UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

UNIVERSITA PALACKÉHO V OLOMOUCI FAKULTA PŘÍRODOVĚDECKÁ

TEORIE OPTICKÝCH PŘÍSTROJŮ

III.

Oko a jeho korekce

Prof. RNDr. Engelbert Keprt

STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ
PRAHA

UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

UNIVERSITA PALACKÉHO V OLOMOUCI FAKULTA PŘÍRODOVĚDECKÁ

TEORIE OPTICKÝCH PŘÍSTROJŮ

III.

Oko a jeho korekce

Prof. RNDr. Engelbert Keprt

1966

STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ

PRAHA

1) Úvod

Teorie vidění tvoří velmi širokou vědní oblast, ve které se setkává řada různých disciplín, jako anatomie, fysika, chemie, fysiologie, psychologie a zdravotnictví. Na první pohled se zdá, že teorie vidění nemůže přinést pro člověka žádných kladných výsledků, které by zlepšily vidění ať již z hlediska dosahu pozorovaných předmětů nebo z hlediska rozlišovací schopnosti apod, neboť lze předpokládat, že člověk stejně jako zvířata v přírodě, instinktivně využívá v optimální míře svého zraku. Ve skutečnosti tomu však tak není, neboť zvláště v poslední době, kdy rychlý rozvoj techniky poskytuje člověku nejrozmanitější technické pomůcky, může se lidský zrak oslabovat, protože případná zhoršení jsou vyrovnávána těmito pomůckami. Mimoto člověk pracuje stále více při umělém osvětlení, na jeho zrak jsou kladeny v různých povoláních stále větší požadavky, jak je tomu např. u letců, kosmonautů, železničních zaměstnanců, nebo v laboratořích, kde se pracuje s optickými přístroji.

Právě tyto skutečnosti vyžadují, aby teorii vidění byla věnována stále větší pozornost, aby bylo možno na základě dosažených výsledků předcházet zhoršování zraku a učit člověka za daných podmínek využívat v optimální míře svého zraku.

Úkolem tohoto skripta nemohou být problémy vidění v celé jejich šíři, neboť velká většina z nich spadá do oblasti zdravotnictví. Hlavním cílem tohoto skripta je problém korekce vad oka a konstrukce brýlových skel. Protože však přístrojová technika vyžaduje, aby optické přístroje, které pracují ve spojení s okem, byly v maximální míře přizpůsobeny možnostem lidského oka, budeme se v našich úvahách zabývat jednotlivými problémy vidění a stavbou oka v takovém rozsahu, který odpovídá potřebám konstruktéra optických přístrojů.

Celé skriptum je rozděleno na 4 části. První část je věnována problémům klidného (pevného) oka a jeho korekci, druhá část se zabývá okem pohybujícím se v očním důlku a jeho korekcí, třetí část řeší problémy binokulárního vidění a korekce příslušných vad a konečně poslední, čtvrtá část se týká měřících metod a příslušných oftalmoskopických přístrojů.

Problémy fysiologické optiky jsou zpracovány v řadě děl od různých autorů. V roce 1945 byla ve Francii vydána třídílná "Optique physiologique", napsaná Yves Le Grandem, profesorem na Muséum National d'Histoire Naturelle v Paříži. Je to vynikající vědecké dílo, které ve značné míře přispívá ke zvednutí úrovně brýlařské optiky, která je ještě v mnohých zemích na úrovni živnostenské vý-

roby. Přes svou vysokou úroveň je dílo psáno velmi přístupnou formou. I když jsem prostudoval řadu různých jiných děl, přidržoval jsem se při psaní tohoto skripta především prvního dílu tohoto obsáhlého díla, který podává vyčerpávajícím způsobem nejrůznější problémy brýlařské optiky, na které je toto skriptum zaměřeno.

I. část

KLIDNÉ OKO A JEHO KOREKCE

2) Zrak a jeho orgány

Zrak tvoří nejdůležitější smysl člověka. Zrakový vjem je výsledkem složité spolupráce jednotlivých zrakových orgánů, tj. vlastního oka a odpovídající části mozku. Oba tyto orgány jsou spojeny rozvětvenou soustavou nervů, které procházejí jakýmisi přepínacími stanicemi, zvanými ganglia.

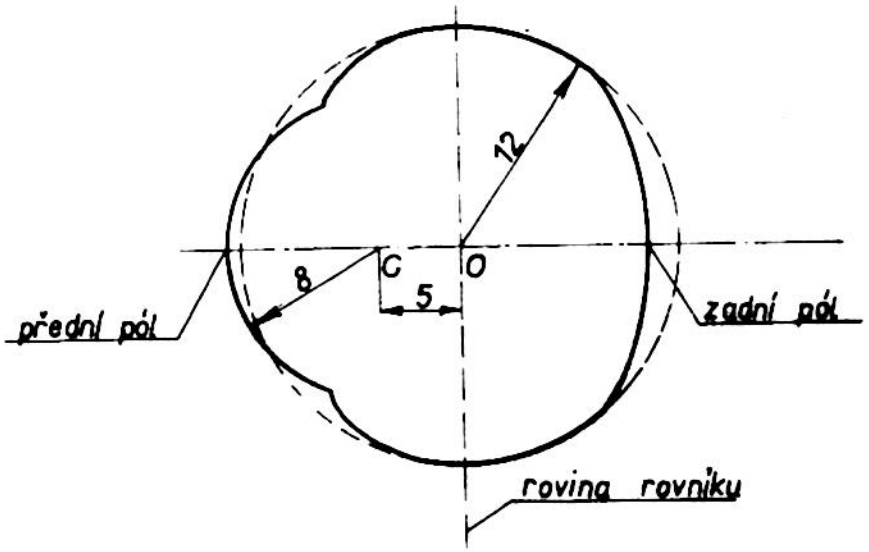
Způsob této spolupráce a průběh předávání informací těmito spoji není zatím do jednotlivostí prozkoumán. Na vzájemné souvislosti mezi jednotlivými zrakovými orgány není ani možno soudit z výsledků výzkumů prováděných na zvířatech, neboť zrakové orgány jsou u zvířat jednodušší. Přesto však je možno říci, že hlavní problémy těchto vzájemných vztahů jsou již známy.

Všimněme si proto nyní podrobně jednotlivých zrakových orgánů.

3) Stavba oka - tvar oka

Z anatomie člověka je známo, že žádný lidský orgán nemá přesně geometrický tvar. Přesto je možno z důvodů jednoduchosti uvažovat oko dospělého člověka jako kouli o poloměru přibližně 12 mm, která přechází v přední části v kulovité okno o poloměru křivosti 8 mm, jehož střed křivosti C leží 5 mm před středem O vlastní oční koule.

Geometrická osa protíná vnější plochu oka v předním resp. zadním pólu. Rovina procházející středem O oka kolmo na jeho osu se nazývá rovníková (ekvatoreální), zatímco roviny obsahující geometrickou osu se nazývají meridionálními.



Obr. 3.1 Geometrický tvar lidského oka

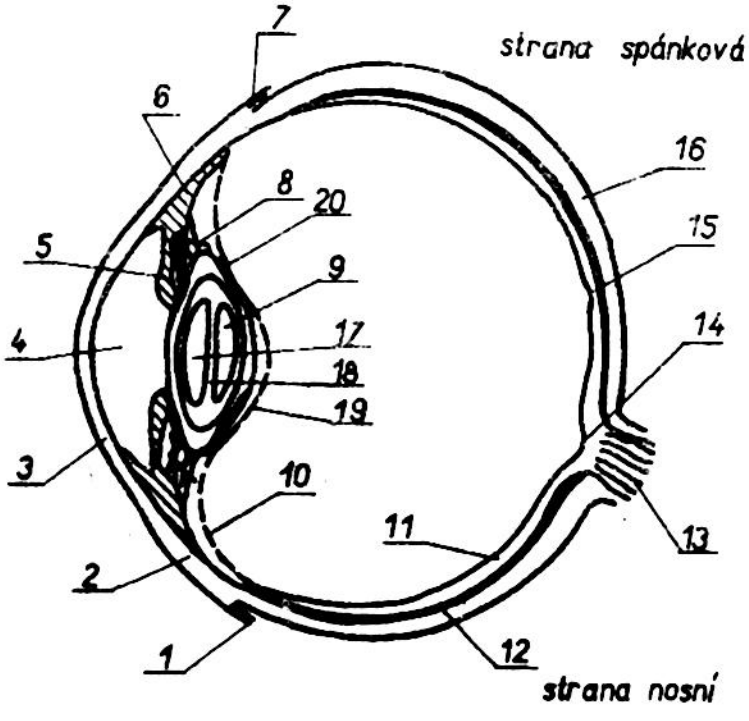
Z obr. 3.1 je zřejmé, že přední stěna oční koule je kuželovitě deformována a zadní je poněkud sploštělá. Geometrická osa není osou rotace, neboť křivost oční koule v ekvatoreální rovině je obecně na spánkové straně menší než na straně nosní. Je třeba si uvědomit, že oko není uzavřeno nedeformovatelnou obálkou a že tedy tvar oka závisí na odporu stěn obalu a tlaku kapalin tvořících jeho náplň.

3.1) Jednotlivé části oka

Vnější blána očního obalu je tvořena vrstvičkou pevných vláken, která chrání oko, udržuje jeho tvar a slouží jako kostra obalu. Na tuto vrstvičku se napojují svaly (1) resp. (7), které zajišťují pohyb oka v očním důlku. Tato blána se skládá ze dvou částí, neprůhledné bělimy (16), která tvoří 5/6 a průhledné rohovky (3). Bělima je na vnější straně bílá a na vnitřní straně hnědá.

Na vnitřní straně bělimy je cévnatka (15) bohatá na cévy, která vyživuje oko a udržuje jeho teplotu. Je silně pigmentována, takže je na vnitřní straně černá a na vnější hnědá a tedy dobře absorbuje světlo, které prošlo bělimou. Pokrývá asi 2/3 plochy oční koule. V přední části přechází cévnatka do ciliárního tělesa (6), které je zakončeno duhovkou (5). Ciliární těleso je tvořeno prstencem, jehož vnější část se připojuje k bělimě a vnitřní část splývá s duhovkou. Duhovka je umístěna před čočkou a její otvor se nazývá oční pupilou.

K duhovce přiléhá jako třetí vnitřní blána očního obalu sítnice (11), která je tvořena spletí nervových vlákének a jejíž vrstvička přiléhající k duhov-



Obr. 3.1.1 Vodorovný řez okem

ce je tvořena světlocitlivými buňkami, které transformují světelné rozruchy na rozruchy nervové.

V přední části oka je uložena oční čočka (9), která je uzavřena v pouzdře (20), které je upevněno tzv. Zinnovými vlákny (8) na ciliárním tělese. Svou přední plochou se opírá o zadní stěnu duhovky. Tím je oční dutina rozdělena na dvě části. Přední část, uzavřená rohovkou, duhovkou a čočkou je vyplněna bezbarvou kapalinou zvanou oční mok. Druhá část, která je tvořena čočkou a sítnicí, je vyplněna rosolovitou látkou zvanou sklivec, který tvoří největší část oka (5 cm^3 z celkového obsahu 7 - 8 cm^3).

Všimněme si nyní podrobněji jednotlivých částí oka.

3.2) Bělima (sclera)

Tloušťka bělimy se mění od 1 až 1,5 mm na zadní straně, přes 0,5 mm na rovníku, do 0,8 mm v sousedství rohovky. Je prostoupena velkým počtem kanálků (cév apod.) a v zadní části otvorem, kterým prochází oční nerv. Tento otvor je kuželového tvaru a má průměr 1,5 mm na vnitřní straně a 3 mm na vnější straně oka. Není umístěn v zadním pólu, nýbrž je posunut o 3 až 4 mm ve směru k nosu. Otvor je vlastně tvořen sítem o tloušťce 0,5 mm vyklenutým dozadu, jehož otvory prochází jednotlivá nervová vlákna.

Bělima je tvořena vlákny, která se spojují v proužky o šířce 0,1 mm a tloušťce 0,01 mm, které probíhají rovnoběžně s její plochou tak, že se kříží ve všech směrech. V zadní části mají tyto proužky radiální směr, jejich vlákna jsou svlnělá a jsou prostoupena pružnými vlákny, což umožňuje, aby bělima v této části reagovala na změny vnitřního tlaku v oku. V přední části jsou

tyto proužky rovnoběžné s rovinou rovníku a vytváří na rovníku tuhý prstenec, na který se napojují svaly sloužící k pohybu oka.

Bělima je chudá na cévy a nervy a její citlivost je proto velmi otupělá.

3.3) Rohovka (cornea)

Spojení rohovky s bělimou je zprostředkováno uzoučkým rohovkovým kruhem o šířce cca 0,7 mm, který se jeví ze zadní strany jako kruh, avšak z přední strany má tvar elipsy, jejíž vodorovná hlavní osa se pohybuje podle stáří v rozsahu od 9 do 13,5 mm a převyšuje vedlejší osu o 0,2 až 2 mm. Tloušťka rohovky v místě předního pólu je 0,4 až 0,7 mm a roste směrem k rohovkovému kruhu. Eliptický tvar přední části rohovky je často příčinou osového astigmatismu.

Rohovka je složena z 5-ti vrstev:

a) rohovkový epithel o tloušťce cca 45 µm, který obsahuje povrchovou vrstvu složenou ze dvou až tří vrstviček plochých dlaždicových buněk, které zajišťují velmi hladký povrch rohovky a její nepropustnost, dále střední vrstvu z polyedrických buněk uspořádaných do dvou až tří vrstviček a konečně vnitřní vrstvy složené z válcovitých buněk. Všechny tyto buňky se velmi čile dělí a vyznačují velkou regenerační schopností. Mezi buňkami jsou četná zakončení sensitivních nervových vláken, která způsobují, že rohovka je nejcitlivější částí oka.

Rohovkový epithel je neustále pokryt vrstvičkou slzné kapaliny, která se obnovuje při každém pohybu víček a která jednak vyplňuje prohlubně povrchu a jednak napájí rohovku, čímž ji vyživuje. Je tedy možno říci, že oko si samo povrch rohovky neustále "přeleštuje", čímž nabývá jakosti opticky leštěné skleněné plochy.

b) Bowmanova vnější ohraničující blanka (lamina limitans externa) o tloušťce 9 - 10 µm, která je tvořena hustě slisovanými vlákénky a která tvoří podklad pro povrchový epithel. Vyznačuje se pevností, není však schopna regenerace.

c) Základní částí rohovky je tzv. substantia propria corneae, jejíž tloušťka je rovna 90 % tloušťky celé rohovky. Je tvořena vlákny, která jsou uspořádána do lamel probíhajících rovnoběžně s povrchem, jejichž jednotlivé vrstvičky se vzájemně kříží. Mimoto jsou tyto lamely prostoupeny elastickými vlákny, která zajišťují pružnost rohovky, jež je daleko větší než pružnost bělimy. Meziprostory lamelové struktury jsou vyplněny vazivovými buňkami, které spolu s přesným poměrem vody zajišťují konstantní index lomu a dokonalou průhlednost.

S postupem stárnutí se ukládají na okrajových částech rohovky kapičky anisotropního tuku, který způsobuje zahnědlý srpkovitý zákal, který se směrem do středu vytrácí.

d) Čtvrtá vrstva je tzv. membrana limitans interna (Descemet, Demours) o tloušťce 7 - 11 µm, která je homogenní a velmi pevná a není pevně spojena s předcházející vrstvičkou, od které se dá snadno oddělit. Jeví regenerační schopnost.

e) Poslední vrstvička je tzv. endothel rohovky; je tvořena plochými buňkami, které vystýlají přední oční komoru. Buňky mají šestiboký tvar a tvoří vrstvičku o tloušťce 6 µm.

3.4) Cévnatka (choroides)

Pokrývá dvě třetiny zadní části oka a sahá na 7 - 8 mm k rohovkovému kruhu, tedy do míst, kde sítnice přestává být citlivá na světlo. Její tloušťka je cca 0,2 mm a směrem dopředu se zmenšuje až na 0,1 mm. V okolí otvoru pro oční nerv má tloušťku cca 0,4 mm. Má velký obsah cév a pigmentu, takže má hnědočervenou barvu a tvoří jakousi temnou komoru pro citlivou vrstvu sítnice.

Po zevní ploše cévnatky probíhají ve směru meridionálním vlákna ciliárních nervů, dvě arterie a jemné žíly, které se paprskovitě rozvětvují do jednotlivých kvadrantů oka. Vnitřní plocha cévnatky, která sousedí se sítnicí, je hladká a její pružná vlákna tvoří podkladovou blanku, na kterou přiléhá pigmentová vrstvička sítnice.

Na cévnatce rozeznáváme čtyři vrstvy:

a) Zevní vrstva, tzv. stratum perichorioideum, o tloušťce 10 až 35 µm, je složená z lamelek, mezi nimiž se nacházejí buňky s pigmentem, nervová vlákna a ganglie, kterým se připočítává regulace cévnatkové cirkulace.

b) Druhá vrstva, lamina vasculosa obsahuje velké množství cév. V této vrstvě probíhají arterie, které se zde velmi rozvětvují a vysílají kapilárky i do následující třetí vrstvy.

c) Třetí vrstva, lamina capillarium obsahuje velmi široké krevní kapiláry, které tvoří hustou síť a vyživují vnější vrstvu sítnice obsahující elementy citlivé na světlo, tj. čípky a tyčinky.

d) Poslední vrstva, lamina basialis, má velmi malou tloušťku cca 1,5 µm a je tvořena hladkým vazivem. Někteří savci mají mezi touto a předposlední vrstvou slaboučkou vláknitou vrstvičku obsahující jemné krystalky, modře nebo zeleně zbarvené, které odrážejí světlo zpět k sítnici a způsobují světélkování očí, např. u psů a koček.

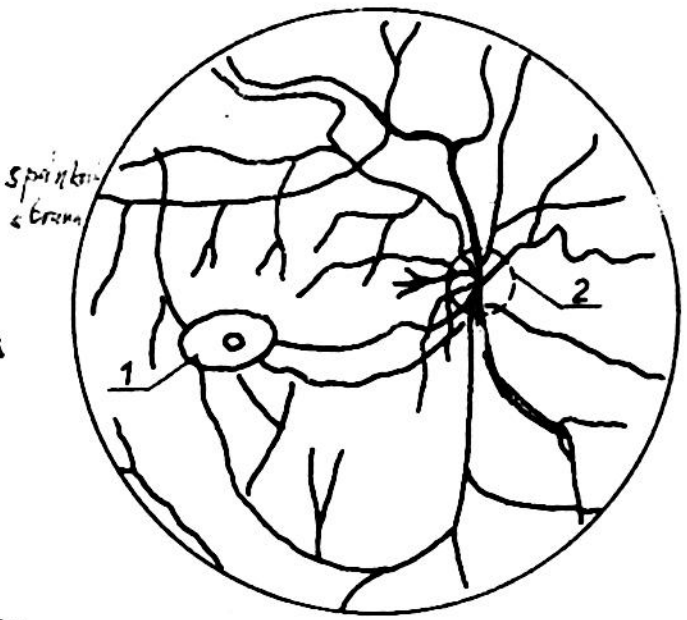
3.5) Sítnice (retina)

Sítnice vystýlá vnitřní část oční koule až k okraji duhovky. Je to prvotní vrstva, která se vyvíjí z očních pohárků embrya. Ostatní její vrstvy se di-

ferencují teprve na jejím povrchu. Vnější list očního pohárku se mění na pigmentovou vrstvu sítnice. Z vnitřního listu očního pohárku se vytváří v zadní části oční koule nervové elementy, zatímco v přední části přechází tento list v tenkou vrstvičku, která neobsahuje elementy citlivé na světlo. Hranici mezi oběma těmito částmi tvoří zubatá čára, zvaná ora serrata.

Zadní, optická část sítnice je za živa sklovitě průhledná a hladká. Její zabarvení je podmíněno krevní náplní kapilár cévnatky a hustotou pigmentu v pigmentové vrstvičce sítnice. Její tloušťka je největší v místě slepé skvrny (2) a činí 0,5 mm a zmenšuje se až na 0,2 mm na rovníku. V místě, kde vstupuje do oka oční nerv, je tzv. slepá skvrna (2) (viz obr. 3.5.1) o průměru cca 1,5 mm. Střed slepé skvrny je prohlouben a vystupují z něho jemné cévy, které se rozvětvují po ploše sítnice. V místě slepé skvrny chybějí tyčinky a čípky, čímž si vysvětlíme její název. Slepá skvrna je lemována světlejším prstencem, jehož obvod je obyčejně tmavě pigmentován.

Asi 4 mm směrem ke spánkové straně od slepé skvrny leží tzv. žlutá skvrna (1) (macula lutea). Žlutá se nazývá proto, že je u mrtvoly žlutě zabarvena, zatímco u živého oka se jeví spíše červenější než její okolí. Má tvar elipsy o delším rozměru asi 3 mm. Její střed je značně prohlouben a tvoří tzv. fovea centralis, která je místem nejlepšího vidění. V místě, kde se nachází fovea, je tloušťka sítnice velmi malá, jen asi 0,1 mm. Pozorujeme-li oběma očima určitý malý předmět, pak jeho obraz padá do středu fovea centralis. Místo, kde dochází k nejlepšímu vidění, má průměr cca 0,3 mm; příslušné vidění se často nazývá foveální a je to vidění, které jediné bude předmětem našich dalších úvah.



Obr. 3.5.1 Oční pozadí (sítnice).

Sítnice je složena z řady vrstev.

a) Zevní vrstva sítnice spočívá na poslední vrstvě cévnatky (lamina basalis) a je tvořena buňkami, které jsou nabity pigmentem.

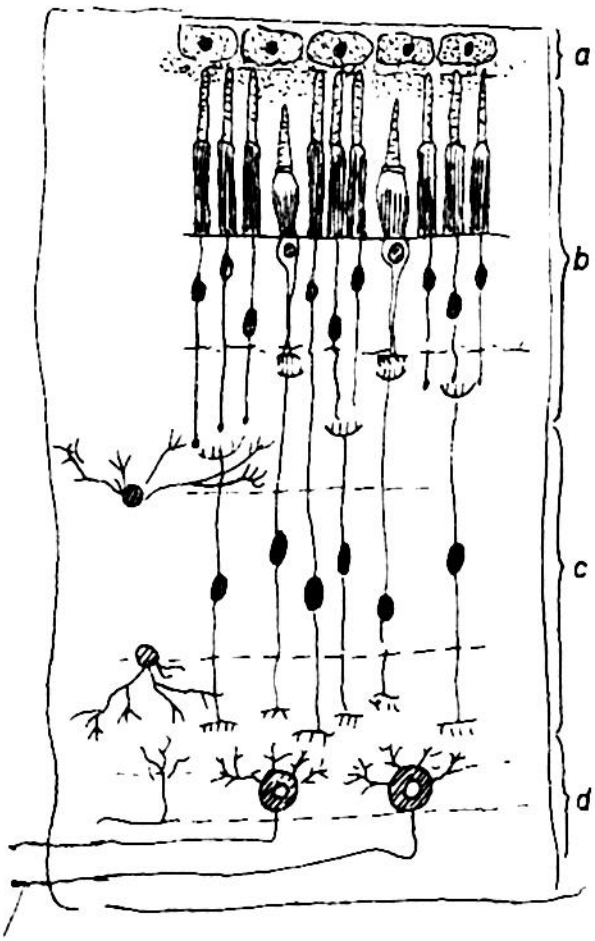
b) Druhá vrstva se skládá ze světlocitlivých elementů, tzv. tyčinek a čípků, jejichž přijímače zasahují do pigmentové části první vrstvy a vodivé části směřují do vnitřku oka.

čípků 7 milionů
tyčinek 130 milionů | tj 100 Mpixel

Tyto útlé tyčinky i baňatější čípky tvoří primární smyslové buňky a jsou nadutelé v místě, kde mají uloženo jádro. Jejich vodivé výběžky se stromečkovitě rozvětvují a odevzdávají podráždění dendritům buněk následující třetí vrstvě.

Pokusně bylo dokázáno, že tyčinky jsou citlivé na množství světla a čípky jsou citlivé na barvy. Proto zvířata noční mají jenom tyčinky a zvířata denní jenom čípky.

Žlutá skvrna obsahuje výhradně čípky, jejichž počet na sítnici směrem k její periferii se zmenšuje. Celkový počet čípků na sítnici se odhaduje na 7 a tyčinek na 130 milionů. Tyčinky obsahují červené barvivo, rhodopsin, které se světlem rozkládá a ve tmě znovu regeneruje.



hezký

Obr. 3.5.1 Jednotlivé vrstvy sítnice

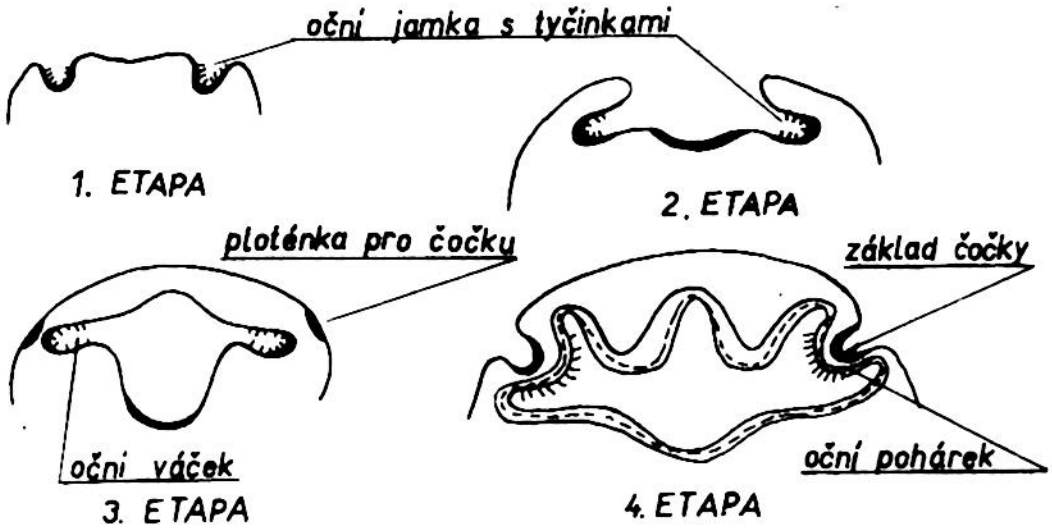
c) Další vrstva je tvořena bipolárními buňkami, kulovitého tvaru, jejichž dendrit přivádí podráždění od tyčinek a čípků. Jejich neurit odevzdává příslušné podráždění gangliovým buňkám další vrstvy. Přitom dendrit jedné bipolární buňky opřádá vodivé výběžky tří až pěti tyčinek, ale jen od jediného čípku.

d) Čtvrtá vrstva je tvořena gangliovými buňkami. Jsou to velké jaderné buňky, které se silně rozvětvují proti předcházející vrstvě. Po vnitřní ploše sítnice vysílají dlouhá vlákna (neurity), které se sbíhají v otvoru, který prochází slepou skvrnou, kde se spojují v oční nerv.

e) Proti sklivci je sítnice chráněna zhuštěnou teninkou blankou, zvanou membrana limitans interna.

Závěrem ke stavbě sítnice je třeba zdůraznit, že sled jednotlivých vrstev, v jakém byly v předchozích úvahách uváděny, je obrácený než směr dopadajícího světla. To znamená, že vlastně vrstva, obsahující světlocitlivé elementy, je na odvrácené straně, takže světlo, přicházející do oka, musí projít nejdříve vrstvami obsahujícími nervová vlákna, gangliové vrstvy apod. a teprve pak je zachycováno citlivými receptory. Říkáme proto často, že sítnice lidského oka je inversní.

Tato skutečnost se dá vysvětlit vývojovými etapami embrya. Na obr.3.5.2 jsou znázorněny čtyři etapy vývoje.



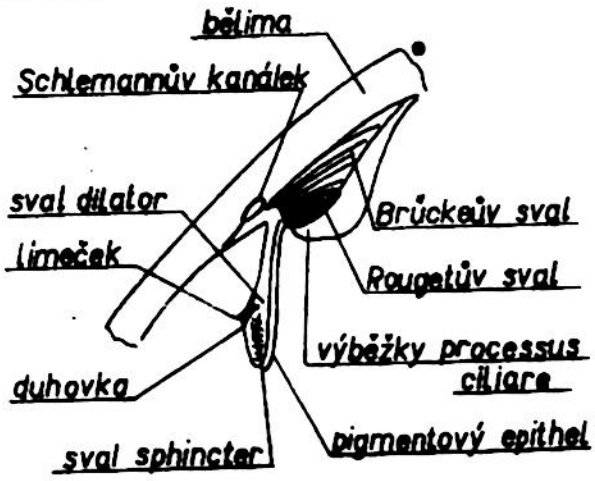
Obr. 3.5.2 Čtyři vývojové etapy očí u embrya.

Z těchto etap je patrno, že čípky, které jsou v první etapě přivrácený k dopadajícímu světlu, jsou ve čtvrté etapě na odvrácené straně vzhledem k dopadajícímu světlu. Tímto způsobem vznikají inverzní komorové oči, se kterými se setkáváme u všech obratlovců.

Druhá část sítnice, ležící od linie ora serrata v přední části oka, přechází na ciliární těleso a zadní plochu duhovky. Je tvořena pouze dvěma vrstvami a to vnější pigmentovou a vnitřní složenou z podpůrných buněk.

3.6) Ciliární (řasnaté) těleso (corpus ciliare)

Ciliární těleso má tvar věnečku trojúhelníkového průřezu, jak je to naznačeno na obr. 3.6.1. Podstatnou částí tohoto tělesa je ciliární sval s početnými svalovými vlákny. Snopce tohoto svalu jsou uspořádány radiálně a tvoří tzv. Brückeův sval. Část těchto vláken přechází do cévnatky a část jich zahýbá radiálně do ciliárního tělesa. Směrem dovnitř oka probíhají rovnoběžně s rovinou rovníku kruhová vlákna Rougetova svalu, který tvoří pretencovitý svěrač v blízkosti obvodu duhovky.



Obr. 3.6.1 Řez ciliárním tělesem a duhovkou

Ciliární sval je svalem akomodačním a umožňuje vidění blízkých předmětů.

Ciliární těleso je nejtlustší v místě přechodu bělimy do rohovky. Jeho centrální okraj je značně nerovný a vysoký a na ploše přivrácené do sklivce na něm vyvstávají výběžky 2 - 3 mm dlouhé a 1 mm vysoké, zvané processus ciliares. Je jich asi 70 a jsou uspořádány radiálně paprskovitě. Pigmentový epithel, který přechází ze sítnice po zadní stěně ciliárního tělesa na duhovku, je v místech těchto výběžků velmi ztenčen a dodává jim hnědého zabarvení. Z míst mezi těmito výběžky vybíhají k oční čočce jemná Zinnova závěsná vlákna.

3.7) Duhovka (Iris)

Duhovka má mírně eliptický tvar. Svislá menší osa má délku oca 12 mm, vodorovná osa je asi o 0,25 mm delší. Má poněkud excentricky vykrojen kruhový otvor, zvaný zornička, panenka nebo pupila. Excentricita se projevuje pošinutím pupily více k nosní straně.

Přední plocha duhovky je vidět průhlednou rohovkou a vyznačuje se charakteristickou barvou a kresbou. Podle její barvy se mluví o barvě očí. Přes okraj pupilového otvoru se v nepatrné míře přehýbá zadní pigmentový list sítnice, a vytváří kolem okraje zorničky tmavě hnědý lem. V místě, kde je duhovka nejtlustší, se vytváří jakýsi límeček, který se projevuje jako nepravidelná vlnitá čára probíhající soustředně s pupilou. Tím je celá duhovka rozdělena na dvě zony, z nichž každá má svoji charakteristickou kresbu. V obou zonách probíhají v radiálním směru krypty, jimiž prosakuje komorová tekutina do duhovkových cév.

Vlastní duhovka se skládá se dvou vrstev, předního a zadního listu.

Přední list je složen z velkého množství krevních cév probíhajících radiálně, z řídkého vaziva s menším počtem vláken a rozvětvených vazivových buněk s proměnlivým množstvím pigmentu.

Zadní list přechází na zadní plochu duhovky z ciliárního tělesa a tvoří pokračování přední části sítnice. Jeho válcovité buňky jsou rozmístěny v jediné vrstvě a jsou nabity pigmentem.

Duhovka má dva svaly, zornič kový svěrač (sphincter) a dilator. První z nich je tvořen asi 1 mm širokým svazkem svalových vláken a je umístěn uprostřed duhovkového tělesa, jak je to vidět na obr. 3.6.1. Druhý sval je umístěn dále k vnějšímu okraji duhovky; jeho vlákna jsou uspořádána paprskovitě.

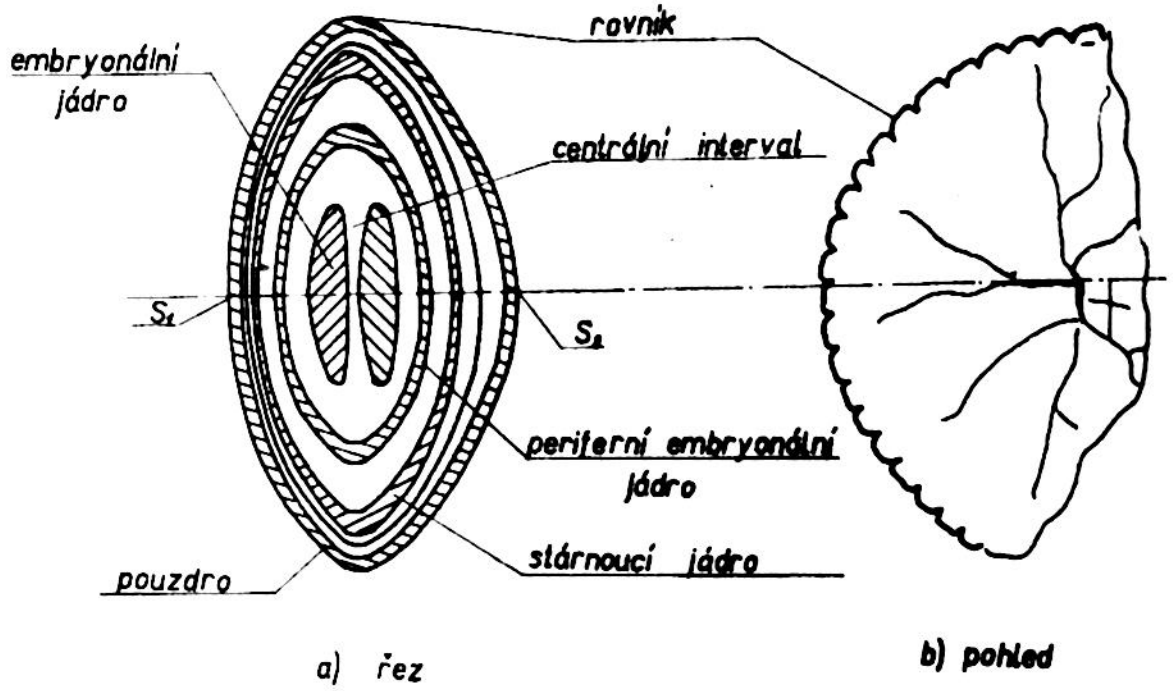
Spoluprací obou těchto svalů se řídí velikost pupily v rozsahu průměrů od 1,5 mm do 9 - 10 mm. Tím se reflexně řídí množství světla přiváděného do oka.

3.8 Oční čočka (lens crystallina)

Oční čočka je za živa průhledná a jasná. Pravidelně je lehce nažloutlá, u novorozeňat má zelenavý nádech. S postupujícím věkem nabývá tmavožlutého zabarvení a stává se méně propustnou.

Oční čočka se vyvíjí po celý život; jednak vzrůstají její rozměry tak, že se nové vrstvy vytvářejí na starších, tak jako léta na kmeni stromů. Čočka novorozeněte má průměr 6 mm a tloušťku 3,5 mm a dosahuje u dospělého člověka průměru 9,5 mm a tloušťky 4,5 mm. Zatímco čočka novorozeněte je spíše kulovitá, nabývá čočka u dospělého člověka tvaru nesouměrné čočky, jejíž přední plocha má větší poloměr křivosti a sice 10 - 11 mm; zadní plocha má spíše tvar rotačního paraboloidu, jehož zakřivení ve vrcholu je možno charakterisovat poloměrem o hodnotě 5 - 6 mm.

Na druhé straně čočka s postupujícím věkem člověka tuhne. Látka, se které je oční čočka vytvořena, je mírně dvojlomná. Obě vnější plochy čočky vzájemně přecházejí do sebe na rovníku, který je mírně vroubkován, jak je to vidět z obr. 3.8.1 b). Vrchol S_1 resp. S_2 se nazývá předním resp. zadním polem.



Obr. 3.8.1 Řez oční čočkou a čárkovaný pohled na čočku

V okolí rovníku se na oční čočku upínají závěsná vlákna (Zinnova), která jsou druhými konci zavěšena na ciliárním tělese. Štěrbiny mezi těmito vlákny jsou spojeny se zadní oční komorou. Závěsná vlákna svým tahem čočku sploštují a přizpůsobují ji vidění vzdálených předmětů. Při smrštění ciliárního svalu se

posouvá celé ciliární těleso směrem dopředu, čímž se zmenšuje napětí závěsných vláken, takže čočka se svou vlastní pružností vyklene a přizpůsobí se pozorování blízkých předmětů.

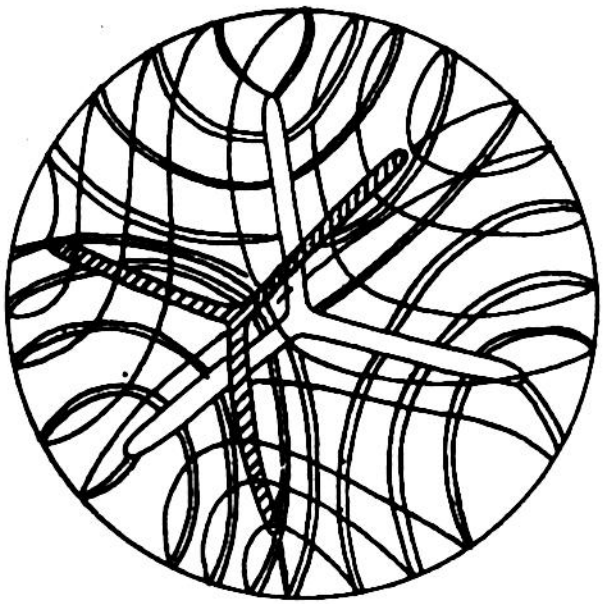
Podle některých pracovníků má podstatný vliv na změnu tvaru připojení sklivce na závěsný aparát a na periferní části čočky.

Optická lámavost čočky se pohybuje od 17 do 20 dioptrií. Odstraní-li se čočka při šedém zákalu operativně, stačí ji nahradit brýlovým sklem o lámavosti jen 10 - 12 dioptrií, neboť brýlové sklo se umísťuje ve vzdálenosti asi 13 mm před okem.

V průběhu druhého embryonálního měsíce se vytváří na povrchu čočky bezstrukturní pouzdro, které má tvar pevné a pružné blány, jež není spojena s hmotou vlastní čočky.

Čočka vzniká v době embryonální z oční jamky, která se po vchlípení do očního pohárku přemění v dutý, kulovitý váček. Jeho stěna je tvořena jednou vrstvou ektodermových buněk, které si svůj tvar podržují jen v rozsahu přední plochy. V místě budoucího rovníku a hlavně za ním se původně nízké buňky zvyšují, protahují a přeměňují v dlouhá šestiboká vlákna, která postupně vyplní celý čočkový váček. V průběhu vývoje roste čočka tak, že nová vlákna vznikají na povrchu starších vláken. Tato vlákna se směrem k rovníku zplošťují a mají šířku asi 10 µm a délku 7 - 8 mm. Vznikají z rovníku a přecházejí z jedné strany čočky přes rovník na druhou stranu. Protože jejich délka je menší než průměr čočky, přesáhne vlákno, začínající ve středu jedné plochy, pouze asi 1/6 své délky přes rovník na druhou plochu, kde končí v blízkosti rovníku. Po určité době se setkávají vlákna u čočky novorozeněte na přední i zadní její ploše ve třech švech mající tvar písmene X. Přitom šev na druhé ploše je pootočen o 60° vzhledem ke švu na první ploše, jak je to vidět na obr. 3.8.2. S postupným stárnutím roste i počet švů, které se částečně rozvětvují, jak je to patrno na obr. 3.8.1 b).

V embryonálním jádru zůstává obraz tříramého hvězdicového švu zachován.



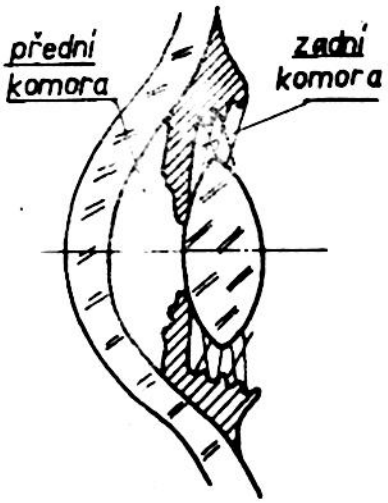
Obr. 3.8.2 Schema průběhu čočkových vláken a švů u čočky novorozeněte

1212-5083

3.9) Oční mok (humor aqueus)

Oční mok vyplňuje obě oční komory, tj. přední komoru, tvořenou zadní plochou rohovky, přední plochou duhovky a čočky a zadní komoru, tvořenou zadní plochou duhovky a přední plochou čočky. Je to čirá tekutina obsahující 7 až 8 g NaCl v litru. Vyprázdníme-li oční komoru, pak oční mok se regeneruje během 1 hodiny. Štěrbinami mezi závěsnými vlákny čočky proudí oční mok z přední komory do zadní a odtud pupilou zpět do přední komory. Odtok očního moku se uskutečňuje prosakováním duhovkovými kryptami do duhovkových cév.

Hydrostatický tlak očního moku se nazývá očním tlakem a mění se od 12 do 35 mm sloupce rtuti a je vyšší u dětí než dospělých; mění se během dne tak, že ráno nabývá maxima a večer minima.



Obr. 3.9.1 Oční komory

3.10) Sklivec (corpus vitreum)

Sklivec, zvaný též skelný mok vyplňuje celý prostor oční koule za čočkou. Je sklovitě průhledná a má huspeninovou konsistenci. Jeho struktura je vláknitá, přičemž se příslušná vlákna kříží a proplétají všemi směry. Prostor mezi vlákny je vyplněn viskosní tekutinou. Sklivec obsahuje 99 % vody, 7 g NaCl na litr, málo albuminu a trochu cukru. Není inertní a malá změna p_H (kolem 7,8) způsobuje nabobtnání sklivce, čímž se změní oční tlak.

V přední části sklivce je mělká jamka, do níž zapadá svou zadní plochou oční čočka. V sousedství se sítnicí je sklivec zahuštěn v membranu zvanou hyaloidea, která lne k sítnici pevněji v místě slepé skvrny a při linii ora serrata. V ose sklivce probíhá kanálek, kterým do 6-tého měsíce vývoje probíhá větev arterie, která živí čočku a po této době zaniká.

4) Rozměry a optické vlastnosti oka

Abychom mohli správně korigovat vadné oko, musíme znát jeho rozměry a nejdůležitější jeho optické vlastnosti. Přitom rozměry oka rozumíme poloměry křivosti kulových ploch jeho různých částí, jako např. rohovky, oční čočky, apod., vzdálenosti vrcholů jednotlivých ploch atd. K optickým vlastnostem čítáme indexy lomu jednotlivých částí, jako rohovky, oční čočky, očního moku nebo sklivce, lámavosti jednotlivých kulových ploch, rohovky oční čoč-

ky nebo celého oka a konečně polohy hlavních a uzlových bodů, ohnisek apod. K určení těchto hodnot byla vypracována řada vhodných měřicích metod a zařízení, jejichž popis a konstrukce bude předmětem poslední části tohoto skripta.

Protože celá řada z uvedených optických parametrů se musí určit výpočtem z naměřených rozměrů, všimněme si nejdříve základních vztahů, kterými se řídí zobrazování optických soustav.

