna. Przecież okulary zostały wykonane, a klient powinien za nie zapłacić. Jak ma postąpić optyk, kiedy klient nie chce odebrać okularów, gdyż jak twierdzi, źle przez nie widzi? Ponieważ przyczyny niezadowolenia klienta mogą być różne, trudno udzielić jednoznacznej odpowiedzi na to pytanie. Z pewnością nie jest łatwe całkowite wyeliminowanie takich problemów. W codziennej praktyce nawet doświadczonego optyka okularowego będą się one pojawiać od czasu do czasu. Istnieje możliwość zmniejszenia

częstości występowania owych dyskusyjnych sytuacji. Można jej upatrywać w doskonaleniu optometrycznych umiejętności lekarzy okulistów, a także w opanowaniu przez optyków podstawowych procedur badania refrakcji. Optyk okularowy z odpowiednim przygotowaniem profesjonalnym powinien przed wykonaniem okularów mieć możliwość sprawdzenia, jak klient widzi z korekcją zleconą przez okulistę, a ostatnio coraz częściej przez optometrystę. Sądzymy, iż optyk ma nawet obowiązek upewnić się, że okulary, które wykona na podstawie recepty wystawionej przez okulistę lub optometrystę, zapewnią klientowi optymalną korekcję. Z tak nałożonego obowiązku potrafi wywiązać się tylko optyk dysponujący odpowiednią wiedzą i praktycznymi umiejętnościami. Świadomość tego mieli przed laty znani polscy okuliści: profesor Witold Starkiewicz i profesor Władysław Melanowski. Uważali oni, że tylko optyk znający podstawy korekcji wad wzroku i badania refrakcji będzie mógł poprawnie wykonywać okulary i dobrze współpracować z okulistą.

Należy podkreślić, że kompetentny optyk okularowy to przede wszystkim fachowiec, który dzięki zdobytemu doświadczeniu zawodowemu pomaga klientowi wybrać odpowiednią oprawę okularową, a następnie starannie montuje w niej odpowiednie soczewki korygujące. Dobra znajomość optyki powinna pozwolić mu także ocenić, czy przepisana moc jest optymalna i zapewnia należyty komfort widzenia. Autorzy mają nadzieję, że opracowany przez nich podręcznik ułatwi optykowi osiągnąć odpowiedni poziom kompetencji zawodowych.

Piśmiennictwo

Grosvenor T.G., *Optometria*, red. wyd. polskiego T. Tokarzewski, M. Ożóg, Wydawnictwo Urban & Partner, Wrocław 2011.

Melanowski W.H., *Optyka okulistyczna w obliczeniach*, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1972.

Methling D., Maxam U., *Optometrie*, VEB Verlag Technik, Berlin 1989.

Starkiewicz W., *Optyka oka i szkieł okularowych. Zarys optyki geometrycznej i optyki oka oraz zasad budowy okularów i przyrządów optycznych*, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, Warszawa 1953.

Styszyński A., *Korekcja wad wzroku – procedury badania refrakcji*, Alfa Medica Press, Bielsko-Biała 2009.

Szaflik J., Ambroziak A.M. (red.), *Optyka kliniczna*, Wydawnictwo Urban & Partner, Wrocław 2009.

Zając M., *Optyka okularowa*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003.

Test sprawdzający

1. Prędkość światła w diamencie wynosi:
 - A. 242 000 km/s
 - B. 200 000 km/s
 - C. 124 000 km/s
 - D. 12 400 km/s

2. Dla diamentu i powietrza kąt graniczny wynosi:
 - A. 23°
 - B. 41°
 - C. 52°
 - D. 61°

3. Kąt 20° to:
 - A. 0,20 rad
 - B. 0,35 rad
 - C. 0,57 rad
 - D. 1,75 rad

4. Kąt 10° to:
 - A. 5,7 pdpt
 - B. 17,5 pdpt
 - C. 25,4 pdpt
 - D. 37,2 pdpt

5. Przedmiot umieszczono w odległości 25 cm przed soczewką o mocy +10 dpt. Obraz tego przedmiotu powstaje w odległości:
- A. 12,5 cm przed soczewką
 - B. 16,7 cm przed soczewką
 - C. 12,5 cm za soczewką
 - D. 16,7 cm za soczewką
6. Obraz z poprzedniego pytania jest obrazem:
- A. rzeczywistym, odwróconym, pomniejszonym
 - B. rzeczywistym, odwróconym, powiększonym
 - C. rzeczywistym, prostym, powiększonym,
 - D. pozornym, prostym, powiększonym
7. Przedmiot znajduje się w odległości 5 cm od soczewki o mocy +10 dpt. Utworzony przez tę soczewkę obraz przedmiotu jest obrazem:
- A. rzeczywistym, odwróconym, pomniejszonym
 - B. rzeczywistym, odwróconym, powiększonym
 - C. rzeczywistym, prostym, powiększonym
 - D. pozornym, prostym, powiększonym
8. Przedmiot znajduje się w odległości 20 cm od soczewki o mocy –10 dpt. Utworzony przez tę soczewkę obraz znajduje się:
- A. w odległości 3,3 cm przed soczewką
 - B. w odległości 6,7 cm przed soczewką
 - C. w odległości 3,3 cm za soczewką
 - D. w odległości 6,7 cm za soczewką
9. Obraz z poprzedniego pytania jest obrazem:
- A. rzeczywistym, odwróconym, pomniejszonym
 - B. rzeczywistym, prostym, pomniejszonym
 - C. pozornym, prostym, pomniejszonym
 - D. pozornym, odwróconym, pomniejszonym

10. Przedmiot znajduje się w odległości 100 cm od soczewki o mocy -1 dpt. Jego obraz:
- A. powstanie w odległości 50 cm przed soczewką
 - B. powstanie w odległości 50 cm za soczewką
 - C. powstanie w odległości 100 cm za soczewką
 - D. nie powstanie, gdyż przedmiot znajduje się w ognisku soczewki
11. Promień krzywizny przedniej powierzchni soczewki wypukło-płaskiej o mocy $+5,00$ dpt wykonanej ze szkła o indeksie $n = 1,5$ wynosi:
- A. 5 cm
 - B. 10 cm
 - C. 15 cm
 - D. 20 cm
12. Meniskowa soczewka wypukło-wklęsła o promieniach krzywizny $r_1 = 50$ mm, $r_2 = 200$ mm i grubości $d = 10$ mm jest wykonana ze szkła o indeksie $n = 1,6$. Jej moc i moc sferometryczna wynoszą odpowiednio:
- A. $+9,00$ dpt i $+9,22$ dpt
 - B. $+9,22$ dpt i $+9,00$ dpt
 - C. $+15,00$ dpt i $+15,45$ dpt
 - D. $+15,45$ dpt i $+15,00$ dpt
13. Odległości punktu głównego przedmiotowego od wierzchołka przedniej powierzchni i punktu głównego obrazowego od wierzchołka drugiej powierzchni dla powyższej soczewki wynoszą odpowiednio:
- A. $-0,002$ m i $-0,008$ m
 - B. $-0,008$ m i $-0,002$ m
 - C. $+0,002$ m i $+0,008$ m
 - D. $+0,008$ m i $+0,002$ m
14. Długości ogniskowej obrazowej i ogniskowej czołowej dla powyższej soczewki wynoszą odpowiednio:
- A. 100 mm i 108 mm
 - B. 108 mm i 100 mm
 - C. 90 mm i 100 mm
 - D. 67 mm i 90 mm

15. Wypadkowa moc układu dwóch soczewek $D_1 = +5$ dpt i $D_2 = +10$ dpt znajdujących się na wspólnej osi w odległości 15 cm wynosi:
- A. +7,5 dpt
 - B. +15 dpt
 - C. +17,5 dpt
 - D. +20 dpt
16. Aby wypadkowa moc powyższego układu soczewek wynosiła 0, powinny one znajdować się w odległości:
- A. 0 cm
 - B. 10 cm
 - C. 20 cm
 - D. 30 cm
17. Pryzmat o mocy 10 pdpt odchyła promień świetlny o kąt:
- A. $2,6^\circ$
 - B. $5,7^\circ$
 - C. 10°
 - D. $12,6^\circ$
18. Decentracja o 5 mm soczewki sferycznej o mocy +5 dpt wywołuje jej działanie pryzmatyczne o wartości:
- A. 1 pdpt
 - B. 2,5 pdpt
 - C. 3,5 pdpt
 - D. 5,5 pdpt
19. Wypukło-płaska soczewka cylindryczna o promieniu krzywizny przedniej powierzchni 8 cm jest wykonana ze szkła o indeksie $n = 1,5$. Jej ognisko obrazowe jest:
- A. punktem leżącym 8 cm za soczewką
 - B. punktem leżącym 16 cm za soczewką
 - C. odcinkiem równoległym do osi cylindra leżącym 8 cm za soczewką
 - D. odcinkiem równoległym do osi cylindra leżącym 16 cm za soczewką