4.1) Základní vztahy geometrické optiky oka

V geometrické optice oka vystačíme se vztahy platícími pro Gaussův (paraxiální) prostor. Nutno však zdůraznit, že v případě oka se setkáváme s řídkou výjimkou, kdy prostředí před soustavou má jiný index lomu než prostředí za soustavou. Proto musíme uvažovat příslušné vztahy vždy v jejich obecném tvaru.

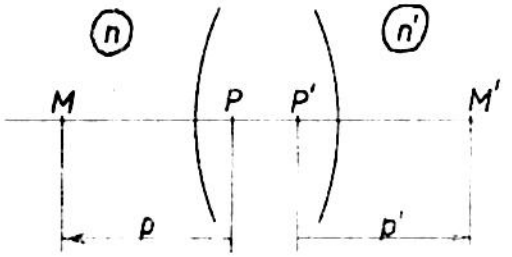
Nechť optická soustava je dána jejími hlavními body P a P´ a její lámavostí D. Nechť p resp. p´ značí vzdálenosti předmětového bodu M od předmětového hlavního bodu P resp. příslušného obrazu M´ od obrazového hlavního bodu P´, měřené kladně ve směru šíření světla, jak je to naznačeno na obr. 4.1.1. Potom platí

$$\frac{n'}{p'} - \frac{n}{p} = D$$

nebo

$$\frac{n'}{p'} = \frac{n}{p} + D \,, \qquad (4.1.1)$$

kde n resp. n´ značí indexy lomu prostředí před resp. za soustavou.



Obr. 4.1.1 K určení základních vztahů geometr. optiky oka.

Uvažujme případ, kdy $p' = \infty$. Potom

$$D = -\frac{n}{p} = -\frac{n}{\overline{PF}} = -\frac{n}{f} \,. \qquad (4.1.2)$$

Nechť $p = \infty$, pak

$$D = \frac{n'}{p'} = \frac{n'}{\overline{P'F'}} = \frac{n'}{f'} \,, \qquad (4.1.3)$$

kde f resp. f´ značí předmětovou resp. obrazovou ohniskovou vzdálenost soustavy.

Platí tedy

$$f = -\frac{n}{D} \qquad (4.1.4)$$

$$f' = \frac{n'}{D} \,. \qquad (4.1.5)$$

Ze vztahů (4.1.4) resp. (4.1.5) je patrno, že pro soustavu spojnou (rozptylnou) mající lámavost D kladnou (zápornou) je ohnisková vzdálenost předmětová f záporná (kladná) a obrazová ohnisková vzdálenost f' kladná (záporná). Budeme proto obdobně jako v běžné geometrické optice rozlišovat optické soustavy podle jejich obrazové ohniskové vzdálenosti.

Pro příčné zvětšení soustavy platí

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{\frac{p'}{n'}}{\frac{p}{n}} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{p'}{p} \qquad (4.1.6)$$

nebo dosadíme-li sem za p' resp. p z (4.1.1)

$$m = \frac{\frac{p}{n + p \cdot D}}{\frac{p}{n}} = \frac{n}{n + p \cdot D} \qquad (4.1.7)$$

nebo

$$m = \frac{\frac{p'}{n'}}{\frac{p'}{n' - p'D}} = \frac{n' - p'D}{n'} \,. \qquad (4.1.8)$$

Nejjednodušší z centrovaných optických soustav je jediná kulová lámavá plocha. Nechť r značí její poloměr křivosti. Potom pro její lámavost vychází jednoduchý vztah

$$D = \frac{n' - n}{r} \,. \qquad (4.1.9)$$

Tato lámavost bude kladná, jestliže prostředí o větším indexu lomu vyplňuje dutou část plochy.

Hlavní body této jednoduché optické soustavy splývají s vrcholem plochy. Obráceně platí, existuje-li centrovaná optická soustava taková, že její hlavní body splývají, pak ji můžeme nahradit jedinou lámavou plochou, jejíž vrchol splyne s hlavními body.

Všimněme si nyní soustavy, která vznikne spojením dvou optických centrovaných soustav. Nechť první z nich je určena hlavními body P_1 , P_1' , lámavostí

D_1 a nechť n_1 resp. n_1' značí indexy lomu prostředí před resp. za soustavou. Podobně nechť je druhá soustava určena P_2 , P_2' , D_2 a n_2 resp. n_2' .

Obě uvažované soustavy můžeme spojit v jedinou jen tehdy, bude-li prostředí za první a před druhou soustavou stejné, tj. bude-li platit

$$n_1' = n_2 \ .$$

Nechť σ značí tzv. redukovanou vzdálenost přilehlých hlavních bodů P_1' a P_2 obou soustav, tedy

$$\sigma = \frac{\overline{P_1' P_2}}{n_1'} = \frac{\overline{P_1' P_2}}{n_2} \ . \qquad (4.1.10)$$

Potom vychází pro výslednou lámavost D soustavy vzniklé spojením obou uvažovaných soustav

$$D = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \, . \, \sigma \ . \qquad (4.1.11)$$

Je zřejmé, že v této výsledné optické soustavě bude index lomu n resp. n' před resp. za soustavou

$$n = n_1 \qquad \text{resp.} \qquad n' = n_2' \ .$$

Poloha hlavních bodů P , P' soustavy je dána vzhledem k hlavním bodům P_1 resp. P_2' obou soustav vztahy

$$\frac{\overline{P_1 P}}{n} = \sigma \, . \, \frac{D_2}{D} \qquad (4.1.12)$$

$$\frac{\overline{P_2' P'}}{n'} = - \sigma \, . \, \frac{D_1}{D} \qquad (4.1.13)$$

Tím jsme zrekapitulovali nejdůležitější vztahy, které budeme v dalších úvahách nejvíce používat.

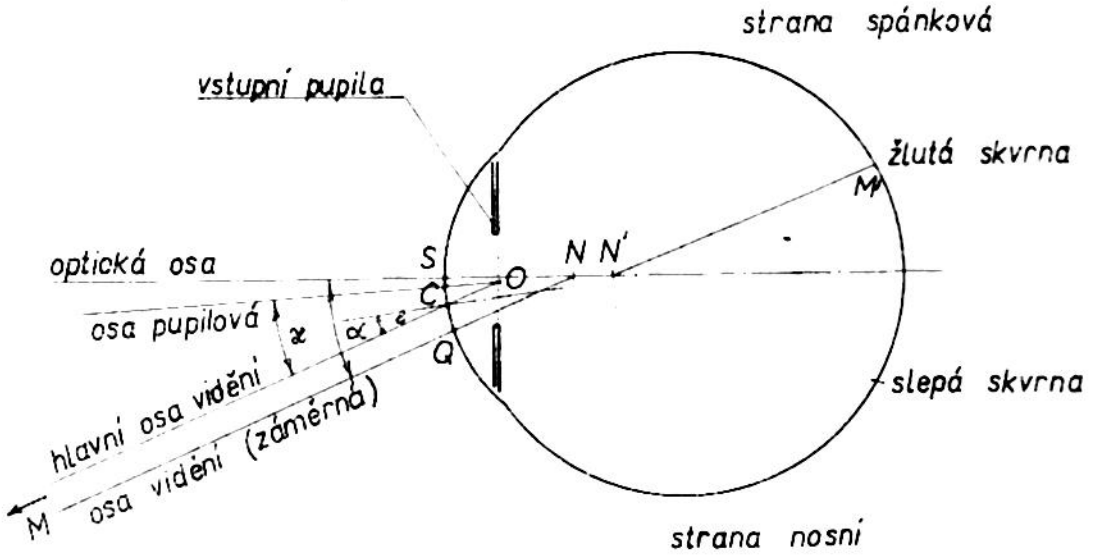
4.2) Oko jako centrovaná optická soustava

Oko obsahuje 8 ploch, které tvoří rozhraní mezi prostředími o různých indexech lomu a to dvě z nich ohraničují rohovku a 6 se nachází v oční čočce. Tři z nich, přední plocha rohovky, přední a zadní plocha čočky, mají zřetelně vyšší lámavost než ostatní plochy. Kdybychom mohli uvažovat tyto tři plochy jako rotační plochy kolem společné osy, pak bychom mohli považovat oko jako celek za centrovanou soustavu.

Ve skutečnosti tomu tak není, neboť přední plocha rohovky bývá jen zřídka rotační plochou a vykazuje obyčejně různé křivosti v jednotlivých meridiánech, s čímž je spojen tzv. osový astigmatismus oka. Kdybychom na chvíli k této skutečnosti nepřihlíželi, pak rotační osa čočky musí procházet středem křivosti rohovky. Existovala by tedy optická osa oka, které by představovalo centrovanou optickou soustavu. Kdyby tomu tak bylo, pak by musily být v koincidenci Purkyňovy obrazy vznikající odrazem na uvedených třech plochách (tj. přední ploše rohovky a obou vnějších plochách čočky) v případě, že příslušný předmět (svět. zdroj) i pozorovatelovo oko se nacházejí na společné optické ose. Obecně však k této koincidenci nedochází, protože podle Helmholtze a Tscherninga je střed křivosti rohovky posunut asi o 0,1 mm směrem k spánkové straně vzhledem k optické ose oční čočky. Tento posuv zavádí do definice optické osy oka nepřesnost řádu 1 - 2°.

Uvědomíme-li si však elastické zavěšení oční čočky pomocí Zinnových vláken, které může způsobit větší změny v poloze oční čočky než 0,1 mm, pak můžeme oko považovat za přibližně centrovanou soustavu s nepřesností nepřesahující 2°.

4.3) Oční osy



Obr. 4.3.1 Osy oka

Přímka $\overline{NM}$ spojující předmětový uzlový bod N s předmětovým bodem M, na který jsou pozorovatelovy oči soustředěny, probíhající rovnoběžně se spojnicí obrazového uzlového bodu N' a středu žluté skvrny M' se nazývá

osou vidění. Přímka $\overline{OM}$ probíhající středem O vstupní pupily[x] rovnoběžně s osou vidění se nazývá hlavní osou vidění a tvoří hlavní paprsek svazku, který vstupuje z bodu M do oka.

Úhel, který svírá osa vidění s optickou osou oka se označuje α a jeho velikost se pohybuje u dospělých lidí v rozsahu od 4° do 8°, přičemž je u dalekozrakých větší (10°) než u krátkozrakých. Obyčejně se pracuje se střední hodnotou $\alpha = 5^\circ$.

Bod Q , ve kterém protíná osa vidění vnější plochu rohovky, se nazývá oftalmometrickým pólem. Pro jeho vzdálenost od vrcholu rohovky S vychází

$$\overline{SQ} = \overline{SM} \cdot \sin\alpha = 7{,}2 \cdot \sin 5^\circ = 0{,}63 \text{ mm} .$$

Normála vnější plochy rohovky procházející středem vstupní pupily se nazývá pupilovou osou.

Pupilová osa svírá s hlavní osou vidění úhel $\varkappa$, který bývá obecně menší než úhel α .

Protože osa vidění probíhá přibližně kolmo na vnější plochu rohovky, svírá hlavní osa vidění s normálou úhel $\varepsilon \doteq 3^\circ$.

4.3) Oko teoretické

Teoretickým okem nazýváme fiktivní oko, jehož rozměry a optické vlastnosti odpovídají středním hodnotám dospělých Evropanů. Příslušné rozměry teoretického oka jsou uvedeny v tab. 4.3.1 a z nich jsou pak vypočítány jeho optické vlastnosti, které jsou rovněž uvedeny v citované tab. 4.3.1. Příklady výpočtů jednotlivých optických parametrů jsou uvedeny v příloze I. tohoto skripta.

4.4) Zjednodušené oko

Vyjdeme-li ze skutečnosti, že indexy lomu očního moku a sklivce se jen málo liší, takže je můžeme považovat za stejné a rovné 1,336, můžeme nahradit oko zjednodušenou soustavou sestávající z lámavé plochy, která je ekvivalentem rohovky a tenké čočky, která nahrazuje oční čočku vzdálenou od lámavé plochy o δ . Lámavosti D_{roh} a $D_{čoč}$ těchto dvou soustav a jejich vzdálenost určíme z podmínky, aby výsledná soustava měla stejnou lámavost a stej-

---

x) Poznámka: Vstupní pupila oka je obrazem oční pupily vytvořeným všemi plochami nacházejícími se před oční pupilou. Podobně výstupní pupila je obrazem oční pupily vytvořeným oční čočkou. Vstupní pupilu vidíme, pozorujeme-li pupilu cizího oka.

nou polohu hlavních bodů jako teoretické oko. Tak dostaneme tři rovnice

$$D_{roh} + D_{čoč} - \delta \cdot D_{roh} \cdot D_{čoč} = 59{,}95$$

$$1{,}59 \cdot 10^{-3} = \delta \cdot \frac{D_{čoč}}{59{,}95} \qquad (4.4.1)$$

$$-\delta + \frac{1{,}91 \cdot 10^{-3}}{1{,}336} = -\delta \cdot \frac{D_{roh}}{59{,}95}$$

pro tři neznámé, δ , $D_{čoč}$ a D_{roh} .

Určíme-li z posledních dvou rovnic (4.4.1) lámavosti $D_{čoč}$ a D_{roh} dostaneme

$$D_{roh} = 59{,}95 - \frac{59{,}95 \cdot 1{,}91 \cdot 10^{-3}}{1{,}336 \cdot \delta} \qquad (4.4.2)$$

$$D_{čoč} = \frac{59{,}95 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3}}{\delta}$$

a dosadíme-li do první rovnice (4.4.1), dostaneme dále

$$59{,}95 - \frac{59{,}95 \cdot 1{,}91 \cdot 10^{-3}}{1{,}336 \cdot \delta} + \frac{59{,}95 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3}}{\delta} -$$

$$- \left(59{,}95 - \frac{59{,}95 \cdot 1{,}91 \cdot 10^{-3}}{1{,}336 \cdot \delta}\right) 59{,}95 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3} = 59{,}95$$

čili

$$-1{,}91 \cdot 10^{-3} + 1{,}336 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3} - 59{,}95 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}336\,\delta +$$

$$+ 59{,}95 \cdot 1{,}91 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3} = 0$$

a odtud

$$\delta = \frac{59{,}95.1{,}91.10^{-3}.1{,}59.10^{-3} + 1{,}336.1{,}59.10^{-3} - 1{,}91.10^{-3}}{59{,}95.1{,}59.10^{-3}.1{,}336} =$$

$$= \frac{0{,}182 + 2{,}124 - 1{,}91}{127{,}09} = \frac{0{,}396}{127} = 0{,}00313\ \mathrm{m} = 3{,}13\ \mathrm{mm} .$$

Pomocí této hodnoty určíme z (4.4.2)

$$D_{roh} = 59,95 - \frac{59,95 \cdot 1,91 \cdot 10^{-3}}{1,336 \cdot 3,13 \cdot 10^{-3}} = 59,95 - 27,2 = 32,75 \text{ dioptrií}$$

$$D_{čoč} = \frac{59,95 \cdot 1,59 \cdot 10^{-3}}{3,13 \cdot 10^{-3}} = 30,4 \text{ dioptrií} .$$

Je vidět, že u takto zjednodušeného oka vychází lámavost rohovky velmi malá, takže z tohoto důvodu nebylo možno v praksi pro jednoduché výpočty tohoto oka využít.

Proto se vyvinula snaha zjednodušit oko tak, aby mělo s teoretickým okem společný pouze obrazový hlavní bod a obrazové ohnisko. Tím bylo možno změnit třetí podmínku tak, že se žádá, aby poloměr plochy rohovky byl $r = 8$ mm. Z těchto podmínek dostáváme také tři rovnice:

$$\left.\begin{aligned} & D_{roh} + D_{čoč} - D_{roh} \cdot D_{čoč} \cdot \delta = 59,95 \\ & D_{roh} = \frac{n' - n}{r} = \frac{0,336}{8 \cdot 10^{-3}} = 42 \text{ dioptrií} \\ & -\delta + \frac{1,91 \cdot 10^{-3}}{1,336} = -\delta \frac{D_{roh}}{59,95} \end{aligned}\right\} \qquad (4.4.3)$$

Z poslední z těchto rovnic plyne

$$\delta = \frac{1,91 \cdot 10^{-3}}{1,336} \cdot \frac{59,95}{59,95 - D_{roh}} = \frac{1,91 \cdot 10^{-3}}{1,336} \cdot \frac{59,95}{17,95} = 4,77 \text{ mm} ,$$

takže pro vzdálenost tenké čočky, která nahrazuje oční čočku, plyne

$$d = \delta \cdot 1,336 = 4,77 \cdot 1,336 = 6,37 \text{ mm} .$$

Pro lámavost této čočky pak plyne z první rovnice (4.4.3)

$$D_{čoč} = \frac{59,95 - D_{roh}}{1 - \delta \cdot D_{roh}} = \frac{59,95 - 42}{1 - 4,77 \cdot 10^{-3} \cdot 42} = \frac{17,95}{0,8} = 22,43 \text{ dioptr.}$$

Tato hodnota se celkem dobře přibližuje hodnotě teoretického oka a lze tedy s výhodou využít tohoto zjednodušeného oka pro rychlé úvahy.

4.5) Redukované oko

V kapitole 4.3., kde bylo uvažováno teoretické oko, bylo zjištěno, že hlavní body oka leží velmi blízko sebe (jejich vzdálenost činí cca 0,3 mm). Nabízí se tedy zjednodušit oko tak, že se nechají oba hlavní body splynout.

Potom lze oko nahradit jedinou lámavou plochou (dioptrem), jejíž vrchol leží cca 1,75 mm za vrcholem S rohovky a pro jejíž poloměr křivosti vychází hodnota 5,6 mm.

Tuto redukci provedl již Huygens a takto upravené oko se nazývá redukované.

V dříve citované tab. 4.3.1 jsou uvedeny rozměry a optické konstanty a parametry oka teoretického, ale současně i odpovídající hodnoty u zjednodušeného oka a konečně údaje Gullstrandovy.

4.6) Pupily

Z anatomie oka vyplývá, že oční pupila přiléhá k přední ploše oční čočky. To znamená, že prakticky je oční pupila vzdálena od vrcholu S rohovky 3,6 mm. Vzdálenost p' pupily od obrazového hlavního bodu rohovky je

$$p' = 3,6 + 0,0597 = 3,6597 \text{ mm} .$$

Potom pro polohu p vstupní pupily oka plyne

$$\frac{n}{p} = \frac{n'}{p'} - D_{roh} = \frac{1,3374}{3,6597 \cdot 10^{-3}} - 42,3564 = 365 - 42,3564 =$$

$$= 322,64$$

čili

$$p = 3,09 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

takže vzdálenost výstupní pupily od vrcholu rohovky je

$$3,09 - 0,0576 = 3,0324 \text{ mm} .$$

Tedy vstupní pupila leží asi o 0,6 mm blíže k rohovce než oční pupila a má v poměru

$$\frac{y}{y'} = \frac{p}{n} \cdot \frac{n'}{p'} = \frac{3,09 \cdot 1,3374}{3,6597} = 1,13$$

větší průměr.

Podobně plyne pro polohu a velikost výstupní pupily, která je obrazem oční pupily, vytvořeným oční čočkou

$$p = - 6,0218 + 3,6 = - 2,4218 \text{ mm}$$

$$\frac{n'}{p'} = \frac{n}{p} - D_{čoč} = - \frac{1,3374}{2,422 \cdot 10^{-3}} + 21,78 = - 552 + 21,78 = - 530,22$$

$$p' = \frac{1,336}{-530,22} = - 0,00252 \text{ m} = - 2,52 \text{ mm}$$

a tedy vzdálenost výstupní pupily od vrcholu rohovky je

$$6,207 - 2,52 = 3,687 \text{ mm} .$$

Výstupní pupila leží tedy těsně za oční pupilou, kde je zobrazena se zvětšením

$$\frac{y'}{y} = \frac{p'}{n'} \cdot \frac{n}{p} = \frac{2,52}{1,336} \cdot \frac{1,3374}{2,42} = 1,04 .$$

Je tedy průměr výstupní pupily větší než průměr oční pupily a menší než průměr vstupní pupily.

4.7) Rozptylový kroužek

V předchozích úvahách o teoretickém oku bylo konstatováno, že obrazové ohnisko F' oka leží ve vzdálenosti 24,2 mm od vrcholu S rohovky. Přitom se předpokládá, že tímto ohniskem prochází sítnice oka. Ve skutečnosti však leží poněkud před ohniskem a sice asi ve vzdálenosti 23,5 mm za vrcholem rohovky. Tento rozdíl je způsoben tím, že při předchozích úvahách byla volena pro index lomu oční čočky hodnota poněkud nižší a pak proto, že při průměrné hodnotě průměru oční pupily nejsou již splněny podmínky předpokládané pro paraxiální prostor, takže poloha ohniska je ovlivněna vadami a ohybem světla.

V dalších úvahách budeme však předpokládat, že sítnice prochází obrazovým ohniskem oka. Takové oko budeme pak nazývat emmetropickým.

V praxi se setkáváme velmi často s případem, že současně pozorujeme dva různě vzdálené body ležící na společné ose vidění. Tento případ nastává při vytyčování přímek v zeměměřictví apod.

Předpokládejme, že oko je nastaveno (akomodováno) na velmi vzdálený bod O. Jeho obraz O' bude ležet ve vzdálenosti

$$\overline{P'O'} = \frac{n'}{D}$$

od hlavního bodu P' oka.

Předpokládejme dále, že takto akomodované oko pozoruje současně jiný blízký bod M ležící ve vzdálenosti p. Pro polohu p' jeho obrazu měřenou od obrazového hlavního bodu P' pak plyne

$$\frac{n'}{p'} = \frac{1}{p} + D = X + D ,$$

Tab. 4.3.1[xx)]

		Gullstrand		Teoretické oko		Zjednodušené oko	
		neakomod.	akomod.	neakomod.	akomod.	neakomod.	akomod.
Indexy lomu:							
	Rohovka	1,376	1,376	1,3771	1,3771	1,336	1,336
	Oční mok	1,336	1,336	1,3374	1,3374	1,336	1,336
	Oční čočka	1,4085[x)]	1,426[x)]	1,42	1,427	1,4208	1,4260
	Sklivec	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336	1,336
Vzdálenosti vrcholů jednotlivých ploch od rohovky	Zadní plocha rohovky	0,5	0,5	0,55	0,55	-	-
	Přední plocha čočky	3,6	3,2	3,6	3,2	6,3740	5,7763
	Zadní plocha čočky	7,2	7,2	7,6	7,7	6,3740	5,7763
Poloměry křivosti	Přední plocha rohovky	7,7	7,7	7,8	7,8	8,-	8,-
	Zadní plocha rohovky	6,8	6,8	6,5	6,5	-	-
	Přední plocha čočky	10,-	5,3333	10,2	6,0	10,2	6,0
	Zadní plocha čočky	-6,0	-5,3333	-6,0	-5,5	-6,0	-5,5
Lámavosti	Přední plocha rohovky	48,83	48,83	48,3462	48,3462	42,0	42,0
	Zadní plocha rohovky	-5,88	-5,88	-6,1077	-6,1077	-	-
	Přední plocha čočky	5,0	9,375	8,0980	14,9333	8,3097	15,0049
	Zadní plocha čočky	8,3333	9,375	14,0	16,5455	14,1265	16,3690
	Jádra ekviv. čočce	5,9850	14,96	-	-	-	-
Rohovka	Lámavost	43,053	43,053	42,3564	42,3564	42,0	42,0
	Poloha před.hl.bodu	-0,0496	-0,0496	-0,0576	-0,0576	-	-
	Poloha obr.hlav.bodu	-0,0506	-0,0506	-0,0597	-0,0597	-	-
	Předm.ohn.vzdálenost	-23,227	-23,227	-23,6092	-23,6092	-23,8095	-23,8095
	Obr.ohn.vzdálenost	31,031	31,031	31,5749	31,5749	31,8095	31,8095

x) Tato hodnota je měřená za předpokladu, že index slupky je 1,368

Pokračování tab. 4.3.1

		Gullstrand		Teoretické oko		Zjednodušené oko	
		neakomod.	akomod.	neakomod.	akomod.	neakomod.	akomod.
Oční čočka	Lámavost	19,1107	33,05	21,7787	30,6996	22,4362	31,3739
	Poloha před.hl.bodu	5,6779	5,145	6,0218	5,4730	6,3740	5,7763
	Poloha obr.hlav.bodu	5,8068	5,225	6,2007	5,6506	6,3740	5,7763
	Předm. ohn. vzdál.	-69,908	-40,416	-61,4087	-43,5641	-59,5466	-42,5832
	Obr. ohn. vzdál.	69,908	40,416	61,3444	43,5185	59,5466	42,5832
Oko jako celek	Lámavost	58,636	70,57	59,9404	67,6767	59,9404	67,6767
	Poloha před.hl.bodu	1,348	1,772	1,5946	1,8190	1,7858	2,0040
	Poloha obr.hl.bodu	1,602	2,086	1,9078	2,1915	1,9078	2,1915
	Poloha před.ohniska	-15,707	-12,397	-15,0887	-12,9571	-14,8974	-12,7718
	Poloha obr. ohniska	24,387	21,016	24,1965	21,9325	24,1965	21,9325
	Předm. ohn. vzdál.	-17,055	-14,169	-16,6832	-14,7761	-16,6832	-14,7761
	Obr. ohn. vzdálenost	22,785	18,930	22,2888	19,7409	22,2888	19,7409
	Poloha před.úzl.bodu	7,078	6,533	7,2001	6,7838	7,3914	6,9691
	Poloha obr.úzl. bodu	7,332	6,847	7,5133	7,1563	7,5133	7,1563
	akomodace	0	10,66	0	6,9633	0	6,9633

xx) Le Grand, Y., Optique physiologique, I, 52 - 53, Paříž, 1952

Havelka uvádí dle Gullstranda

$n_1 = 7,7$ $d_1 = 0,5$ $n_1 = 1$

$n_2 = 6,8$ $d_2 = 3,1$ $n_2 = 1,376$

$n_3 = 10,6$ $d_3 = 0,546$ $n_3 = 1,336$

$n_4 = 7,911$ $d_4 = 2,419$ $n_4 = 1,386$

$n_5 = -5,76$ $d_5 = 0,635$ $n_5 = 1,406$

$n_6 = -6$ $n_6 = 1,386$

$n_7 = 1,336$

čili

$$\overline{P'M'} = p' = \frac{n'}{X + D} ,$$

kde $X = \frac{1}{p}$ je tzv. vergence a D lámavost oka.

Pro vzdálenost $\overline{D'M'}$ obou obrazových bodů pak vychází

$$\overline{O'M'} = \overline{P'M'} - \overline{P'O'} = \frac{n'}{X + D} - \frac{n'}{D} = - \frac{n' . X}{D (X + D)} .$$

Pro polohu výstupní pupily, jejíž střed označme C', platí podle předchozích úvah

$$\overline{P'C'} = \overline{SC'} - \overline{SP'} = 3,68 - 1,91 = 1,77 \text{ mm} ,$$

takže můžeme psát

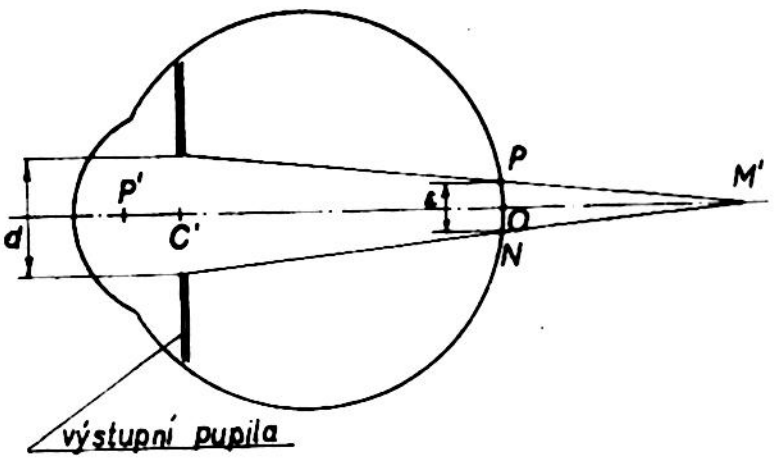
$$\overline{O'M'} = p' - \overline{P'C'} = \frac{n'}{X + D} - 1,77 . 10^{-3} =$$

$$= \frac{n'}{X + D} . \left[1 - \frac{1,77}{1,336} . 10^{-3} (X + D)\right] =$$

$$= \frac{n'}{X + D} . \left[1 - 1,328 . 10^{-3} (X + D)\right]$$

běřeme-li za $n' = 1,336$.

Situace bude taková, jak je to vyznačeno na obr. 4.7.1. Jak je z tohoto obrázku patrno, protne svazek, přicházející do obrazového bodu M', sítnici v rozptylovém kroužku o průměru $\overline{PN} = \xi$. Podle tohoto obrázku bude pro ξ platit



Obr. 4.7.1 K vysvětlení vzniku rozptylového kroužku

$$\frac{\xi}{d'} = \frac{\overline{O'M'}}{\overline{C'M'}} = - \frac{n' . X}{D . (X + D)} .$$

$$. \frac{X+D}{n'} \frac{1}{1-1,328.10^{-3} (X+D)} \doteq$$

$$\doteq - \frac{X}{D} \left[1 + 1,328.10^{-3} (X+D)\right] ,$$

kde d' značí průměr výstupní pupily, který je prakticky roven průměru d oční pupily.

Můžeme tedy předchozí vztah psát dále ve tvaru

$$\varepsilon = - d \frac{X}{D} \left[1 + 1{,}328 \cdot 10^{-3} (X + D) \right] . \qquad (4.7.1)$$

Protože druhý člen $1{,}328 \cdot 10^{-3} (X + D)$ v hranaté závorce můžeme zanedbat, můžeme psát

$$\varepsilon = - d \frac{X}{D} . \qquad (4.7.2)$$

Např. pro bod M , ležící ve vzdálenosti p = 10 cm před okem, je $X = \frac{1}{0{,}1} = 10$ dioptrií.

Protože D = 60 dioptrií, vychází pro

$$\varepsilon = - \frac{d}{6} .$$

Nutno poznamenat, že vztah (4.7.2) neplatí zcela přesně, neboť při menších průměrech oční pupily se začne projevovat ve značné míře ohyb světla, který podstatně ovlivní velikost ε rozptylového kroužku.

4.8) Úhel vidění

Uvažujme velmi vzdálený předmět $\overline{AB} = y$, který stojí kolmo na optickou osu oka. Nechť y' značí velikost příslušného jeho obrazu. Potom podle (4.1.6) platí

$$\frac{y'}{y} = \frac{p'}{n'} \cdot \frac{n}{p} .$$

Protože $n = 1$ a $p' = f'$, kde f' značí ohniskovou vzdálenost oka, platí podle (4.1.5)

$$\frac{p'}{n'} = \frac{1}{D} ,$$

takže předchozí vztah lze psát ve tvaru

$$y' = \frac{y}{p \cdot D} = \frac{\omega}{D} , \qquad (4.8.1)$$

kde $\omega = \frac{y}{p}$ značí tzv. úhel vidění, tj. úhel, pod kterým se jeví oku pozorovaný předmět. Tomuto úhlu se často říká také zdánlivý průměr předmětu.

Bude-li pozorovaný předmět v konečné vzdálenosti ($p \neq \infty$) , pak podle (4.1.7) můžeme psát ($n = 1$)

$$\frac{y'}{y} = \frac{1}{1 + p D} .$$

V tomto vztahu můžeme vždy ve jmenovateli na pravé straně zanedbat 1 proti $p \cdot D$, takže i tento vztah nabude tvaru (4.8.1), který má platnost tedy i pro blízké předměty.

Vyčíslíme-li vztah (4.8.1) tak, že dosadíme za D příslušnou číselnou hodnotu, dostaneme

$$y' = \frac{\omega}{D} = \frac{\omega}{59,94} = 16,67\,\omega \ , \qquad (4.8.2)$$

kde ω je vyjádřeno v radiánech a y' v milimetrech, nebo

$$y' = \frac{16,67 \cdot \omega}{\rho'} = \frac{16,67 \cdot \omega}{3438} = 0,00485 \cdot \omega \ , \qquad (4.8.3)$$

kde ω je vyjádřeno v minutách a y' v milimetrech, nebo konečně

$$y' = 4,85 \cdot \omega \ , \qquad (4.8.4)$$

kde ω je vyjádřeno v minutách a y' v mikronech.

Např. pro $\omega = 5^0 = 300'$ plyne z (4.8.4)

$$y' = 4,85 \cdot 300 = 1455\ \mu m = 1,455\ mm.$$

5) Akomodace

Kdyby emmetropické oko nebylo vybaveno mechanismem, který umožňuje plynule měnit lámavost, potom by vidělo blízké body jako rozptylové kroužky o průměru

$$\varepsilon = - d \frac{X}{D} \ .$$

Označíme-li ω úhel, pod kterým se tento rozptylový kroužek jeví, pak podle (4.8.1) můžeme psát

$$y' = \frac{\omega}{D} \ .$$

Protože $y' = \varepsilon$, dostaneme srovnáním obou předchozích vztahů

$$\omega = - d \cdot X \ .$$

Např. pro $d = 4.10^{-3}$ m vychází odtud pro $X = - 2,5$ dioptrie

$$\omega = 4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 10^{-2} \text{ radiánu} = 34 \text{ minutám.}$$

To znamená, že bod ležící ve vzdálenosti $p = - 40$ cm před okem, se bude jevit jako rozptylový kroužek o zdánlivé úhlové velikosti Měsíce. Snadno si dovedeme na základě tohoto příkladu představit, jak neostře by vidělo oko blízké předměty.

Ve skutečnosti vidí oko i zřetelně předměty blízké a sice díky akomodační schopnosti, kterou je vybaveno.

5.1) Akomodační rozsah

Neakomoduje-li oko, pak vidí zřetelně bod, zvaný vzdálený bod - punctum remotum, který u emmetropického oka leží v nekonečnu.

U ammetropického oka měříme vzdálenost tohoto bodu kladně ve směru šíření světla, přičemž volíme jako počátek předmětový hlavní bod oka. Obyčejně se vyjadřuje poloha vzdáleného bodu jeho vergencí ($R = \frac{1}{r}$, vyjádřenou v dioptriích, kde r značí vzdálenost tohoto bodu v metrech.

Např. $R = -0{,}5$ dioptrie značí, že vzdálený bod leží 2 m před okem, jak je tomu v případě krátkozrakých lidí, a $R = 0{,}5$ dioptrie značí, že tento bod leží 2 m za okem, jak je tomu u dalekozrakých lidí.

Označme $X = \frac{1}{x}$ vergenci bodu, který leží mezi okem a jeho vzdáleným bodem. Potom rozdíl

$$A = R - X \qquad (5.1.1)$$

je mírou potřebné akomodace. Tento rozdíl je vždy kladný, neboť R i X jsou záporné hodnoty, přičemž X je absolutně větší než R.

Maximální hodnota A_m, kterou může rozdíl A dosáhnout, se nazývá amplitudou akomodace a příslušná vergence P určuje polohu tzv. blízkého bodu - punctum proximum, přičemž platí

$$A_m = R - P . \qquad (5.1.2)$$

Je možno říci, že poloha vzdáleného bodu je dostatečně dobře definována. Poloha blízkého bodu je závislá na akomodačním rozsahu, který je velmi proměnlivý a závisí na různých okolnostech, např. na konvergenci os při binokulárním pozorování. V praksi nelze např. udržet delší dobu bez námahy akomodační rozsah větší než $\frac{2}{3} . A_m$ nebo $\frac{3}{4} . A_m$.

V případě emmetropického oka, kdy $R = 0$, vychází

$$A = - X \quad \text{resp.} \qquad (5.1.3)$$

$$A_m = - P . \qquad (5.1.4)$$

5.2) Stárnutí oka (presbyopie)

Akomodační amplituda, nebo jak se též říká, akomodační rozsah se s věkem zmenšuje. To znamená, že blízký bod se postupně s rostoucím věkem od oka vzda-

luje až mezi 60-tým a 65-tým rokem přejde za hlavu. Vzdálený bod zůstává u emmetropického oka v nekonečnu až asi do 50-tého roku, kdy se u oka projeví tzv. stařecká dalekozrakost a kdy se vzdálený bod přesune rovněž za hlavu.

V tabulce 5.2.1 uvádíme hodnoty akomodačního rozsahu naměřené Dondersem spolu s polohou blízkého a vzdáleného bodu.

Tabulka 5.2.1[x)]

Věk roků	Vzdálenost blízkého bodu v cm	Vzdálenost vzdálen. bodu v cm	Akomodační rozsah A_m v dioptriích
10	- 7,1	∞	14
15	- 8,3	∞	12
20	-10	∞	10
25	-11,8	∞	8,5
30	-17,3	∞	7
35	-18,2	∞	5,5
40	-22,2	∞	4,5
45	-28,6	∞	3,5
50	-40	∞	2,5
55	-66,6	400	1,75
60	-200	200	1
65	400	133	0,5
70	100	80	0,25
75	57,1	57,1	0
80	40	40	0

Ukazuje se, že akomodační rozsah A_m lze ve stáří 35 - 50 roků vyjádřit empirickým vztahem

$$A_m = 12,5 - 0,2 \cdot N , \qquad (5.2.1)$$

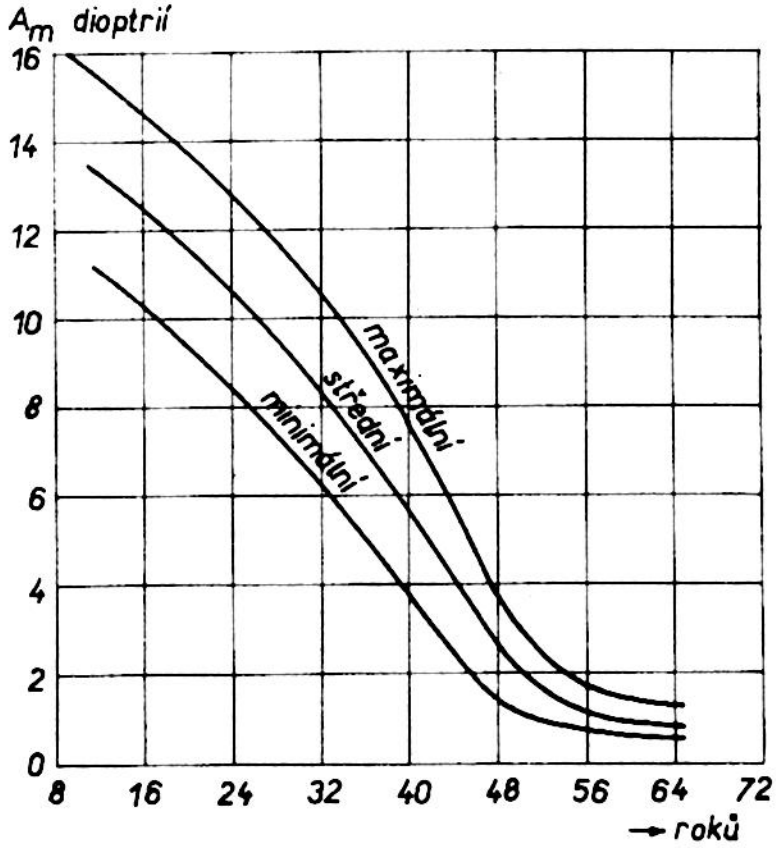
kde N značí věk vyjádřený v rocích.

Duane v roce 1912 změřil asi u 2.000 lidí akomodační rozsah a sice jeho maximální, střední a minimální hodnoty. Výsledky jeho měření jsou graficky znázorněny na obr. (5.2.1).

---

x) Pistor, H., Der Augenoptiker, III., 9, Jena, 1948

Říkáme, že oko se stává presbyoptickým, když jeho blízký bod leží již ve větší vzdálenosti, než je konvekční vzdálenost zřetelného vidění, tj. - 25 cm. Z tab. 5.2.1 vyplývá, že se tak stává mezi 40- a 45-tým rokem, kdy má oko ještě dostatečný akomodační rozsah cca 4 dioptrie.



Obr. 5.2.1 Akomodační rozsah v závislosti na věku

5.3) Změny odehrávající se v oku během akomodace

1) Nejdříve (1619) byla objevena kontraktace oční pupily při pozorování blízkých předmětů. Při zmenšení oční pupily se zmenšil průměr rozptylových kroužků příslušných blízkým předmětovým bodům, takže tyto body se jevily zřetelnější. Couvreux zjistil v roce 1924, že je-li průměr oční pupily při A = 0 jedničkový, že při akomodaci A = 7 dioptrií je průměr oční pupily v mezích 0,82 až 0,95.

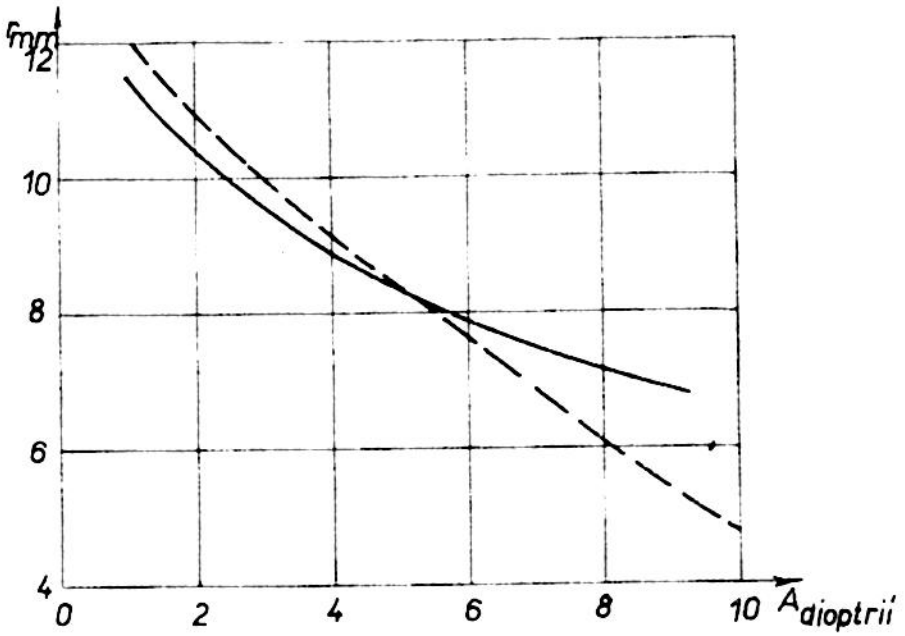
2) Okraj oční pupily se pošine při akomodaci poněkud směrem k rohovce. Podle Helmholtze se pošine při akomodaci A = 7 dioptrií o 0,4 mm.

3) Přední plocha oční čočky se při akomodaci pošine k rohovce a sice podle Helmholtze při akomodaci A = 7 dioptrií o 0,4 mm.

4) Zadní plocha oční čočky se neposouvá vůbec nebo jen velmi málo směrem k sítnici. Je to způsobeno změnou tloušťky oční čočky při akomodaci, která probíhá v rozmezí 4 mm při akomodaci A = 0 do 4,5 mm při A = 7 dioptrií. Protože přední plocha se při akomodaci posouvá o 0,4 mm k rohovce, pošine se zadní plocha čočky při akomodaci A = 7 dioptrií směrem k sítnici o 0,1 mm.

5) Poloměr křivosti přední plochy oční čočky se zmenší při akomodaci. Podle Helmholtze se změní při akomodaci A = 7 dioptrií z 10 mm na 6 mm.

Výsledky Finchamových měření na dvou případech jsou znázorněny graficky jako závislost poloměru r na akomodaci A (viz obr. 5.3.1).



Obr. 5.3.1 Závislost poloměru křivosti přední plochy oční čočky na akomodaci

6) Poloměr křivosti zadní plochy se zmenší jen málo. Podle Helmholtze se zmenší z 6 mm na 5,5 mm.

7) Z předchozích úvah vyplývá, že při akomodaci A = 7 dioptrií má čočka tloušťku 4,5 a poloměry křivosti $r_1 = 6$ a $r_2 = 5,5$ mm. Budeme-li předpokládat index lomu oční čočky 1,42, pak pro lámavost akomodující čočky vychází 28,37 dioptrií. Předpokládáme-li, že lámavost rohovky se nemění, což se potvrdilo měřeními pomocí oftalmometru, pak oko jako celek má lámavost 65,75 dioptrií. To znamená, že při akomodaci A = 7 se změní lámavost oka o 5,75 dioptrií, což odpovídá akomodaci menší než A = 5,5 dioptrií. Z toho vyplývá, že index lomu oční čočky musí během akomodace vzrůstat. Gullstrand nazývá příslušný mechanismus intrascapulární, neboť probíhá uvnitř pouzdra oční čočky. Výpočtem dostaneme, že index lomu oční čočky by měl při akomodaci A = 7 dioptrií vzrůst na 1,427.

S touto hodnotou indexu lomu byly provedeny výpočty parametrů akomodujícího teoretického oka, které jsou uvedeny v dříve citované tab. 4.3.1. Za téhož předpokladu byly provedeny i výpočty parametrů akomodujícího zjednodušeného oka.

Z tab. 4.3.1 je vidět, že při akomodaci oka se oba hlavní body mírně posouvají. To má za následek, že se i v odpovídající míře mění úhel vidění ω. Tyto změny jsou tak nepatrné, že se nemusí brát v úvahu.

8) Během silné akomodace se oční čočka mírně posouvá směrem dolů. To znamená, že má-li oko optickou osu, že tuto při akomodaci ztrácí. Je ovšem možný i případ obrácený. Tscherning v jednom případě zjistil, že optická osa oční čočky neakomodujícího oka probíhá asi 0,25 mm nad středem křivosti rohovky, zatímco při akomodování se oko vycentruje.

6) Teorie akomodace

První domněnku, že akomodace oka je umožněna změnou poloměru křivosti rohovky, vyvrátil v r. 1801 Young měřením reflexních obrazů vznikajícím odrazem na ploše rohovky a dále tím, že oko nepozbývá akomodaci, je-li ponořeno do vody.

V roce 1749 Buffon se domníval, že při binokulárním vidění je vyvoláváno svalové úsilí, které způsobuje prodloužení oka. Jeho domněnka byla vyvrácena a je do jisté míry podepřena skutečností, že i oko s vyjmutou čočkou umožňuje určitou akomodaci.

Ať je tomu jakkoliv, určitě převážná část akomodace je umožňována dříve uvedenými změnami v oční čočce.

6.1) Příčiny vyvolávající deformaci oční čočky.

V roce 1719 se domníval Pemberton, že vlákna opřádající čočku jsou smrštitelná. Tato domněnka, která byla ještě častěji opakována, se nezdála pravděpodobnou, protože oční čočka není vůbec inervována, že vyoperovaná čočka nereagovala na elektrické proudy, které vyvolávaly smršťování svalů. Naopak elektrická excitace přední části oka vyvolává akomodaci, která se může přisuzovat nějakému svalu přední části oční koule. Craunner se v r. 1851 domníval, že tuto úlohu lze přisoudit duhovce. Ukázalo se však, že ochrnutí duhovky nenarušuje akomodaci.

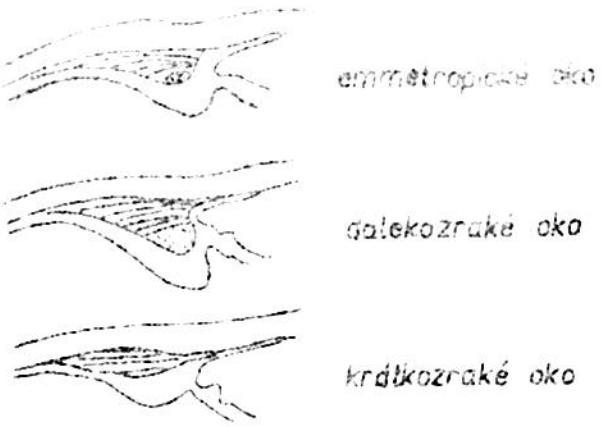
Fick (1853) se domníval, že ciliární těleso nebo jeho výběžky se nasytí krví a vytlačí sklivec, který způsobuje deformaci oční čočky. Czermak (1854) předpokládal, že ciliární těleso působí na rovník oční čočky a tím ji deformuje. Když se však oční čočka pozorovala trhlinou v duhovce, ukázalo se, že při akomodaci je vždy mezi rovníkem a ciliárním tělesem mezera alespoň 1 mm.

V roce 1855 Helmholtz předpokládal, že aktivním akomodačním orgánem je ciliární těleso. Svůj předpoklad opíral o následující důvody:

1) Ciliární těleso krátkozrakého oka, které akomoduje málo, je slabé, zatímco u dalekozrakého oka je silné, jak je to naznačeno na obr. 6.1.1.

2) V roce 1909 provedl Hess pitvu dvou čerstvě vyoperovaných očí, z nichž do jednoho zavedl prostředek utlumující akomodaci (atrofin) a do druhého prostředek podporující akomodaci (eserin) a zjistil, že ciliární těleso bylo daleko silnější v druhém případě a že ciliární sval byl smrštěn.

3) Jak bylo dříve uvedeno, část vláken Brückova svalu se napojuje na vnější část ciliárního tělesa a část se napojuje na cévnatku. Právě tomuto spojení se připisuje akomodační schopnost. Hensen a Völkers v r. 1868 zabodli v tomto



6.1.1 Ciliární těleso o tří druhů oka.

místě přes bělinu do oka psa jehlu a zjistili, že při elektrické vyvolávané akomodaci se jehla nakláněla, což prozrazovalo posuv cévnatky směrem dopředu.

6.2) Způsob přenášení akomodačních změn ciliárního tělesa na oční čočku.

Přenášení změn ciliárního tělesa vyvolaných při akomodaci na oční čočku může zprostředkovat jednak závěsný systém (Zinnova vlákna), jednak oklivec. Zdá se, že největší podíl na tomto přenosu mají Zinnova vlákna.

Existuje několik různých názorů na funkci těchto vláken.

1) Podle Helmholtze jsou tato vlákna při pozorování dalekých předmětů napjata a uvolňují se teprve při pozorování blízkých předmětů a umožňují tím, aby se oční čočka vlastní pružností vyklenula.
2) Podle Tscherninga naopak jsou tato vlákna v nenapjatém stavu při pozorování dalekých předmětů a při akomodaci se napínají a vyvolávají tím deformaci oční čočky.
3) Podle Schöna (1885) část Zinnových vláken se při akomodaci napíná a část uvolňuje.

Lze říci, že stále i dnes se jeví Helmholtzův názor za nejpravděpodobnější a nasvědčuje tomu řada důvodů:

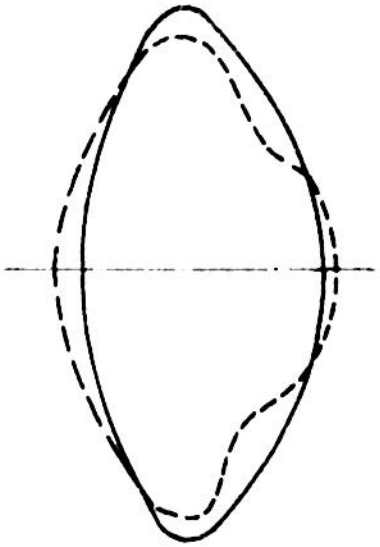
1) Anatomie ciliárního tělesa velmi nesnadno vysvětluje napínání Zinnových vláken při smršťování ciliárního svalu.
2) Průměr oční čočky se při akomodaci zmenšuje o 0,5 - 2 mm.
3) Při silné akomodaci se oční čočka posouvá poněkud směrem dolů a to nezávisle na poloze hlavy, což nasvědčuje tomu, že závěsný systém při akomodaci je uvolněn a proto špatně oční čočku přidržuje.

6.3) Tvar čočky při akomodaci

Helmholtz vysvětloval změnu tvaru oční čočky jejími pružnými silami, které se projevují při uvolňování Zinnových vláken během akomodace. Přitom se však objevily určité potíže. Ukázalo se, že vyjmutá oční čočka je tlustší, že však její přední plocha má poloměr křivosti r = 8 mm místo 5 - 6 mm. Helm-

holtz z toho usoudil na určitý doplňkový účinek uvnitř čočky, který vyvolává její deformaci.

Jiná potíž, která se vyskytla, bylo vysvětlit sploštění okrajové části přední plochy, jak je to naznačeno na obr. 6.3.1. Bylo totiž zjištěno, že poloměr křivosti u pólu přední plochy oční čočky je asi 5,2 mm při akomodaci 7 dioptrií, zatímco 2 mm od středu má plocha zakřivení r = 14 mm. Tentýž zjev se projevuje daleko výrazněji na zadní ploše oční čočky. Tyto obtíže, které se objevily v Helmholtzově teorii, byly vysvětleny později různými teoriemi.



Obr. 6.3.1 Tvar neakomodující (plně vytažená) a akomodující (čárkovaně vytažená) čočky.

a) Teorie Tscherningova

Tato teorie předpokládá, že napětím Zinnových vláken se sploští měkké vnější vrstvy oční čočky, které se posouvají po daleko více vypuklém jádru, což je příčinou většího zakřivení přední plochy kolem pólu a jejího sploštění v periferijních částech. Tato teorie nedovedla vysvětlit zvětšení tloušťky čočky.

Pokud se týče doplňkových sil, připisuje je Tscherning později sklivci. Přední a vnější části sklivce jsou taženy Zinnovými vlákny, které přiléhají k přední části cévnatky a přitlačují se k periferijním částem zadní plochy čočky, kterou zplošťují, zatímco na střední část plochy mají menší vliv, což umožňuje větší vyklenutí čočky kolem zadního pólu.

b) Teorie Gullstrandova

Tato teorie přejímá podstatnou část teorie Helmholztovy. Tvar oční čočky je podle Gullstranda výslednicí dvou proti sobě působících pružných sil, pružných sil pouzdra oční čočky a pružných sil cévnatky, které jsou spolu spojeny Zinnovými vlákny. Tím je vytvořen mechanismus, který zajišťuje ochranu oční čočky před náhlými změnami svalových sil.

Když oko akomoduje, tato vlákna se posouvají jedno po druhém, což má za následek změnu celkového indexu lomu čočky (intracapsulární mechanismus).

c) Teorie von Pflughova (1906)

Von Pflugh se domníval, že Zinnova vlákna nejsou příliš pevná a naopak, že jsou spíše protažitelnější než pouzdro oční čočky. Jsou tak křehká, že je

jím spíše určena úloha pružného závěsu. Podle von Pflugha příslušné deformu-jící účinky sklivci. Opírá se především o pozorující výsledky výzkumů, podle kterých je sklivec vláknité struktury. Tato teorie nedovede však vysvětlit pohyblivost oční čočky u akomodujícího oka, neboť sklivec by měl čočku tla-čit proti duhovce. Podle von Pflugha sklivec pouze přenáší síly na čočku, aniž se přitom jedná o zvýšení tlaku, jak to předpokládají hydrodynamické teorie, zvláště Ronchi (1947). Bylo prokázáno, že během akomodace se tlak očního moku nemění, že tedy oční tlak zůstává konstantní.

<u>d) Finchamova teorie</u>

Podle Finchama je oční čočka plastická, ale nikoliv elastická a proto nemá určitý tvar. Její tvar je teprve určován pružností jejího pouzdra, jehož deformace je maximální v místech jeho nejmenší tloušťky. Okrajové oploštění čočky je způsobeno maximální tloušťkou pouzdra. Z tohoto důvodu se neprojevují žádné kuželové deformace v místech, kde má pouzdro stejnou tloušťku.

Tato teorie představuje moderní formu Helmholtzovy teorie a jeví se zatím jako nejlépe vyhovující.

Závěrem je možno říci, že často bývá přijímán názor, že podélná i prstencovitá vlákna ciliárního svalu pracují při akomodaci současně. Někteří pracovníci předpokládají, že Rougetův sval slouží pro vidění na blízko, zatímco sval Brückeův slouží jako protichůdná brzda.

<u>6.4) Akomodační ústrojí některých živočichů.</u>

Vzhledem k tomu, že vzdálenost předmětu vzhledem k oku je pevně dána, zůstávají z fyzikálního hlediska pro nastavení oka na zřetelné vidění různě vzdálených předmětů jen tři možnosti:

a) Vybavení oka dvojitou sítnicí, jejíž části by se nacházely ve dvou různých vzdálenostech od zobrazovací soustavy.

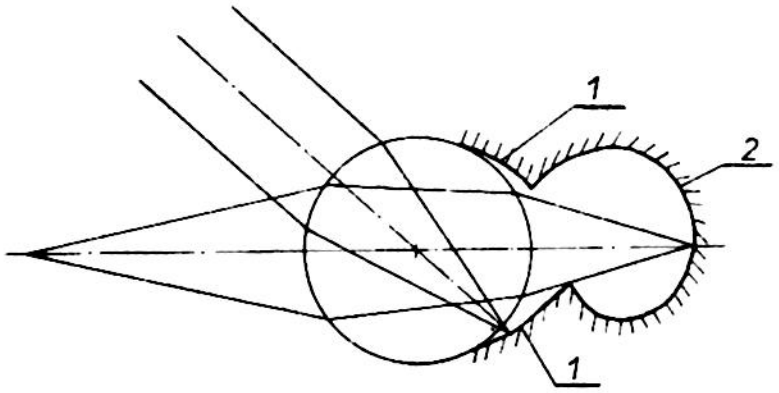
b) Vybavení oka ústrojím, které by umožňovalo plynulou změnu vzdálenosti sítnice vzhledem k zobrazovací soustavě.

c) Vybavení oka ústrojím, které by umožňovalo plynulou změnu lámavosti zobrazovací soustavy.

Všimněme si proto, jak byly tyto fyzikální principy využity při stavbě akomodačního ústrojí některých druhů živočichů.

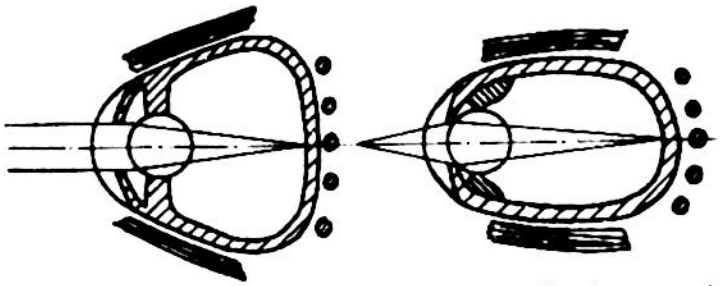
První princip je využit při stavbě oka některých druhů ryb. Stavba jejich oka je patrna z obr. 6.4.1.

Oko má dvě sítnice (1) a (2), které jsou umístěny v různých vzdálenostech od kulové čočky. Část (1) slouží k pozorování vzdálených předmětů a část (2) k pozorování blízkých předmětů.



Obr. 6.4.1 Oko s dvojitou sítnicí.

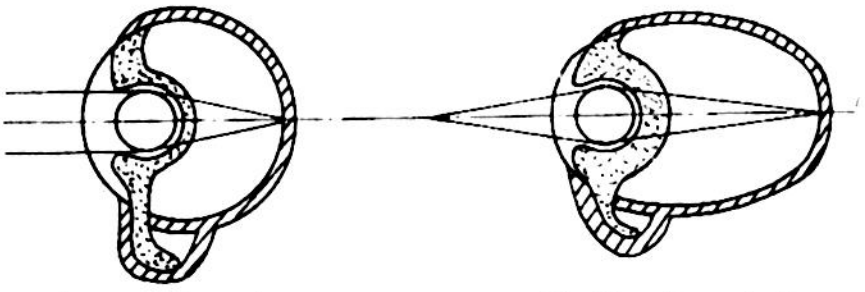
Druhý fyzikální princip využívají především sepie, které vlivem tlaku, který je vyvolán vnějším svalem, prodlužují oční kouli a posunou tak tuhou oční čočku daleko před sítnici, jak je to patrno z obr. 6.4.2, kde je znázorněno oko sepie při pozorování dalekých i blízkých předmětů.



Obr. 6.4.2 Oko sepie, a) bez akomodace a b) při akomodaci.

Nutno poznamenat, že současně s prodlužováním oka se posouvá oční čočka pomocí prstencového svalu dopředu, čímž se účinek obou změn zvětší.

U některých červů se dosahuje téhož výsledku tím, že se obsah oka zvětší přetlačením jeho náplně se zásobníku, který se nachází mimo oko. Tím se vyvolá tlak, který oddálí oční čočku od sítnice. Princip tohoto druhu oka je patrný z obr. 6.4.3.

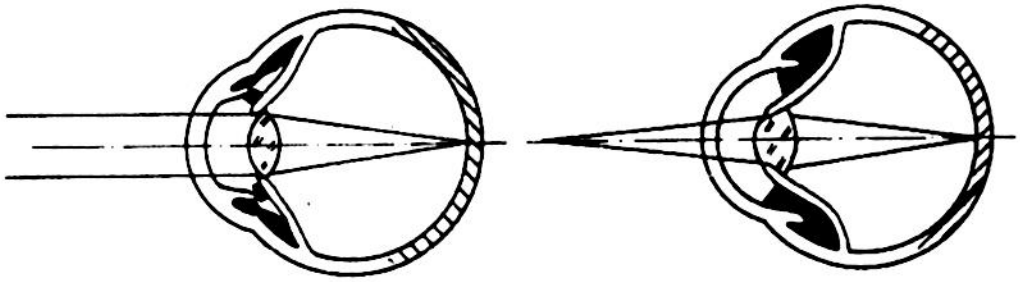


Obr. 6.4.3 Oko červa.

Zcela jiná cesta byla nastoupena přírodou v případě ryb. Nejdříve nutno poznamenat, že ryby akomodují obráceně na daleké předměty, protože při hledá-

ní potravy jsou převážně odkázány na blízké předměty. Proto u těchto zvířat je při akomodaci příslušná čočka posouvána pomocí vhodných svalů k sítnici a nikoli od ní, jak tomu bylo v případě předchozích živočichů. Mimoto ryby nemají již plně tuhou čočku, jak tomu bylo v předchozích případech, nýbrž oční čočka je měkká, takže současně s jejím posuvem se mění i její tvar. Představuje tedy oko těchto ryb, zejména makrel a štik, přechod k lidskému oku.

Třetí fyzikální princip, tj. změna poloměrů křivosti nepohyblivé oční čočky, je využit u očí hadů, ptáků a člověka. Pro srovnání uvádíme na obr. 6.4.4 oko ptáků, které se vyznačuje velmi měkkou oční čočkou, jejíž tvar se při akomodaci podstatně mění.



a) neakomodující oko b) akomodující oko

Obr. 6.4.4 Oko ptáků.

7) Sférická ametropie

Emmetropickým okem rozumíme takové oko, které vidí bez akomodace velmi vzdálené předměty. Všechny ostatní případy nazýváme okem ametropickým. Tím je přesně rozlišeno oko presbyoptické a ametropické.

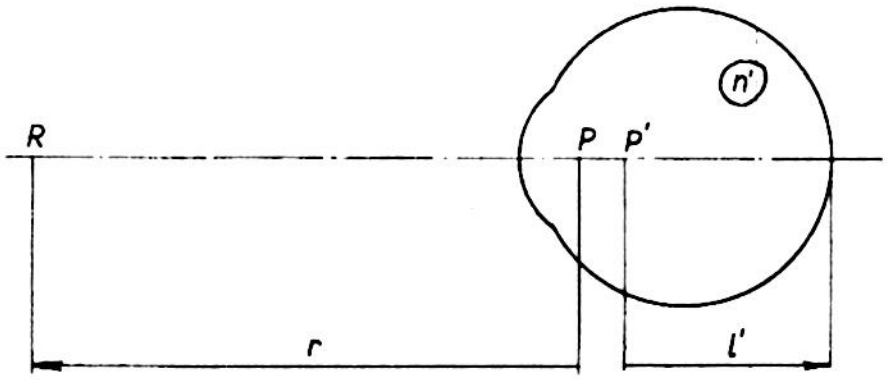
V nejbližších úvahách si budeme všímat pouze ametropie sférické, tj. ametropie se zanedbatelně malým astigmatismem.

Je známo, že myopické oko má reálný vzdálený bod ($R < 0$) a hyperopické oko má neskutečný vzdálený bod ($R > 0$). Přitom považujeme za počátek příslušných vzdáleností $r = \frac{1}{R}$ předmětový hlavní bod nebo předmětové ohnisko. Hodnota $R = \frac{1}{f}$, která je mírou ametropie, se nazývá hlavní refrakcí.

Nechť D resp. D_0 značí lámavost ametropického resp. emmetropického oka a l' vzdálenost sítnice od obrazového hlavního bodu ametropického oka. Protože vzdálený bod R a sítnice tvoří sdružený pár, můžeme psát

$$\frac{n'}{l'} - \frac{1}{r} = D \quad \text{čili}$$

$$\frac{n'}{l'} = R + D , \tag{7.1}$$



Obr. 7.1 K vysvětlení ametropie

Podobně můžeme psát pro emmetropické oko

$$\frac{n'}{l'_o} = D_o \,, \tag{7.2}$$

neboť $R_o = 0$.

Odečtením (7.1) a (7.2) dostaneme

$$R = n' \left(\frac{1}{l'} - \frac{1}{l'_o} \right) - (D - D_o) \,. \tag{7.3}$$

Je vidět, že ametropie R závisí jednak na vzdálenosti l' a lámavosti D oka. Z toho důvodu existují dvě teoretické příčiny ametropie:

Myopické oko ($R < 0$) je takové oko, u kterého je $l' > l'_o$ nebo $D > D_o$. To znamená, že oko je delší nebo lámavější než oko emmetropické.

Hyperopické oko ($R > 0$) je takové oko, u kterého je $l' < l'_o$ nebo $D < D_o$, tj. oko je kratší nebo méně lámavé než oko emmetropické.

7.1) Příčiny ametropie

Předchozí klasifikace je umělá a nemá fyzikálního smyslu než jen v některých řídkých případech:

a) oko je zřejmě velmi krátké nebo velmi dlouhé,
b) v oku chybí oční čočka.

Ametropie indexu lomu je velmi řídká:

a) stařecká krátkozrakost vyvolaná změnami propustnosti oční čočky,
b) první fáze šedého zákalu,
c) krátkozrakost diabetiků,
d) přechodná krátkozrakost vyvolaná šleutenkou nebo nemocemi spánku,
e) dalekozrakost vyvolaná na přechodnou dobu zvýšením obsahu cukru ve sklivci.

Rozlišování ametropie osové (tj. ametropie vyvolané osovými rozměry oka) a ametropie křivostí předpokládá normalizaci veličin l_o a D_o, které jsou výsledky statistiky a které se mění od jednoho autora ke druhému.

Je možno říci, že ametropie oka se neobjeví potud, pokud nebudou délkové rozměry oka a křivosti v souladu. Měření délkových rozměrů např. ukazují, že střední odchylka dosahuje hodnot 1,1 mm, což vyjádřeno ametropií R činí 3 dioptrie. Měření ametropie R ukazují však, že střední odchylka dosahuje 1 - 2 dioptrie, což potvrzuje, že na výsledné ametropii oka se podílí různé faktory. Maximum křivky četnosti R nesplývá přesně s hodnotou R = 0, nýbrž je posunuto směrem k hodnotě R = + 0,5 dioptrie. Z toho plyne, že lidské oko je normálně málo dalekozraké.

Dítě se obyčejně narodí dalekozraké, přičemž jeho ametropie bývá menší než 4 dioptrie, v průměru 2 dioptrie. Tato dalekozrakost mizí před dospíváním, takže oko se stává ve většině případů emmetropickým. Je to jakási rovnováha, která je zajišťována sítnicí, tvořící nervovou vrstvu oka. Jestliže tato "dioptricko-osová rovnováha" je správně řízena, stává se oko emmetropickým. Ametropie je výsledkem špatně probíhajícího vývoje, který je často spojen s dědičnými, obyčejně dominujícími faktory, které jsou na dítě přenášeny přímo z některého z obou jeho rodičů. Oko si přitom zachovává normální anatomii, pouze vzájemné proporce se poněkud pozmění. Je to tzv. konformační ametropie, která je charakterizována souměrnou křivkou četnosti, jež vykazuje stejný počet případů krátkozrakosti jako případů dalekozrakosti, přičemž často příslušná ametropie přesáhne i hodnotu 5 dioptrií.

Tento druh ametropie je nejčastější a není způsoben ani rozměrovými odchylkami ani odchylkami v křivostech, nýbrž pouze jejich disharmonií.

Ametropie se přestane měnit při skončení růstu, načež oko si zachová příslušnou ametropii pro celý další život. Stává se, že ve stáří se objevuje dalekozrakost, vyvolaná buď rostoucí tuhostí rohovky, nebo snižováním očního tlaku, nebo sklerozou oční čočky, která mění celkový index lomu čočky. Konečně tato ametropie může být vyvolána smrštěním pupily, které se projeví optickými vadami.

Měřeními bylo zjištěno, že tato stařecká dalekozrakost dosahuje průměrných hodnot, uvedených v tab. 7.1.1.

Mimo tuto nejběžnější ametropii se může vyskytovat dosti silná rozměrová ametropie:

a) vrozená nebo zděděná dalekozrakost dosahující hodnot do 8 dioptrií, která je způsobena zastavením vývoje zadní části oka. Oko je malé, velmi sploštělé, zapuštěné hluboko do hlavy a velmi pohyblivé.

b) symptomatická krátkozrakost a krátkozrakost progresivní, která je vlastně nemocí celkem často se vyskytující; tato krátkozrakost se nezastaví ve

Tabulka 7.1.1

Věk roků	$R_{Dioptr.}$
50	0
55	0,25
60	0,5
65	0,75
70	1,25
75	1,75
80	2,5

svém vývoji při skončení růstu těla a může dosáhnout až -20 dioptrií. Je to vlastnost dědičná, je však pouze recesivní a nikoliv dominantní. Je znamená, že rodiče ji sami nemusejí mít, jsou pouze nositeli tohoto znaku.

7.2) Prodloužení oka

Nechť osově ametropické oko má lámavost $D \approx D_0$ a délku $\ell' = \ell'_0 + a$, kde a značí prodloužení vyvolávající ametropii. Potom platí

$$\ell' = \frac{n'}{R + D} \qquad \ell'_0 = \frac{n'}{D}$$

Odečtením plyne odtud dále

$$a = \ell' - \ell'_0 = - \frac{n' \cdot R}{D\,(R + D)} \,. \tag{7.2.1}$$

V případě slabých ametropií můžeme ve jmenovateli zanedbat R proti D, takže můžeme psát

$$a = - \frac{n' R}{D^2} = - 3{,}7 \cdot 10^{-4}\, R \,, \tag{7.2.2}$$

klademe-li za $n' = 1{,}336$ a $D = 60$ dioptrií. Odtud plyne, že každé dioptrii krátkozrakosti $(R < 0)$ odpovídá prodloužení 0,37 mm a obráceně každé dioptrii dalekozrakosti $(R > 0)$ odpovídá zkrácení oka o 0,37 mm.

Pro silné ametropie je nutné použít vztahu (7.2.1). Např. pro $R = -10$ dioptrií odtud vychází

$$a = + \frac{1{,}336 \cdot 10}{60\,(-10 + 60)} = \frac{1{,}336}{300} = 0{,}00445 \text{ m} = 4{,}45 \text{ mm} \,.$$

7.3) Akomodační amplituda u ametropického oka

Všimněme si nejdříve, jak se změní lámavost oka při akomodaci.

Nechť D resp. D^* značí lámavost neakomodujícího resp. akomodujícího oka. Uvažujme ametropické oko o ametropii R. Nechť ℓ' značí vzdálenost

jeho sítnice od obrazového hlavního bodu P'. Potom platí

$$\frac{n'}{l'} = R + D \,. \tag{7.3.1}$$

Akomoduje-li toto oko na bod, jehož vergence je X, pak můžeme psát obdobně

$$\frac{n'}{l' - \Delta l'} = X + D^* \,, \tag{7.3.2}$$

kde $\Delta l'$ značí posuv obrazového hlavního bodu vyvolaný akomodací. Protože posuv $\Delta l'$ je velmi malý, můžeme předchozí vztah psát ve tvaru

$$\frac{n'}{l' - \Delta l'} = \frac{n'}{l' \left(1 - \frac{\Delta l'}{l'}\right)} \doteq \frac{n'}{l'} \left(1 + \frac{\Delta l'}{l'}\right) = \frac{n'}{l'} + \frac{n' \Delta l'}{l'^2} =$$

$$= R + D + \frac{\Delta l'}{n'} (R + D)^2 \,.$$

Pro velikost akomodace A pak vychází

$$A = R - X = R - \frac{n'}{l' - \Delta l'} + D^* = R - \left[R + D + \frac{\Delta l'}{l'} (R + D)^2 \right] + D^* =$$

$$= D^* - D - \frac{\Delta l'}{n'} \,. (R + D)^2 \,.$$

Protože posuv $\Delta l'$ nabývá hodnot 4 až 5.10^{-5} A, můžeme klást

$$k = \frac{\Delta l'}{A \,.\, n'} = 3 \text{ až } 4.10^{-5} \,,$$

takže

$$A = D^* - D - kA (R + D)^2$$

čili

$$D^* - D = A \left[1 - k (R + D)^2 \right] \tag{7.3.3}$$

V případě emmetropického oka $(R = 0)$ vychází

$$D^* - D = A (1 + k D^2) \,. \tag{7.3.4}$$

Pro $D = 60$ dioptrií a $k = 5.10^{-5}$ můžeme tedy psát

$$D^* - D = 1{,}108 \, A \,.$$

Např. pro $A = 10$ dioptrií je

$$D^* - D = 11{,}08 \text{ dioptrie.}$$

Je vidět, že rozdíl 1,08 dioptrie není možno zanedbat.

Uvažujme nyní ametropické a emmetropické oko, které mají stejné optické parametry a stejný ciliární sval. Předpokládejme, že obě oči maximálně akomodují. Potom rozdíl $D^* - D$ musí být u obou očí stejný. Můžeme tedy psát:

a) pro oko ametropické

$$D^* - D = A_m \cdot \left[1 + k\,(R + D)^2\right]$$

b) pro oko emmetropické

$$D^* - D = A_0 \cdot (1 + k\,D^2) ,$$

kde A_0 značí akomodační amplitudu emmetropického oka.

Srovnáním obou posledních vztahů plyne

$$A_m \left[1 + k\,(R + D)^2\right] = A_0\,(1 + k\,D^2)$$

a odtud

$$A_m = \frac{A_0\,(1 + kD^2)}{1 + k\,(R + D)^2} \doteq A_0\,(1 + k\,D^2) \cdot \left[1 - k\,(R + D)^2\right]$$

nebo

$$A_m = A_0 \cdot \left[1 - k\,(2\,RD + R^2)\right] \quad . \qquad (7.3.5)$$

Faktor v závorce je velmi blízký jedné. Např. pro $k = 4.10^{-5}$ a $R = +5$ dioptrií nabývá hodnoty 0,975, pro $R = -5$ dioptrií nabývá hodnoty 1,023 a pro $R = -10$ hodnoty 1,044.

Je vidět, že můžeme s dostatečnou přesností psát

$$A_m = A_0 \cdot \qquad . \qquad (7.3.6)$$

Na základě těchto úvah můžeme říci, že akomodační amplituda, vyjádřená ve vergenci, se u ametropického oka zachovává. Vyjádříme-li akomodační rozsah v příslušných vzdálenostech, vidíme, že se podstatně liší u emmetropického a ametropického oka.

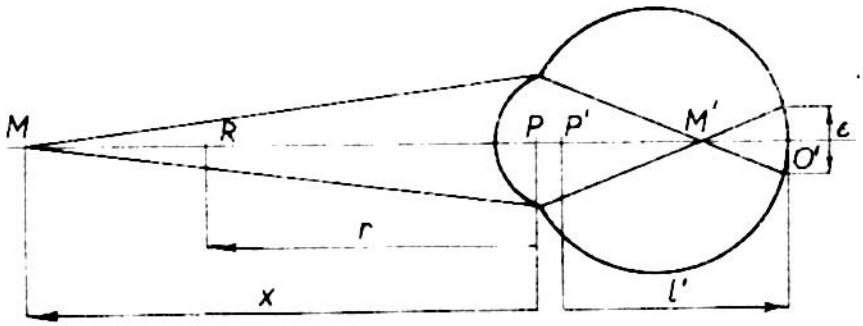
Např. oko s akomodační amplitudou $A_m = 10$ dioptrií má rozsah:

a) u emmetropického oka od ∞ do 10 cm, tedy nekonečně veliký,

b) u krátkozrakého oka s krátkozrakostí $R = -5$ dioptrií od 20 cm do 6,7 cm $\left(= \frac{1}{10 + 5}\right)$, tj. pouze 13,3 cm,

c) u krátkozrakého oka s krátkozrakostí $R = -10$ dioptrií od 10 cm do 5 cm $\left(= \frac{1}{10 + 10}\right)$, tj. pouze 5 cm.

7.4) Vidění krátkozrakého oka na dálku



Obr. 7.4.1 K vysvětlení velikosti rozptylového kroužku u krátkozrakého oka

Předpokládejme, že krátkozraké oko pozoruje vzdálený bod M ležící ve větší vzdálenosti než jeho vzdálený bod. Potom vergence

$$X = \frac{1}{x} < R = \frac{1}{r} .$$

Tento bod vidí krátkozraké oko neostře. Oko nejeví ani snahu akomodovat, což se projeví dalším zneostřením obrazu M' .

Určeme průměr rozptylového kroužku, který je jeho obrazem. Značí-li O' bod, ve kterém protíná optická osa sítnici, můžeme psát

$$\overline{P'O'} = l' = \frac{n'}{R + D} ,$$

kde D značí lámavost a R ametropii uvažovaného krátkozrakého oka.

Podobně můžeme psát pro bod M'

$$\overline{P'M'} = \frac{n'}{X + D} ,$$

takže

$$\overline{O'M'} = \overline{P'M'} - \overline{P'O'} = \frac{n'}{X + D} - \frac{n'}{R + D} = - \frac{n' (X - R)}{(X + D) . (R + D)} .$$

Potom vztah (4.7.1) pro průměr rozptylového kroužku nabude tvaru

$$\varepsilon = - d \frac{X - R}{R + D} (0{,}9938 + 1{,}222 . 10^{-3} X)$$

nebo přibližně

$$\varepsilon = - d \frac{X - R}{R + D} . \qquad (7.4.1)$$

Protože $X - R > 0$, jsou ε a d opačných znamének, což je zřejmé též z obr. 7.4.1. Krátkozraké oko přivřením víček zmenší d ve svislém směru, čímž částečně redukuje rozptylový kroužek ε . Krátkozraké oko vidí vzdálené předměty nezřetelně a větší. Označíme-li velikost obrazu nějakého vzdáleného předmětu na sítnici emmetropického oka y'_0 a velikost obrazu téhož předmětu na sítnici krátkozrakého oka y^*, pak poměr $\frac{y^*}{y'}$ je dán vztahem

$$\frac{y^*}{y_0'} = 1 - \frac{65{,}1 \cdot R}{D\,(R + D)}\,,$$ x)

kde D značí lámavost a R ametropii uvažovaného oka.

Např. pro R = 5 dioptrií je $\frac{y^*}{y_0'} = 1{,}1$ a pro R = - 10 dioptrií je $\frac{y^*}{y_0'} = 1{,}22$. Tento vzrůst zvětšení bude ještě znatelnější, vezmeme-li v úvahu neostrou hranici příslušného obrazu, jejíž šířka činí $\frac{\varepsilon}{2}$, značí-li ε průměr rozptylového kroužku.

7.5) Vidění krátkozrakého oka na blízko

Krátkozraké oko vidí předměty nacházející se mezi jeho vzdáleným bodem a okem zřetelně. Oko se snaží akomodovat obdobně jako oko emmetropické. Velikost obrazu y´ na sítnici bude dána vztahem

$$\frac{y'}{y} = \frac{p'}{n'} \cdot \frac{n}{p}\,, \qquad (7.5.1)$$

kde y značí velikost příslušného předmětu a p resp. p´ odpovídající vzdálenost od příslušných hlavních bodů P resp. P´.

Označíme-li ℓ_0' vzdálenost obrazového hlavního bodu P´ od sítnice neakomodujícího emmetropického oka, můžeme psát dále na základě (7.2.1)

$$\frac{p'}{n'} = \frac{\ell_0'}{n'} - \frac{\Delta\ell'}{n'} + \frac{a}{n'} = \frac{1}{D} - kA - \frac{R}{D\,(R + D)}\,.$$

Uvážíme-li, že A = R - X , můžeme (7.5.1) psát dále ve tvaru

$$y' = \frac{y}{p\,(R + D)}\left[1 - k\,(R - X)\,.\,(R + D)\right]\,.$$

Pro emmetropické oko odtud plyne (R = 0):

$$y_0' = \frac{y}{pD}\,(1 + k\,X\,D)$$

a tedy pro poměr $\frac{y'}{y_0'}$ vychází

$$\frac{y'}{y_0'} = \frac{\frac{y}{p\,(R + D)}\left[1 - k\,(R - X)\,(R + D)\right]}{\frac{y}{p\,D}\,(1 + k\,X\,D)} = \frac{D}{R + D}\left[1 - k(R-X).(R+D)\right].(1 - kXD) =$$

$$= \frac{D}{R + D}\left[1 - k\,(R - X)\,.\,(R + D)\right] - k\,X\,D - k^2.\,XD\,.\,(R-X)\,.\,(R+D)$$

x) Le Grand, Y., Optique physiologique, I., 86., Paříž, 1952.

Zanedbáme-li člen s k^2 , dostaneme

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{D}{R + D} \left[1 - k\, R\, (R + D - X)\right] \quad .$$

Protože výraz v závorce se neliší mnoho od jedné, můžeme psát s dostatečnou přesností

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{D}{R + D} \quad . \qquad (7.5.2)$$

Např. pro $R = -5$ dioptrií odtud vychází pro poměr $\frac{y'}{y'_0} = 1{,}09$ a pro $R = -10$ dioptrií pak $\frac{y'}{y'_0} = 1{,}20$. Tedy krátkozraké oko vidí blízké předměty větší než oko emmetropické.

7.6) Vidění dalekozrakého oka na dálku

Slabá dalekozrakost u mladých lidí může zůstat nepovšimnuta. Je-li však dalekozrakost silná, pak musí oko stále akomodovat, a to i na vzdálené cíle, čímž se ciliární sval velmi unaví a výsledkem jsou bolesti hlavy - migrena. Obraz se stává neostrým z důvodů ochabnutí akomodace.

Velikost obrazu se určí pomocí vztahu (7.5.2), který platí i pro dalekozraké oko. Pro $R = +5$ dioptrií odtud vychází $\frac{y'}{y'_0} = 0{,}923$ a pro $R = +10$ dioptrií $\frac{y'}{y'_0} = 0{,}86$. Dalekozraké oko vidí předměty menší než oko emmetropické.

7.7) Vidění dalekozrakého oka na blízko

Slabě dalekozraké oko mívá často akomodační amplitudu A_m daleko větší než emmetropické oko. Přitom jeho blízký bod leží v normální vzdálenosti. Je-li dalekozrakost silná, nebo je-li komplikována stárnutím, pak oko nestačí dostatečně akomodovat a proto se obraz stává neostrým.

Má-li dalekozraký člověk číst drobné písmo, klade si příslušný tisk blízko k oku, obdobně jako člověk krátkozraký. Tento zjev je možno vysvětlit takto:

Nestačí-li oko akomodovat, vytváří se na sítnici neostrý obraz velikosti y^* , který je v porovnání s obrazem y'_0 téhož předmětu vytvořeného na sítnici emmetropického oka v poměru $\frac{y^*}{y'_0}$ daném vztahem

$$\frac{y^*}{y'_0} = 1 - \frac{65{,}1 \cdot R}{D\,(R + D)} \quad ,$$

který platí pro oko dalekozraké stejně jako pro oko krátkozraké. Uvážíme-li že $y_0' : y = \frac{1}{D} : \frac{1}{X}$, můžeme předchozí vztah psát ve tvaru

$$y^* = \frac{yX}{D} \cdot \left[1 - \frac{65{,}1 \cdot R}{D\,(R + D)} \right] = \frac{yX}{D} \cdot \left[\frac{D\,R + D^2 - 65{,}1 \cdot R}{D\,(R + D)} \right].$$

Položíme-li $D = 65{,}1$ dioptrií, dostaneme odtud dále

$$y^* = y \cdot \frac{X}{R + D} \,. \qquad (7.6.1)$$

Pro průměr rozptylového kroužku ε platí podle dřívějšího, nepřihlížíme-li ke znaménku:

$$\varepsilon = d \, \frac{X - R}{R + D} \,. \qquad (7.6.2)$$

Z (7.6.1) a (7.6.2) plyne pak pro poměr

$$\frac{\varepsilon}{y^*} = \frac{d}{y} \cdot \frac{\frac{X - R}{R + D}}{\frac{X}{R + D}} = \frac{d}{y} \, \frac{X - R}{X} = \frac{d}{y} \left(1 - \frac{R}{X} \right) . \qquad (7.6.3)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že blíží-li se předmět k oku, že X roste co do absolutní hodnoty, takže kladná hodnota $-\frac{R}{X}$ klesá. To znamená, že při přibližování předmětu roste průměr rozptylového kroužku ε pomaleji než velikost y^* příslušného obrazu. Proto dalekozraký rozlišuje lépe drobné litery, když je k oku přiblíží.

7.8) Rozlišovací schopnost oka

Nechť ω značí minimální zdánlivou velikost předmětu, který je ještě okem rozpoznán. Je přirozené, že hodnota úhlu ω bude především záviset na druhu předmětu - testu. Čím bude úhel ω menší, tím dokonalejší je vidění, tím má oko lepší rozlišovací schopnost. Proto se zavádí jako míra pro posouzení jakosti vidění nebo rozlišovací schopnosti hodnota V, která je nepřímo úměrná úhlu

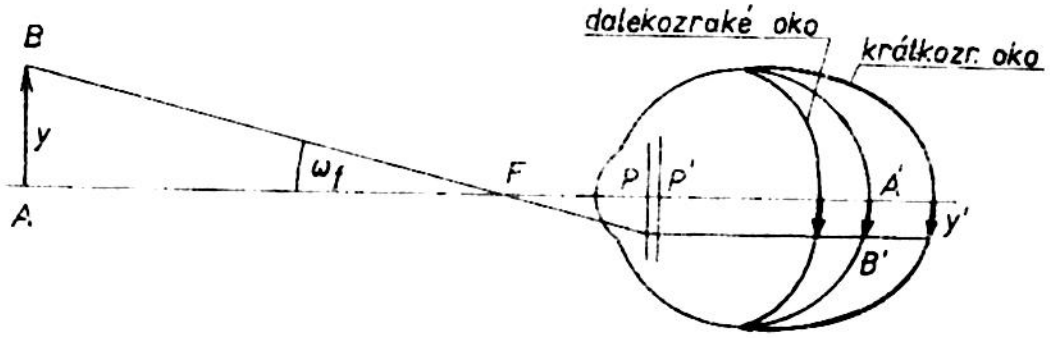
$$V = \frac{K}{\omega} \,, \qquad (7.8.1)$$

kde K značí konstantu, která se např. volí u písmenových testů používaných očními optiky rovna 5.

Přitom úhel ω značí výšku písmen vyjádřenou v šedesátinných minutách.

Rozlišovací schopnost slouží tedy ke srovnání ametropického oka s okem emmetropickým a toto srovnání se provádí dvěma způsoby.

a) Absolutní rozlišovací schopnost V_a je nepřímo úměrná minimální zdánlivé velikosti ω_f pozorovaného předmětu, přičemž vrchol úhlu ω_f splývá s předmětovým ohniskem oka.



Obr. 7.8.1 K vysvětlení absolutní rozlišovací schopnosti oka.

V tomto případě velikost obrazu $\overline{A'B'}$ na sítnici nezávisí než jen na úhlu ω_f .

Podle obrázku platí

$$\omega_f = -\frac{y}{\overline{AF}} = -\frac{y}{\overline{AP} + \overline{PF}} = \frac{y}{\frac{1}{R} + \frac{1}{D}} = y \cdot \frac{RD}{R + D} \qquad (7.8.2)$$

b) Přirozená rozlišovací schopnost V_n je nepřímo úměrná minimální zdánlivé velikosti ω_p pozorovaného předmětu, přičemž vrchol úhlu ω_p splývá nyní s předmětovým hlavním bodem P oka. Pro úhel ω_p můžeme psát

$$\omega_p = \frac{y}{p} = y \cdot R \qquad (7.8.3)$$

a tedy

$$\frac{V_a}{V_n} = \frac{\omega_p}{\omega_f} = \frac{y \cdot R}{y \cdot \frac{R \cdot D}{R + D}} = 1 + \frac{R}{D} \; . \qquad (7.8.4)$$

Při měření se postupuje tak, že test se umístí ve vzdáleném bodu oka, čímž se vyloučí akomodace.