25. Komora tylna gałki ocznej to:
- A. obszar gałki ocznej pomiędzy tylną powierzchnią soczewki a siatkówką
 - B. obszar gałki ocznej pomiędzy tylną powierzchnią tęczówki a przednią powierzchnią ciała szklanego
 - C. obszar gałki ocznej zawarty pomiędzy obwodem rogówki a obwodem tęczówki
 - D. obszar oczodołu znajdujący się za gałką oczną
26. Moc układu optycznego oka, obserwującego najpierw przedmiot znajdujący się w odległości 5 m, a następnie w odległości 20 cm powinna:
- A. wzrosnąć o 5,5 dpt
 - B. wzrosnąć o 4,8 dpt
 - C. wzrosnąć o 3,2 dpt
 - D. zmaleć o 4,8 dpt
27. Punkt daleki oka to:
- A. punkt osi optycznej znajdujący się w nieskończoności
 - B. punkt osi widzenia, którego ostry obraz znajduje się na siatkówce
 - C. najdalszy punkt, który oko widzi
 - D. wszystkie powyższe odpowiedzi są prawdziwe
28. Jeżeli refrakcja oka wynosi $-5,00$ dpt, to:
- A. punkt daleki znajduje się 20 cm przed okiem
 - B. punkt daleki znajduje się 50 cm przed okiem
 - C. punkt daleki znajduje się 20 cm za okiem
 - D. punkt daleki znajduje się 50 cm za okiem
29. Jeżeli punkt daleki znajduje się 25 cm za okiem, to refrakcja oka wynosi:
- A. $-2,50$ dpt
 - B. $-4,00$ dpt
 - C. $+2,50$ dpt
 - D. $+4,00$ dpt

30. Jeżeli punkt bliski oka miarowego znajduje się w odległości 40 cm przed okiem, to amplituda akomodacji tego oka wynosi:
- A. 4,00 dpt
 - B. 3,50 dpt
 - C. 2,50 dpt
 - D. 2,00 dpt
31. Jeżeli refrakcja oka wynosi $-1,00$ dpt, a amplituda akomodacji 4,00 dpt, to:
- A. punkt daleki znajduje się 100 cm przed okiem, a punkt bliski 40 cm za okiem
 - B. punkt daleki znajduje się 100 cm przed okiem, a punkt bliski 20 cm za okiem
 - C. punkt daleki znajduje się 100 cm przed okiem, a punkt bliski 20 cm przed okiem
 - D. punkt daleki znajduje się 100 cm za okiem, a punkt bliski 40 cm przed okiem
32. Punkt daleki znajduje się 40 cm za okiem, a punkt bliski 40 cm przed okiem. Refrakcja R i amplituda akomodacji A_A tego oka wynoszą odpowiednio:
- A. $R = -2,50$ dpt, $A_A = +2,50$ dpt
 - B. $R = -2,50$ dpt, $A_A = +5,00$ dpt
 - C. $R = +2,50$ dpt, $A_A = +2,50$ dpt
 - D. $R = +2,50$ dpt, $A_A = +5,00$ dpt
33. Dodatek do bliży $\ell = 40$ cm dla powyższego oka powinien wynosić:
- A. 0,00 dpt
 - B. +1,00 dpt
 - C. +1,50 dpt
 - D. +2,00 dpt
34. W warunkach prawidłowych średnia wartość amplitudy akomodacji w wieku 20 lat powinna wynosić około:
- A. 3,0 dpt
 - B. 5,0 dpt
 - C. 9,0 dpt
 - D. 14,0 dpt

35. Dla oka o refrakcji $-1,50$ dpt i amplitudzie akomodacji $2,00$ dpt korekcja do pracy z bliska $\ell = 33$ cm powinna wynosić:

- A. $-0,50$ dpt
- B. $+0,50$ dpt
- C. $+1,50$ dpt
- D. $+2,00$ dpt

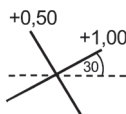
36. Ekwiwalent sferyczny soczewki korekcyjnej o mocy $+1,00/-2,00 \times 15$ wynosi:

- A. $+0,50$ dpt
- B. $-0,50$ dpt
- C. $-1,00$ dpt
- D. $0,00$ dpt

37. Astygmatyzm oka $\begin{smallmatrix} -1,00 \\ + \\ +1,50 \end{smallmatrix}$ należy skorygować soczewką toryczną:

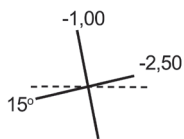
- A. $-1,00/+1,50 \times 180$
- B. $+1,50/-1,00 \times 90$
- C. $+1,50/-2,50 \times 90$
- D. $+1,50/-2,50 \times 180$

38. Astygmatyzm oka przedstawiony na poniższym rysunku należy skorygować soczewką toryczną:

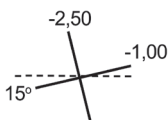


- A. $+1,00/-0,50 \times 30$
- B. $+0,50/+0,50 \times 30$
- C. $+1,50/-1,00 \times 120$
- D. $-0,50/+1,00 \times 120$

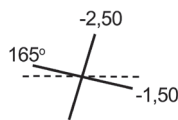
39. Soczewka toryczna o mocy $-1,50/-1,00 \times 165$ koryguje astygmatyzm oka:



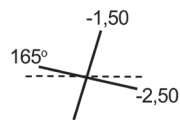
A.



B.



C.



D.

40. Zapis mocy soczewki $+1,00/-1,50 \times 25$ jest równoważny zapisowi:

- A. $-1,50/+1,00 \times 115$
- B. $-0,50/+1,50 \times 115$
- C. $-1,00/+1,50 \times 25$
- D. $+1,50/-1,00 \times 25$

41. Moc soczewki w pełni korygującej krótkowzroczność oka przy odległości $VD = 25$ mm wynosi $-12,50$ dpt. Refrakcja tego oka ma wartość:

- A. $-8,50$ dpt
- B. $-9,50$ dpt
- C. $-10,50$ dpt
- D. $-11,50$ dpt

42. Moc soczewki korygującej powyższą wadę przy odległości $VD = 10$ mm powinna wynosić:

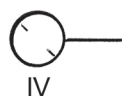
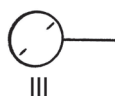
- A. $-10,00$ dpt
- B. $-10,50$ dpt
- C. $-11,00$ dpt
- D. $-11,50$ dpt

43. Moc soczewki w pełni korygującej nadwzroczność przy odległości $VD_1 = 25$ mm wynosi $+8,50$ dpt. Moc soczewki korygującej tę wadę przy odległości $VD_2 = 10$ mm powinna wynosić:

- A. $+8,75$ dpt
- B. $+9,25$ dpt
- C. $+9,75$ dpt
- D. $+10,50$ dpt

44. Moc soczewki okularowej w pełni korygującej wadę krótkowzroczności przy $VD = 18$ mm wynosi $-5,00$ dpt. Odpowiednia moc soczewki kontaktowej wynosi:
- A. $-4,00$ dpt
 - B. $-4,50$ dpt
 - C. $-5,00$ dpt
 - D. $-5,50$ dpt
45. Jeżeli kąt zdolności rozdzielczej oka $MAR = 4'$, to ostrość wzroku przyjmuje wartość:
- A. 1,0
 - B. 0,5
 - C. 0,4
 - D. 0,25
46. Jeżeli kąt zdolności rozdzielczej oka $MAR = 5'$, to ostrość wzroku V i procentowy wskaźnik ostrości wzroku VAR (*visual acuity rating*) wynoszą odpowiednio:
- A. 0,2, 65%
 - B. 0,2, 20%
 - C. 0,5, 65%
 - D. 0,5, 20%
47. Oko, które z odległości 4 m rozpoznaje optotypy o wielkości 10 M, ma ostrość wzroku:
- A. 0,1
 - B. 0,2
 - C. 0,3
 - D. 0,4
48. Oko, które z odległości 40 cm rozpoznaje optotypy o wielkości 1 M, ma ostrość wzroku:
- A. 0,1
 - B. 0,2
 - C. 0,3
 - D. 0,4