7.9) Ametropie křivostí

Nechť oko má normální délku a nechť jeho lámavost je $D \neq D_o$, značí-li D_o lámavost emmetropického oka. Pro emmetropické oko pozorující vzdálený předmět můžeme psát

$$\frac{n'}{l'} = D_o \; .$$

Podobně pro ametropické oko o ametropii R můžeme psát

$$\frac{n'}{l'} = R + D \ .$$

Srovnáním obou vztahů dostaneme

$$R = D_o - D \ .$$

To znamená, že ametropie se v tomto případě projevuje jako přírůstek resp. úbytek lámavosti.

Předpokládejme, že oběma očima pozorujeme tentýž předmět velikosti y ležící ve stejné vzdálenosti p . V obou případech budou obě oči akomodovat (ovšem různě) a budou vidět předmět o velikosti y´ , pro který platí

$$\frac{y'}{y} = \frac{p'}{n'} \cdot \frac{n}{p} \ .$$

Protože v obou případech je $p' = l'$, musí být také y´ v obou případech stejné (zanedbáme-li posuv hlavních bodů vyvolaný akomodací). To znamená, že v tomto případě je velikost obrazu nezávislá na příslušné ametropii.

8) Korekce sférické ametropie

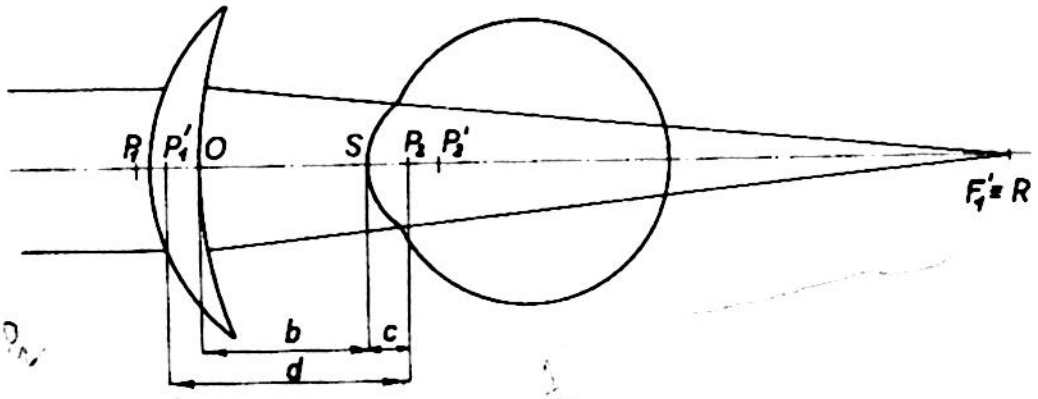
Úkolem brýlového skla je upravit vidění oka tak, aby ametropické oko vidělo střetelně vzdálený bod bez akomodace. Tento požadavek bude splněn, zobrazí-li korekční brýlové sklo tento vzdálený bod do vzdáleného bodu oka. Jinak řečeno, obrazové ohnisko korekčního brýlového skla musí splynout se vzdáleným bodem ametropického oka.

Přitom je nutno si uvědomit, že korekční brýlové sklo zprostředkovává zobrazení velmi úzkými paprskovými svazky vymezenými průměrem oční pupily. To znamená, že poměr dopadových výšek h příslušných zobrazovacích paprsků k poloměrům křivosti ploch brýlového skla je malý, takže zobrazování se prakticky odehrává v paraxiálním prostoru. Proto je možno provádět korekci ametropie jednoduchými čočkami.

8.1) Určení lámavosti korekčního brýlového skla

Má-li být splněna podmínka pro korekci ametropie, musí podle obr. 8.1.1 platit

$$\overline{P_2P_1'} = \overline{P_1'P_1'} - \overline{P_1'P_2} \ . \qquad (8.1.1)$$



Obr. 8.1.1 K vysvětlení korekce ametropie oka brýlovým sklem.

Označíme-li D_s lámavost korekčního skla, pak

$$\overline{P_1'F_1'} = \frac{1}{D_s} . \qquad (8.1.2)$$

Značí-li R ametropii korigovaného oka, pak můžeme psát

$$\overline{P_2F_1'} = \frac{1}{R} . \qquad (8.1.3)$$

Dosazením (8.1.2) a (8.1.3) do (8.1.1) dostaneme

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{D_s} - d$$

značí-li $d = \overline{P_1'P_2}$ vzdálenost brýlového skla od oka. Odtud pak plyne

$$D_s = \frac{R}{1 + d.R} \qquad (8.1.4)$$

Z tohoto vztahu plyne, že lámavost D_s korekčního skla má stejné znaménko jako korigovaná ametropie R a její algebraická hodnota je vždy menší.

Z (8.1.4) plyne

$$R = D_s . (1 + R . d) = \frac{D_s}{1 - d . R} . \qquad (8.1.5)$$

Znásobením (8.1.4) a (8.1.5) pak plyne

$$(1 + dR) . (1 - d D_s) = 1 . \qquad (8.1.6)$$

Pro tenké čočky splývá P_1' s vrcholem čočky O , takže

$$d = b + c ,$$

kde b značí vzdálenost brýlového skla od rohovky a c vzdálenost $\overline{SP_2}$, značí-li S vrchol rohovky.

V souhlase s jenskou školou budeme brát pro $o = 1{,}35$ mm a pro $b = 12$ mm, takže $d = 13{,}35$ mm. V důsledku toho se lámavost D_s jen velmi málo liší od ametropie R. Rozvineme-li (8.1.4) v řadu, dostaneme

$$D_s = R\,(1 - Rd \ldots.) = R - 1{,}335 \cdot 10^{-2} \cdot R^2 \ldots\ldots$$

Obecně se neprovádí korekce oka s větší přesností než na 0,25 dioptrie, to znamená, že podle předchozího rozvoje bude rozdíl $D_s - R$ zanedbatelný, pokud bude

$$1{,}335 \cdot 10^{-2}\, R^2 \leq 0{,}25 \quad \text{čili}$$

$$|R| \leq \sqrt{\frac{0{,}25}{1{,}335 \cdot 10^{-2}}} = 4{,}3 \text{ dioptrie.} \qquad (8.1.7)$$

Z tohoto výsledku plyne, že až do $\pm$ 4,3 dioptrií můžeme korigovat ametropii tak, že lámavost D_s příslušného korekčního skla je stejná jako korigovaná ametropie R. Nad tuto hodnotu jsou již rozdíly daleko větší a nelze je zanedbat.

Vztah (8.1.4) je velmi důležitý pro brýlařskou praksi a může se využívat několika různými způsoby. Buď je zpracován do tabulek se dvěma vstupními hodnotami, nebo je upraven ve formě průsečíkového nomogramu, nebo se také využívá speciálním způsobem.

V tabulce 8.1.1 jsou uvedeny hodnoty D_s jako funkce R pro jedinou vzdálenost $b = 12$ mm a $o = 1{,}35$ mm. Např. pro $R = +0{,}5$ dioptrie ze vztahu (8.1.4) plyne

$$D_s = \frac{0{,}5}{1 + 0{,}01335 \cdot 0{,}5} = \frac{0{,}5}{1{,}006675} = 0{,}497 \doteq 0{,}5 \text{ dioptrií}$$

nebo pro $R = -5$ dioptrie

$$D_s = \frac{-5}{1 - 0{,}01335 \cdot 5} = \frac{-5}{0{,}93325} = -5{,}36 \text{ dioptrií}.$$

Stejným způsobem byly určeny hodnoty D_s pro ostatní hodnoty R ametropie.

Pro vyčíslení vztahu (8.1.4) je možno snadno sestrojit průsečíkový nomogram.

Na přímku $\overline{OA}$ vztyčíme kolmici $\overline{OM}$, která nese stupnici vzdáleností b. Souměrně k přímce $\overline{OA}$ sestrojíme přímky $\overline{OB}$ a $\overline{OC}$ procházející bodem O. Přímka $\overline{OB}$ nese stupnici D_s a přímka $\overline{OC}$ stupnici R. Potom spojnice $\overline{MR}$ vytíná na přímce $\overline{OB}$ bod D, který určuje na příslušné stupnici D_s odpovídající vzdálenosti b příslušné k bodu M a ametropii R příslušné k bodu R.

Tabulka 8.1.1

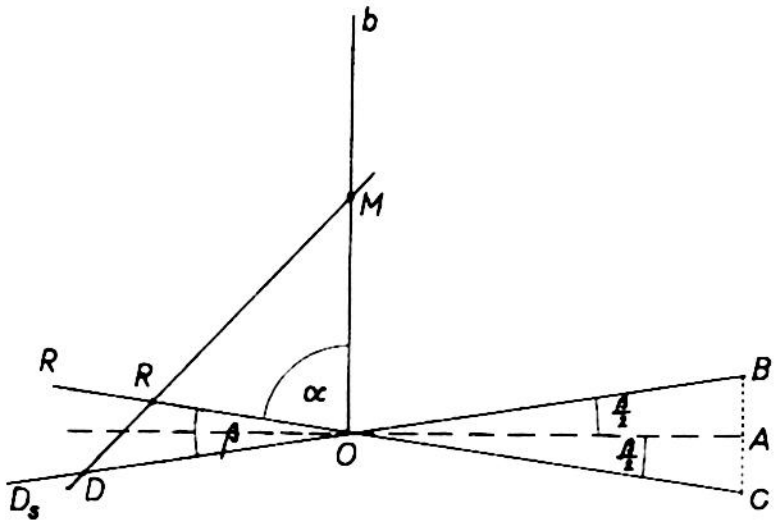
Ametropie R dioptrií	Lámavost D_s dioptrií		Ametropie R dioptrií	Lámavost D_s dioptrií	
	+	-		+	-
0,5	0,50	0,50	10,5	9,21	12,21
1	0,99	1,01	11	9,59	12,89
1,5	1,47	1,53	11,5	9,97	13,59
2	1,95	2,05	12	10,34	14,29
2,5	2,42	2,59	12,5	10,71	15,00
3	2,88	3,13	13	11,08	15,73
3,5	3,35	6,67	13,5	11,44	16,47
4	3,80	4,23	14	11,80	17,22
4,5	4,25	4,79	14,5	12,15	17,98
5	4,69	5,36	15	12,50	18,75
5,5	5,12	5,94	15,5	12,84	19,54
6	5,56	6,52	16	13,18	20,35
6,5	5,98	7,12	16,5	13,52	21,16
7	6,40	7,72	17	13,86	21,99
7,5	6,82	8,33	17,5	14,19	22,84
8	7,23	8,96	18	14,51	23,69
8,5	7,63	9,59	18,5	14,84	24,57
9	8,04	10,23	19	15,16	25,46
9,5	8,43	10,88	19,5	15,47	26,36
10	8,82	11,54	20	15,79	27,28

Proveďme důkaz. Píšme vztah vyjadřující, že plocha Δ MOD je rovna součtu ploch Δ MOR a Δ ROD :

$$\frac{1}{2} \cdot \overline{MO} \cdot \overline{OR} \cdot \sin\alpha + \frac{1}{2} \overline{OR} \cdot \overline{OD} \cdot \sin\beta = \frac{1}{2} \overline{OM} \cdot \overline{OD} \cdot \sin(\alpha + \beta)$$

čili odtud

$$\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\overline{OR}} = \frac{\sin\alpha}{\overline{OD}} + \frac{\sin\beta}{\overline{OM}} \quad .$$



Obr. 8.1.2 Ke konstrukci nomogramu pro vyčíslení vztahu 8.1.4

Z konstrukce nomogramu vyplývá, že úhly $(\alpha + \beta)$ a α jsou výplňkové a proto platí $\sin(\alpha + \beta) = \sin(2R - \alpha) = \sin\alpha$, takže předchozí vztah můžeme psát dále ve tvaru

$$\frac{1}{\overline{OR}} - \frac{1}{\overline{OD}} = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \cdot \frac{1}{\overline{OM}} .$$

Protože $\overline{OR} = R$ a $\overline{OD} = D_s$, můžeme psát dále

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{D_s} = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \cdot \frac{1}{\overline{OM}} .$$

Označíme-li

$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \cdot \frac{1}{\overline{OM}} = d \qquad (8.1.8)$$

můžeme psát konečně

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{D_s} = d . \qquad (8.1.9)$$

Vztah (8.1.4) má však tvar

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{D_s} = -d .$$

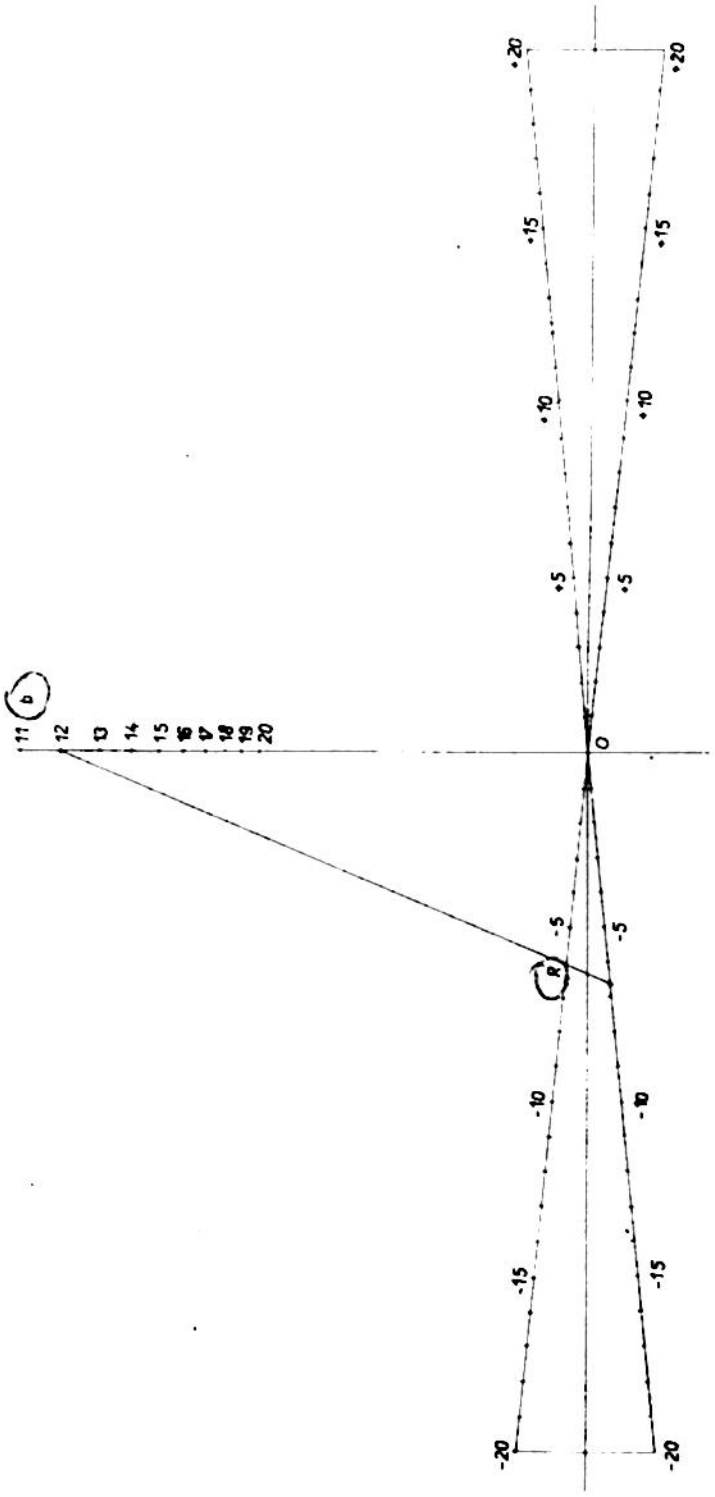
Stačí tedy změnit smysl stupnice vzdáleností $\underline{b}$ na přímce $\overline{OM}$, aby předchozí vztah (8.1.9) byl totožný se vztahem (8.1.4).

Volíme-li $\operatorname{tg}\frac{\beta}{2} = 0{,}1$, pak $\operatorname{tg}\beta = 0{,}2$. Protože $\sin\alpha \doteq 1$, plyne ze vztahu (8.1.8), že

$$\overline{OM} = \frac{0{,}2}{d} = \frac{1}{5d} . \qquad (8.1.10)$$

Volíme-li na osách $\overline{OR}$ a $\overline{OD_s}$ měřítko tak, aby 1 cm odpovídal 1 dioptrii, pak ze vztahu (8.1.10) plyne pro $d = 13{,}35$ mm, tj. $b = 12$ mm :

$$\overline{OM} = \frac{0{,}2}{1{,}335 \cdot 10^{-2}} = 14{,}98 \text{ cm} .$$



Obr. 8.1.8 Nomogram pro určení lámavosti korekčního brýlového skla

Nomogram tedy sestrojíme tak, že na přímku $\overline{OA}$ naneseme ve vzdálenosti $\overline{OA} = 20$ cm na kolmici na obě strany od bodu A úsečky $\overline{AB}$ resp. $\overline{AC} = 2$ cm. Potom $tg \frac{\beta}{2} = 0,1$. Provedení nomogramu je patrno z obr. 8.1.3.

Z tohoto nomogramu plyne pro $b = 12$ mm a $R = -6$ dioptrií $D_s = -6,55$ dioptrií.

Obdobně jako pro $b = 12$ se určí délky $\overline{OM}$ pro ostatní vzdálenosti b. Výpočet je proveden v tab. 8.1.2.

Tabulka 8.1.2[x)]

b_{mm}	OM_{cm}
4	37,4
5	31,5
6	27,2
7	24,0
8	21,4
9	19,3
10	17,6
11	16,2
12	14,98
13	13,94
14	13,02
15	12,24
16	11,50
17	10,90
18	10,34
19	9,82
20	9,36

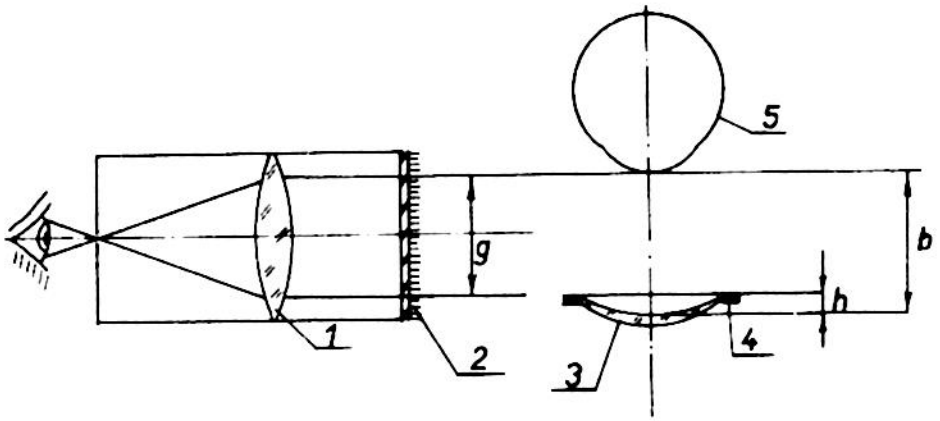
8.2) Poloha brýlových skel

Brýlové sklo je třeba přiblížit co nejvíce k oku a to jednak z důvodů estetických a jednak z důvodů většího zorného pole. Nejmenší vzdálenost brýlového skla je omezena řasami víčka, které se nesmí brýlového skla dotýkat. Vzdálenost b brýlového skla je třeba u velmi lámavých skel měřit s přesností do 1 mm. Např. při $D_s = -20$ dioptr. je třeba určit vzdálenost b s přesností pod 1 mm, nemáme-li se dopustit v korekci oka chyby větší než 0,25 dioptrií.

Tato vzdálenost se měří tzv. keratometrem Wesselyho. V podstatě je tvořen milimetrovou stupničkou nanesenou na skleněné destičce umístěné před spojnou čočkou. V předmětovém ohnisku této čočky je umístěno pozorovatelovo oko, jak je to naznačeno na obr. 8.2.1. Tím je zajištěn rovnoběžný paprskový chod před tímto přístrojem, takže na stupničce (1) je možno celkem dobře bez paralaxy změřit vzdálenost q vrcholu rohovky S od obruby (4) brýlí. Vhodným hloubkoměrem se pak na brýlích určí výška vrchlíku h, která doplňuje naměřenou vzdálenost g na potřebnou vzdálenost b ($= g + h$) .

---

x) Le Grand, Y., Optique physiologique, I. 93, Paříž, 1952



Obr. 8.2.1 Wesselyho keratometr

8.3) Soustava oko - brýlové sklo

Označme lámavost soustavy oko - brýlové sklo $\mathcal{D}$. Nechť D_s je lámavost korekčního brýlového skla a D lámavost oka. Potom můžeme psát

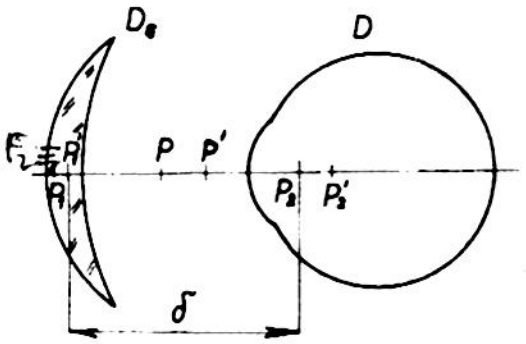
$$\mathcal{D} = D_s + D - D_s \cdot D \cdot \delta \,, \qquad (8.2.1)$$

kde δ značí vzdálenost předmětového hlavního bodu oka od obrazového hlavního bodu brýlového skla (obr. 8.3.1).

a) Uvažujme případ, kdy $\delta = \frac{1}{D}$, tj. kdy obrazový hlavní bod brýlového skla splývá s předmětovým ohniskem F_2 oka. Ze vztahu (8.2.1) plyne, že

$$\mathcal{D} = D \,, \qquad (8.2.2)$$

tj. lámavost soustavy oko - brýlové sklo je rovna lámavosti samotného oka. To znamená, že takto korigované oko vidí předměty stejně veliké jako normální oko.



Obr. 8.3.1 K vysvětlení lámavosti soustavy oko - brýlové sklo

Pro polohu hlavních bodů P a P´ soustavy oko - brýlové sklo vychází podle (4.1.12) resp. (4.1.13)

$$\overline{P_1 P} = \delta \frac{D}{\mathcal{D}} = \delta \,.$$

Vzhledem k tomu, že brýlové sklo je možno uvažovat jako tenkou čočku, je také

$$\overline{P_1' P} = \delta \,.$$

Podobně

$$\overline{P_2'P'} = - n'\sigma \frac{D_s}{\mathcal{D}} = - n' \frac{D_s}{D^2} = - \frac{n' R}{D^2 (1 + \sigma R)} = - \frac{n' . R}{D (R + D)} .$$

Podle (7.2.1) značí $- \frac{n' R}{D (R + D)}$ prodloužení oka vyvolané ametropií. Je tedy možno předchozí výsledky shrnout takto: Rozměrově (osově) ametropické oko, korigované brýlovým sklem umístěným v jeho předmětovém ohnisku, má stejné vlastnosti jako oko emmetropické. Brýlové sklo nemění jeho lámavost, nýbrž pouze posouvá obrazový hlavní bod tak, aby vyrovnalo prodloužení oka způsobené ametropií.

Má-li se umístit brýlové sklo v předmětovém ohnisku oka, pak je třeba, aby vzdálenost b byla velká 15,1 - 15,7 mm (podle toho, které rozměry teoretického oka budeme uvažovat). Tato vzdálenost působí neesteticky a nepřináší žádných předností.

b) Uvažujme nyní obecný případ, kdy $\sigma < \frac{1}{D}$. Položme jako von Rohr $\omega^2 = 1 - \sigma . D_s$. Hodnota ω^2 je malá, je-li $b = 12$ mm (takže $\sigma = 13,6$ mm), a nabývá pro $D = 60$ dioptrií velikosti $\omega^2 = 0,184$. Potom platí

$$\mathcal{D} = D_s + D - D_s . D . \frac{1 - \omega^2}{D} = D + \omega^2 . D_s ,$$

$$\overline{P_1P} = \sigma . \frac{D}{D + \omega^2 . D_s} = \sigma (1 - \omega^2 \frac{D_s}{D}) \quad \text{a}$$

$$\overline{P_2'P'} = - n'\sigma \frac{D_s}{\mathcal{D}} = - n'\sigma \frac{D_s}{D + \omega^2 . D_s} = - n'\sigma \frac{D_s}{D} (1 - \omega^2 \frac{D_s}{D}) .$$

Potom podle obr. 8.3.1 platí pro vzdálenost $\overline{PP'}$:

$$\overline{PP'} = \sigma + \overline{P_2P_2'} - \overline{P_1P} + \overline{P_2'P'} = \sigma + 0,3132 . 10^{-3} - \sigma (1 - \omega^2 \frac{D_s}{D}) -$$

$$- n'\sigma \frac{D_s}{D} (1 - \omega^2 . \frac{D_s}{D}) = 0,3132 . 10^{-3} + \omega^2 \sigma \frac{D_s}{D} - n'\sigma \frac{D_s}{D} (1 - \omega^2 \frac{D_s}{D}) ,$$

neboť $\overline{P_1P_1'} = 0$. a $\overline{P_2P_2'} = 0,3132$ mm (viz tab. 4.3.1).

Hledejme hodnotu D_s , pro kterou bude $\overline{PP'} = 0$. Pro tuto hodnotu platí

$$\omega^2 n'\sigma \frac{D_s^2}{D^2} + \frac{D_s}{D} (\omega^2 \sigma - n'\sigma) + 0,3132 . 10^{-3} = 0 .$$

Dosadíme-li za ω^2 , n', σ a D příslušné hodnoty, dostaneme

$$\frac{0{,}184 \cdot 1{,}336 \cdot 0{,}0136}{60^2} \cdot D_s^2 + \frac{0{,}184 \cdot 0{,}0136 - 1{,}336 \cdot 0{,}0136}{60} \cdot D_s +$$

$$+ 0{,}0003132 = 0 \qquad \text{čili}$$

$$D_s^2 - 30{,}3\, D_s + 33{,}7 = 0 .$$

Odtud

$$(D_s)_{1,2} = 15{,}15 \pm \sqrt{229{,}5 - 33{,}7} = \begin{cases} 29{,}14 \\ 1{,}16 \end{cases}$$

Pro náš případ má význam pouze druhé řešení. Z tohoto výsledku plyne, že pro dalekozrakost $D_s = +1{,}16$ dioptrií oba hlavní body P a P´ splynou a pro větší hodnoty D_s se pořadí hlavních bodů soustavy oko - brýlové sklo obrátí.

8.4) Pupily oka korigovaného brýlovým sklem

Korekční brýlové sklo neovlivní polohu a velikost výstupní pupily, má však vliv na polohu a velikost vstupní pupily, která je obrazem oční pupily vytvořeným rohovkou a brýlovým sklem, nebo obrazem vstupní pupily nekorigovaného oka vytvořeným brýlovým sklem.

Tato pupila leží asi 3 mm za vrcholem rohovky a tedy přibližně 15 mm za vrcholem brýlového skla. Známe tedy p' (= 15 mm) a je třeba určit p vstupní pupily. Platí

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{p'} - D_s = \frac{1}{p'} - \frac{R}{1 + dR} = \frac{1 + (d - p')R}{p'(1 + dR)} \doteq \frac{1}{p'(1 + dR)} ,$$

neboť $d - p'$ je veličina velmi malá. Dostáváme tedy

$$p = p'(1 + dR) .$$

Pro zvětšení, se kterým je vstupní pupila zobrazena, platí

$$\frac{p}{p'} = 1 + dR .$$

Vliv korekčního brýlového skla na vstupní pupilu oka je možno vyjádřit tedy takto:

a) vstupní pupila nekorigovaného oka je brýlovým sklem posunuta o hodnotu

$$p - p' = p'(1 + dR) - p' = p' . dR \doteq d^2 . R .$$

b) její velikost se změní faktorem $1 + dR$. Tento faktor je pro krátkozraké oko menší než 1. Z toho důvodu je pro krátkozrakého člověka důležité,

aby d bylo co nejmenší, neboť pak je faktor $1 + dR$ co největší a tedy oko krátkozrakého člověka, pozorované druhým člověkem přes korekční brýlové sklo, se nejeví tak malé a není tedy tak mnoho narušována estetičnost. Současně s klesajícím průměrem vstupní pupily klesá i světelný tok vstupující do oka. Tato nevýhoda korigovaného krátkozrakého oka bývá poněkud vyvážena tím, že nekorigované krátkozraké oko má poněkud větší oční pupilu.

8.5) Tolerování lámavosti korekčních brýlových skel

Vztah (7.4.1) pro průměr rozptylového kroužku

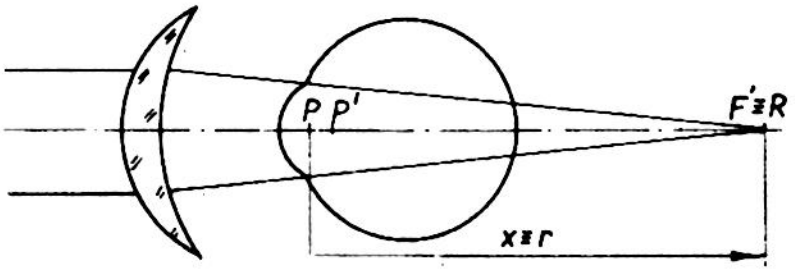
$$\varepsilon = - d^{*} \frac{X - R}{R + D}$$

platí zcela obecně, přičemž d^{*} značí průměr vstupní pupily a X vergenci vzhledem k oku (nikoliv vzhledem k soustavě oko - brýlové sklo).

Předpokládejme, že D_s značí přesnou hodnotu lámavosti korekčního brýlového skla. Potom platí

$$D_s = \frac{R}{1 + d R} .$$

Při správné korekci musí obraz dalekého předmětu padnout do vzdáleného bodu R oka a proto $x = r$, nebo $X = R$. Potom z předchozího vztahu plyne, že $\varepsilon = 0$. Jinak řečeno obraz dalekého bodu se vytvoří přímo na sítnici.

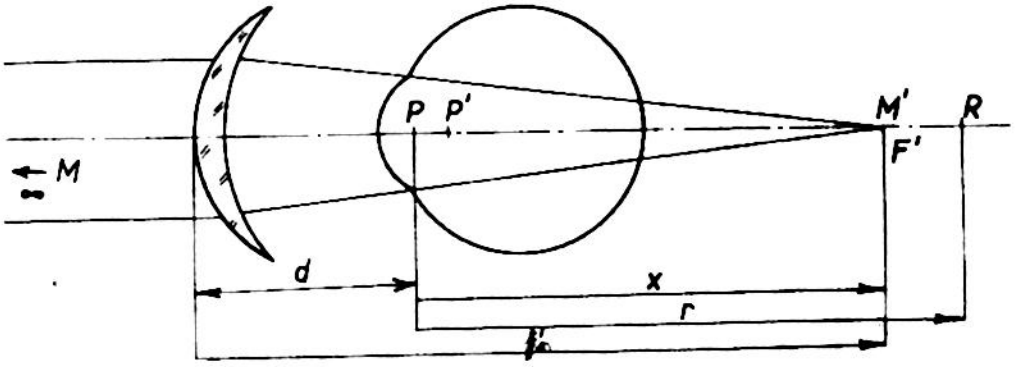


Obr. 8.5.1 K určení tolerance lámavosti brýlového korekčního skla

Předpokládejme nyní, že lámavost brýlového korekčního skla se liší od správné hodnoty D_s o malou hodnotu ΔD_s, takže jeho lámavost je $D_s + \Delta D_s$.

Nyní vergence X obrazu M' vytvořeného brýlovým sklem měřená vzhledem k nekorigovanému oku bude dána vztahem

$$X = \frac{1}{x} = \frac{1}{f'_s - d} = \frac{1}{\frac{1}{D_s + \Delta D_s} - d} = \frac{D_s + \Delta D_s}{1 - (D_s + \Delta D_s) d} .$$



Obr. 8.5.2 K určení tolerance korekčního brýlového skla

Pro ametropii R pak plyne dále podle (8.1.5)

$$R = \frac{D_s}{1 - d \cdot D_s} .$$

Tedy pro rozdíl X - R vychází

$$X - R \frac{D_s + \Delta D_s}{1 - (D_s + \Delta D_s)\, d} - \frac{D_s}{1 - d \cdot D_s} =$$

$$= \frac{(1 - d\, D_s)(D_s + \Delta D_s) - D_s \left[1 - (D_s + \Delta D_s)\, d\right]}{\left[1 - (D_s + \Delta D_s)\, d\right] \cdot (1 - d\, D_s)}$$

$$\frac{D_s - d\, D^2 + \Delta D_s - d\, D_s \cdot \Delta D_s - D_s + d\, D_s^2 + d \cdot \Delta D_s \cdot D_s}{(1 - d\, D_s)^2} = \frac{\Delta D_s}{(1 - d\, D_s)^2} ,$$

zanedbáme-li ve jmenovateli výraz $(\Delta D_s \cdot d)$ jako veličinu velmi malou.

Poznámka: Rozdíl X - R je možno chápat jako přírůstek R připadající na ΔD_s. Diferencováním R dostaneme $dR = \frac{\Delta D_s}{(1 - d\, D_s)^2}$. Dosadíme-li tuto hodnotu do vztahu pro ε, můžeme psát

$$\varepsilon = - d^2 \frac{\frac{\Delta D_s}{(1 - d.D_s)^2}}{\frac{D_s}{1 - d.D_s} + D} = - \frac{d \cdot \Delta D_s}{\left[(D_s + D\,(1 - d.D_s)\right] \cdot (1 - d.D_s)}$$

a odtud

$$\Delta D_s = - \frac{\varepsilon}{d} \left[D + D_s\,(1 - 2\, d\, D) + D_s^2\,(d^2 . D - d) \right] \qquad (8.5.1)$$

Připustíme-li, že rozptylový kroužek nebude viditelný, bude-li se jevit pod úhlem menším než 1 minuta, pak z (4.8.4) plyne pro jeho průměr v mikronech

$$\varepsilon = y' = 4{,}85\ \mu m$$

Potom ze vztahu (8.5.1) plyne pro $d = 4$ mm

$$|\Delta D_s| = \frac{4{,}85 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-3}} \left[60 + (1 - 2.1{,}36.10^{-2}.60) \cdot D_s + \right.$$

$$\left. + (1{,}36^2 \cdot 10^{-4} \cdot 60 - 1{,}36 \cdot 10^{-2}) \cdot D_s^2 \right] =$$

$$= 0{,}073 - 7{,}6 \cdot 10^{-4} D_s - 2{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot D_s^2 \ .$$

Pro $D_s = -10$ dioptrií odtud vychází

$$|\Delta D_s| = 0{,}073 - 7{,}6 \cdot 10^{-3} - 2{,}8 \cdot 10^{-4} = 0{,}08 \text{ dioptrie.}$$

Tato tolerance je příliš přísná.

Především úhlová velikost rozptylového kroužku $1'$ je zbytečně malá. Ukazuje se, že nejlepší emmetropické oko využije prakticky pouze hodnotu 90". Proto se doporučuje při tolerování brýlových skel do 5 až 10 dioptrií brát pro úhlovou velikost rozptylového kroužku hodnotu cca 110" a nad 10 dioptrií pouze 150", což vede k toleranci $\Delta D_s = 0{,}2$ dioptrie. Prakticky slabá korekční brýlová skla se tolerují do 0,125 dioptrií a ostatní do 0,25 dioptrií.

V případě, kdy $D_s = 0$, tj. v případě nekorigovaného oka, značí $\Delta D_s = \Delta X = 0{,}073$ dioptrie vzdálenost mezi vzdáleným bodem a bodem, který ještě vidí oko zřetelně bez akomodace. Pozoruje-li tedy nekorigované oko daleký bod, pak vidí zřetelně celý prostor od nekonečna až do vzdálenosti $x = \frac{1}{X} = \frac{1}{0{,}073} = 14$ m. Pozoruje-li oko bod ve vzdálenosti 5 m (kterému přísluší vergence 0,2 dioptrie), pak vidí zřetelně ještě body prostoru od vzdálenosti $\frac{1}{0{,}2 + 0{,}073} = 3{,}7$ m do vzdálenosti $\frac{1}{0{,}2 - 0{,}073} = 7{,}70$ m.

8.6) Velikost obrazu na sítnici oka korigovaného brýlovým sklem

Podle (4.8.1) můžeme psát pro velikost y' obrazu na sítnici oka korigovaného brýlovým sklem

$$y' = \frac{\omega}{\mathfrak{D}} \ ,$$

kde $\mathfrak{D} = D_s + D - d\, D_s\, D = D_s\,(1 - D\,d) + D = \frac{R}{1 + dR}\,(1 - d\,D) + D =$

$$= \frac{R + D}{1 + d\,R} \ ,$$

takže

$$y' = \omega \frac{1 + d\,R}{R + D} \,. \qquad (8.6.1)$$

Pro velikost obrazu y'_0 na sítnici emmetropického oka platí

$$y'_0 = \frac{\omega}{D} \,. \qquad (8.6.2)$$

Z (8.6.1) a (8.6.2) pak plyne

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{\omega \frac{1 + d\,R}{R + D}}{\frac{\omega}{D}} = \frac{1 + d\,R}{1 + \frac{R}{D}} \qquad (8.6.3)$$

Volíme-li $d = \frac{1}{D}$, pak $\frac{y'}{y'_0} = 1$, což je výsledek nalezený dříve, kdy byl řešen problém umístění korekčního brýlového skla v předmětovém ohnisku oka.

Ve skutečnosti $d < \frac{1}{D}$, takže dR bude absolutně vždy menší než $\frac{R}{D}$. To znamená, že v případě krátkozrakého oka $(R < 0)$ bude čítatel (8.6.3) větší, takže $y' > y'_0$. Tedy krátkozraký člověk bude vidět předmět větší a dalekozraký menší než člověk s emmetropickým okem.

Srovnáme-li vztah (8.6.3) se vztahem (7.5.2), který platí pro krátkozraké i dalekozraké oko, vidíme, že jejich poměr je

$$\frac{\frac{1 + dR}{1 + \frac{R}{D}}}{\frac{D}{R + D}} = 1 + dR \,.$$

Uvažujme např. krátkozraké oko s ametropií $R = -5$ dioptrií. Potom předchozí poměr nabude hodnoty (pro $d = 13{,}6$ mm)

$$1 + 0{,}0136\ (-5) = 1 - 0{,}068 = 0{,}932 \,.$$

Pozorujeme-li určitý předmět nekorigovaným okem s ametropií $R = -5$ dioptrií, pak podle (7.5.2) bude jeho obraz v porovnání s obrazem téhož předmětu vytvořeného na sítnici emmetropického oka větší v poměru

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{R}{R + D} = \frac{60}{55} = 1{,}09 \,,$$

zatím co při pozorování téhož předmětu tímtéž korigovaným ametropickým okem bude obraz zvětšen v porovnání s obrazem vytvořeným na sítnici emmetropického oka v poměru

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{1 + dR}{1 + \frac{R}{D}} = \frac{1 + 0{,}0136 \,.\, (-5)}{1 - \frac{5}{60}} = 1{,}02 \,.$$

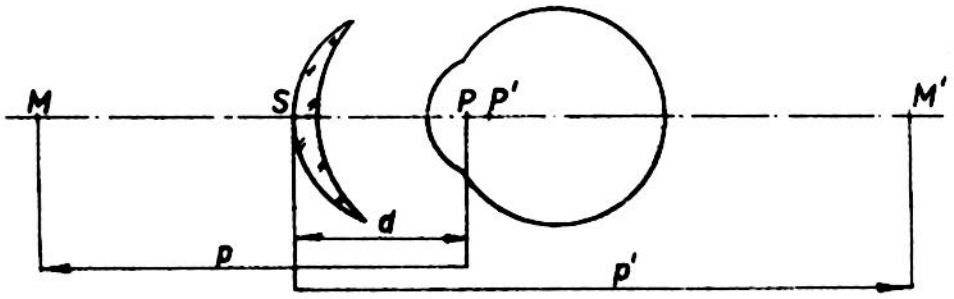
Je vidět, že při pozorování předmětu korigovaným okem bude obraz zmenšen 0,932 - krát v porovnání s obrazem téhož předmětu pozorovaného nekorigovaným ametropickým okem.

Závěrem je tedy možno říci: Krátkozraké (dalekozraké) korigované oko vidí předmět menší (větší) než totéž nekorigované ametropické oko.

8.7) Akomodace oka korigovaného brýlovým sklem

Předpokládejme, že člověk s ametropickým okem korigovaným brýlovým sklem pozoruje předmět ležící ve vzdálenosti p od předmětového hlavního bodu oka, tedy ve vzdálenosti p + d od vrcholu korekčního brýlového skla, jak je to naznačeno na obr. 8.7.1. Brýlové sklo zobrazí tento předmět do vzdálenosti p´, měřené od brýlového skla, pro kterou platí

$$\frac{1}{p'} = \frac{1}{p+d} + D_s$$



Obr. 8.7.1 K určení akomodace korigovaného ametropického oka.

nebo po úpravě

$$p' = \frac{p+d}{1+(p+d)\,.\,D_s}\,.$$

Vzdálenost tohoto obrazu M´ vzhledem k oku bude

$$p' - d = \frac{p - D_s\,(p+d)\,d}{1+(p+d).D_s}$$

a jeho vergence vzhledem k oku

$$X' = \frac{1+(p+d)\,D_s}{p - D_s(p+d)\,d} = \frac{1+(p+d)\,\frac{R}{1+dR}}{p - \frac{R}{1+dR}\,(p+d).d} = \frac{1+p.R+2R\,.\,d}{p - R\,d^2}$$

Kdyby uvažovaný člověk měl emmetropické oko, pak by jeho akomodace na daný předmět byla charakterisována hodnotou

$$A = -X = -\frac{1}{p} ,$$

zatím co korigované ametropické oko má akomodovat od vzdáleného bodu R do obrazu M´, tedy o hodnotu

$$A' = R - X' = \frac{(1 + dR)^2}{d^2 R - p} .$$

Tedy porovnáním obou akomodací dostáváme

$$\frac{A'}{A} = \frac{(1 + dR)^2}{1 - R X d^2} . \qquad (8.7.1)$$

Pro $d = 13{,}6$ mm vychází $d^2 = 1{,}85 . 10^{-4}$ m^2, takže jmenovatel předchozího vztahu se velmi blíží k jedné. Můžeme tedy psát

$$\frac{A'}{A} = (1 + dR)^2 .$$

Např. krátkozraké korigované oko se snaží akomodovat na určitý předmět méně než emmetropické oko a naopak dalekozraké oko více. Z předchozího vztahu plyne pro $R = -5$ dioptrií

$$\frac{A'}{A} = (1 - 0{,}0136 . 5)^2 = 0{,}87$$

a pro $R = +5$ dioptrií

$$\frac{A'}{A} = (1 + 0{,}0136 . 5)^2 = 1{,}14 .$$

Tyto výsledky potvrzují předchozí závěr.

Pokud se týče určení velikosti obrazu na sítnici akomodujícího korigovaného ametropického oka, je možno říci, že příslušné vztahy jsou poměrně složité a není také třeba, aby byly v rámci tohoto skripta odvozovány. Stačí uvést, že v případě oka s $R = -5$ dioptrií akomodujícího na předmět, ležící ve vzdálenosti 10 cm před okem, vychází $\frac{y'}{y_0} = 1{,}032$ (zatímco v případě vzdáleného předmětu vychází 1,017) a pro $R = +5$ dioptrií vychází $\frac{y'}{y_0} = 0{,}971$ (místo 0,986 v případě pozorování dalekého předmětu). Poměr obrazů vytvořených na sítnici korigovaného ametropického a nekorigovaného ametropického oka je opět jako v případě pozorování dalekých předmětů roven $1 + dR$.

8.8) Velikost obrazu na sítnici oka v případě ametropie křivostí.

Vztah (8.6.1) nalezený pro velikost obrazu vytvořeného na sítnici korigovaného rozměrově (osově) ametropického oka

$$y' = \omega \frac{1 + d\,R}{R + D} ,$$

platí i pro korigované oko s ametropií křivostí.

Pro emmetropické oko platí

$$y'_0 = \frac{\omega}{D_0} ,$$

kde v případě ametropie křivostí je

$$D_0 = R + D .$$

Vychází tedy

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{\omega \frac{1 + dR}{R + D}}{\frac{\omega}{R + D}} = 1 + dR .$$

Tedy krátkozraké oko bude vidět v tomto případě předměty menší a dalekozraké oko větší než oko emmetropické.

9) Kulová korekční brýlová skla

Pro výrobu brýlových skel se používá sklo. V 19.století byla v určité oblibě brýlová skla zhotovená z křemene, která se vyznačovala značnou tvrdostí, slabou disperzí a velkou tepelnou vodivostí, což bylo výhodné z hlediska srážení vodních par. Jejich nevýhodou byla vysoká cena a propustnost pro oko škodlivých ultrafialových paprsků.

Umělé hmoty - organické sklo-vylučují rozbití, jsou lehké, jsou však snadno mechanicky poškoditelné. Z toho důvodu se doposud používá pro výrobu brýlových skel ponejvíce korunového skla o indexu lomu $1{,}51 < n < 1{,}53$. Flintová skla a korunová skla o velkých indexech lomu umožňují zmenšení křivostí, což by bylo výhodné z hlediska ekonomie výroby, avšak tato výhoda je jen velmi nepatrná.

9.1) Označování brýlových skel

Od 17.století se nejdříve vyráběla bikonvexní nebo bikonkávní skla. Poloměry křivosti těchto skel se vyjadřovaly buď ve francouzských palcích (27,07 mm) nebo v anglických palcích (25,40 mm).

Volíme-li pro výrobu brýlových skel sklo o indexu lomu $n = 1{,}5$, pak ze vztahu pro lámavost tenké čočky

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

vychází pro $r_2 = - r_1$

$$D = \frac{1}{r_1} .$$

Protože francouzský palec je přibližně roven 1/37 metru a anglický palec 1/39 metru, je

$$D = \frac{37}{r_1} \qquad \text{resp.} \qquad D = \frac{39}{r_1} ,$$

kde D je vyjádřeno v dioptriích. Od roku 1875 se měří poloměry křivosti v metrické soustavě.

9.2) Vrcholová lámavost

V předchozích úvahách jsme se doposud zabývali skutečnou lámavostí D_s brýlových skel, která je dána vztahem

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta \cdot D_1 D_2 ,$$

kde

$$D_1 = \frac{n - 1}{r_1} \qquad \text{a} \qquad D_2 = \frac{(1 - n)}{r_2}$$

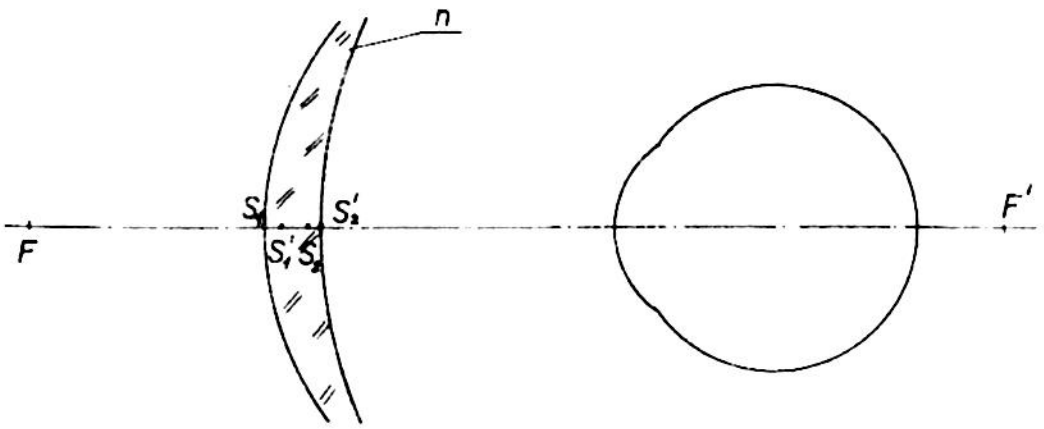
značí lámavosti přední a zadní plochy brýlového skla a $\delta = \frac{d}{n}$ tzv. redukovanou tloušťku, přičemž d značí skutečnou tloušťku měřenou na optické ose brýlového skla.

Je-li čočka tenká, pak používání lámavosti D_s je vyhovující, neboť u této čočky můžeme snadno určit polohu jejího obrazového ohniska F', které má splynout se vzdáleným bodem oka. Hlavní body této čočky prakticky splývají s čočkou.

Je-li však čočka tlustá, pak lámavost D_s nestačí k určení polohy obrazového ohniska, neboť poloha obrazového hlavního bodu není známa a je ji možno určit od případu k případu výpočtem. Tato skutečnost se projeví ještě více, když brýlové sklo nabude asymetrického tvaru - tvaru menisku.

Aby se tato podstatná nevýhoda odstranila, určuje se poloha obrazového ohniska F' vzhledem k vrcholu jedné z obou kulových ploch brýlového skla.

Uvažujme meniskové brýlové sklo, jehož poloha je s ohledem na potlačení astigmatismu šikmých svazků jednoznačně určena tak, že tato skla jsou vždy přivrácena dutou plochou k oku, jak je to naznačeno na obr. 9.2.1.



Obr. 9.2.1 Orientace meniskového brýlového skla vzhledem k oku

Nechť S_1 značí vrchol první a S_2' vrchol druhé kulové plochy tohoto meniskového brýlového skla a F resp. F' předmětové resp. obrazové ohnisko. Potom skutečná lámavost tohoto skla je dána vztahy

$$D_s = -\frac{1}{PF} \qquad \text{resp.} \qquad D_s = \frac{1}{P'F'},$$

kde P resp. P' značí hlavní body brýlového skla.

Zcela obdobně definujeme tzv. vrcholovou lámavost D_v.

$$D_v = \frac{1}{S_1F} \qquad \text{resp.} \qquad D_v' = \frac{1}{S_2'F'},$$

z nichž první se nazývá přední vrcholovou lámavostí a druhá zadní vrcholovou lámavostí. Častěji se používá zadní vrcholové lámavosti, které se pak jednoduše říká vrcholová lámavost.

9.3) Teorie vrcholové lámavosti

Podle předchozí definice jsme určili polohu předmětového ohniska vzhledem k vrcholu první plochy čočky a polohu obrazového ohniska vzhledem k vrcholu druhé plochy čočky. Přirozeně se nabízí otázka, proč béřeme různé počátky pro určení polohy obou ohnisek.

Ve skutečnosti můžeme nechat oba počátky, které označíme např. O resp. O', vzájemně splynout, ovšem za cenu zkomplikování příslušných vztahů.

Homografii bodů na přímce můžeme obecně vyjádřit vztahem

$$C_1 x x' + C_2 x + C_3 x' + C_4 = 0 .$$

Jsou-li počátky O resp. O', vzhledem ke kterým měříme polohu předmětových resp. obrazových bodů, sdružené body, pak předchozí vztah musí být splněn pro $x = 0$ a $x' = 0$. Z této podmínky vyplývá, že konstanta $C_4 = 0$, takže předchozí obecný vztah nabude v tomto zvláštním případě tvar

$$\frac{1}{x'} = -\frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{1}{x} - \frac{C_1}{C_2} . \qquad (9.3.1)$$

Vidíme, že v tomto zvláštním případě dostáváme lineární vztah mezi vergencemi $\frac{1}{x}$ a $\frac{1}{x'}$ obdobně, jak tomu je v případě klasických zobrazovacích rovnic. To je důvodem, proč se volí za počátky sdružené body.

V případě, že čočka je ponořena do vzduchu, můžeme volit dvě soustavy počátku vrcholových vzdáleností:

a) Za počátek O volíme vrchol S_1 první plochy a za počátek O' bod S_1', který je obrazem bodu S_1 vytvořený příslušným brýlovým sklem (obr. 9.2.1). Potom platí

$$\frac{1}{\overline{S_2'S_1'}} = \frac{n}{\overline{S_2'S_1}} + D_2 = \frac{n}{\overline{S_2'S_1}}$$

a odtud

$$\overline{S_1'S_2'} = \frac{d}{n} = \delta' .$$

Pro tyto přední počátky S_1 a S_1' definujeme dvě lámavosti $\frac{1}{\overline{S_1F}}$ a $\frac{1}{\overline{S_1'F'}}$, z nichž jedna se nazývá přední předmětová vrcholová lámavost a druhá přední obrazová vrcholová lámavost.

b) Za počátek O' volíme vrchol S_2' druhé plochy a za počátek O bod S_2, který je sdružený s bodem S_2'.

Platí tedy obdobně

$$\frac{1}{\overline{S_1S_2}} = \frac{n}{\overline{S_1S_2'}} - D_1 = \frac{n}{\overline{S_1S_2'}}$$

čili

$$\overline{S_1S_2} = \frac{d}{n} = \delta .$$

Protože $n = 1{,}5$ jsou prakticky úseky $\overline{S_1S_1'}$, $\overline{S_1'S_2}$, $\overline{S_2S_2'}$ stejné a rovné $\frac{d}{3}$.

Pomocí těchto zadních počátků S_2 , S_2' definujeme zadní předmětovou vrcholovou lámavost $\frac{1}{S_2F}$ a zadní obrazovou vrcholovou lámavost $\frac{1}{S_2'F'}$.

Z těchto čtyř vrcholových lámavostí jsou dvě vázány na přesně definované počátky, tj. vrcholy S_1 a S_2' přední a zadní plochy brýlového skla. Proto mluvíme o přední předmětové vrcholové lámavosti D_v a o zadní obrazové vrcholové lámavosti D_v' .

Ze zobrazovací rovnice (9.3.1) plyne, aplikujeme-li ji na "zadní" počátky S_2 a S_2' a volíme-li předmět v nekonečnu, tj. volíme-li $x = \infty$

$$\frac{1}{x'} = -\frac{C_1}{C_2} = D_v' \quad ,$$

neboť x' značí vlastně vzdálenost obrazového ohniska F' od počátku O' .

Můžeme tedy vztah (9.3.1) psát ve tvaru

$$\frac{1}{x'} = -\frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{1}{x} + D_v' \quad . \qquad (9.3.2)$$

Diferencováním odtud plyne

$$-\frac{dx'}{x'^2} = \frac{C_3}{C_2}\frac{dx}{x^2} \quad ,$$

takže pro osové zvětšení daného zobrazení plyne

$$\frac{dx'}{dx} = -\frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{x'^2}{x^2} \quad .$$

Z geometrické optiky je známo, že osové zvětšení soustavy ponořené do prostředí o indexu lomu $n = 1$ je rovno čtverci příčného zvětšení

$$\frac{dx'}{dx} = \left(\frac{y'}{y}\right)^2 \quad .$$

Položíme-li

$$-\frac{C_3}{C_2} = g'^2 \quad ,$$

můžeme psát

$$\frac{y'}{y} = g'\frac{x'}{x} \quad .$$

Význam "zadního vrcholového faktoru" g najdeme, když určíme jeho hodnotu příslušnou k počátkům O a O', které tvoří sdružený pár. Upravme nejdříve vztah (9.3.2) tak, že jej násobíme x', čímž dostaneme

$$1 = - \frac{C_3}{C_2} \cdot \frac{x'}{x} + D_v' \cdot x' \quad .$$

Blíží-li se x i x' k nule, plyne odtud, že

$$\frac{x'}{x} = - \frac{C_2}{C_3} = \frac{1}{g'^2} \quad .$$

To znamená, že v bodech O a O' nabývá zvětšení $\frac{y'}{y}$ hodnoty $\frac{1}{g'}$, Tedy faktor g' značí převratnou hodnotu příčného zvětšení v počátcích O a O'. Z geometrické optiky je známo, že v hlavních bodech, jsou-li tyto voleny za počátek, je $g' = 1$.

Můžeme tedy psát zobrazovací rovnice vztažené na libovolné počátky O a O', které ovšem tvoří sdružený pár, ve tvaru

$$\frac{1}{x'} = \frac{g'^2}{x} + D_v' \qquad (9.3.3)$$

$$\frac{y'}{y} = g' \frac{x'}{x} \quad , \qquad (9.3.4)$$

nebo dosadíme-li do (9.3.4) z (9.3.3)

$$\frac{y'}{y} = \frac{g'}{g'^2 + D_v' \cdot x} \qquad (9.3.5)$$

resp.

$$\frac{y'}{y} = \frac{1 - D_v' \cdot x'}{g'} \quad . \qquad (9.3.6)$$

Označíme-li vlastní lámavost uvažované soustavy D_s , pak podle (4.1.8) platí, vzhledem k tomu, že $n' = 1$

$$\frac{y'}{y} = 1 - D_s \cdot p' \quad .$$

Srovnáním této rovnice s (9.3.6) plyne

$$1 - D_v \cdot x' = g' - D_s \, p' \cdot g'$$

nebo

$$\frac{1}{p'} - \frac{D_v \, x'}{p'} = \frac{g'}{p'} - D_s \cdot g' \quad .$$

Blíží-li se předmět k ohnisku, pak v obou případech (tj. v případě zobrazovacích rovnic vztažených na hlavní body nebo na sdružené obecné počátky O a O') se blíží p' i x' k nekonečně velké hodnotě a obě vzdálenosti jsou prakticky stejně dlouhé. Proto z předchozího vztahu v tomto případě

plyne

$$D_v' = g' \cdot D_s \,. \qquad (9.3.7)$$

To znamená, že "zadní vrcholový faktor" g' je roven poměru vrcholové a skutečné lámavosti brýlového skla.

Podobně můžeme ukázat, že budeme-li volit "přední" počátky O_1 a O_1', že uvažované zobrazovací rovnice nabudou tvaru

$$\frac{g^2}{x'} = \frac{1}{x} + D_v \qquad (9.3.8)$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{1}{g}\,\frac{x'}{x} = \frac{g}{1 + D_v\, x} = \frac{g^2 - D_v \cdot x'}{g} \qquad (9.3.9)$$

a

$$D_v = g \cdot D_s \,. \qquad (9.3.10)$$

Přitom D_v značí "přední předmětovou vrcholovou lámavost" a "přední" faktor g značí nyní přímo příčné zvětšení v počátcích.

Zobrazovací rovnice (9.3.3) až (9.3.10) jsou zcela obecné a platí za předpokladu, že příslušné počátky jsou sdružené body. Nemusí tedy tyto počátky být totožné s vrcholy brýlového skla.

9.4) Různé tvary brýlových skel

Bod v nekonečnu je zobrazen první plochou čočky do obrazu, který leží ve vzdálenosti $\frac{n}{D_1}$ od vrcholu této plochy a ve vzdálenosti

$$p = \frac{n}{D_1} - d$$

od druhé plochy.

Druhá plocha přenese tento obraz do vzdálenosti p', pro kterou platí

$$\frac{1}{p'} = \frac{n}{p} + D_2 = \frac{n\, D_1}{n - d\, D_1} + D_2 = \frac{D_1}{1 - d\, D_1} + D_2 \,.$$

Přitom $\frac{1}{p'}$ je "zadní" vrcholová lámavost čočky. Můžeme tedy psát

$$D_v' = \frac{D_1}{1 - d\, D_1} + D_2 \,, \qquad (9.4.1)$$

nebo

$$D_v' = \frac{D_1 + D_2 - d\, D_1\, D_2}{1 - d\, D_1} = \frac{D_s}{1 - d\, D_1} \,.$$

Srovnáme-li tuto hodnotu s (9.3.7), vidíme, že

$$g' = \frac{1}{1 - D_1 \delta} .$$

Můžeme tedy rovnici (9.4.1) psát ve tvaru

$$D_v' = g' D_1 + D_2 \quad .$$

Podobně dostaneme pro přední vrcholovou lámavost D_v

$$D_v = D_1 + \frac{D_2}{1 - \delta D_2} = D_1 + g D_2 \quad , \qquad (9.4.2)$$

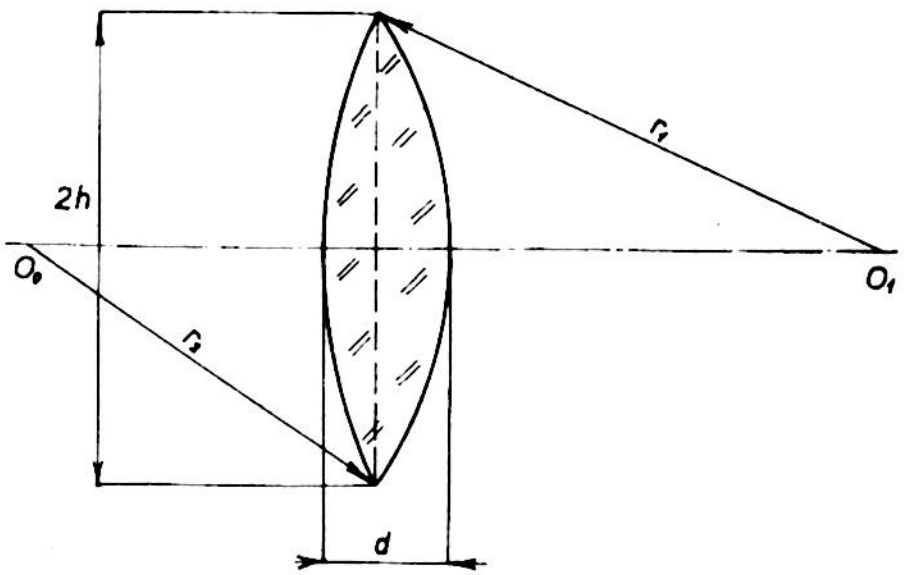
kde

$$g = \frac{1}{1 - \delta D_2} .$$

Abychom mohli vztahy (9.4.1) a (9.4.2) v praxi použít, musíme znát redukovanou tloušťku $\delta = \frac{d}{n}$.

Pro rozptylná brýlová skla se volí osová tloušťka d = 0,5 - 1,5 mm. Proto je u těchto skel redukovaná tloušťka δ prakticky zanedbatelná. Z toho důvodu platí

$$D_v = D_v' = D_s = D_1 + D_2 \quad . \qquad (9.4.3)$$



Obr. 9.4.1 K určení tloušťky d spojných brýlových skel.

Pro tloušťku d spojných brýlových skel plyne podle Rayleigh-o z obr. 9.4.1 za předpokladu nulové okrajové tloušťky

$$d = (r_1 - \sqrt{r_1^2 - h^2}) - (r_2 - \sqrt{r_2^2 - h^2}) = \frac{h^2}{2}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \pm$$

$$\pm \frac{h^2}{2} \cdot \frac{D_s}{n - 1} \quad . \tag{9.4.4}$$

V praksi je třeba tuto tloušťku ještě zvětšit o okrajovou tloušťku, tj. asi o 1 mm.

Všimněme si nyní tvaru brýlových skel: Původně se vyráběla skla bikonvexní nebo bikonkávní, později plankonvexní nebo plankonkávní a nyní se vyrábí výhradně skla menisková, která se umísťují, jak již bylo dříve uvedeno, dutou plochou k oku. Všimněme si proto blíže jednotlivých typů těchto brýlových skel.

a) Bikonvexní resp. bikonkávní brýlová skla

U těchto brýlových skel je $D_1 = D_2$. Z důvodů souměrnosti je $D_v = D_v'$. Je-li předepsáno D_v' , pak pro D_1 vychází z (9.4.1)

$$D_v' - D_1 D_v' \cdot \delta = D_1 + D_1 - D_1^2 \delta \quad \text{čili}$$

$$\delta D_1^2 - (2 + \delta D_v') D_1 + D_v' = 0 \quad .$$

Odtud pak

$$(D_1)_{1,2} = \frac{2 + \delta D_v'}{2\delta} \pm \sqrt{\left(\frac{2 + \delta D_v'}{2}\right)^2 - \frac{D_v'}{\delta}} =$$

$$= \frac{2 + \delta D_v'}{2\delta} \pm \frac{1}{\delta} \cdot \sqrt{1 + \frac{\delta^2 \cdot D_v'^2}{4}} \pm \frac{D_v'}{2} - \frac{\delta D_v'^2}{8} \quad ,$$

béřeme-li v úvahu z výrobních důvodů pouze řešení se znaménkem záporným.

Můžeme tedy psát jednoduše

$$D_1 = \frac{D_v'}{2} - \frac{\delta D_v'^2}{8} \quad . \tag{9.4.5}$$

b) Plankonvexní a plankonkávní brýlová skla

Tato brýlová skla se orientují rovinnou plochou k oku. To znamená, že $D_2 = 0$, takže z (9.4.1) plyne

$$D_1 = \frac{D_v'}{1 + D_v' \cdot \delta} \quad ,$$

nebo

$$D_v = D_s = D_1$$

c) Menisková brýlová skla

Tato skla se orientují, jak již bylo dříve uvedeno, dutou plochou k oku. Jejich zadní plocha, zvaná báse, má konstantní lámavost buď - 1,25 dioptrií (tj. poloměr křivosti $r = \frac{n-1}{D_2} = \frac{0,52}{-1,25} = -400$ mm) nebo - 3 a - 6 dioptrií (tj. poloměr křivosti - 174 mm a 86,7 mm). Brýlová skla s bází - 1,25 dioptrií se nazývají periskopická, zatím co skla s bází o lámavosti - 3 a - 6 dioptrií se nazývají menisková.

Je-li tedy dána lámavost D_2 druhé plochy, pak pro lámavost D_1 první plochy plyne z (9.4.1)

$$(1 - D_1 \delta)\, D_v' = D_1 + D_2 (1 - D_1 \delta) \quad \text{čili}$$

$$D_1 = \frac{D_v' - D_2}{1 + (D_v' - D_2) \cdot \delta}$$

nebo pro D_s ze vztahu

$$D_v' = \frac{D_s}{1 - \delta D_1}$$

$$D_s = \frac{D_v'}{1 + (D_v' - D_2) \cdot \delta} .$$

Příklady

1) Je třeba určit parametry bikonvexního brýlového skla tak, aby vrcholová lámavost skla byla $D_v' = + 5$ dioptr. Volme osovou tloušťku skla $d = 3$ mm a $n = 1,52$.

Postupně dostaneme

$$\delta = \frac{d}{n} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1,52} = 1,97 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_1 = \frac{D_v'}{2} - \frac{\delta D_v'^2}{8} = \frac{5}{2} - \frac{1,97 \cdot 5^2 \cdot 10^{-3}}{8} = 2,5 - 0,0061 = 2,494 \text{ dioptrií.}$$

$$D_2 = D_1 = 2,494 \text{ dioptrií}$$

$$g' = \frac{1}{1 - \delta D_1} = \frac{1}{1 - 1,97 \cdot 10^{-3} \cdot 2,49} = 1,005$$

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 = 4{,}98 \text{ dioptrií}$$

$$D_v = D_v' = 5 \text{ dioptrií}$$

$$D_n = D_1 + D_2 = 4{,}99 \text{ dioptrií.}$$

2) Určeme nyní parametry plankonvexního brýlového skla téže vrcholové lámavosti $D_v' = + 5$ dioptrií.

Obdobně jako v předchozím případě dostaneme postupně:

$$\delta = \frac{d}{n} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1{,}52} = 1{,}97 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_1 = \frac{D_v'}{1 + \delta D_v'} = \frac{5}{1 + 5 \cdot 1{,}97 \cdot 10^{-3}} = \frac{5}{1{,}009} = 4{,}95 \text{ dioptr.}$$

$$D_2 = 0$$

$$g' = \frac{1}{1 - \delta D_1} = \frac{1}{1 - 1{,}97 \cdot 10^{-3} \cdot 4{,}95} = \frac{1}{0{,}99} = 1{,}010$$

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 = D_1 = 4{,}95 \text{ dioptrií}$$

$$D_v = D_1 + g D_2 = D_1 = 4{,}95 \text{ dioptrií}$$

$$D_n = D_1 + D_2 = D_1 = 4{,}95 \text{ dioptrií}$$

3) Určeme parametry periskopického brýlového skla o téže vrcholové lámavosti $D_v' = + 5$ dioptrií.

Postupně dostaneme:

$$\delta = \frac{d}{n} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1{,}52} = 1{,}97 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_1 = \frac{D_v' - D_2}{1 + (D_v' - D_2)\delta} = \frac{5 + 1{,}25}{1 + (5 + 1{,}25) \cdot 1{,}97 \cdot 10^{-3}} = \frac{3{,}75}{1{,}0125} =$$

$$= + 6{,}17 \text{ dioptrií}$$

$$D_2 = - 1{,}25 \text{ dioptrií}$$

$$g' = \frac{1}{1 - \delta D_1} = \frac{1}{1 - 1{,}97 \cdot 10^{-3} \cdot 6{,}17} = \frac{1}{0{,}988} = 1{,}012$$

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 = 6{,}17 - 1{,}25 - 6{,}17 \cdot 1{,}25 \cdot 1{,}97 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 4{,}92 + 0{,}015 = 4{,}94 \text{ dioptrie}$$

$$D_v = \frac{D'_v}{1 + (D'_v - D_2)\delta} = \frac{5}{1 + (5 + 1{,}25)\ 1{,}97 \cdot 10^{-3}} = \frac{5}{1{,}0125} =$$

$$= + 4{,}92 \text{ dioptrií.}$$

$$D_n = D_1 + D_2 = 6{,}17 - 1{,}25 = 4{,}92 \text{ dioptrie.}$$

4) Určeme konečně parametry meniskového skla o téže vrcholové lámavosti $D'_v = + 5$ dioptrií.

Obdobně jako v předchozím případě dostaneme postupně:

$$\delta = \frac{d}{n} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{1{,}52} = 1{,}97 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_1 = \frac{D'_v - D_2}{1 + (D'_v - D_2)\delta} = \frac{5 + 6}{1 + (5 + 6)\ 1{,}97 \cdot 10^{-3}} = \frac{11}{1{,}022} = 10{,}8 \text{ dioptrií}$$

$$D_2 = - 6 \text{ dioptrií}$$

$$g' = \frac{1}{1 - \delta D_1} = \frac{1}{1 - 1{,}97 \cdot 10^{-3} \cdot 10{,}8} = \frac{1}{0{,}978} = 1{,}022$$

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 = 10{,}8 - 6 + 1{,}97 \cdot 10^{-3} \cdot 10{,}8 \cdot 6 = 4{,}8 +$$

$$+ 0{,}127 = 4{,}93 \text{ dioptrie}$$

$$D_v = \frac{D'_v}{1 + (D'_v - D_2)\delta} = \frac{5}{1 + (5 + 6) \cdot 1{,}97 \cdot 10^{-3}} = \frac{5}{1{,}022} = 4{,}87 \text{ dioptrií}$$

$$D_n = D_1 + D_2 = 10{,}8 - 6 = 4{,}80 \text{ dioptrie.}$$

5) Určeme parametry periskopického brýlového skla s vrcholovou lámavostí $D'_v = - 10$ dioptrií.

Volme osovou tloušťku tohoto skla $d = 1$ mm.

$$\delta = \frac{10^{-3}}{1{,}52} = 0{,}658 \cdot 10^{-3} \text{ m} .$$

δ je v tomto případě tak malé, že je můžeme v dalším výpočtu zanedbat. Potom tedy dostaneme

$$D_1 = \frac{D'_v - D_2}{1 + (D'_v - D_2)\delta} = D'_v - D_2 = - 10 + 1{,}25 = - 8{,}75 \text{ dioptr.}$$

$D_2 = -1{,}25$ dioptrií

$$g' = \frac{1}{1 - \delta D_1} = 1$$

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta D_1 \cdot D_2 = D_1 + D_2 = -8{,}75 - 1{,}25 = -10 \text{ dioptr.}$$

$$D_v = \frac{D_v'}{1 + (D_v' - D_2)\delta} = -D_v' = -10 \text{ dioptrií}$$

$$D_n = D_1 + D_2 = -8{,}75 - 1{,}25 = -10 \text{ dioptrií.}$$

6) Určeme parametry meniskového brýlového skla téže vrcholové lámavosti $D_v' = -10$ dioptrií.

Podobně jako v předchozím případě dostaneme postupně:

$$\delta = \frac{d}{n} = \frac{10^{-3}}{1{,}52} = 0{,}658 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

$$D_1 = \frac{D_v' - D_2}{1 + (D_v' - D_2)\delta} = D_v' - D_2 = -10 + 6 = -4 \text{ dioptrie}$$

$D_2 = -6$ dioptrií

$$g' = \frac{1}{1 - \delta D_1} = 1$$

$$D_s = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 = D_1 + D_2 = -4 - 6 = -10 \text{ dioptrií}$$

$$D_v = \frac{D_v'}{1 + (D_v' - D_2)\delta} = D_v' = -10 \text{ dioptrií}$$

$$D_n = D_1 + D_2 = -4 - 6 = -10 \text{ dioptrií.}$$

Z předchozích příkladů je vidět, že jednotlivé lámavosti D_s a D_v' se podstatně u jednotlivých druhů skel vzájemně liší a že tyto rozdíly přesahují u větších lámavostí tolerovatelné hodnoty.

9.5) Jednoduchý výpočet vrcholové lámavosti brýlových skel

Podle dřívějšího je možno určit vrcholovou lámavost brýlového skla podle vztahu (9.4.1):

$$D_v' = \frac{D_1}{1 - \delta D_1} + D_2 .$$

Z tohoto vztahu je patrno, že vrcholová lámavost D_v' brýlového skla je v podstatě rovna algebraickému součtu lámavostí D_1 a D_2 přední a zadní plochy, přičemž lámavost přední plochy je korigována faktorem

$$\frac{1}{1 - \delta D_1} .$$

Pro rychlejší a snadnější vyčíslování vztahu (9.4.1) je možno převést tento vztah na vhodnější tvar

$$1 - \frac{d}{n} D_1 = \frac{D_1}{D_v' - D_2}$$

nebo

$$1 - \delta D_1 = \frac{D_1}{D_v' - D_2} .$$

Výraz $D_v' - D_2$ představuje vlastně lámavost přední plochy tenké čočky, takže můžeme psát

$$D_v' - D_2 = \frac{n - 1}{r_1^*} ,$$

kde r_1^* značí poloměr křivosti první plochy tenké čočky.

Můžeme tedy psát

$$1 - \frac{d}{n} \cdot \frac{n - 1}{r_1} = \frac{\frac{n - 1}{r_1}}{\frac{n - 1}{r_1^*}} \qquad \text{čili}$$

$$r_1 = r_1^* + \frac{n - 1}{n} \cdot d . \qquad (9.5.1)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že poloměr zakřivení r_1 první plochy brýlového skla je roven poloměru křivosti r_1^* první plochy tenké čočky zvětšenému o tloušťku skla d korigovanou faktorem $\frac{n - 1}{n}$.

Při výpočtu postupujeme pak tak, že nejdříve určíme poloměry křivosti přední a zadní plochy tenkého brýlového skla. K tomu s výhodou využijeme tab. 9.5.1, která obsahuje poloměry zakřivení r_1^* pro lámavosti D_1 od 0,00 do 39,75 dioptrií pro $n = 1{,}523$.

Hodnotu r_1^* takto nalezenou opravíme o hodnotu $\frac{n - 1}{n} \cdot d$, kterou vyhledáme v tab. 9.5.2, která obsahuje tyto hodnoty pro tloušťky d v rozsahu od 0,00 mm do 14,9 mm.

Příklad:

1) Mají se určit parametry meniskového brýlového skla o vrcholové lámavosti $D'_v = + 3{,}75$ dioptrií a tloušťce $d = 3{,}6$ mm.

Při stanovení parametrů tohoto skla postupujeme takto:

Báse meniskového skla je dána lámavostí druhé plochy $D_2 = - 6$ dioptrií. Z tab. 9.5.1 plyne $r_2 = - 87{,}17$ mm. Lámavost přední plochy tenkého brýlového skla je

$$D'_v - D_2 = 3{,}75 - (-6) = + 9{,}75 \text{ dioptrií.}$$

Z tab. 9.5.1 plyne k této hodnotě $r_1^* = 53{,}64$ mm.
Z tab. 9.5.2 dostáváme pro tloušťku $d = 3{,}6$ mm korekci $\frac{n-1}{n} \cdot d = 1{,}24$ mm.
Tedy pro poloměr křivosti první plochy r_1 plyne

$$r_1 = r_1^* + 1{,}24 = 53{,}64 + 1{,}24 = 54{,}88 \text{ mm.}$$

2) Mají se určit parametry meniskového brýlového skla o vrcholové lámavosti $D'_v = - 2{,}5$ dioptrie a tloušťce $d = 0{,}8$ mm.

Z tab. 9.5.1 plyne pro poloměr druhé plochy $r_2 = - 87{,}17$ mm.

Lámavost přední plochy tenkého brýlového skla je

$$D'_v - D_2 = - 2{,}5 - (-6) = + 3{,}5 \text{ dioptrií.}$$

Z tab. 9.5.1 najdeme k této hodnotě poloměr $r_1^* = 149{,}43$ mm.
Z tab. 9.5.2 dostaneme pro tloušťku $d = 0{,}8$ mm korekci $\frac{n-1}{n} d = 0{,}27$ mm, takže

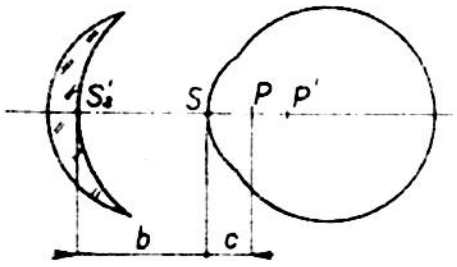
$$r_1 = r_1^* + 0{,}27 = 149{,}43 + 0{,}27 = 149{,}70 \text{ mm.}$$

9.6) Změna vrcholové lámavosti vyvolaná změnou vzdálenosti brýlového skla od oka.

Základní rovnicí (8.1.4) pro korekci oka můžeme psát ve tvaru

$$D'_v = \frac{R}{1 + R(b + c)} , \qquad (9.6.1)$$

kde podle obr. 9.6.1 značí b vzdálenost vrcholu druhé plochy brýlového skla od vrcholu rohovky a c vzdálenost vrcholu rohovky od předmětového hlavního bodu oka.



Obr. 9.6.1 K určení lámavosti D'_v vyvolané změnou vzdálenosti b.

Změní-li se vzdálenost b, změní se i lámavost D'_v. Nechť D'_{v1} resp. D'_{v2} značí vrcholové lámavosti příslušné ke vzdálenostem b_1 resp. b_2. Můžeme

Tab. 9.5.1

R v dioptriích	r v mm			
	0,0	0,25	0,50	0,75
0		2092,00	1046,00	697,33
1	523,00	418,40	348,67	298,86
2	261,50	232,44	209,20	190,18
3	174,33	160,92	149,43	139,47
4	130,75	123,06	116,22	110,11
5	104,60	99,62	95,09	90,96
6	87,17	83,68	80,46	77,48
7	74,71	72,14	69,73	67,48
8	65,38	63,39	61,53	59,77
9	58,11	56,54	55,05	53,64
10	52,30	51,02	49,81	48,65
11	47,55	46,49	45,48	44,51
12	43,58	42,69	41,84	41,02
13	40,23	39,47	38,74	38,04
14	37,36	36,70	36,07	35,46
15	34,87	34,30	33,74	33,21
16	32,69	32,18	31,70	31,22
17	30,76	30,32	29,89	29,46
18	29,06	28,66	28,27	27,89
19	27,53	27,17	26,82	26,48
20	26,15	25,83	25,51	25,20
21	24,90	24,61	24,33	24,05
22	23,77	23,51	23,24	22,99
23	22,74	22,49	22,26	22,02
24	21,79	21,57	21,35	21,13
25	20,92	20,71	20,51	20,31
26	20,12	19,92	19,74	19,55
27	19,37	19,19	19,02	18,85
28	18,68	18,51	18,35	18,19
29	18,03	17,88	17,73	17,58
30	17,43	17,29	17,15	17,01
31	16,87	16,74	16,60	16,47
32	16,34	16,22	16,09	15,97
33	15,85	15,73	15,61	15,50
34	15,38	15,27	15,16	15,05
35	14,94	14,84	14,73	14,63
36	14,53	14,43	14,33	14,23
37	14,14	14,04	13,95	13,85
38	13,76	13,67	13,58	13,50
39	13,41	13,32	13,24	13,16

Tab. 9.5.2

d	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,00	0,03	0,07	0,10	0,14	0,17	0,21	0,24	0,27	0,31
1	0,34	0,38	0,41	0,45	0,48	0,52	0,55	0,58	0,62	0,65
2	0,69	0,72	0,76	0,79	0,82	0,86	0,89	0,93	0,96	1,00
3	1,03	1,06	1,10	1,13	1,17	1,20	1,24	1,27	1,30	1,34
4	1,37	1,41	1,44	1,48	1,51	1,55	1,58	1,61	1,65	1,68
5	1,72	1,75	1,79	1,82	1,85	1,89	1,92	1,96	1,99	2,03
6	2,06	2,09	2,13	2,16	2,20	2,23	2,27	2,30	2,34	2,37
7	2,40	2,44	2,47	2,51	2,54	2,58	2,61	2,64	2,68	2,71
8	2,75	2,78	2,82	2,85	2,88	2,92	2,95	2,99	3,02	3,06
9	3,09	3,13	3,16	3,19	3,23	3,26	3,30	3,33	3,37	3,40
10	3,43	3,47	3,50	3,54	3,57	3,61	3,64	3,67	3,71	3,74
11	3,78	3,81	3,85	3,88	3,91	3,95	3,98	4,02	4,05	4,09
12	4,12	4,16	4,19	4,22	4,26	4,29	4,33	4,36	4,40	4,43
13	4,46	4,50	4,53	4,57	4,60	4,64	4,67	4,70	4,74	4,77
14	4,81	4,84	4,88	4,91	4,95	4,98	5,01	5,05	5,08	5,12

tedy psát

$$D'_{v1} = \frac{R}{1 + R(b_1 + c)}$$

$$D'_{v2} = \frac{R}{1 + R(b_2 + c)} .$$

Odtud pak plyne

$$R = \frac{D'_{v1}}{1 - D'_{v1}(b_1 + c)} = \frac{D'_{v2}}{1 - D'_{v2}(b_2 + c)} .$$

A odtud dále

$$D'_{v2} = \frac{D'_{v1}}{1 + D'_{v1}(b_2 - b_1)} . \qquad (9.6.2)$$

Z tohoto vztahu můžeme určit lámavost D'_{v2}, kterou bude mít sklo o lámavosti D'_{v1}, změní-li se jeho vzdálenost z b_1 na b_2.

9.7) Spojení dvou brýlových skel

Uvažujme dvě brýlová skla o vrcholových lámavostech D'_{v1} a D'_{v2}. Z předchozích úvah vyplývá, že první čočka zobrazí bod v nekonečnu do vzdálenosti $\frac{1}{D'_{v1}}$ za vrcholem druhé plochy, tj. ve vzdálenosti

$$x = \frac{1}{D'_{v1}} - \xi = \frac{1 - \xi D'_{v1}}{D'_{v1}}$$

od předmětového počátku druhé plochy. Přitom ξ značí vzdálenost obrazového počátku první čočky (tj. vrcholu druhé plochy první čočky) od předmětového počátku druhé čočky.

Druhá čočka přenese tento obraz do vzdálenosti x' od vrcholu druhé plochy druhé čočky, pro kterou platí podle (9.3.3)

$$\frac{1}{x'} = \frac{g'^2_2}{x} + D'_{v2} = \frac{g'^2_2 \cdot D'_{v1}}{1 - \xi D'_{v1}} + D'_{v2} \quad .$$

Protože jsme zvolili za obrazový počátek druhé čočky vrchol její druhé plochy, značí $\frac{1}{x'}$ vrcholovou lámavost D'_v soustavy tvořené uvažovanými dvěma brýlovými skly, takže můžeme psát

$$D'_v = \frac{g'^2_2 \cdot D'_{v1}}{1 - \xi D'_{v1}} + D'_{v2} \quad . \tag{9.7.1}$$

Lze dokázat[x], že pro zadní vrcholový faktor g' této soustavy lze psát

$$g' = \frac{g'_1 g'_2}{1 - \xi D'_{v1}} \quad . \tag{9.7.2}$$

Vzdálenost ξ je prakticky rovna vzduchové vzdálenosti obou čoček zvětšené o $g'_2 d_2$, tj. přibližně o 2/3 tloušťky druhé čočky.

---

x) Le Grand, Y., Optique physiologique, I, 350, ovič. 22, Paříž, 1952

10) Presbytie, aphakie a amblyopie

10.1) Presbytie - stárnutí oka

Všimněme si nejdříve stárnutí ametropického korigovaného oka.

Z předchozích úvah vyplývá, že ametropické oko, korigované brýlovým sklem pro vidění na dálku, nemá tutéž akomodační amplitudu jako emmetropické oko.

Určeme proto akomodační amplitudu korigovaného ametropického oka. Vztah (8.7.1) udává poměr akomodace A' korigovaného ametropického oka na bod ležící v určité vzdálenosti p k akomodaci A emmetropického oka akomodujícího na tentýž předmět. Pro tento poměr vychází

$$\frac{A'}{A} = \frac{(1 + \delta R)^2}{1 - R X \delta} \quad .$$

Při určování akomodační amplitudy tj. maximální akomodace A_m, které je schopno korigované ametropické oko, vyjdeme z předchozího vztahu, kde za X budeme klást $-A$. Tím dostaneme

$$\frac{A'}{A} = \frac{(1 + \delta . R)^2}{1 + R A \delta} \quad .$$

Řešme tento vztah podle A a dostaneme

$$A' + R A A' \delta = A(1 + \delta R)^2 \quad \text{čili}$$

$$A = \frac{A'}{(1 + \delta R)^2 - R A' \delta^2} \quad .$$

Podle (7.3.5) může ametropické nekorigované oko akomodovat maximálně o hodnotu

$$A_m = A_o \left[1 - k (2RD + R^2)\right] .$$

Položme proto v předchozím výraze za A' maximální možnou hodnotu A_m a dostaneme hodnotu A_{mk} maximální akomodace, které je schopno ametropické korigované oko

$$A_{mk} = \frac{A_o \left[1 - k (2RD + R^2)\right]}{(1 + \delta R)^2 - R \delta^2 A_o \left[1 - k(2RD + R^2)\right]} \quad .$$

Protože faktor $k \delta^2$ je zanedbatelně malý, můžeme psát jednoduše

$$A_{mk} = \frac{A_o \left[1 - k(2RD + R^2)\right]}{(1 + \delta R)^2 - R \delta^2 . A_o} \quad . \qquad (10.1.1)$$

Jak je známo z dřívějších úvah, mění se amplituda A_o emmetropického oka podle vztahu (5.2.1)

$$A_o = 12,5 - 0,2\ N\ .$$

Oko se považuje za stařecké, když jeho akomodační amplituda A_o klesne na 4 dioptrie. Podle předchozího vztahu této hodnoty dosáhne emmetropické oko ve věku N, pro který vychází

$$N = \frac{12,5 - A_o}{0,2} = \frac{12,5 - 4}{0,2} = 42,5 \text{ roků.}$$

Pro věk N, ve kterém se stává ametropické korigované oko stařeckým, vychází z (10.1.1), dosadíme-li sem za $k = 3.10^{-5}$, $D = 60$ dioptr. a $d = 13,6$ mm a předpokládáme-li, že oko se stane stařeckým, když $A_{mk} = 4$ dioptrie:

$$4 = \frac{(12,5 - 0,2\ N)\ [1 - 3.10^{-5}\ (2.60\ R + R^2)]}{(1 + 1,36.10^{-2}\ R) - 1,36^2.10^{-4}.\ R(12,5 - 0,2N)}$$

a odtud

$$N = 42,5 - 0,70\ R - 5,5\ .\ 10^{-3}\ R^2\ . \qquad (10.1.2)$$

Z tohoto vztahu vychází pro ametropické oko s ametropií $R = -10$ dioptrií

$$N = 42,5 + 7 - 5,5\ .\ 10^{-1} \doteq 49 \text{ roků}$$

a v případě $R = +5$ dioptrií

$$N = 42,5 - 3,5 - 5,5\ .\ 25.10^{-3} = 39 \text{ roků}\ .$$

10.1.1) Korekce oka pro vidění na blízko

Tuto korekci je možno provést trojím způsobem:

a) Brýle pro vidění na dálku se zamění za brýle pro vidění na blízko.
b) Brýle pro vidění na dálku se doplní skly, které upraví brýle pro vidění na blízko.
c) Zkonstruují se brýle bifokální, jejichž dolní polovina slouží pro pozorování na blízko a horní polovina pro pozorování na dálku.

a) Zvláštní brýle pro pozorování na blízko.