49. Wskaż nieprawdziwe twierdzenie:
- Soczewką poprawnie korygującą nadwzroczność jest najsilniejsza soczewka dodatnia, przy której oko osiąga najwyższą ostrość wzroku.
 - Soczewką poprawnie korygującą krótkowzroczność jest najsłabsza soczewka ujemna, przy której oko osiąga najwyższą ostrość wzroku.
 - Test czerwono-zielony wykorzystuje zależność współczynnika załamania światła od długości fali.
 - Test czerwono-zielony nie jest przydatny w przypadku osób z zaburzeniami rozpoznawania barw.
50. Podczas prezentacji w warunkach przekorygowania tarczy do badania astygmatyzmu badany stwierdził, że najwyraźniej widzi linie na godzinach 5–11. Ujemny cylinder korygujący należy ustawić tak, aby jego oś przyjęła położenie:
- 50°
 - 60°
 - 110°
 - 150°
51. Przy ekwiwalencie sferycznym $+1,25$ dpt ostrość wzroku badanego oka $V = 0,5$, a podczas badania astygmatyzmu za pomocą cylindra skrzyżowanego badany stwierdził, że obserwowane optotypy najwyraźniej widzi przy ustawieniach II i IV.



Należy więc:

- Wstawić cylinder $-1,00$ dpt, a sferę zwiększyć do $+1,75$ dpt
 - Wstawić cylinder $-1,00$ dpt, a sferę zwiększyć do $+2,25$ dpt
 - Wstawić cylinder $-0,50$ dpt, a sferę zmniejszyć o $+0,25$ dpt
 - Wstawić cylinder $-1,50$ dpt, a sferę zmniejszyć o $+0,75$ dpt
52. W powyższym przypadku ujemny cylinder korygujący powinien zostać ustawiony w osi:
- $22,5^\circ$
 - $67,5^\circ$
 - $112,5^\circ$
 - $157,5^\circ$

53. Podczas uściślenia osi ujemnego cylindra korygującego ręczny cylinder skrzyżowany należy trzymać tak, aby:
- Jego trzonek był równoległy do osi cylindra korygującego
 - Ujemna oś cylindra skrzyżowanego była równoległa do osi cylindra korygującego
 - Dodatnia oś cylindra skrzyżowanego była równoległa do osi cylindra korygującego
 - Cylinder skrzyżowany może być ustawiony w dowolnym położeniu
54. Podczas uściślenia mocy ujemnego cylindra korygującego należy:
- Trzymać cylinder skrzyżowany tak, aby jego trzonek był równoległy do osi cylindra korygującego
 - Trzymać cylinder skrzyżowany tak, aby jego trzonek był prostopadły do osi cylindra korygującego
 - Ustawić cylinder skrzyżowany tak, aby najpierw jego ujemna oś była równoległa do osi cylindra korygującego (pozycja 1), a następnie obrócić go tak, aby jego dodatnia oś była równoległa do osi cylindra korygującego (pozycja 2)
 - Cylinder skrzyżowany ustawić w dowolnej pozycji
55. Refrakcja oka wynosi $\begin{smallmatrix} -2,00 \\ + \\ +1,00 \end{smallmatrix}$. Ekwiwalent sferyczny oka wynosi:
- 1,50 dpt
 - 1,00 dpt
 - 0,50 dpt
 - +0,50 dpt
56. Wypadkowa refrakcja z ekwiwalentem sferycznym dla powyższego oka wynosi:
- | | | | |
|---|---|---|---|
| $-2,50$ | $-1,50$ | $-1,50$ | $-1,50$ |
| A. $\begin{smallmatrix} + \\ +1,50 \end{smallmatrix}$ | B. $\begin{smallmatrix} + \\ +2,00 \end{smallmatrix}$ | C. $\begin{smallmatrix} + \\ +1,50 \end{smallmatrix}$ | D. $\begin{smallmatrix} + \\ +0,50 \end{smallmatrix}$ |
57. Refrakcja oka wynosi $\begin{smallmatrix} +1,00 \\ + \\ +2,50 \end{smallmatrix}$. Ustawienie przed tym okiem soczewki sferycznej o mocy +1,00 dpt spowoduje, że wypadkowa refrakcja będzie wynosić:
- | | | | |
|---|---|---|---|
| $+2,00$ | $+1,00$ | $+1,50$ | $0,00$ |
| A. $\begin{smallmatrix} + \\ +3,50 \end{smallmatrix}$ | B. $\begin{smallmatrix} + \\ +3,50 \end{smallmatrix}$ | C. $\begin{smallmatrix} + \\ +3,00 \end{smallmatrix}$ | D. $\begin{smallmatrix} + \\ +1,50 \end{smallmatrix}$ |