Nechť D_p' značí vrcholovou lámavost brýlí pro pozorování na blízko. Jejich úkolem je zobrazit blízký bod oka do pracovní vzdálenosti (cca 25 cm) před korigované oko.

Předpokládejme, že předmět se nachází obecně ve vzdálenosti x před brýlovým sklem. Jeho obraz leží pak ve vzdálenosti x', pro kterou platí podle (9.3.3)

$$\frac{1}{x'} = \frac{g_p'^2}{x} + D_p' \quad ,$$

kde g_p' značí "zadní vrcholový faktor" brýlového skla pro vidění na blízko.

Má-li být tento obraz okem dobře viditelný, musí padnout do jeho blízkého oka, jehož vergence P je

$$P = R - A_m \, .$$

Tedy $x' = b + c + \frac{1}{p} = \frac{P(b + c) + 1}{P}$.

Můžeme tedy psát

$$D_p' = \frac{1}{x'} - \frac{g_p'^2}{x} = \frac{P}{P(b + c) + 1} - \frac{g_p'^2}{x} = D_t' - g_p'^2 X \, ,$$

kde D_t' značí lámavost teoretického brýlového skla, které koriguje na dálku fiktivní ametropické oko o ametropii P .

Volíme-li pracovní vzdálenost 25 cm, tj. X = - 4 dioptrie, pak předchozí vztah je možno psát ve tvaru

$$D_p' = D_t' + 4 \, g_p'^2 \qquad (10.1.1.1)$$

Např. pro b = 12 mm, c = 1,6 mm a A_m = 2 dioptrie dostaneme pomocí tab. 8.1.1 pro ametropické oko s ametropií R = 0 , + 6 a - 6 dioptr.:

1) R = 0 dioptrií

D_v' = 0 dioptrií

D_t' podle tab. 8.1.1 pro $P = R - A_m = 0 - 2 = - 2$ dioptrie je rovno - 2,05 dioptrie. Protože $g'^2 \doteq 1$, plyne pro lámavost D_p' korekčního brýlového skla na blízko

$$D_p' = D_t' + 4 = - 2 + 4 = + 2 \text{ dioptrie.}$$

Faktor g_p' určíme ze vztahu

$$g_p' = \frac{1}{1 - \delta D_1} \, ,$$

kde $\delta = \frac{1,5}{n}$ = 1 mm. Pro D_1 vychází při bázi D_2 = - 6 dioptrií

$$D_1 = \frac{D_p' - D_2}{1 + (D_p' - D_2) \cdot \delta'} = \frac{+ 2 + 6}{1 + 8.10^{-3}} = \frac{8}{1,008} = 7,92 \text{ dioptrie},$$

takže

$$g_p' = \frac{1}{1 - 7,92 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{0,992} = 1,008$$

čili $g_p'^2 = 1,016 \doteq 1$.

2) R = + 6 dioptrií

Pro D_v' podle tab. 8.1.1 vychází pro R = + 6 dioptrií hodnota 5,56 dioptrií

$P = R - A_m = + 6 - 2 = + 4$ dioptrie, takže podle tab. 8.1.1 vychází $D_t' = 3,8$ dioptrie.

Pro $g_p' = 1$ vychází předběžně

$$D_p' = D_t' + 4\, g_p' = 3,8 + 4 = 7,8 \text{ dioptrií.}$$

Při bási $D_2 = - 6$ dioptrií a tloušťce d = 4,5 mm, tj. $\delta' = \frac{4,5}{1,5} = 3$ mm dostáváme dále

$$D_1 = \frac{D_p' - D_2}{1 + (D_p' - D_2) \cdot \delta'} = \frac{7,8 + 6}{1 + 13,8 \cdot 3.10^{-3}} = \frac{13,8}{1,04} = 13,3 \text{ dioptrií},$$

takže

$$g_p' = \frac{1}{1 - 13,3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{0,96} = 1,04$$

$$g_p'^2 = 1,04^2 = 1,08 .$$

Tedy konečně

$$D_p' = 3,8 + 4.1,08 = 3,8 + 4,32 = + 8,12 \text{ dioptrií.}$$

3) R = - 6 dioptrií

Pro R = - 6 dioptrií vychází z tab. 8.1.1

$D_v' = - 6,52$ dioptrie.

$P = R - A_m = - 6 - 2 = - 8$ dioptrie, takže z tab. 8.1.1 plyne pro $D_t' = - 8,96$ dioptrií. Při tloušťce d = 1 mm, je $g_p' = 1$, takže

$$D_p' = D_t' + 4 = - 8,96 + 4 = - 4,96 \text{ dioptrií.}$$

Při návrhu brýlových skel na blízko se prakticky nikdy nepředpokládá $A_m = 0$, nýbrž se předpokládá $A_m \neq 0$ a brýlové sklo se určí tak, aby oko mohlo ještě v mezích svých schopností, tj. v mezích zbytkové akomodace, mírně akomodovat.

b) Doplňkové brýlové sklo umožňující spolu s brýlovým sklem na dálku vidění na blízko

Při tomto řešení problému vidění na blízko si člověk s ametropickým okem ponechává před očima své brýle pro vidění na dálku a umísťuje před nimi doplňková brýlová skla pro případ pozorování na blízko.

Nechť D_d' značí vrcholovou lámavost tohoto doplňkového brýlového skla. Vzhledem k tomu, že D_d' bývá poměrně malé a protože také vzdálenost ξ je malá, takže vztah (9.7.1) pro lámavost soustavy D_p', tvořené oběma brýlovými skly, se redukuje na

$$D_p' = g_v' \cdot D_d' + D_v' ,$$

kde faktor g_v' skla pro vidění na dálku se mnoho neliší od jedné.

c) Bifokální brýlová skla

Jak již bylo dříve uvedeno, problém vidění na blízko se řeší prakticky tak, že se plocha brýlového skla rozdělí na dvě části o různých vrcholových lámavostech D_v' a D_p'. Korekce se nazývá úplnou, když blízký bod oka P je zobrazen brýlovým sklem pro vidění na dálku nejméně tak blízko jako obraz vzdáleného bodu R vytvořený brýlovým sklem na blízko, tak, aby mezi nimi nebyl mrtvý meziprostor.

Předpokládejme, že tyto obrazy splývají ve vzdálenosti x před brýlovým sklem. Potom platí podle předchozího pro sklo pro vidění na dálku

$$\frac{g_v'^2}{x} = D_t' - D_v' ,$$

kde opět D_t' značí lámavost

$$\frac{P}{1 + P(b + c)} .$$

Podobně můžeme psát pro sklo pro vidění na blízko

$$\frac{g_p'^2}{x} = D_v' - D_p' .$$

Srovnáním obou rovnic plyne

$$\frac{D_t' - D_v'}{g_v'^2} = \frac{D_v' - D_p'}{g_p'^2}$$

a odtud

$$D'_p = D'_v + \frac{g'^2_p}{g'^2_v}(D'_v - D'_t) \quad . \qquad (10.1.1.2)$$

Pokud se týče souřadnice x_1 blízkého bodu zobrazeného brýlovým sklem na blízko, platí

$$\frac{g'^2_p}{x_1} = D'_t - D'_p = D'_t - D'_v - \frac{g'^2_p}{g'^2_t}(D'_v - D'_t)$$

čili

$$\frac{g'^2_p}{x_1} = (D'_t - D'_v) \cdot \left(1 + \frac{g'^2_p}{g'^2_v}\right) \quad .$$

Korekce bude vyhovující, jestliže x_1 bude rovno pracovní vzdálenosti nebo jestliže bude menší. Předpokládejme, že pracovní vzdálenost je rovna 25 cm měřeno od oka, tj. 23,5 cm měřeno od brýlového skla, což značí, že

$$-\frac{1}{x_1} \geqslant 4{,}26 \text{ dioptrií} \quad .$$

Dosadíme-li sem z předchozího vztahu, dostaneme

$$-(D'_t - D'_v)\,\frac{g'^2_v + g'^2_p}{g'^2_p \cdot g'^2_v} \geqslant 4{,}26 \text{ dioptrií}$$

a odtud

$$(D'_v - D'_t) \geqslant 4{,}26\,\frac{g'^2_v \cdot g'^2_p}{g'^2_v + g'^2_p} \quad . \qquad (10.1.1.3)$$

Naopak, tato korekce bude zbytečná, jestliže blízký bod oka bude zobrazen brýlovým sklem na dálku dostatečně blízko. Proto musí být splněna další podmínka

$$(D'_v - D'_t) \leqslant 4{,}26 \cdot g'^2_v \quad . \qquad (10.1.1.4)$$

Jestliže stanovíme smluvní pracovní vzdálenost na 33 cm místo 25 cm, pak je nutno v rovnicích (10.1.1.3) a (10.1.1.4) klást místo 4,26 pouze 3,30. Vztahy (10.1.1.2) až (10.1.1.4) se zjednoduší, jestliže béřeme za faktory g'_p , g'_v hodnoty 1. Tak dostaneme

$$\left.\begin{aligned} D'_p &= 2\,D'_v - D'_t \\ (D'_v - D'_t) &\geqslant 2{,}13 \\ (D'_v - D'_t) &\leqslant 4{,}26 \end{aligned}\right\} \qquad (10.1.1.4)$$

Na obr. 10.1.1.1 je znázorněna závislost akomodační amplitudy A_m na ametropii R , potřebné k tomu, aby byly splněny poslední dvě podmínky (10.1.1.4). Tento graf byl sestrojen takto:

1212-5083

Uvažujme např. oko s ametropií $R = + 10$ dioptrií. Podle tab. 8.1.1 odpovídá této hodnotě lámavost D_v' brýlového skla na dálku $D_v' = + 8,82$ dioptrie. Podle druhé podmínky (10.1.1.4) vychází pro lámavost D_t'

$$D_t' = + 8,82 - 2,13 = + 6,69 \text{ dioptrií.}$$

Z tab. 8.1.1 najdeme k této hodnotě hodnotu $R = P = + 7,32$ dioptr.

Potom podle dřívějšího

$$A_m = R - P = + 10 - 7,32 = + 2,68 \text{ dioptrie.}$$

Podobně z třetí podmínky (10.1.1.4) plyne obdobně

$$D_t' = 8,82 - 4,26 = 4,56 \text{ dioptrií}$$

a z tab. 8.1.1 k této hodnotě najdeme

$$P = + 4,84 .$$

Tedy

$$A_m = R - P = + 10 - 4,84 = 5,16 \text{ dioptrií.}$$

Tím jsme získali po 1 bodu křivek určující potřebnou akomodaci A_m, aby byla splněna druhá a třetí podmínka (10.1.1.4).

Podobně uvažujme nyní oko s ametropií $R = - 10$ dioptrií. Stejným postupem jako v předcházejícím případě dostáváme postupně:

$R = - 10$ dioptrií
$D_v' = - 11,54$ dioptrií
$D_t' = - 11,54 - 2,13 = - 13,67$ dioptrií
$P = - 11,54$ dioptrií
$A_m = R - P = - 10 + 11,54 = 1,54$ dioptrie

Podobně pro třetí podmínku (10.1.1.4) plyne

$D_t' = - 11,54 - 4,26 = - 15,80$ dioptrií
$P = - 13,05$ dioptrií
$A_m = R - P = - 10 + 13,05 = + 3,05$ dioptrie.

Tím jsme získali po dalším jednom bodě zmíněných křivek.

Tyto křivky jsou na obr. 10.1.1.1 plně vytaženy. Na tomto obrázku jsou ještě vyznačeny tečkovaně křivky, které získáme stejným způsobem, volíme-li pracovní vzdálenost místo 25 cm 33 cm.

Jak je z tohoto grafu patrno, je v oblasti nad horní křivkou korekce nevyužitá a proto zbytečná a v oblasti pod spodní křivkou je korekce vůbec nemožná.

Příklad:

Má se korigovat bifokálním brýlovým sklem oko, jehož ametropie je $R = -7$ dioptrií, vergence blízkého bodu $P = -9$ dioptrií, tedy akomodační amplituda $A_m = 2$ dioptrie.

Daný případ vede k souřadnicím $R = -7$, $A_m = 2$. Příslušný bod padá do oblasti, kde je možná úplná korekce pro obě pracovní vzdálenosti 25 i 33 cm.

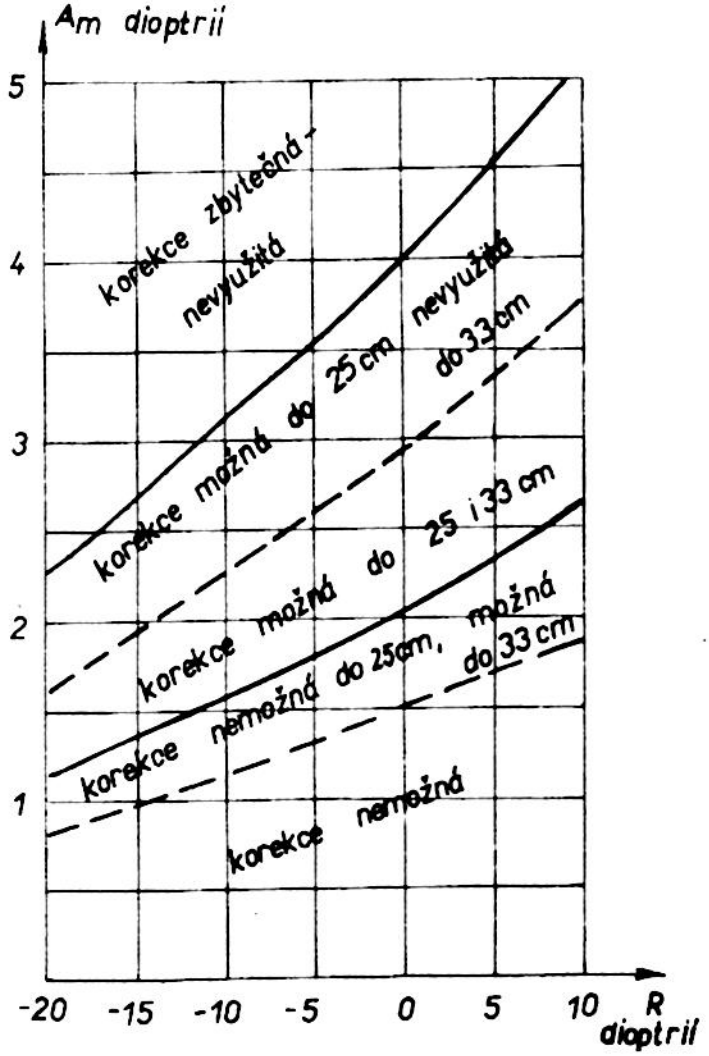
Řešíme-li dané požadavky, pak vycházíme z tab. 8.1.1, ze které plyne pro $R = -7$ dioptrií $D'_v = -7{,}72$ dioptrie a pro $P = -9$ dioptrií $D'_t = -10{,}23$ dioptrie. Tedy pro D'_p podle prvního vztahu (10.1.1.4) plyne

$$D'_p = 2D'_v - D'_t = -15{,}44 + 10{,}23 = -5{,}21 \text{ dioptrií}$$

Prakticky budeme volit

$D'_p = -5{,}25$ dioptrie

$D'_v = -7{,}75$ "



Obr. 10.1.1.1 Podmínky úplné korekce stařeckého oka

10.2) Oko s vyjmutou oční čočkou (aphakie)

Je-li při šedém zákalu z oka vyjmuta oční čočka, pak oko je jako optická soustava redukována pouze na jeho rohovku o lámavosti D_r. Hlavní body velmi těsně splývají s vrcholem rohovky. Takové oko je jasným případem ametropie lámavosti a oko, které před operací bylo emmetropické, se stává po operaci silně dalekozrakým.

Předpokládejme, že oko mělo před operací ametropii R. Potom vzdálenost l' jeho obrazového hlavního bodu od sítnice je rovna

$$l' = \frac{n'}{D + R} .$$

Tento obrazový hlavní bod leží zhruba 2 mm za novým obrazovým hlavním bodem oka po vyoperování oční čočky. To znamená, že vzdálenost obrazu od obrazového hlavního bodu po operaci bude

$$2 \cdot 10^{-3} + \frac{n'}{D + R} ,$$

takže nový vzdálený bod R_1 příslušný k oku s vyjmutou oční čočkou bude mít vergenci R_1 , pro kterou platí

$$R_1 = - D_r + \frac{n'}{2 \cdot 10^{-3} + \frac{n'}{D + R}} = - D_r \frac{D + R}{1 + 1{,}3 \cdot 10^{-3} (D + R)} .$$

Není-li R příliš velké, můžeme je v porovnání s D zanedbat, takže předchozí vztah nabude s přihlédnutím k tomu, že D = 60 dioptrií a D_r teoretického oka je rovno 42,36 dioptrií, tvar

$$R_1 = - D_r + \frac{D + R}{1{,}08} = - 42{,}36 + 55{,}6 + 0{,}925 R = 13{,}2 + 0{,}925 R .$$

Ukazuje se, že 75 % lidí s vyjmutou oční čočkou se stávají dalekozrakými s ametropií + 12 dioptrií. Stává se, že krátkozraké oko s velkou ametropií řádu - 13 až - 15 dioptrií se po vyjmutí čočky stává emmetropickým. Z toho důvodu existovalo určité období, kdy se doporučovalo u silně krátkozrakých lidí vyjmout oční čočku (1890).

10.2.1) Korekce aphakie pro vidění na dálku

Pro lámavost brýlového skla pro vidění na dálku vychází podle dřívějšího

$$D_v' = \frac{R_1}{1 + b R_1} ,$$

neboť v případě aphakie je vzdálenost o zanedbatelná. Vzhledem k tomu, že R_1 je velké, je nutné velmi přesně měřit vzdálenost b . Obecně D_v' přesahuje hodnotu + 10 dioptrií a proto se značně liší od příslušné ametropie R_1 a od skutečné lámavosti brýlového skla vztažené na hlavní body.

Předpokládejme, že ve velké vzdálenosti x od korekčního brýlového skla leží pozorovaný vzdálený předmět, který je tímto sklem zobrazen podle (9.3.3) a (9.3.4) se zvětšením, pro které platí

$$\frac{y_1'}{y} = g' \frac{x'}{x} ,$$

kde

$$x' = \frac{x}{g'^2 - x D_v'}$$

takže

$$\frac{y_1'}{y} = \frac{g'}{g'^2 + D_v' x} \pm \frac{g'}{D_v' \cdot x}$$

za předpokladu, že x je dostatečně veliké. Tento obraz bude ležet ve vzdálenosti $p = \frac{1}{R_1}$ od rohovky příslušného oka, takže velikost obrazu y' na sítnici oka bude dána podle (4.1.7) vztahem

$$\frac{y'}{y_1'} = \frac{1}{1 + p D_r} = \frac{1}{1 + \frac{D_r}{R_1}} = \frac{R_1}{R_1 + D_r}$$

a odtud

$$\frac{y'}{y} = \frac{y_1'}{y} \cdot \frac{y'}{y_1'} = \frac{g'}{D_v' \cdot x} \cdot \frac{R_1}{R_1 + D_r}$$

čili

$$y' = \frac{y}{x} \cdot \frac{g}{D_v'} \cdot \frac{R_1}{D_1 + D_r} = \frac{y}{x} \cdot g' \frac{1 + b R_1}{R_1 + D_r} .$$

Pro emmetropické oko je

$$y_o' = \frac{y}{x} \cdot \frac{1}{D} , \quad \text{takže}$$

$$\frac{y'}{y_o'} = g' (1 + b R_1) \frac{D}{R_1 + D_r} .$$

Uvažujme $b = 12$ mm, $D = 60$ dioptrií , $D_r = 43$ dioptrie a g' nechť má hodnotu odpovídající meniskovým brýlovým sklům s bází -6 dioptrií. Potom dostaneme následující hodnoty $\frac{y'}{y_o'}$

Tab. 10.2.1.1

R_1	D_v'	g'	y'/y_o'
-5	- 5,32	1	1,48
0	0	1	1,40
5	4,72	1,019	1,35
10	8,93	1,046	1,33
15	12,71	1,091	1,33

10.2.2) Úhel vidění

Abychom mohli porovnat rozlišovací schopnost oka před a po vyjmutí oční čočky, je nutné volit za vrchol příslušných úhlů vidění takový bod C , který je zobrazen rohovkou oka do středu C´ jeho oční čočky, neboť vyjmutí čočky nemá vliv na průchod příslušných paprsků. Předpokládáme-li, že bod C´ leží ve vzdálenosti 6,1 mm za vrcholem rohovky S , pak bod C leží asi 5,7 mm za vrcholem S , tj. ve vzdálenosti

$$x' = b + 5{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

za vrcholem druhé plochy brýlového skla. Nechť u_r značí úhel před okem a u_r' úhel za rohovkou po lomu. Podle (9.3.6) platí pro příčné zvětšení $\frac{y'}{y}$, které je podle Langrange-Helmholtzova vztahu rovno poměru $\frac{u_r}{u_r'}$,

$$\frac{1 - D_v' \cdot x'}{g'} = \frac{1 - D_v' (b + 5{,}7 \cdot 10^{-3})}{g'} .$$

Protože poměr rozlišovacích mezí V_1 a V příslušných k oku před a po vyjmutí oční čočky je roven převrácené hodnotě poměru poměrů úhlů $\frac{u_{r1}}{u_{r1}}$ a $\frac{u_r}{u_r}$ oka před resp. po vyjmutí oční čočky, můžeme psát (vzhledem k tomu, že $u_{r1} = u_r$)

$$\frac{V_1}{V} = \frac{1 - D_v' (b + 5{,}7 \cdot 10^{-3})}{1 - D_{v1}' (b_1 + 5{,}7 \cdot 10^{-3})} \cdot \frac{g_1'}{g'} ,$$

kde hodnoty označené indexem 1 se vztahují na oko po vyjmutí oční čočky.

Příklad

Nechť oko před operací je emmetropické, tj. $D_v' = 0$ dioptrií, takže $g' = 1$ a nechť po operaci je $D_v' = 11$ dioptrií a $g_1' = 1{,}06$ a $b = 12$ mm .

Potom pro poměr $\frac{V_1}{V}$ vychází

$$\frac{V_1}{V} = \frac{1{,}06}{1 - 11 (12.10^{-3} + 5{,}7 \cdot 10^{-3}} = 1{,}32 .$$

Tento výsledek je v dobrém souhlase s předchozími výsledky v tab. 10.2.1.1.

10.2.3) Vidění aphakického oka na blízko

Oko s vyjmutou oční čočkou nemůže akomodovat a proto prakticky potřebuje na každou vzdálenost jedny brýle. Někteří pracovníci však pozorovali, že přesto lidé s vyjmutou oční čočkou akomodují v rozsahu cca 1 dioptrie. Je to poměrně vyšší hodnota, než je velikost rozptylového kroužku vyjádřená v di-

optriích. Pravděpodobně je tato akomodace vynucena mírným prodlužováním oka působením vedlejších svalů.

Člověk s vyjmutou oční čočkou může do jisté míry dosáhnout správného umístění obrazu blízkého předmětu na sítnici při jeho pozorování brýlemi na dálku tím, že změní vzdálenost těchto brýlí vzhledem k oku.

Zobrazovací rovnici, která přiřazuje předmětu ve vzdálenosti x obraz ve vzdálenosti x', můžeme psát ve tvaru

$$\frac{1}{x'} = \frac{g'^2}{x} + D'_v$$

kde

$$x' = \frac{1}{R_1} + b \ .$$

Pro vergenci $X = \frac{1}{x}$ předmětu pak odtud vychází

$$X = \frac{1}{x} = \frac{1}{g'^2} \cdot \frac{R_1}{1 + b R_1} - \frac{D'_v}{g'^2} \ .$$

Umístěme postupně uvažované brýle ve vzdálenosti b_1 a b_2. Potom platí pro rozdíl příslušných vergencí X_1 resp. X_2:

$$X_2 - X_1 = \frac{R_1}{g'^2} \left(\frac{1}{1 + b_2 R_1} - \frac{1}{1 + b_1 R_1} \right) = \frac{R_1^2 (b_2 - b_1)}{g'^2 . (1 + b R_1)^2} =$$

$$= \frac{D'^2_v}{g'^2} \cdot (b_2 - b_1)$$

Příklad:

Nechť $D'_v = 11$ dioptrií, $g' = 1{,}06$ a $b_2 - b_1 = 1$ cm. Potom vychází

$$X_2 - X_1 = \frac{11^2}{1{,}06^2} \cdot 0{,}01 = \frac{1{,}21}{1{,}12} = 1{,}08 \text{ dioptrie.}$$

Je tedy vidět, že změnou polohy brýlových skel o 1 cm lze docílit akomodaci cca 1 dioptrie.

10.3) Amblyopie

Amblyopickým okem nazýváme takové oko, které ačkoliv bylo korekčním brýlovým sklem vykorigováno tak, že je rovnocenným s emmetropickým okem, nemá dostačující rozlišovací schopnost. Amblyopie se zjistí tak, že se před oční pupilu umístí stínítko s malým otvorem, kterým se potlačí vady oka a zkouší se, zda s korekčním brýlovým sklem se zlepší rozlišovací schopnost. Nezlepší-li se, je oko amblyopické. Tato vada je způsobena sítnicí nebo mozkovou přijímací soustavou a nemá nic společného s neostrostí obrazu.

Amblyopie se obyčejně vyskytuje u krátkozrakého oka s velmi prodlouženým okem, jehož sítnice je velmi napjatá. Odstranění čočky může učinit oko emmetropickým a plně světšit jeho rozlišovací schopnost. Je však spojeno s nebezpečím odchlípení sítnice a mimoto oko ztrácí akomodační schopnost. Tento způsob odstranění amblyopie se dnes již neprovádí a doporučuje se používat Galileova dalekohledu s malým světšením do 2,5-krát.

Nechť D_1' značí vrcholovou lámavost spojného objektivu a D_2' vrcholovou lámavost rozptylného okuláru ($g_2' = 1$). Potom pro vrcholovou lámavost dalekohledu plyne podle vztahu (9.7.1)

$$D' = \frac{D_1'}{1 - \S D_1'} + D_2'$$

a pro faktor g' soustavy

$$g' = \frac{g_1'}{1 - \S D_1'} ,$$

přičemž podmínka korekce je stále dána vztahem (9.6.1).

Tyto tzv. dalekohledové brýle jsou upevněny v normálních brýlových obrubách ve vzdálenosti $\underline{b}$, která musí být dobře zajištěna, neboť zlepšení rozlišovací schopnosti se dosáhne pouze pro jednu určitou korekci.

Zvětšení dalekohledových brýlí se definuje jako poměr velikostí obrazů vytvořených na sítnici oka, když oko pozoruje určitý předmět dalekohledovými brýlemi a normálními korekčními brýlemi o těchže vrcholových lámavostech.

Je-li předmět velmi vzdálený, pak velikosti těchto obrazů jsou úměrné velikostem obrazů vytvořených těmito korekčními soustavami, tj. hodnotám

$$y' = \frac{Y}{x} \cdot \frac{g'}{D'} .$$

Jejich poměr je pak roven poměru příslušných faktorů g'. Přitom faktor g' normálního brýlového skla můžeme brát roven 1.

Příklad

Mají se navrhnout dalekohledové brýle o zvětšení 1,8 pro krátkozraké oko o ametropii R = - 15 dioptrií při vzdálenosti b = 12 mm.

Pro zvětšení Γ dalekohledu plyne podle definice

$$\Gamma = 1{,}8 = \frac{g_d'}{g_b'} ,$$

kde g_b' resp. g_d' značí faktory korekčních brýlí resp. dalekohledových brýlí.

Jak bylo dříve uvedeno, $g_b' = 1$ a pro g_d' vychází podle (9.7.2)

$$g_d' = \frac{g_1' g_2'}{1 - D_1 \xi} = \frac{1{,}2}{1 - 0{,}01 D_1'} ,$$

kde $g_1' = 1{,}2$ značí faktor spojného objektivu, jehož lámavost se pohybuje kolem 30 dioptrií, $g_2' = 1$ faktor rozpt. okuláru, D_1' lámavost objektivu a ξ vzdálenost objektivu a okuláru, kterou volíme 10 mm.

Můžeme tedy psát

$$\Gamma = 1{,}8 = \frac{\dfrac{1{,}2}{1 - 0{,}01 D_1'}}{g_b'} = \frac{1{,}2}{1 - 0{,}01 D_1'}$$

a odtud

$$D_1' = \frac{1{,}8 - 1{,}2}{0{,}018} = \frac{0{,}6}{0{,}018} = 33{,}3 \text{ dioptrie.}$$

Z tab. 8.1.1 vychází pro R = - 15 dioptr. $D_v' = - 18{,}75$ dioptrií, takže

$$D_2' = D' - \frac{D_1'}{1 - \xi D_1'} = - 18{,}75 - \frac{33{,}3}{1 - 0{,}01.33{,}3} = - 18{,}75 - 50 = - 68{,}75 \text{ dioptrií.}$$

Amblyopie se vyskytuje též u očí emmetropických a slabě ametropických jako následek různých nemocí nebo úrazů. Také v těchto případech se používá dalekohledových brýlí, které jsou v případě emmetropických očí afokální.

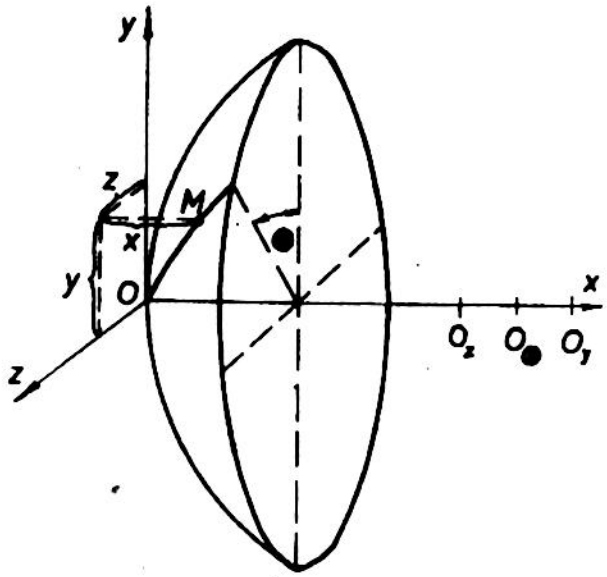
Dalekohledové brýle jsou drahé, neestetické a proto se málo používají.

Pro vidění na blízko se obyčejně spokojujeme s poloviční rozlišovací schopností. Obyčejně se toho docílí použitím obyčejné lupy, nebo dalekohledových brýlí s vhodnou předsádkou.

11) Osový astigmatismus

V předchozích úvahách jsme stále předpokládali, že vnější plocha rohovky je uvnitř účinné oblasti rotační plochou. Ukazuje se však, že tento předpoklad není vždy splněn. Odchylka plochy rohovky od rotační plochy vyvolává tzv. osový nebo rohovkový astigmatismus.

Dříve než přejdeme k problému osového astigmatismu, všimněme si poněkud teorie ploch. Nechť O značí libovolný bod plochy, Ox normála v bodě O , Oy a Oz dva vzájemně kolmé směry v tečné rovině bodu O .



Obr. 11.1 K osovému astigmatismu

Vzdálenost x libovolného bodu M blízkého k bodu O plochy od tečné roviny yOz je veličina nekonečně malá druhého řádu, jsou-li souřadnice x, y bodu M prvního řádu, takže pak vzdálenost x můžeme vyjádřit rozvojem v řadu, který můžeme psát

$$x = C_1 y^2 + C_2 z^2 + C_3 yz + \ldots .$$

Volíme-li vhodně souřadné osy y a z , pak $C_3 = 0$. Potom směry os Oy a Oz vyznačují tzv. hlavní směry.

Rovina xOy seče tuto plochu v křivce, jejíž poloměr křivosti v bodě O je r_y . Podobně rovina xOz seče plochu v křivce, jejíž poloměr křivosti v bodě O je r_z . Podle teorému Dupinova platí:

$$r_y = \frac{1}{2C_1} , \qquad r_z = \frac{1}{2C_2} .$$

Potom rovina rovnoběžná s tečnou rovinou yOz v bodě O , ležící ve vzdálenosti x_0 od O , seče tuto plochu v křivce, jejíž rovnice má tvar

$$\frac{y^2}{r_y} + \frac{z^2}{r_z} = 2 x_0$$

která se nazývá indikatris.

Nechť O_y resp. O_z značí hlavní středy křivosti. Uvažujme libovolnou rovinu procházející osou x-ovou, která svírá s rovinou xOy úhel Ⓗ . Tato rovina seče uvažovanou plochu v křivce mající v bodě O poloměr křivosti $r_Ⓗ$.

Nechť

$$R_y = \frac{1}{r_y} , \qquad R_z = \frac{1}{r_z} , \qquad R_\Theta = \frac{1}{r_\Theta}$$

značí hlavní křivosti a křivost v rovině vedené pod úhlem Θ .

Z diferenciální geometrie ploch plyne podle Eulerovy věty

$$R_\Theta = R_y \cos^2 \Theta + R_z \sin^2 \Theta . \qquad (11.2)$$

V rovině kolmé platí obdobně

$$R_{\Theta+90} = R_y \cos^2 (\Theta + 90) + R_z \sin^2 (\Theta + 90)$$

čili

$$R_{\Theta+90} = R_y \sin^2 \Theta + R_z \cos^2 \Theta . \qquad (11.3)$$

Sečtením (11.2) a (11.3) vychází

$$R_\Theta + R_{\Theta+90} = R_y + R_z . \qquad (11.4)$$

Podle tohoto vztahu je součet křivostí v libovolných vzájemně kolmých směrech konstantní, přičemž konstanta je rovna součtu křivostí v hlavních směrech.

Tento závěr je velmi důležitý pro korekci osového astigmatismu. Všimněme si proto ještě trochu blíže tohoto výsledku.

Podle dřívějšího můžeme psát pro lámavost D plochy v určitém řezu

$$D = (n' - n) R , \qquad (11.5)$$

kde n resp. n' značí index lomu před resp. za touto plochou a R křivost v uvažovaném řezu. Podle (11.2) můžeme tedy psát

$$D_\Theta = D_y \cos^2 \Theta + D_z \sin^2 \Theta , \qquad (11.6)$$

kde D_y resp. D_z značí lámavosti v hlavních směrech.

Aplikujme tento vztah na plankonvexní tenkou čočku, jejíž první plocha je tvořena nerotační plochou. Předpokládejme, že tato čočka je umístěna před okem, jehož rohovka je rovněž omezena nerotační plochou a sice tak, že hlavní řezy obou ploch splývají. Nechť $D_{o\Theta}$ značí lámavost rohovky v libovolném řezu, jehož rovina svírá s rovinou xOy úhel Θ .

Podle předchozího můžeme psát

$$D_{o\Theta} = D_{oy} \cos^2 \Theta + D_{oz} \sin^2 \Theta , \qquad (11.7)$$

kde D_{oy} resp. D_{oz} značí lámavosti rohovky v hlavních jejích směrech.

Pro lámavost soustavy tvořené uvažovanou čočkou a okem platí

$$D_{\textcircled{H}} + D_{o\,\textcircled{H}} = (D_y + D_{oy}) \cos^2 \textcircled{H} + (D_z + D_{oz}) \sin^2 \textcircled{H} \,. \qquad (11.8)$$

Protože u korigovaného oka musí být

$$D_y + D_{oy} = D_z + D_{oz} \,,$$

plyne z (11.8)

$$D_{\textcircled{H}} + D_{o\,\textcircled{H}} = (D_y + D_{oy}) \,.\, (\cos^2 \textcircled{H} + \sin^2 \textcircled{H}) =$$

$$= (D_z + D_{oz}) (\cos^2 \textcircled{H} + \sin^2 \textcircled{H}) = D_y + D_{oy} = D_z + D_{oz} = \text{konst.}$$

což můžeme psát jednoduše

$$D_{\textcircled{H}} + D_{o\,\textcircled{H}} = \text{konst.} \qquad (11.9)$$

Tím jsme dospěli k velmi důležitému výsledku: Jsou-li vykorigovány rozdíly v lámavostech rohovky v hlavních směrech, jsou vykorigovány i rozdíly v lámavostech ve všech ostatních směrech.

Tento důležitý výsledek můžeme formulovat též takto: Osový astigmatismus určité lámavé plochy může být vykorigován ve všech meridiánech jinou vhodně volenou a vhodně orientovanou plochou tak, aby jejich hlavní směry splývaly a aby lámavosti soustavy tvořené oběma plochami byly v obou hlavních směrech stejné.

V předchozích úvahách jsme předpokládali, že bod O na uvažované ploše byl zvolen zcela libovolně. Je tedy možno říci, že každým bodem plochy můžeme vést takové dvě vzájemně kolmé roviny, které sečou plochu v křivkách s maximální a minimální křivostí. Na každé ploše existují čáry hlavních křivostí. Jsou to čáry, které mají tu vlastnost, že tečna sestrojená v kterémkoliv jejich bodě určuje směr hlavní křivosti.

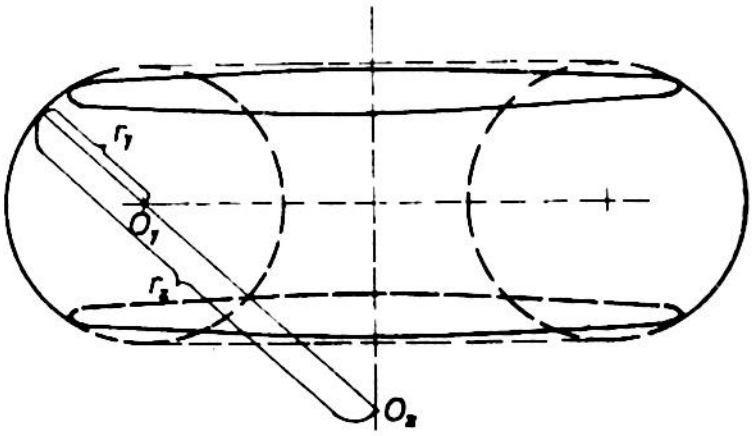
Jako nejvhodnější příklad ploch, které je možno z výrobních důvodů s výhodou využít v brýlařské technice při korekci osového astigmatismu, jsou tzv. torické plochy. Jsou to plochy, které vzniknou rotací kružnice kolem osy ležící v rovině kružnice. Čáry hlavních křivostí jsou u torické plochy totožné s výtvarnou kružnicí, která tvoří meridián torické plochy, a s rovnoběžkami, z nichž největší se nazývá rovníkem.

Mohou nastat dva případy, podle toho, zda rotační osa protíná nebo neprotíná výtvarnou kružnici. V druhém případě, vyznačeném na obr. 11.2 vzniká tzv. anuloid, který obsahuje vnější a vnitřní část. U vnější části mají oba poloměry křivosti r_y a r_z stejné znaménko, zatímco u vnitřní části jsou poloměry hlavních křivostí opačných znamének. Vnější část má indikatris tva-

ru elipsy a v brýlařské optice se využívá, zatímco vnitřní část, která má indikatris tvaru hyperboly se v brýlařské optice nevyužívá.

V případě, že rotační osa protíná výtvarnou kružnici, vyznačeném na obr. 11.3, má vnější část tvar melounu nebo dyně a vnitřní část tvar soudku.

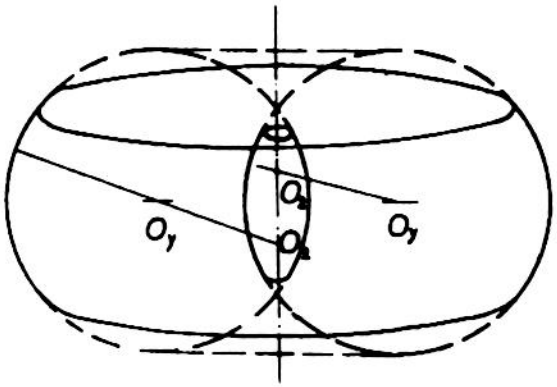
Normála sestrojená v libovolném bodě torické plochy prochází oběma středy hlavních křivostí, z nichž jeden je totožný se středem příslušné výtvarné kružnice a druhý leží na ose rotace.



Obr. 11.2 Torická plocha - anuloid

11.1) Astigmatismus rohovky

Z odst. 4.3 je známo, že hlavní osa vidění dopadá na přední plochu rohovky pod úhlem dopadu rovným 5°. Předpokládejme pro jednoduchost, že tento úhel je roven nule. Nechť hlavní osa vidění protne rohovku v bodě O a nechť Oy resp. Oz značí hlavní směry na ploše rohovky. Předpokládejme dále, že poloměr křivosti $r_y < r_z$.



Obr. 11.3 Torická plocha

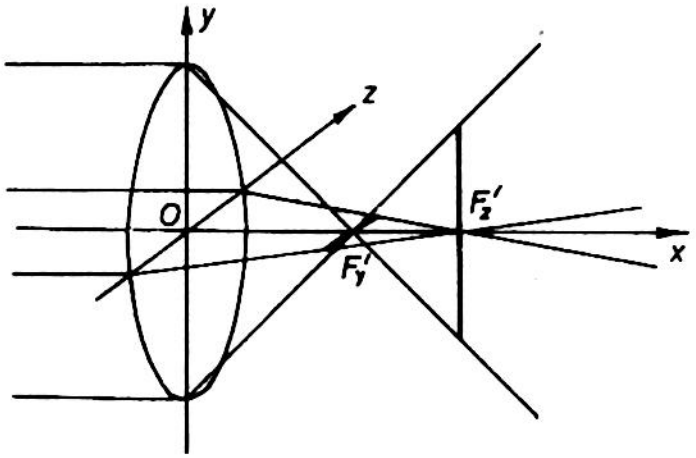
Uvažujme paprsky probíhající hlavní rovinou yOx rovnoběžně s osou x . Tyto paprsky se spojí v obrazovém ohnisku F_y' , pro jehož vzdálenost platí

$$\frac{n'}{\overline{O\,F_y'}} = D_y = \frac{n' - n}{r_y} .$$

Podobně paprsky probíhající v druhé hlavní rovině zOx rovnoběžně s osou x se spojí v obrazovém ohnisku F_z' , pro jehož vzdálenost platí

$$\frac{n'}{\overline{O\,F_z'}} = D_z = \frac{n' - n}{r_z} .$$

Paprsky probíhající v ostatních rovinách procházející osou x se spojí v bodech, které leží mezi body F_y' a F_z'. To znamená, že paprskový svazek nebude tvořen kuželem, nýbrž jeho průřez se bude měnit. V bodech F_y' resp. F_z' bude tvořen úsečkami, tzv. fokálami, přičemž fokála příslušná k F_y' je rovnoběžná s hlavním směrem Oz a obráceně, fokála příslušná k F_z' je rovnoběžná s hlavním směrem Oy, jak je to naznačeno na obr. 11.1.1.



Obr. 11.1.1 K určení astigmatismu rohovky.

Bude-li ležet předmětový bod v konečné vzdálenosti, můžeme psát zcela obecně

$$\frac{n'}{p_y'} = \frac{1}{p_y} + D_{1y} \quad , \quad \frac{n'}{p_z'} = \frac{1}{p_z} + D_{1z} \quad ,$$

kde D_{1y} resp. D_{1z} značí lámavosti přední plochy rohovky, což je vyznačeno indexem 1. Odečtením předchozích rovnic plyne

$$\left(\frac{n'}{p_y'} - \frac{n'}{p_z'}\right) = \left(\frac{1}{p_y} - \frac{1}{p_z}\right) + (D_{1y} - D_{1z}) \, .$$

Podle tohoto vztahu můžeme definovat osový astigmatismus rohovky A_r třojím způsobem

a) $$A_r = D_{1y} - D_{1z}$$

b) $$A_r = \frac{n'}{p_y'} - \frac{n'}{p_z'} \quad ,$$

neboť v případě oka je vždy $p_z = p_y$.

c) $$A_r = \frac{1}{p_z} - \frac{1}{p_y} \, ,$$

volíme-li $p_z' = p_y'$; to znamená, že astigmatismus je v tomto případě dán rozdílem vzdáleností předmětových bodů, jejichž obrazy vytvořené paprskovými svazky probíhajícími v hlavních rovinách, jsou tvořeny jediným bodem.