58. Refrakcja oka wynosi $\begin{smallmatrix} +1,50 \\ + \end{smallmatrix} -1,00$. Wstawienie przed to oko soczewki sferycznej o mocy $-1,00$ dpt spowoduje, że refrakcja wypadkowa będzie wynosić:

A. $\begin{smallmatrix} +2,50 \\ + \end{smallmatrix} 0,00$ B. $\begin{smallmatrix} +0,50 \\ + \end{smallmatrix} -2,00$ C. $\begin{smallmatrix} +0,50 \\ + \end{smallmatrix} 0,00$ D. $\begin{smallmatrix} +1,50 \\ + \end{smallmatrix} -2,00$

59. Refrakcja oka wynosi $\begin{smallmatrix} -0,50 \\ + \end{smallmatrix} +1,50$. Wstawienie przed to oko soczewki cylindrycznej o mocy $+1,00 \times 90$ spowoduje, że wypadkowa refrakcja będzie wynosić:

A. $\begin{smallmatrix} -1,50 \\ + \end{smallmatrix} +1,50$ B. $\begin{smallmatrix} +0,50 \\ + \end{smallmatrix} +1,50$ C. $\begin{smallmatrix} -0,50 \\ + \end{smallmatrix} +0,50$ D. $\begin{smallmatrix} +1,00 \\ + \end{smallmatrix} +1,50$

60. Przed oko o refrakcji $+1,50/-0,50 \times 180$ wstawiono soczewkę sferyczną $-1,00$ dpt. Wypadkowa refrakcja tego oka wynosi:

A. $+0,50/-0,50 \times 180$
 B. $+0,50/-1,50 \times 180$
 C. $+1,50/-1,50 \times 180$
 D. $+2,50/-0,50 \times 180$

61. Przed oko o refrakcji $+2,00/-1,50 \times 20$ wstawiono cylinder o mocy $+1,00 \times 110$. Wypadkowa refrakcja tego oka będzie wynosić:

A. $+2,00/-2,50 \times 20$
 B. $+2,00/-0,50 \times 20$
 C. $+1,00/-0,50 \times 20$
 D. $+1,00/-1,50 \times 20$

62. Przed oko o refrakcji $-1,00/-1,00 \times 165$ wstawiono cylinder $+1,00 \times 75$. Wypadkowa refrakcja tego oka będzie wynosić:

A. $-1,00/-2,00 \times 165$
 B. $-2,00/-1,00 \times 165$
 C. $-2,00/-2,00 \times 165$
 D. sph $-2,00$

63. Przed oko o refrakcji $+0,50/-3,00 \times 25$ wstawiono cylinder $-1,00 \times 115$. Wypadkowa refrakcja tego oka będzie wynosić:
- A. $+1,50/-4,00 \times 25$
 - B. $+0,50/-4,00 \times 25$
 - C. $-1,5/-1,00 \times 25$
 - D. $-2,50/+1,50 \times 115$
64. Przy wykonywaniu skiaskopii z odległości 100 cm uzyskano neutralizację (wypełnienie źrenicy światłem) bez żadnej soczewki. Refrakcja badanego oka wynosi:
- A. 0,00
 - B. +1,00
 - C. -0,50
 - D. -1,00
65. Podczas skiaskopii przy odległości badania 67 cm wypełnienie źrenicy światłem występuje przy soczewce neutralizującej +3,50 dpt. Refrakcja tego oka wynosi:
- A. +3,00
 - B. +2,50
 - C. +2,00
 - D. +1,50
66. Ostrość wzroku pacjenta ze zwyrodnieniem siatkówki przy optymalnej korekcji okularowej do dali i bliży wynosi $V = 0,1$. Aby mógł on czytać tekst, który wymaga ostrości wzroku $V_p = 0,4$, powinien posługiwać się lupą o mocy:
- A. 8 dpt
 - B. 12 dpt
 - C. 16 dpt
 - D. 20 dpt
67. Aby soczewki o mocy $D_1 = +10,00$ dpt i $D_2 = -20,00$ dpt tworzyły układ lunety Galileusza, powinny znajdować się na wspólnej osi w odległości:
- A. 5 cm
 - B. 10 cm
 - C. 15 cm
 - D. 30 cm

68. Powiększenie kątowe powyższej lunety będzie miało wartość:
- A. 2
 - B. 3
 - C. 4
 - D. 5
69. Para miarowych oczu o rozstawie źrenic $PD = 74$ mm obserwuje punkt odległy o 80 cm. W warunkach prawidłowych akomodacja i konwergencja tych oczu powinna wynosić odpowiednio:
- A. +1,25 dpt, 9,25 pdpt
 - B. +1,25 dpt, 8,00 pdpt
 - C. +0,80 dpt, 7,40 pdpt
 - D. +0,80 dpt, 9,25 pdpt
70. Jeżeli w powyższym przypadku obserwowany punkt zbliży się na odległość 40 cm, odpowiednie wartości akomodacji i konwergencji będą wynosić:
- A. +4,00 dpt, 11,10 pdpt
 - B. +4,00 dpt, 18,50 pdpt
 - C. +2,50 dpt, 18,50 pdpt
 - D. +2,50 dpt, 40,00 pdpt
71. Osoba z antymetropią i korekcją okularową oka prawego (O.P.) +2,00 dpt i oka lewego (O.L.) -2,00 dpt podczas czytania i związanego z tym obniżenia osi widzenia może odczuwać dyskomfort wywołany pryzmatycznym działaniem obwodu soczewek:
- A. O.P. 2 pdpt BG, O.L. 2 pdpt BD
 - B. O.P. 2 pdpt BD, O.L. 2 pdpt BG
 - C. O.P. 1 pdpt BG, O.L. 1 pdpt BD
 - D. O.P. 1 pdpt BD, O.L. 1 pdpt BG
72. W przypadku zeza rozbieżnego oka lewego o kącie $\alpha = 12^\circ$ oprócz korekcji refrakcji należy zastosować korekcję pryzmatyczną:
- A. O.P. 10 pdpt B180, O.L. 10 pdpt B 0
 - B. O.P. 10 pdpt B 0, O.L. 10 pdpt B180
 - C. O.P. 7 pdpt B180, O.L. 7 pdpt B 0
 - D. O.P. 7 pdpt B 0, O.L. 7 pdpt B180

73. Dwojenie występujące w porażeniu nerwu okoruchowego (n. III) lewego zanika przy patrzeniu na wprost, gdy zastosowano pryzmaty: przed okiem prawym 16 pdpt BN, a przed okiem lewym 12 pdpt BG. Najkorzystniejszy rozkład korekcji pryzmatycznej to:
- A. O.P. bez pryzmatu, O.L. 20 pdpt B143
 - B. O.P. 10 pdpt B 323, O.L. 10 pdpt B143
 - C. O.P. 10 pdpt B 37, O.L. 10 pdpt B 217
 - D. O.P. 10 pdpt B 143, O.L. 10 pdpt B 323
74. Nadwzroczny mężczyzna stosuje okulary o jednakowej dla obu oczu mocy +4,00 dpt. Jego hobby to nurkowanie. Soczewki ze szkła o indeksie $n = 1,6$ zamontowane w jego masce do nurkowania powinny mieć powierzchnie przednią i tylną o promieniach krzywizny odpowiednio:
- A. 5,4 cm i 60 cm
 - B. 12 cm i 5,4 cm
 - C. 12 cm i 60 cm
 - D. 60 cm i 12 cm
75. Powyższe soczewki (odpowiednie do nurkowania) w powietrzu będą mieć moc:
- A. +7,00 dpt
 - B. +8,00 dpt
 - C. +9,00 dpt
 - D. +10,00 dpt

Test – prawidłowe odpowiedzi

1. C	26. B	51. A
2. A	27. B	52. C
3. B	28. A	53. A
4. B	29. D	54. C
5. D	30. C	55. C
6. A	31. C	56. C
7. D	32. D	57. D
8. B	33. A	58. A
9. C	34. C	59. C
10. A	35. B	60. D
11. B	36. D	61. C
12. B	37. D	62. D
13. A	38. A	63. A
14. B	39. C	64. D
15. A	40. B	65. C
16. D	41. B	66. C
17. B	42. B	67. A
18. B	43. C	68. A
19. D	44. B	69. A
20. C	45. D	70. C
21. A	46. A	71. A
22. C	47. D	72. B
23. B	48. D	73. B
24. D	49. D	74. A
25. B	50. D	75. D