Vzhledem k velké lámavosti přední plochy rohovky (D_1 = 48,35 dioptrií) podílí se astigmatismus rohovky velkou měrou na osovém astigmatismu a hraje tedy prvořadou úlohu. Ze vztahu

$$r = \frac{n' - 1}{D_1}$$

plyne diferencováním

$$dr = - \frac{n' - 1}{D_1^2} dD_1 = - \frac{n' - 1}{D_1^2} \cdot A_r \cdot$$

Pro $n' = 1,377$ plyne odtud pro $A_r = 1$ dioptrie

$$dr = - \frac{0,377}{48,35^2} = - 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,16 \text{ mm} .$$

11.2) Teoretické astigmatické oko

Předpokládejme, že všechny lámavé plochy oka jsou rotační a že jejich parametry souhlasí s parametry teoretického oka s výjimkou přední plochy rohovky s teoretickou lámavostí D_{1z} = 48,35 dioptrií v hlavním řezu zOx, zatímco v druhém hlavním řezu je jeho lámavost $D_{1y} = D_{1z} + A_r$.

V rovině hlavního řezu zOx bude pak celková lámavost celé rohovky rovna teoretické hodnotě D_{rz} = 42,36 dioptrií. V hlavním řezu yOz bude pak celková lámavost rohovky dána vztahem

$$D_{ry} = D_{1y} + D_2 - D_{1y} \cdot D_2 \cdot \delta ,$$

kde D_2 značí teoretickou lámavost zadní plochy rohovky a δ její redukovanou tloušťku.

Dosadíme-li za D_{1y}, můžeme psát dále

$$D_{ry} = D_{1z} + A_r + D_2 - (D_{1z} + A_r) D_2 \delta = \underbrace{D_{1z} + D_2 - D_{1z} D_2 \delta}_{D_{rz}} + A_r (1 - \delta D_2) =$$

$$= D_{rz} + A_r (1 - \delta D_2) = D_{rz} + 1,0024 A_r ,$$

klademe-li za $D_2 = - 6,1077$ dioptrie a $\delta = 3,99 \cdot 10^{-4}$ mm.

Z tohoto výsledku je vidět, že astigmatismus rohovky jako celku se neliší od astigmatismu přední její plochy o více než 0,2 %. Tím je tedy odůvodněn název "astigmatismus rohovky", i když se vlastně jedná pouze o astigmatismus její přední plochy.

Určeme nyní astigmatismus celého oka. Přitom budeme uvažovat oko jako soustavu složenou z teoretického oka a tenké soustavy o lámavosti A_r umístěné před jeho rohovkou. Redukovaná vzdálenost je rovna vzdálenosti vrcholu rohovky od předmětového hlavního bodu oka, tj. 1,59 mm.

Potom vychází pro lámavost D_y v hlavním řezu yOx, považujeme-li lámavost v hlavním řezu zOx za shodnou s lámavostí teoretického oka, D_z = = 59,94 dioptrií:

$$D_y = A_r + D_z - A_r D_2 \delta = D_z + A_r (1 - \delta D_2) = D_z + 0{,}9044\, A_r . \qquad (11.2.1)$$

Pro polohu příslušného hlavního bodu H_y' plyne

$$\overline{H_z' H_y} = - n' \delta \frac{A_r}{D_y} \doteq - n' \delta \frac{A_r}{D_z} = - \frac{1{,}336 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3} A_r}{59{,}94} =$$

$$= - 3{,}55 \cdot 10^{-5} A_r . \qquad (11.2.2)$$

Z posledních dvou vztahů vychází pro změnu polohy obrazového ohniska v rovině hlavního řezu yOx odpovídající A_r = 1 dioptrie:

$$\frac{n'}{D_z} - \frac{n'}{D_z + 0{,}9\, A_r} = \frac{n' \cdot 0{,}9}{D_z (D_z + 0{,}9\, A_r)} = \frac{1{,}377 \cdot 0{,}9}{59{,}94 \cdot (59{,}94 + 0{,}9)} =$$

$$= \frac{1{,}377 \cdot 0{,}9}{59{,}94 \cdot 60{,}84} = 3{,}4 \cdot 10^{-4} .$$

Protože obrazový hlavní bod H_y' se pošine podle (11.2.2) o $- 3{,}5 \cdot 10^{-5}$ mm, bude činit celkové pošinutí obrazového ohniska teoretického astigmatického oka o

$$3{,}4 \cdot 10^{-4} + 3{,}5 \cdot 10^{-5} = 0{,}37 \text{ mm / 1 dioptrie.}$$

Podobný výpočet je možno provést i pro akomodující teoretické oko a dostaneme

$$D_y^* = D_z^* + 0{,}88\, A_r \qquad (11.2.3)$$

$$\overline{H_z'^* H_y'^*} = - 3{,}59 \cdot 10^{-5} A_r . \qquad (11.2.4)$$

V předchozích úvahách jsme předpokládali, že úhel dopadu ε hlavní osy vidění je roven nule. Protože ve skutečnosti $\varepsilon \doteq 5^\circ$, projeví se při zobrazování mimo osového astigmatismus ještě astigmatismus šikmých svazků. Z geometrické optiky je známo, že pro zobrazování paprsků probíhajících v blízkosti paprsku hlavního, platí

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n}{s} + \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r} \qquad (11.2.5)$$

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'} = \frac{n \cdot \cos^2 \varepsilon}{t} + \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r} \,. \qquad (11.2.6)$$

Protože v případě oka je $t = s$, vychází odečtením (11.2.6) a (11.2.5)

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'} - \frac{n'}{s'} = 0 \,.$$

Analogicky podle druhé definice astigmatismu můžeme psát

$$A_r = \frac{n'}{t'} - \frac{n'}{s'} = \frac{n'}{t'} (1 - \cos^2 \varepsilon') = \frac{n'}{t'} \cdot \sin^2 \varepsilon' \doteq D_1 \sin^2 \varepsilon' \,,$$

kde D_1 značí lámavost přední plochy rohovky ($D_1 = 48{,}35$ dioptrií).

Pro $\varepsilon = 3^\circ$ vychází

$$\sin \varepsilon' = \frac{\sin \varepsilon}{n'} = \frac{0{,}0523}{1{,}377} = 0{,}038 \quad \text{a tedy}$$

$$\sin^2 \varepsilon' = 1{,}44 \cdot 10^{-3}$$

takže

$$A_r = 48{,}35 \cdot 1{,}44 \cdot 10^{-3} = 0{,}07 \text{ dioptrie.}$$

Je to zanedbatelná hodnota, takže při korekci osového astigmatismu nemusíme k ní přihlížet.

11.3) Označení osového astigmatismu

Pokud je průměr oční pupily malý, pak můžeme mluvit o přesně definovaných polohách obou fokál. Je-li průměr oční pupily velký, např. 4 mm, pak v jednotlivých zonách rohovky nemusí být poloměry křivosti r_y a r_z stejné a mimoto hlavní směry, odpovídající jednotlivým zonám, nemusí splývat. To znamená, že každé zoně rohovky odpovídá jiná fokála mající případně jiný směr. Proto paprskový svazek propuštěný do oka velkou pupilou má velmi složitou strukturu, neboť vzniká superposicí paprskových svazků příslušných k jednotlivým zonám.

Jsou-li hlavní směry příslušné k jednotlivým zonám rovnoběžné, mluvíme o pravidelném osovém astigmatismu.

Jestliže se hlavní směry mění od jednoho bodu zony k druhému, pak příslušný astigmatismus se nazývá nepravidelný.

Je možno říci, že osový astigmatismus je obecným jevem. Pouze 10 % lidí nemá astigmatismus. U 65 % lidí je $A_r = 1$ dioptrie. Astigmatismus větší

než 2 dioptrie bývá dědičný a bývá spojen obyčejně s nesymetrií lidí. Astigmatismus větší než 4 dioptrie je velmi řídký a bývá doprovázen silnou dalekozrakostí. V Evropě se výskyt astigmatismu zmenšuje od severu k jihu.

Hlavní řez, kterému přísluší menší lámavost, bývá velmi blízký vodorovnému směru. Astigmatismus se dělí na:

a) přímý, leží-li hlavní směr odpovídající menší lámavosti v rozmezí 0 - 30° nebo 150 - 180° ,
b) inversní, leží-li hlavní směr menší lámavosti v rozmezí 60 - 120° ,
c) šikmý ve všech ostatních směrech.

U mladých lidí se vyskytuje přímý astigmatismus v 77 % případů, v 1 % inversní a v 12 % šikmý.

Přímý astigmatismus velikosti 0,5 až 0,75 dioptrií je u mladých lidí normální a nazývá se fysiologickým. Je vyvolávám tlakem očních víček a roste při svírání víček. S přirůstajícím věkem se stává rohovka tužší a tlak víček se snižuje, takže oko nabývá svého přirozeného tvaru.

V některých případech se osový astigmatismus projevuje tak, že hlavní směry nejsou na sebe vzájemně kolmé, nebo že rohovka má tvar kužele. Potom mluvíme o tzv. keratokonu.

11.4) Astigmatismus oční čočky

Astigmatismus přední plochy rohovky není jediný, který se v oku vyskytuje. Zadní plocha rohovky bývá rovněž zatížena astigmatismem, avšak lámavost této plochy je malá, takže se mnoho neprojevuje. Na několika lidech bylo zjištěno, že zadní plocha vykazuje inversní astigmatismus, který může dosáhnout 0,5 dioptrie.

V roce 1801 Young zjistil na vlastním oku, tím, že vyloučil vliv přední plochy rohovky vodní immersí, že oční čočka vykazuje astigmatismus. Young připisoval tento astigmatismus na účet šikmých paprskových svazků. Tato domněnka se zdála málo pravděpodobná, neboť by předpokládala poměrně značný sklon paprskových svazků.

Předpokládejme, že oční čočka je tvořena jednoduchou tenkou čočkou o lámavosti $D_{čoč}$ a indexu lomu n' a že je umístěna v prostředí zjednodušeného oka o indexu lomu n .

Protože úhel dopadu ε středního paprsku svazku je malý, můžeme rozvinout kosínus ve vztahu (11.2.5) v řadu, takže pro přední plochu oční čočky můžeme psát:

$$\frac{n'}{s_1'} = \frac{n}{s} + \frac{n' - n}{r_1} + C_1.\varepsilon^2 + \ldots\ldots = \frac{n}{s} + D_1 + C_1\,\varepsilon^2 + \ldots$$

Podobně platí pro druhou plochu

$$\frac{n}{s'} = \frac{n'}{s'_1} + D_2 + C_2 \cdot \varepsilon^2 + \ldots.$$

Sečtením obou posledních vztahů pak dostaneme

$$\frac{n}{s'} = \frac{n}{s} + D_1 + D_2 + (C_1 + C_2)\,\varepsilon^2 + \ldots.$$

čili

$$\frac{n}{s'} = \frac{n}{s} + D_{\check{c}oč} + (C_1 + C_2)\,\varepsilon^2 + \ldots. \qquad (11.4.1)$$

Podobně plyne ze vztahu (11.2.6) pro přední plochu

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_1} = \frac{n \cdot \cos^2 \varepsilon}{t'_1} + D_1 + C_1 \varepsilon^2 + \ldots.$$

a druhou plochu

$$\frac{n \cdot \cos^2 \varepsilon}{t'} = \frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{t'_1} + D_2 + C_2 \varepsilon^2 + \ldots..$$

a sečtením dále

$$\frac{n}{t'} = \frac{n}{t} + \frac{D_{\check{c}oč} + (C_1 + C_2)\,\varepsilon^2 + \ldots}{\cos^2 \varepsilon} = \frac{n}{t} + D_{\check{c}oč} + D_{\check{c}oč} \cdot \varepsilon^2 +$$

$$+ (C_1 + C_2)\,\varepsilon^2 + \ldots. \qquad (11.4.2)$$

nemá-li rohovka osový astigmatismus, pak $s = t$, takže odečtením (11.4.1) a (11.4.2) dostaneme

$$\frac{n}{t'} - \frac{n}{s'} = \varepsilon^2 \cdot D_{\check{c}oč}\,. \qquad (11.4.3)$$

Najděme pomocí tohoto vztahu úhel ε, pro který je astigmatismus oční čočky roven 0,25 dioptrií.

Protože jsme dříve nalezli, že astigmatismu 1 dioptrie odpovídá posuv obrazového ohniska $P'_y = 0{,}37$ mm, vychází pro 0,25 dioptrií vzdálenost příslušných fokál

$$0{,}37 \cdot 0{,}25 = 0{,}09 \text{ mm}\,.$$

Protože $n = 1{,}336$, $D_{\check{c}oč} = 22{,}4$ dioptrie a vzdálenost oční čočka - sítnice je rovna $1{,}78 \cdot 10^{-2}$ m (pro zjednodušené oko), dostaneme z (11.4.3)

$$\varepsilon^2 = \frac{n}{D_{oč}}\left(\frac{1}{t'} - \frac{1}{s'}\right) = \frac{n}{D_{oč}} \cdot \frac{s' - t'}{s' \cdot t'} = \frac{1{,}336 \cdot 9 \cdot 10^{-5}}{22{,}4 \cdot 1{,}78^2 \cdot 10^{-4}} = 1{,}69 \cdot 10^{-2},$$

předpokládáme-li, že $s' = t' = 1{,}78 \cdot 10^{-2}$ m .

Odtud pak $\varepsilon = 0{,}13$ radiánu, čili

$$\varepsilon = 7{,}5^\circ .$$

Z této úvahy je patrno, že k vyvolání poměrně malého astigmatismu je třeba značného sklonu paprsku, který u oční čočky nemůže být dosažen, protože optická osa oka je obyčejně definována s přesností do 2° .

Na druhé straně je velmi pravděpodobné, že astigmatismus vyvolávají plochy čočky. Tscherning, který se tímto problémem zabýval, zjistil, že u přední plochy se vyskytuje přímý astigmatismus do 1 dioptrie a u zadní plochy inversní astigmatismus velikosti do 1,8 dioptrie. Astigmatismus oční čočky tedy může přesáhnout celkem 1 dioptrii. Obyčejně bývá menší než 2 dioptrie. Statistika ukazuje, že u 49 % je astigmatismus oční čočky zanedbatelný, u 44 % je inversní a u 7 % přímý.

Z předchozích úvah vyplývá, že astigmatismus šikmých svazků u rohovky a oční čočky je zanedbatelný, takže příčiny astigmatismu oka jako celku mohou být tři:

a) přední plocha rohovky
b) zadní plocha rohovky
c) oční čočka.

Protože dvě poslední příčiny nelze snadno při měřeních separovat, shrnují se pod jeden pojem tzv. astigmatismu doplňkového.

Podle Donderse můžeme astigmatismus oka definovat takto: Představme si umístěnu před okem úskou štěrbinu, která vyloní rovinný paprskový svazek obsahující hlavní osu vidění.

Obdobně jak tomu bylo v případě astigmatismu rohovky, nazýváme astigmatismus oka pravidelným, existují-li dva směry štěrbiny, vzájemně na sebe kolmé, které definují hlavní směry, a v nichž se oko chová jako centrovaná soustava.

To znamená, že v každém z obou hlavních směrů můžeme definovat vzdálený bod a jemu odpovídající vergence R_y resp. R_z . Potom celkový astigmatismus A_o oka je dán

$$A_o = R_z - R_y .$$

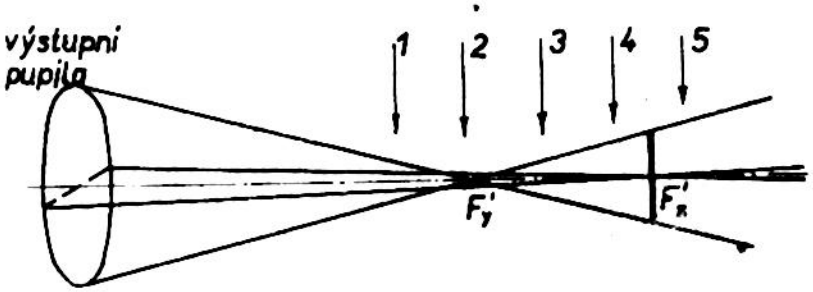
Jinak řečeno, astigmatismus oka je dán rozdílem ametropií oka v jeho hlavních směrech.

Vyskytuje-li se u oka pouze astigmatismus rohovky A_r, pak velmi přesně platí

$$A_o = A_r .$$

V tomto případě se astigmatismus oka při akomodaci nemění. Doplňkový astigmatismus oka, je-li přímý, kompensuje část astigmatismu rohovky. Např. fysiologický astigmatismus se projevuje velmi málo, neboť je prakticky vykompensován doplňkovým astigmatismem.

Naopak inversní astigmatismus rohovky často zvyšuje celkový astigmatismus oka. V některých případech nejsou hlavní směry doplňkového astigmatismu shodné s hlavními řezy rohovky.



Obr. 11.4.1 K vysvětlení spojení astigmatismu oka se sferickou ametropií.

Výsledný astigmatismus oka se pak skládá se sferickou ametropií. Přitom poloha příslušných fokál vzhledem k sítnici může být různá, jak je to vyznačeno na obr. 11.4.1.

Podle toho rozeznáváme celkový astigmatismus oka:

a) krátkozraký složený, když R_y i $R_z < 0$ (5)
b) " jednoduchý, když $R_y < 0$, $R_z = 0$ (4)
c) smíšený, když $R_y < 0 < R_z$ (3)
d) dalekozraký jednoduchý, když $R_z > 0$ a $R_y = 0$ (2)
e) dalekozraký složený, když $R_z > 0$ a $R_y > 0$ (1)

11.5) Vidění nekorigovaného astigmatického oka

11.5.1) Vidění bodového předmětu

Astigmatické oko nikdy nevidí bod jako bod, nýbrž vždy jako rozptylový kroužek nebo fokálu. Padne-li právě jedna z obou fokál (např. F_y') na sítnici, pak její délka bude rovna průměru ε rozptylového kroužku oka o sférické ametropii R_z pozorující bod, kterému odpovídá vergence R_y. Podle (7.4.1) pro tento průměr vychází

$$\varepsilon = -d \cdot \frac{X - R}{R + D} = d \frac{R_z - R_y}{R_z + D_z} = d \cdot \frac{A_o}{R_z + D_z} .$$

Je-li ametropie R_z malá, můžeme psát jednoduše

$$\varepsilon = d \frac{A_o}{D} .$$

Pro úhel ω , pod kterým se bude na sítnici fokála jevit, platí

$$\omega = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{D}} = d \cdot A_0 .$$

Pro $d = 4$ mm odtud vychází

$$\omega = 4 \cdot A_0 \cdot 10^{-3} \text{ radiánu} = 13 \cdot A_0 \text{ minut} .$$

Odtud vyplývá, že zdánlivý úhel, pod kterým se jeví fokála, je pro malý astigmatismus malý.

11.5.2) Nejmenší rozptylový kroužek

Z teorie astigmatismu je známo, že rozptylový kroužek je kruhový, když nastavovací rovina (sítnice) protíná příslušný astigmatický svazek mezi oběma fokálami.

Určeme polohu tohoto rozptylového kroužku vzhledem k fokálám. Nechť na obr. 11.5.2.1 značí $\overline{ZZ'}$ resp. $\overline{YY'}$ v odpovídajících hlavních řezech délky příslušných fokál. Potom pro průměr $\overline{MM'}$ kruhového rozptylového kroužku vychází podle obrázku, značí-li $\overline{PP'}$ průměr výstupní pupily:

$$\frac{\overline{MM'}}{\overline{PP'}} = \frac{\overline{YM}}{\overline{PY}} = \frac{\overline{MZ}}{\overline{PZ}}$$

nebo

$$\frac{\overline{PM} - \overline{PY}}{\overline{PY}} = \frac{\overline{PZ} - \overline{PM}}{\overline{PZ}}$$

dělí

$$\frac{\overline{PM}}{\overline{PY}} - 1 = 1 - \frac{\overline{PM}}{\overline{PZ}}$$

a odtud konečně

$$\frac{2}{\overline{PM}} = \frac{1}{\overline{PY}} + \frac{1}{\overline{PZ}}$$

dělí

$$\frac{2}{\overline{PM}} = \frac{\overline{PZ} + \overline{PY}}{\overline{PY} \cdot \overline{PZ}} .$$

Je-li $\overline{YZ}$ malé, pak aritmetický průměr $\frac{\overline{PZ} + \overline{PY}}{2}$ je roven geometrickému průměru $\sqrt{\overline{PZ} \cdot \overline{PY}}$, takže z posledního vztahu plyne

$$\overline{PM} = \sqrt{PY \cdot PZ} = \frac{\overline{PY} + \overline{PZ}}{2}$$

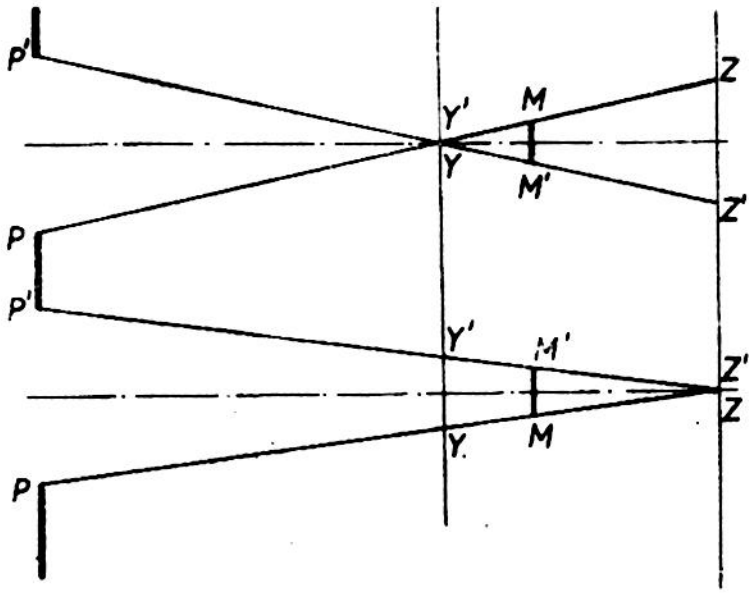
Z předchozí úvahy tedy vyplývá, že nejmenší rozptylový kroužek $\overline{MM'}$ leží uprostřed mezi oběma fokálami. Padne-li tento kroužek na sítnici, pak odpovídající ametropie v hlavních řezech musí být stejné, avšak opačného znaménka a musí tedy platit

$$R_y - R_z = R_y - (-R_y) =$$

$$= 2\,R_y = -\,2\,R_z = A_o$$

čili

$$R_y = -\,R_z = \frac{A_o}{2}\ .$$



Obr. 11.5.2.1 K určení polohy nejmenšího rozptylového kroužku.

Z dřívějších úvah (odst. 8.5) víme, že je možno tolerovat nepřesnost korekce ΔD_v hodnotou 0,075 dioptrie. Tutéž hodnotu je možno připustit na $\frac{A_o}{2}$, aby rozptylový kroužek nebyl vnímán větší než bod, nebo jinak řečeno, aby se příslušný astigmatismus ještě neprojevoval neostrostí obrazu. Vychází tedy

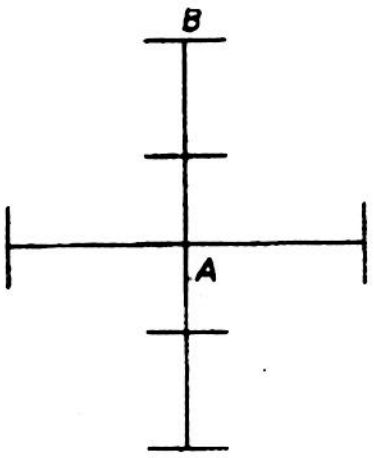
$$\frac{A_o}{2} = 0{,}075 \text{ dioptrie čili}$$

$$A_o = 0{,}15 \text{ dioptrie.}$$

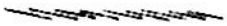
Můžeme tedy říci, že astigmatismus menší než 0,15 dioptrie je zanedbatelný.

11.5.3) Vliv astigmatismu na visuální vjem

Uvažujme oko s jednoduchým astigmatismem, které pozoruje předmět mající tvar podle obr. 11.5.3.1. Obraz tohoto předmětu na sítnici oka bude ostrý v těch částech, jehož fokály se budou vzájemně překládat, jak je to naznačeno na obr. 11.5.3.2. Naopak, obraz předmětu na sítnici bude neostrý v těch jeho částech, kde se budou klást fokály příslušné k jednotlivým jeho bodům vedle sebe, jak je to naznačeno na obr. 11.5.3.3.



Obr. 11.5.3.1 K vysvětlení vlivu astigmatismu na visuální vjem.

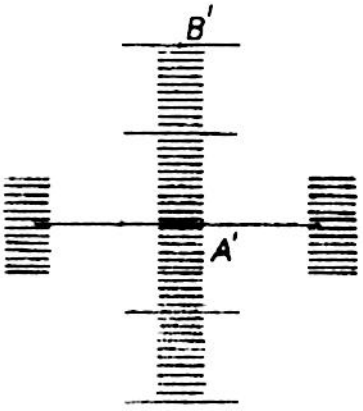


Obr. 11.5.3.2 Překládání fokál příslušných k jednotlivým bodům přímky

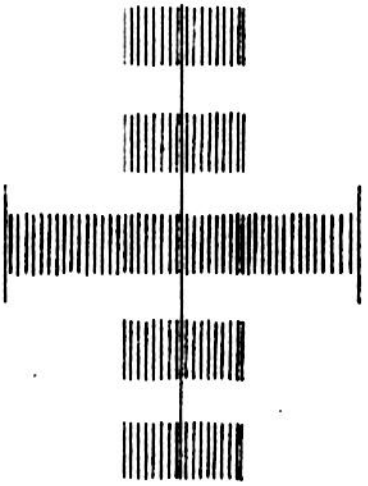
Obr. 11.5.3.3 Vznik neostrosti obrazu

Obecně je možno říci, že oko s jednoduchým astigmatismem bude vidět ostře ty čáry předmětu, které probíhají kolmo na meridián, ve kterém je oko emmetropické (hlavní řez, jehož fokála padá na sítnici).

V případě oka se složeným astigmatismem bude čára probíhající kolmo na meridián s menší ametropií zobrazena méně neostře.

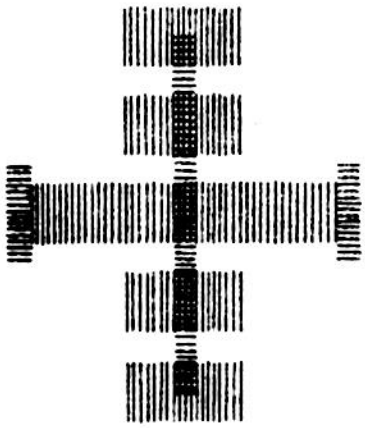


Obr. 11.5.3.4



Obr. 11.5.3.5

Obraz předmětu podle obr. 11.5.3.1 může být tedy zobrazen tak, jak je to naznačeno na obr. 11.5.3.4 až 11.5.3.6, podle toho, bude-li vodorovný nebo svislý směr kolmý na meridian, ve kterém je oko emmetropické, nebo bude-li svislý směr kolmý na meridián s menší ametropií.



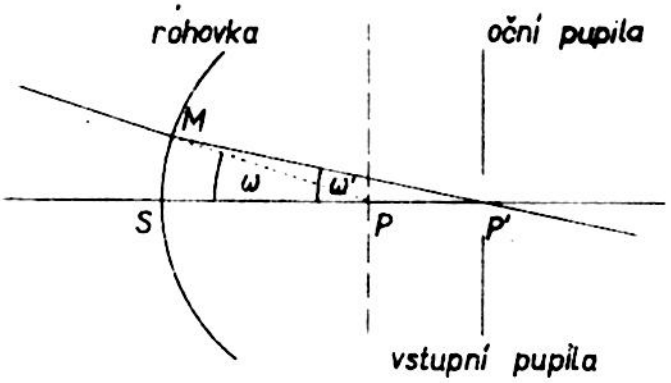
Obr. 11.5.3.6

Mimoto úsečky různých směrů se při astigmatickém oku nezobrazují stejně tmavé.

Naznačeného vlivu astigmatismu na visuální vjem se v brýlařské praksi využívá k určení astigmatismu a směrů hlavních řezů.

11.5.4) Deformace obrazu vyvolaná astigmatismem oka.

Z předchozích úvah je zřejmé, že poloha a velikost výstupní pupily oka musí být u astigmatického oka závislá na směru meridiánu.



Obr. 11.5.4.1 K vysvětlení vlivu astigmatismu na tvar obrazu předmětu.

Nechť ω resp. ω' značí úhel, který svírá dopadající resp. lomený paprsek s optickou osou oka. Potom podle obr. 11.5.4.1 platí

$$\omega = \frac{\overline{SM}}{\overline{SP}} \quad a \quad \omega' = \frac{\overline{SM}}{\overline{SP'}} .$$

Označíme-li D_r lámavost rohovky, můžeme psát

$$\frac{n'}{\overline{SP'}} = \frac{1}{\overline{SP}} + D_r$$

nebo

$$\omega = n' . \omega' - D_r . \overline{SM} .$$

Uvažujme obraz na sítnici astigmatického oka, jehož úhlová velikost ω resp. lineární velikost je ve všech meridiánech stejná. Potom můžeme psát pro roviny hlavních řezů

$$\omega_z = n'\omega' - D_{rz} . \overline{SM}$$
$$\omega_y = n'\omega' - D_{ry} . \overline{SM} .$$

Odečtením obou rovnic pak plyne

$$\omega_z - \omega_y = (D_{ry} - D_{rz}) . \overline{SM} = A_r . \overline{SM} = A_r . \omega . \overline{SP}$$

čili

$$\frac{\omega_z - \omega_y}{\omega} = A_r . \overline{SP} .$$

Protože $\overline{SP} = 3 . 10^{-3}$ m, plyne odtud pro $A_r = + 5$ dioptrií, že relativní změna úhlu ω činí asi $1,5 . 10^{-2}$, tj. 1,5 %.

To znamená, že astigmatickému oku se jeví předmět ve směru menší lámavosti poněkud zploštělým.

11.6) Akomodace nekorigovaného astigmatického oka

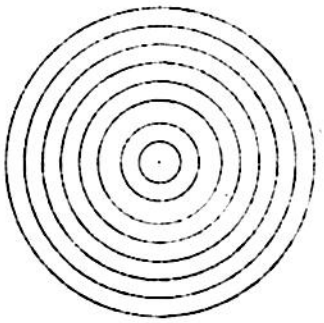
V případě oka s krátkozrakým astigmatismem leží obě nebo alespoň jedna fokála před sítnicí a proto toto oko při pozorování dalekých předmětů si nemůže zlepšit neostrost obrazu akomodací. Oko s dalekozrakým astigmatismem si může při pozorování vzdálených předmětů podle své vůle akomodací upravit zobrazování dalekých předmětů tak, aby na sítnici padla jedna z obou fokál nebo

nejmenší rozptylový kroužek. Podle W. Swaina je umístění nejmenšího rozptylového kroužku na sítnici nestabilní a oko pracuje obyčejně tak, že umísťuje na sítnici jednu z obou fokál a to nejčastěji svislou, která je výhodnější z hlediska binokulárního vidění. Přitom se oko snaží akomodovat co nejméně, takže obyčejně přivádí akomodací na sítnici fokálu přední. U přímého astigmatismu je však přední fokála vodorovná, takže obě tendence jsou protichůdné, a různí lidé dávají přednost té či oné snaze.

Při pozorování blízkých předmětů se každé oko snaží akomodovat maximálně, aby vidělo co nejlépe malé detaily, a proto přivádí obyčejně na sítnici oka zadní fokálu, což je při přímém astigmatismu v souhlase s první tendencí přivést na sítnici svislou fokálu.

Je-li astigmatismus oka způsoben pouze rohovkou, pak se při akomodaci astigmatismu oka nemění nebo jen velmi málo, neboť určitá napětí v ciliárním svalu mohou vyvolat deformaci rohovky. Naproti tomu astigmatismus oční čočky se může měnit, nebo se může objevit, i když u neakomodujícího oka neexistoval. Lze říci, že prakticky u všech lidí se objevuje slabý astigmatismus při akomodaci. Můžeme se o tom snadno přesvědčit, pozorujeme-li test podle obr. 11.6.1 z velmi malé vzdálenosti.

Test se jeví tak, že určité jeho výseče jsou neostré. Měníme-li akomodaci, tak neostré výseče se pootáčí kolem středu.



Obr. 11.6.1 Test k určení astigmatismu oka vyvolaného akomodací

11.7) Korekce astigmatismu

Korekce astigmatismu se provádí jako korekce dvojnásobné ametropie tak, že píšeme vztah zajišťující splynutí obrazového ohniska brýlového skla se vzdáleným bodem pro každý z obou hlavních směrů. Tedy pro vrcholové lámavosti D'_y resp. D'_z v těchto řezech plyne

$$D'_y = \frac{R_y}{1 + (b + o)\, R_y}, \qquad D'_z = \frac{R_z}{1 + (b + o)\, R_z}.$$

Jak bylo ukázáno v odstavci 11, vyplývá ze vztahu (11.9), že astigmatismus je vykorigován ve všech meridiánech, je-li vykorigován v hlavních řezech.

Jsou-li splněny předchozí vztahy, pak obrazy dalekého předmětu v obou hlavních řezech leží na sítnici. Přesto však nelze tvrdit, že takto vykorigované oko je rovnocenné s emmetropickým nebo neastigmatickým okem. Lze např. snadno dokázat, že velikost obrazu u takto vykorigovaného oka nebude ve všech

meridiánech stejná. Podle (8.6.1) platí pro velikost obrazu y'_y resp. y'_z v obou hlavních meridiánech

$$y'_y = \omega \frac{1 + R_y \sigma}{R_y + D_y} \qquad y'_z = \omega \frac{1 + R_z \sigma}{R_z + D_z} \quad .$$

Je-li astigmatismus způsoben pouze rohovkou, pak podle (11.2.1) platí

$$D_y - D_z = 0{,}9\, A_r \quad .$$

Dále můžeme psát

$$R_z - R_y = A_r \quad .$$

A odtud odečtením prvního vztahu od druhého

$$R_z + D_z = 0{,}1\, A_r + R_y + D_y \doteq R_y + D_y \quad ,$$

takže

$$\frac{y'_z}{y'_y} = \frac{1 + R_z \sigma}{1 + R_y \sigma} = \frac{1 + (A_r + R_y)\sigma}{1 + R_y \sigma} = 1 + \frac{A_r \sigma}{1 + R_y \sigma} =$$

$$\doteq 1 + A_r \sigma \,.\, (1 - R_y \sigma) \doteq 1 + A_r \sigma \quad .$$

Pro $\sigma = 1{,}3 \,.\, 10^{-2}$ m a $A_r = 5$ dioptrií odtud vychází

$$\frac{y'_z}{y'_y} = 1 + 5 \,.\, 1{,}3.10^{-2} = 1{,}065 \quad .$$

To znamená, že obraz bude ve směru menší lámavosti větší přibližně o 7 %.

11.8) Akomodace oka s korigovaným astigmatismem.

Jestliže akomodace změní celkový astigmatismus oka, pak oko při akomodaci přestává být vykorigované. Jestliže astigmatismus oka je způsoben pouze rohovkou, pak korekce oka nezůstane rovněž přesně při akomodaci dodržena.
Z odst. 8.7 je známo, že korekční brýlové sklo zobrazí blízký předmět, ležící ve vzdálenosti p měřené od předmětového hlavního bodu, do vzdálenosti p', pro jejíž vergenci X' platí

$$X' = \frac{1 + 2R\sigma + R \,.\, p}{p - R\sigma^2} \quad .$$

Zanedbáme-li σ^2 , můžeme předchozí vztah psát zjednodušeně

$$X' = R + \frac{1 + 2 R \delta'}{p} = R + X + 2 R X \delta' .$$

Aplikujme tento výsledek na oba hlavní řezy oka a dostaneme

$$X'_y = R_y + X + 2 R_y . X \delta'$$

$$X'_z = R_z + X + 2 R_z . X \delta' .$$

Odečtením obou vztahů plyne dále

$$X'_z - X'_y = (R_z - R_y) . (1 + 2 X \delta') = A_c (1 + 2 X \delta') .$$

Je tedy vidět, že obrazy předmětu s vergencí $X = \frac{1}{p}$ neleží ve stejné vzdálenosti jako příslušné fokály. Pro $X = -4$ dioptrie a $\delta' = 13.10^{-3}$ m z předchozího vztahu totiž plyne

$$X'_z - X'_y = A_c . (1 - 2.4.13.10^{-3}) = A_c - 0{,}104 . A_c .$$

Tedy v daném případě je chyba způsobená při akomodaci rovna $\frac{A_c}{10}$, což není zanedbatelná hodnota.

11.9) Brýlová skla sloužící ke korekci osového astigmatismu oka

Young ukázal, že astigmatismus oka je odstranitelný sférickým sklem, jehož optická osa se vhodně skloní vzhledem k optické ose oka.

V praksi se však užívá ke korekci astigmatismu brýlových skel, jejichž jedna plocha tvoří astigmatický dioptr. V roce 1813 zavedli Gallond a Chamblant válcová skla, která byla používána ke korekci astigmatismu od poloviny 19.století. Teprve koncem tohoto století se objevují skla torická.

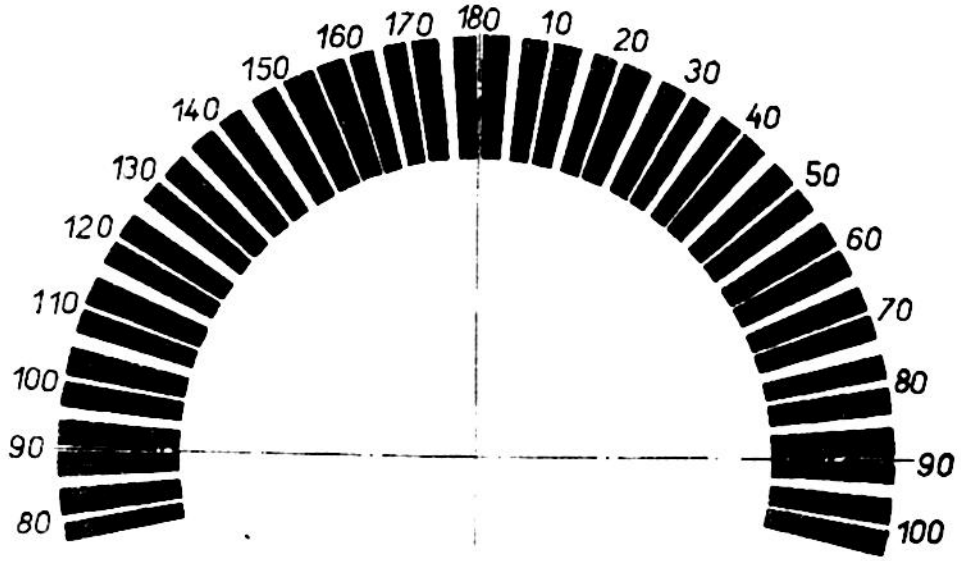
Potřebné lámavosti korekčních brýlových skel, o které je třeba korigovat astigmatické oko v jeho hlavních směrech, se určí buď oftalmometry nebo nejčastěji zkušebními brýlovými skly. V druhém případě se používá buď dvou válcových zkušebních brýlových skel, nebo válcové a sférické zkušební brýlové sklo.

Protože hlavní směry oka nejsou vždy orientovány tak, že jeden z nich je svislý a druhý vodorovný, nýbrž že bývají často natočeny, i když jsou přitom vzájemně kolmé, je nutné vždy určit též směr hlavních řezů. Proto na válcových zkušebních brýlových sklech bývá vyznačen směr jeho geometrické osy.

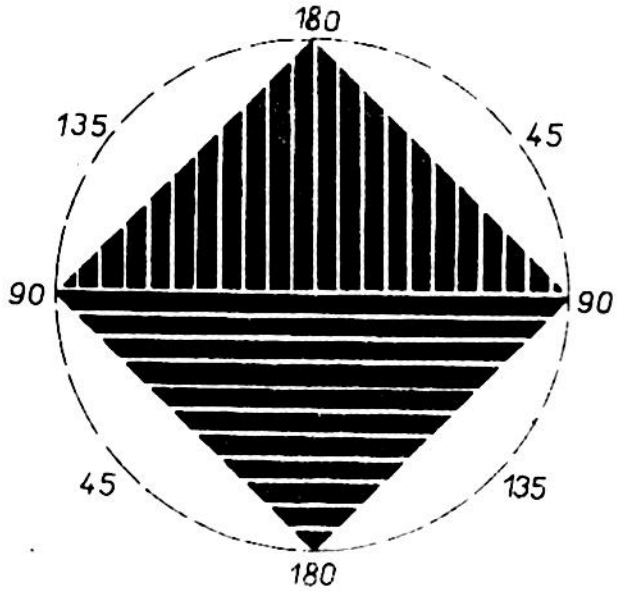
Hlavní směry astigmatického oka se předběžně určí pomocí vhodných testů. Jak již bylo dříve uvedeno, jsou tyto testy založeny na skutečnosti, že

astigmatickému oku se nejeví černé čáry zaujímající různé radiální směry stejně jasné (černé nebo šedé).

V podstatě se k tomuto účelu používá dvou druhů testů znázorněných na obr. 11.9.1 a 11.9.2. V prvním případě jsou rozmístěny dvojice černých čar radiálně po obvodu kruhu v intervalech 10°. Při určování směrů hlavních řezů se hledá dvojice čar, která se jeví nejtmavší, a dvojice čar, která se jeví nejsvětlejší. Obě tyto dvojice leží na průměrech vzájemně kolmých.



Obr. 11.9.1 Test k určování hlavních směrů astigmatického oka



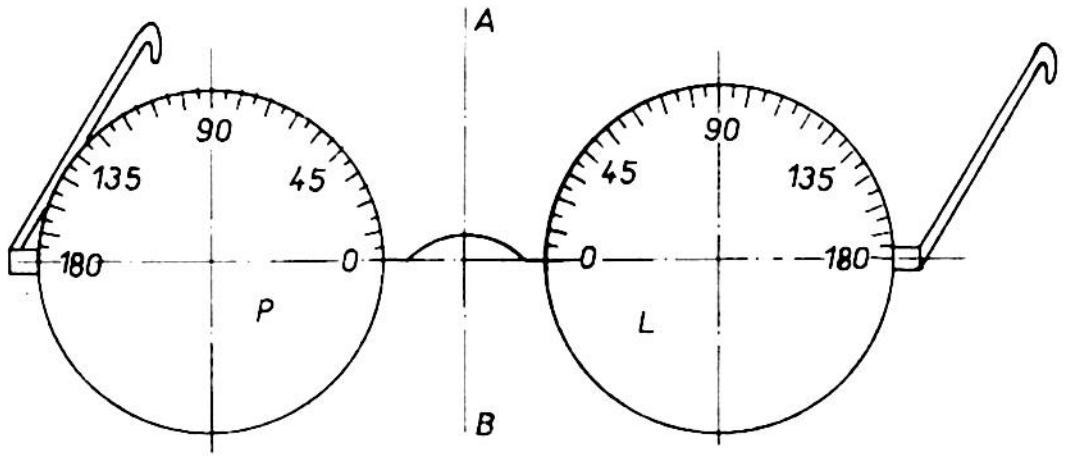
Obr. 11.9.2 Test k určování hlavních směrů astigmatického oka

V druhém případě obsahuje test dvě soustavy vzájemně rovnoběžných čar, jejichž směry jsou na sebe kolmé. Tyto soustavy čar vyplňují čtverec, který je vepsán do kružnice nesoucí stupnici dělenou po 5°. Při hledání hlavních směrů astigmatického oka se tento test natáčí kolem svého středu tak dlouho, až radiálně probíhající soustavu čar vidí oko nejjasněji. Tím určíme jeden z obou hlavních směrů.

Když jsou takto předběžně určeny hlavní směry, je možno přikročit k určení příslušných lámavostí. Obyčejně se to provádí zkušebními brýlovými skly. Tato skla se vkládají do zkušebních brýlových obrub. Aby bylo možno umístit válcová skla v těchto obrubách tak, aby osa

příslušného válce se shodovala s hlavním směrem, je nutno opatřit obruby kruhovou dělenou stupnicí.

Aby směr osy - hlavního směru mohl být udáván jednotně, bylo třeba sjednotit příslušnou souřadnou soustavu. Směr hlavního řezu se v některých případech měřil od vodorovné, jindy od svislé osy. Proto na kongresu oftalmologů v Neapoli, konaném v roce 1909 bylo na návrh amerického lékaře H. Knappa schváleno tzv. mezinárodní schéma, znázorněné na obr. 11.9.3.



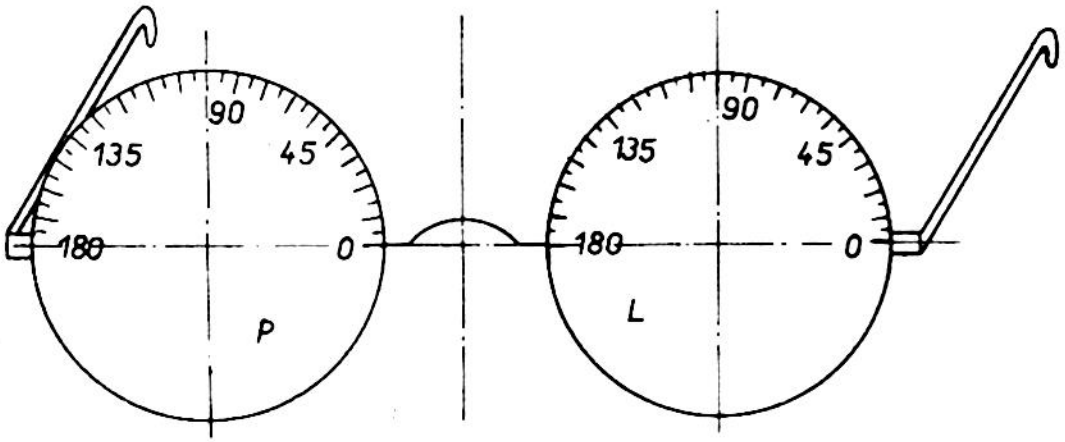
Obr. 11.9.3 Mezinárodní schema pro označení směru osy válce brýlových skel.

Toto schema má jednu výhodu, že obě jeho stupnice mají nulu na nosní straně a jsou tedy souměrné vzhledem k přímce $\overline{AB}$. H. Knapp totiž zjistil, že asi 86 % lidí s astigmatickým zrakem má válcové osy umístěny souměrně k přímce $\overline{AB}$. Je-li např. směr osy válce na levém oku např. 40°, je přibližně i na pravém oku příslušný úhel válcové osy roven 40°. Tím se přirozeně podstatně zjednodušil zápis astigmatismu obou očí.

Tato výhoda nevyvážila však řadu jiných technických nedostatků, takže se dnes tohoto schema již nepoužívá. Proto bylo později dohodnuto mezinárodně nové schema, zvané "Tabo" nebo "Oka". Nula příslušných kruhových stupnic je opět umístěna na vodorovném průměru, avšak na rozdíl od předchozího schéma leží u obou očí vpravo, pozorujeme-li brýle ze strany přicházejícího světla. Číslování obou stupnic tedy roste ve směru proti pohybu hodinových ručiček, jak je to vidět na obr. 11.9.4.

Poznámka: Tabo ~ Technischer Ausschuss für Brillen - Optik

Oka ~ Ophthalmologen Kongress Amsterodam



Obr. 11.9.4 Schema Tabo (Oka) pro označení směru osy válce brýlových skel

Astigmatismus oka se pak určí tak, že do zkušebních brýlových obrub, které jsou opatřeny kruhovou stupnicí podle Tabo-schema, se vkládají vhodná válcová brýlová skla, jejichž osy jsou vzájemně kolmé, nebo sférické brýlové sklo s jedním sklem válcovým. Při vykorigování zkoušeného oka se odečte poloha osy válce na příslušných stupnicích.

Předpokládejme, že určování astigmatismu se provádí pomocí sférického zkušebního brýlového skla, jehož lámavost označme K, a válcového zkušebního brýlového skla, jehož lámavost označme V. Nechť δ značí úhel osy tohoto válce.

Předpokládejme dále, že zkoušením bylo zjištěno, že ke korekci astigmatismu oka je třeba sférické zkušební sklo o lámavosti K a válcové zkušební sklo o lámavosti V, přičemž jeho osa zaujímá směr δ. Tuto korekci pak zapisujeme takto:

$$K \text{ sph} \bigcirc V \text{ cyl Ax } . \delta$$

Např.

$$+ 5 \text{ dioptr. sph} \bigcirc - 0{,}75 \text{ dioptr. cyl. Ax. } 120^{\circ} .$$

Předchozí zápis je možno též provést takto:

$$\frac{K \text{ sph}}{V \text{ cyl Ax } \delta} \qquad \text{nebo} \qquad K \text{ sph} / V \text{ cyl. Ax } . \delta .$$

V našich dalších úvahách budeme zápis psát takto:

$$K \text{ kul.} \bigcirc V \text{ vál. osa } \delta$$

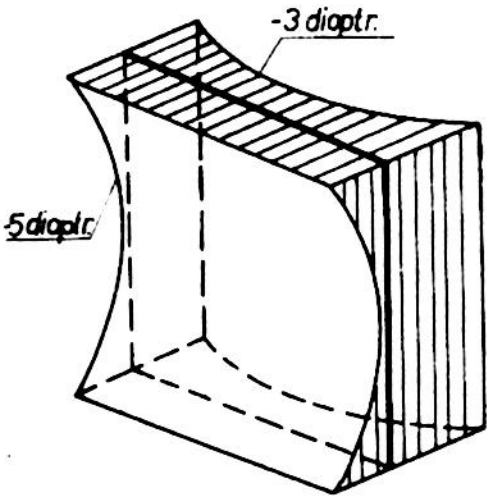
Všimněme si nyní, jakými brýlovými skly je možno daný astigmatismus korigovat.

Uvažujme oko zatížené složeným krátkozrakým astigmatismem. Nechť např. korekce tohoto oka ve svislém směru vyžaduje korekční sklo o lámavosti - 5 dioptr. (aby byly vidět zřetelně vodorovné čáry vzdáleného testu) a nechť ve vodorovném směru vyžaduje korekční sklo o lámavosti - 3 dioptr. (aby byly zřetelně vidět svislé čáry téhož testu).

Tvar brýlového skla, které má tento astigmatismus korigovat, můžeme navrhnout několikerým způsobem:

a) První plocha korekčního brýlového skla bude válcová o lámavosti - 5 dioptrií s osou vodorovnou a druhá plocha bude tvořena rovněž válcem o lámavosti - 3 dioptr. s osou svislou. Příslušné korekční sklo bude mít tvar znázorněný na obr. 11.9.5.

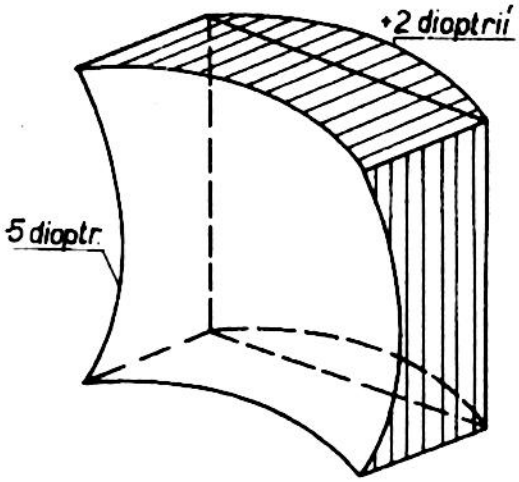
Je zřejmé, že toto korekční brýlové sklo bude mít ve svislém směru lámavost - 5 dioptrií, neboť zadní plocha má v tomto směru nulovou lámavost. Podobně tomu bude ve směru vodorovném, kde zase přední plocha se uplatní svou nulovou lámavostí a druhá plocha lámavostí - 3 dioptrie.



Obr. 11.9.5 Brýlové sklo s oběma plochami tvaru válce.

b) První plocha korekčního brýlového skla bude tvořena kulovou plochou o lámavosti - 5 dioptrií a druhá plocha válcem o lámavosti + 2 dioptrie a osou svislou. Korekční brýlové sklo bude mít tvar znázorněný na obr. 11.9.6.

Ve svislém směru, ve kterém má zadní válcová plocha nulovou lámavost, se projeví pouze lámavost přední kulové plochy hodnotou - 5 dioptrií, kdežto ve vodorovném směru se projeví lámavý účinek obou ploch a to hodnotou (-5) + (+2) = - 3 dioptr.

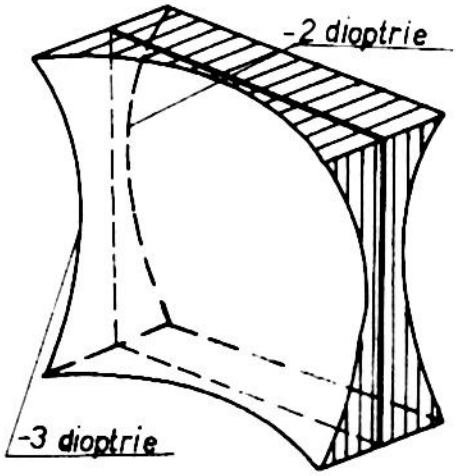


Obr. 11.9.6. Sferocylindrické korekční brýlové sklo

c) První plocha korekčního brýlového skla bude opět kulová o lámavosti - 3 dioptr. a druhá válcová o lámavosti - 2 dioptrie s vodorovnou osou. Korekční brýlové sklo bude mít tvar podle obr. 11.9.7.

Ve svislém směru se projeví lámavosti obou ploch hodnotou (-3) + (-2) = - 5 dioptrií a ve vodorovném pouze lámavost přední plochy, tj. - 3 dioptrie.

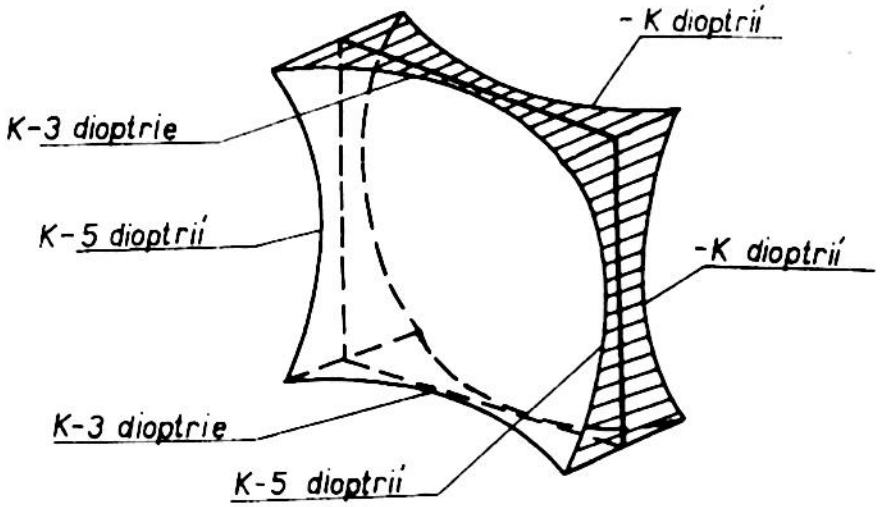
d) První plocha bude torická o lámavosti K-5 ve svislém a K-3 ve vodorovném směru a druhá plocha bude kulová o lámavosti - K dioptrií. Korekční brýlové sklo bude mít tvar znázorněný na obr. 11.9.8. Korekční brýlové sklo bude mít ve svislém směru lámavost rovnou součtu lámavosti torické plochy ve svislém směru a lámavosti druhé kulové plochy, tedy
(K-5) + (-K) =- 5 dioptrií a ve vodorovném směru obdobně
(K-3) + (-K) = - 3 dioptrie.



Obr. 11.9.7 Sferocylindrické korekční brýlové sklo

e) Konečně první plocha korekčního brýlového skla bude kulová o lámavosti + K dioptrií a druhá torická o lámavosti -(K+5) ve svislém a -(K+3) ve vodorovném směru. Tvar čočky je vidět na obr. 11.9.9.

Lámavost korekčního skla ve svislém směru bude rovna součtu lámavosti kulové plochy (+K) a torické plochy ve svislém směru - (K+5) dioptrií, tedy



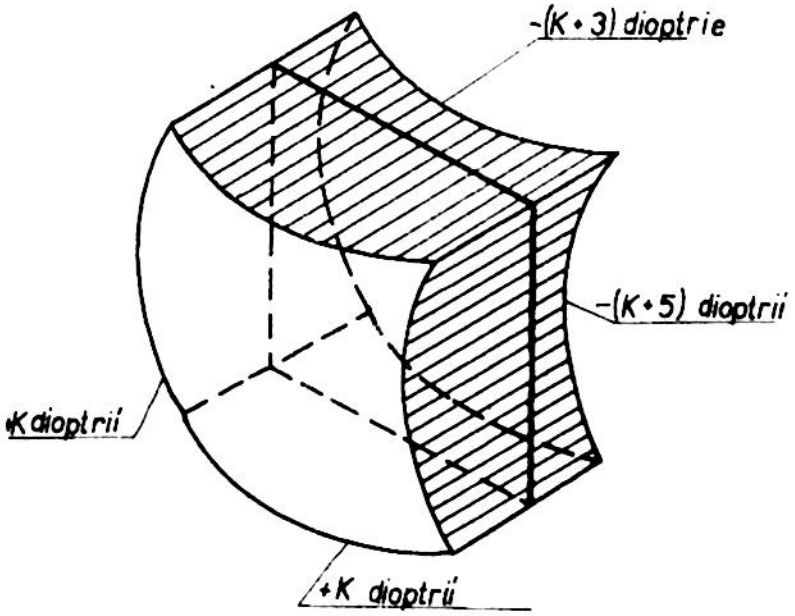
Obr. 11.9.8. Korekční brýlové sklo s toriokou a kulovou plochou

$$(+K) + \left[-(K+5)\right] = -5 \text{ dioptrií}$$

a ve vodorovném směru obdobně

$$(+K) + \left[-(K+3)\right] = -3 \text{ dioptrie.}$$

Všechna uvedená korekční brýlová skla mohou být umístěna před okem buď v poloze znázorněné na orb. 11.9.5 až 11.9.9 nebo v poloze, kterou dostaneme z předešlých, otočíme-li všechna tato brýlová skla kolem svislé osy o 180°. Nutno poznamenat, že ne všechna tato brýlová skla a ne všechny jejich orientace jsou stejně výhodné.



Obr. 11.9.9 Sférotorické korekční brýlové sklo

Z hlediska výrobního je třeba zdůraznit, že válcové plochy jsou výrobně nákladnější než kulové. Proto se v posledních létech vyrábí skla sferotorická.

Ukažme nyní, jak lze obecně přepsat jeden zápis v jiný.

a) Uvažujme např. zápis

K kul $\supset$ V vál. osa δ .

Tento zápis lze přepsat na druhý

K′ kul $\supset$ V′ vál. osa ($\delta + 90^\circ$)

na základě následující úvahy:

Podle daného zápisu má brýlové sklo ve směru δ lámavost

$$K' = K + V \qquad \text{a v kolmém směru}$$
$$K' + V' = K .$$

Řešením obou těchto rovnic dostaneme

$$V' = -V$$
$$K' = K + V .$$

Nejlepší kombinace je taková, u níž lámavosti obou jejich ploch (kulové a válcové) jsou opačného znaménka, neboť tato korekční skla je možno při oboustranné orientaci přivrátit dutou plochou k oku.

b) Uvažujme zápis

$$V_1 \text{ vál. osa } \delta \supset V_2 \text{ vál. osa } \delta + 90^\circ .$$

Tento zápis je možno převést na sferocylindrický dvojím způsobem:

$$K' = V_1 , \qquad V' = V_2 - V_1 ,$$

přičemž píšeme

$$K' \text{ kul. } \supset V' \text{ vál. osa } \delta \pm 90^\circ$$

nebo

$$K' = V_2 , \qquad V' = V_1 - V_2 ,$$

přičemž píšeme

$$K' \text{ kul.} \subset V' \text{ vál. osa } \delta .$$

c) Uvažujme zápis

$$K \text{ kul.} \subset V \text{ vál. osa } \delta .$$

Tento zápis můžeme převést na sferotorický dvojím způsobem, který pak píšeme ve tvaru

$$K' \text{kul.} \subset M + E ,$$

kde M resp. E značí lámavosti torické plochy ve směru δ resp. $\delta + 90^\circ$. Přitom v prvním případě platí pro směr δ

$$K' + E = K \qquad \text{a pro kolmý směr}$$
$$K' + M = K + V .$$

Odtud pak vychází

$$K' = K - E \tag{11.9.1}$$
$$M = V + E . \tag{11.9.2}$$

Podobně v druhém případě plyne pro směr δ

$$K' + M = K$$

a pro kolmý směr

$$K' + E = K + V .$$

Odtud pak

$$K' = K + V - E \tag{11.9.3}$$
$$M = E - V . \tag{11.9.4}$$

U korekčních brýlových skel s torickými plochami se volí buď křivost M nebo E jako báse. Přitom torická plocha může být umístěna jako první nebo jako druhá plocha, podle toho, volíme-li pro M resp. E hodnotu 6 dioptrií nebo - 6 dioptrií.

To znamená, že torická brýlová skla mohou mít celkem čtyři různé tvary:

a) Volme nejdříve ve směru δ

$$E = + 6 \text{ dioptrií.}$$

Potom podle (11.9.3) resp. (11.9.4) vychází

$$\left.\begin{aligned} K' &= K + V - E = K + V - 6 \\ M &= E - V = 6 - V \end{aligned}\right\} \qquad (11.9.5)$$

b) Volme nyní ve směru $\phi + 90$

$$E = + 6 \text{ dioptrií.}$$

Potom ze vztahů (11.9.1) a (11.9.2) vychází

$$\left.\begin{aligned} K' &= K - E = K - 6 \\ M &= V + E = V + 6 \end{aligned}\right\} \qquad (11.9.6)$$

c) Volme nyní ve směru ϕ

$$E = - 6 \text{ dioptrií.}$$

Potom ze vztahů (11.9.3) a (11.9.4) vychází

$$\left.\begin{aligned} K' &= K + V - E = K + V + 6 \\ M &= E - V = - 6 - V \end{aligned}\right\} \qquad (11.9.7)$$

d) Konečně volme ve směru $\phi + 90$

$$E = - 6 \text{ dioptrií.}$$

Potom ze vztahu (11.9.1) a (11.9.2) plyne

$$\left.\begin{aligned} K' &= K - E = K + 6 \\ M &= V + E = V - 6 \end{aligned}\right\} \qquad (11.9.8)$$

V posledních dvou případech je torická plocha umístěna jako druhá a je tedy korekční brýlové sklo dutou plochou přivráceno k oku.

Příklad:

1) Má se navrhnout brýlové korekční sklo, které by korigovalo oko podle zápisu

$$+ 1 \text{ kul. } \frown + 1{,}5 \text{ vál. osa } 20^{\circ}$$

V našem případě je

$$K = + 1 \text{ dioptrie}$$
$$V = + 1{,}5 \text{ dioptrií}$$

a tedy podle vztahů (11.9.5) až (11.9.8) vychází postupně:

a) $E = + 6$ dioptrií
$K' = K + V - 6 = 1 + 1{,}5 - 6 = - 3{,}5$ dioptrií
$M = 6 - V = 6 - 1{,}5 = + 4{,}5$ dioptrií

b) $E = + 6$ dioptrií
$K' = K - E = K - 6 = 1 - 6 = - 5$ dioptrií
$M = V + 6 = 1{,}5 + 6 = + 7{,}5$ dioptrií

c) $E = -6$ dioptrií
$K' = K + V + 6 = +8{,}5$ dioptrií
$M = -6 - V = -6 - 1{,}5 = -7{,}5$ dioptrie

d) $E = -6$ dioptrií
$K' = K + 6 = 1 + 6 = +7$ dioptrií
$M = V - 6 = 1{,}5 - 6 = -4{,}5$ dioptrie.

2) Má se navrhnout brýlové korekční sklo, které by korigovalo oko podle zápisu

$$-1{,}5 \text{ kul } \supset -2 \text{ vál. osa } 0^\circ .$$

V našem případě je

$K = -1{,}5$ dioptrie
$V = -2$ dioptrie,

a tedy podle vztahů (11.9.5) až (11.9.8) vychází postupně:

a) $E = +6$ dioptrií
$K' = K + V - 6 = -1{,}5 - 2 - 6 = -9{,}5$ dioptrií
$M = 6 - V = 6 + 2 = +8$ dioptrií

b) $E = +6$ dioptrií
$K' = K - 6 = -1{,}5 - 6 = -7{,}5$ dioptrií
$M = V + 6 = -2 + 6 = +4$ dioptrie

c) $E = -6$ dioptrií
$K' = K + V + 6 = -1{,}5 - 2 + 6 = -2{,}5$ dioptrií
$M = -6 - V = -6 + 2 = -4$ dioptrie

d) $E = -6$ dioptrií
$K' = K + 6 = -1{,}5 + 6 = +4{,}5$ dioptrie
$M = V - 6 = -2 - 6 = -8$ dioptrií.

11.10) Obecně zkřížené válce

Při zkoušení astigmatických očí se často používá dvou plankonvexních válcových zkušebních skel, jejichž geometrické osy jsou vzájemně skloněny a které nahrazují soustavu sferocylindrickou.

Nechť $\overline{OA}$ resp. $\overline{OB}$ značí směry kolmé na geometrické osy těchto válcových ploch o lámavostech V_1 resp. V_2 a nechť dále δ_1 resp. δ_2 značí úhly, které svírají tyto směry s x-ovou osou.

Lámavost $V_{\textcircled{H}}$ v libovolném směru $\overline{OC}$ svírajícím s x-ovou osou úhel $\textcircled{H}$ je podle Eulerovy věty

$$V_{\textcircled{H}} = V_1 \cos^2 (\textcircled{H} - \delta_1) + V_2 \cos^2 (\textcircled{H} - \delta_2)$$

nebo píšeme-li

$$\alpha_1 = \textcircled{H} - \phi_1 \ , \quad \text{resp.} \quad \alpha_2 = \textcircled{H} - \phi_2$$

$$V_{\textcircled{H}} = V_1 \cos^2 \alpha_1 + V_2 \cos^2 \alpha_2 \ .$$

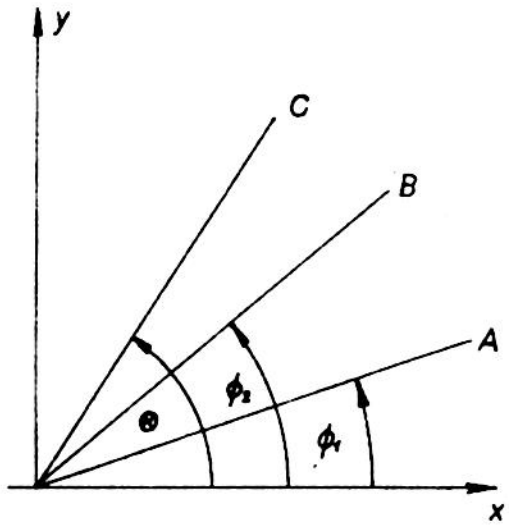
Podobně pro lámavost $V_{\textcircled{H}+90}$ ve směru kolmém $\phi + 90^\circ$ platí

$$V_{\textcircled{H}+90} = V_1 \sin^2 \alpha_1 + V_2 \sin^2 \alpha_2 \ .$$

Nahraďme tedy tyto dvě válcové plochy plochou kulovou o lámavosti K a válcovou o lámavosti V . Potom můžeme např. psát

$$V_{\textcircled{H}} = K + V = V_1 \cos^2 \alpha_1 + V_2 \cos^2 \alpha_2$$

$$V_{\textcircled{H}+90} = K = V_1 \sin^2 \alpha_1 + V_2 \sin^2 \alpha_2 \ .$$



Obr. 11.10.1 K problému obecně skloněných válcových čoček

Sečtením a odečtením předchozích vztahů dostaneme pak

$$2K + V = V_1 (\cos^2 \alpha_1 + \sin^2 \alpha_1) + V_2 (\cos^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_2) = V_1 + V_2 \qquad (11.10.1)$$

$$V = V_1 (\cos^2 \alpha_1 - \sin^2 \alpha_1) + V_2 (\cos^2 \alpha_2 - \sin^2 \alpha_2) =$$

$$= V_1 \cos 2\alpha_1 + V_2 \cos 2\alpha_2 \ . \qquad (11.10.2)$$

Protože lámavost $V_{\textcircled{H}} = K + V$ je maximální, musí být $\frac{d V_{\textcircled{H}}}{d \textcircled{H}} = 0$.

Můžeme tedy psát

$$\frac{d V_{\textcircled{H}}}{d \textcircled{H}} = - 2V_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 - 2V_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 =$$

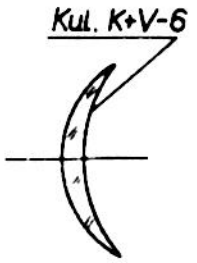
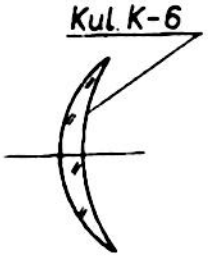
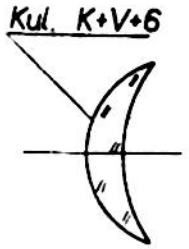
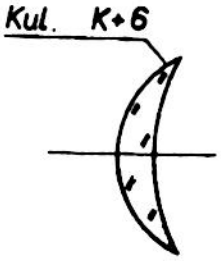
$$= - V_1 \sin 2\alpha_1 - V_2 \sin 2\alpha_2 = 0 \ . \qquad (11.10.3)$$

Zdvojmocněním (11.10.2) a (11.10.3) a sečtením dostaneme

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos 2 (\alpha_1 - \alpha_2) =$$

$$= V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos 2 (\alpha_2 - \alpha_1) \ . \qquad (11.10.4)$$

Tab. 11.9.1

Poř. čís.	První plocha torická		Druhá pl. kulová	První pl. kulová	Druhá plocha torická		Tvar čočky
	E	M	K´	K´	E	M	
1	6	K+V-6	6-V	-	-	-	
2	6	V+6	K-6	-	-	-	
3	-	---	-	K+V+6	- 6	-6-V	
4	-	---	-	K+6	- 6	V-6	

Tab. 11.9.1 Obsahuje přehled všech možných řešení korekčního skla s torickou plochou a jejich příslušný tvar

1212-5083

Z (11.10.1) plyne pomocí (11.10.4)

$$K = \frac{V_1 + V_2 \mp V}{2} = \frac{V_1 + V_2 \mp \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos^2 (\alpha_2 - \alpha_1)}}{2} \qquad (11.10.5)$$

Ze vztahu (11.10.3) plyne, nahradíme-li α_1 resp. α_2 jejich původními hodnotami

$$V_1 (\sin 2 \textcircled{H} \cdot \cos 2 \phi_1 - \cos 2 \textcircled{H} \sin 2 \phi_1) +$$
$$V_2 (\sin 2 \textcircled{H} \cos 2 \phi_2 - \cos 2 \textcircled{H} \sin 2 \phi) = 0 .$$

Dělíme-li poslední rovnici $\cos 2 \textcircled{H}$, dostaneme dále

$$\operatorname{tg} 2 \textcircled{H} = \frac{V_1 \sin 2 \phi_1 + V_2 \sin 2 \phi_2}{V_1 \cos 2 \phi_1 + V_2 \cos 2 \phi_2} . \qquad (11.10.6)$$

Ze vztahů (11.10.4), (11.10.5) a (11.10.6) můžeme snadno určit lámavost K a V příslušné kulové a válcové plochy a směr $\textcircled{H}$ maximální lámavosti K + V , tj. směr geometrické osy válcové plochy $\phi \pm 90^\circ$.

Použijeme-li pro V kladnou hodnotu (neboť rovnice /11.10.4/ má dvě řešení), dostaneme řešení odpovídající zápisu

K kul. ○ V vál. osa $\phi + 90^\circ$

a pro V záporné dostaneme řešení odpovídající zápisu

(K+V) kul. ○ - V vál. osa ϕ .

11.10.1) Grafické řešení problému dvou válcových ploch s obecně nakloněnými osami

Předchozí analytické řešení můžeme snadno nahradit grafickou metodou.

Při grafickém řešení předchozího problému postupujeme takto:

V pravoúhlé soustavě Oxy vytýčíme směr $2\phi_1$ a naneseme na něj délku $\overline{OA} = V_1$. V bodě A vytýčíme směr $\overline{AB}$ tak, aby svíral se směrem $\overline{OA}$ úhel $2 (\phi_2 - \phi_1)$ nebo s osou x-ovou úhel $2 \phi_2$ a vyneseme na něj délku $\overline{AB} = V_2$.

Potom úsečka $\overline{OB}$ je rovna lámavosti V válcové plochy a úhel směru $\overline{OB}$ s osou x-ovou je roven $2 \textcircled{H}$.

Z obr. 15.10.1.1 plyne

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos \left[2R - 2(\phi_2 - \phi_1)\right] = V_1^2 + V_2^2 + 2V_1V_2 \cos 2(\phi_2 - \phi_1)$$

a

$$\operatorname{tg} 2\,\textcircled{H} = \frac{V_1 \sin 2\delta_1 + V_2 \sin 2\delta_2}{V_1 \cos 2\delta_1 + V_2 \cos 2\delta_2} .$$

Oba tyto vztahy jsou v souhlase s (11.10.4) a (11.10.6), neboť

$$\cos 2(\delta_2 - \delta_1) =$$

$$= \cos 2\left[(\textcircled{H} - \alpha_1) - (\textcircled{H} - \alpha_2)\right] =$$

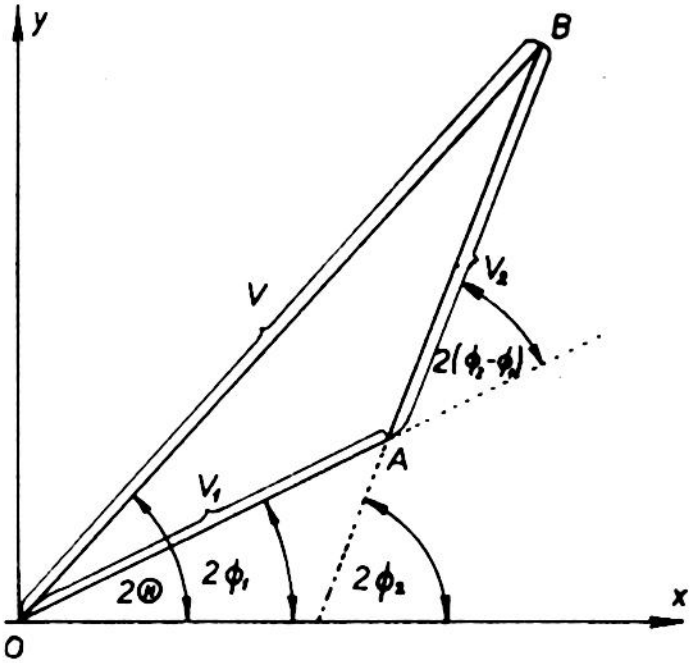
$$= \cos 2(\alpha_2 - \alpha_1) .$$

Vztahy (11.10.4) a (11.10.6) můžeme zjednodušit, volíme-li směr osy válcové plochy o lámavosti V_1 totožný se směrem osy x-ové. Potom podle obr. 11.10.1.2 vychází

$$\operatorname{tg} 2(\textcircled{H} - \delta_1) =$$

$$= \frac{V_2 \sin 2(\delta_2 - \delta_1)}{V_1 + V_2 \cos 2(\delta_2 - \delta_1)} ,$$

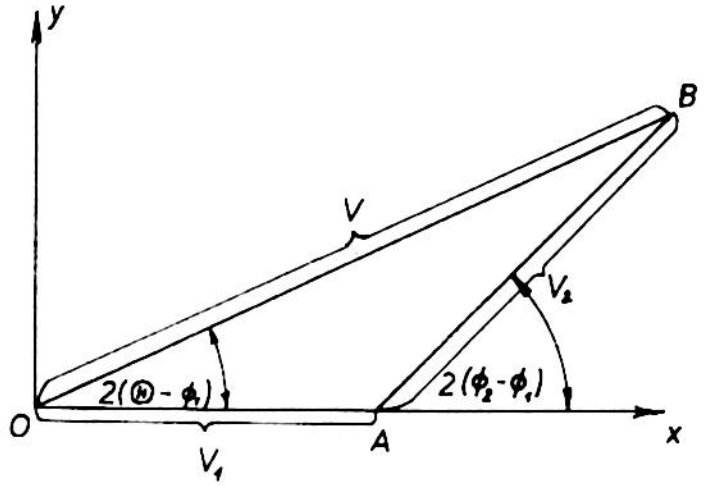
(11.10.1.1)



Obr. 11.10.1.1) Grafické řešení problému dvou obecně skloněných válcových ploch

a

$$V = \frac{V_1 + V_2 \cos 2(\delta_2 - \delta_1)}{\cos 2(\textcircled{H} - \delta_1)} . \qquad (11.10.1.2)$$



Obr. 11.10.1.2 K určení V a úhlu $(\textcircled{H} - \delta_1)$

V praksi se používá k vyčíslování vztahů 11.10.4 a 11.10.5 zvláštního logaritmického pravítka.

11.11) Nepravidelný astigmatismus

Nestejná lámavost oční čočky v různých meridiánech vyvolává dosti často nepravidelný astigmatismus, který nelze normálním způsobem vykorigovat. Tento astigmatismus někdy přejde v tzv. polyopii vyznačující se vícenásobným obrazem, která bývá příznakem začínajícího šedého zákalu. Vyjme-li se oční čočka, pak příslušné aphakické oko získává znovu pravidelný astigmatismus rohovky.

Jsou však též případy, kdy i rohovka vyvolává nepravidelný astigmatismus, např. v případech, kdy po zranění zůstává na rohovce trvalá jizva, nebo po napadení rohovky agresivní tekutinou, nebo často jako následek určitých nemocí, které způsobí deformaci rohovky (tzv. keratokona).

Nepravidelnost rohovky je možno odstranit transplantací, nebo tím, že nepravidelnost rohovky vyloučíme vodní immersí tak, že před rohovkou umístíme malou kyvetu, jejíž přední část je tvořena spojným brýlovým sklem, které nahrazuje vlastně rohovku. Tato tzv. hydrodiascopie se užívala v případech keratokony a stala se jakýmsi předchůdcem dnešních kontaktních brýlových skel.

Myšlenka kontaktních brýlových skel pochází z r. 1827 od J. Herschela a byla prakticky propracována A. Fickem (1888) a A. Müllerem (1899). Hlavní potíž kontaktních brýlových skel spočívá ve velké citlivosti rohovky, která nesnáší dotek. Proto kontaktní brýlové sklo musí být tak upraveno, aby se nedotýkalo rohovky a aby spočívalo na bělimě. Má tedy kontaktní sklo dvě části rohovkovou a bělimovou. Bělimová část je kryta víčkem a zajišťuje utěsnění, zatímco rohovková část je od rohovky oddělena vhodnou kapalinou. Tato skla sledují pohyb oka a jsou prakticky neviditelná.

Kontaktní brýlová skla se používají také v určitých zaměstnáních, kde není možno nosit brýle, jak je tomu ve sportu (lyžaření) nebo v divadelnictví apod.

První kontaktní brýlová skla byla zhotovována tak, že rohovková část byla tvořena kulovou kalotou omezenou plochami o témže poloměru křivosti (to znamená, že ve vzduchu by byla tato část afokální). Obdobně i bělimová část má kulovitý tvar. Tato skla byla zhotovována ze surového blokového skla normální technologií opracování skla. Prostor mezi rohovkou a kontaktním sklem se vyplňoval slanou vodou. Při vkládání těchto skel do oka se postupuje tak, že se dutá část naplní slanou vodou, načež se hlava skloní dopředu a sklo se vloží do oka, přičemž nutno dbát na to, aby v prostoru mezi kontaktním sklem a rohovkou se nevytvořily vzduchové bublinky.

Kulovitá bělimová část kontaktních skel špatně přiléhá k bělimě, jejíž tvar se poměrně značně odchyluje od koule. Z toho důvodu nemohla být nejstarší kontaktní brýlová skla na oku dlouho nasazena.

Velkého pokroku bylo dosaženo, když se začala nesferická bělimová část kontaktních brýlových skel zhotovovat foukáním.

Daleko lepších výsledků se dosáhlo odléváním kontaktních skel do forem získaných otiskem na každém příslušném oku. Tato skla velmi přesně přiléhala k bělimě. Otisky se zhotovovaly např. tak, že na zkoušené brýlové sklo se nanesla tenká vrstvička parafinu o velmi nízkém bodu tání, nebo podobného materiálu. Potom se na sklo, které se přiložilo k umrtvenému oku, přiložil teplý obkladek, který vyvolal změknutí parafinové vrstvičky a přesné rozlití po bělimě. Tím se získal přesný odlitek, aniž došlo k dotyku rohovky.

V současné době se zhotovují kontaktní brýlová skla z umělé hmoty - organického skla. Jsou nerozbitelná, lehčí než skleněná a lépe odolávají očním výměškům.

Tato "skla" je možno rozdělit do dvou skupin, podle toho, je-li jejich adhese pneumatická nebo kapilární. V prvním případě se vytváří mezi rohovkou a kontaktním sklem mezera o tloušťce 1 - 2 mm, která se vyplní umělou tekutinou. Síly, které přidržují kontaktní sklo k oku, jsou mimo síly víček vyvolány atmosferickým tlakem. V druhém případě je tloušťka mezery mezi rohovkou a kontaktním sklem rovna pouze zlomku milimetru a je vyplněna slzní kapalinou. Adhese skla je vyvolána kapilárními silami.

První druh kontaktních skel se snadno zhotoví, vyžaduje však umělou tekutinu, jejíž složení je do jisté míry závislé na člověkovi, který je nosí. Místo kyslíčník uhličitý uvolňovaný rohovkou, mění s časem složení tekutiny.

Druhý druh kontaktních skel se nesnadněji nasazuje. V případě, že rohovka není přesně kulová, mění se tloušťka příslušné mezery od místa k místu, což vede ke vzniku vzduchových bublin, které se hromadí v horní části, avšak obyčejně nepůsobí žádných zvláštních potíží. Bělimová část, která dokonale přilnává, umožňuje vlivem své poréznosti dostatečnou cirkulaci slzné kapaliny, takže kapalina se obnovuje a oko může "dýchat".

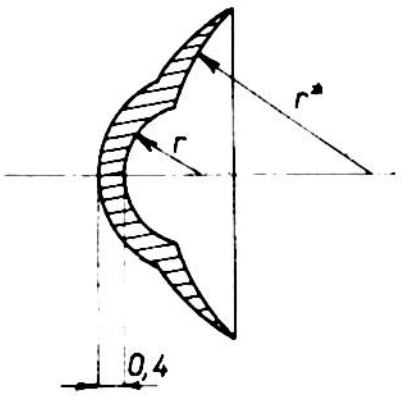
Návrh kontaktních skel z hlediska korekce se provede podle stejných vztahů platících pro normální sférická korekční skla s tím rozdílem, že v těchto vztazích se dosadí za d hodnota řádu 2 mm nebo i nula. Např. vztah pro velikost obrazu na sítnici oka korigovaného kontaktním sklem nabude tvaru

$$\frac{y'}{y'_0} = \frac{D}{R + D} ,$$

kde D značí lámavost oka a R příslušnou ametropii. Odtud je vidět, že např. obraz krátkozrakého oka bude mnohem větší (obraz dalekozrakého oka mnohem menší) než obraz téhož předmětu, který se vytvoří na sítnici emmetropického oka téže lámavosti D. Dále se např. ukazuje, že akomodace oka korigovaného kontaktním sklem bude stejná jako akomodace emmetropického oka.

Tvar dnes běžně vyráběných kontaktních brýlových skel je vidět na obr. 11.11.1.

Kontaktní brýlová skla jsou vyráběna tak, že poloměr r rohovkové části je odstupňován po 0,5 mm, zatímco druhá část, spočívající na bělimě, se zhotovuje s třemi poloměry křivosti, r = 11, 12 a 13 mm.



Obr. 11.11.1 Tvar kontaktního brýlového skla.

II. část

OKO V POHYBU A JEHO KOREKCE

12) Očnicová dutina a oční svaly

Některá zvířata, zvláště plazi, někteří ptáci, malí savci aj. mají pevné oči vzhledem k hlavě, zatímco oko člověka je velmi pohyblivé. Jeho spojité pohyby přivádějí na žlutou skvrnu obrazy těch předmětů, jejichž obrazy objevující se na okraji zorného pole vzbuzují naši pozornost. Důležitosti těchto pohybů si již v roce 1604 všímal Kepler v souvislosti s okem umístěným za přístrojem.

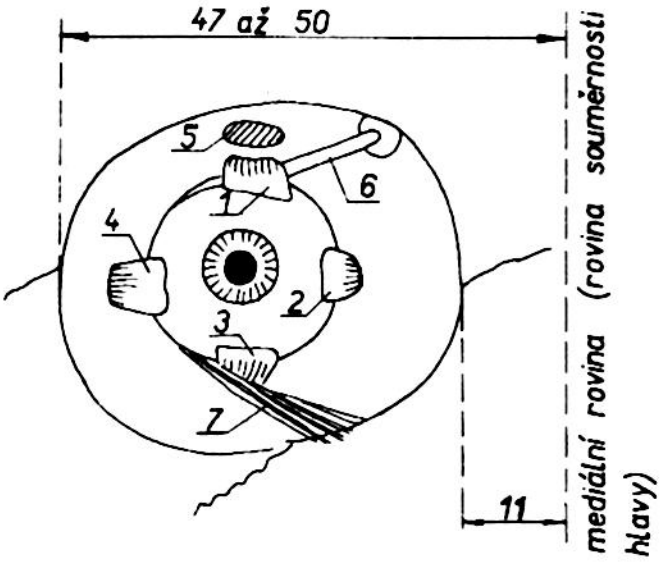
V této části skripta si všimneme blíže pohybových zákonů očí a důsledků, které z nich vyplývají pro korekci oka.

12.1) Očnicová dutina (orbita)

Očnicová dutina slouží k uložení a ochraně oční bulvy. Každá oční dutina je tvořena sedmi kostmi vzájemně spojenými švy. Tyto kosti tvoří stěny čtyřboké pyramidy, jejíž základna je tvořena očnicovým vchodem a jejíž vrchol leží u kanálku, kterým prochází k mozku oční nerv.

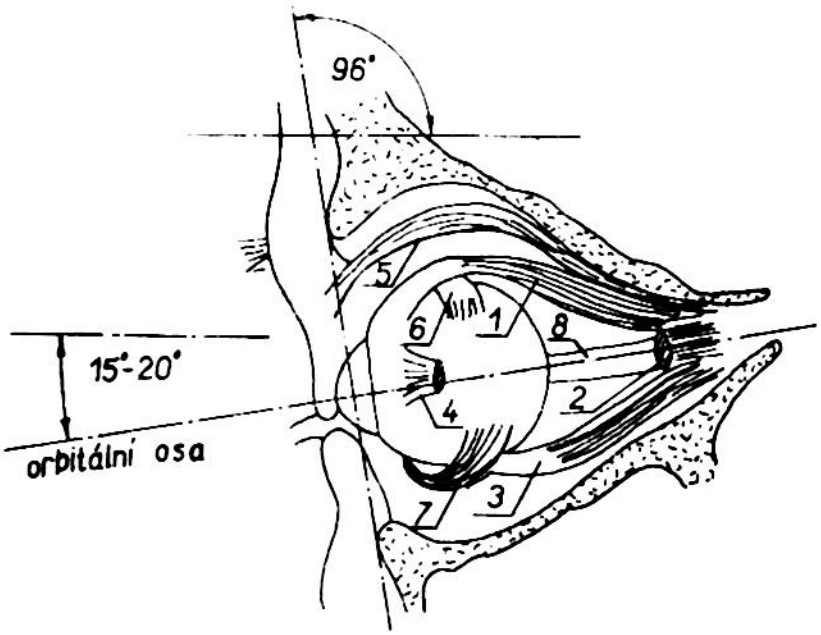
Očnicový vchod má tvar oválný až rovnoběžníkový. Jeho rozměry jsou uvedeny na obr. 12.1.1.

Osa oční pyramidy spojující její vrchol se středem základny (očnicového vchodu) je asi 45 mm dlouhá a svírá



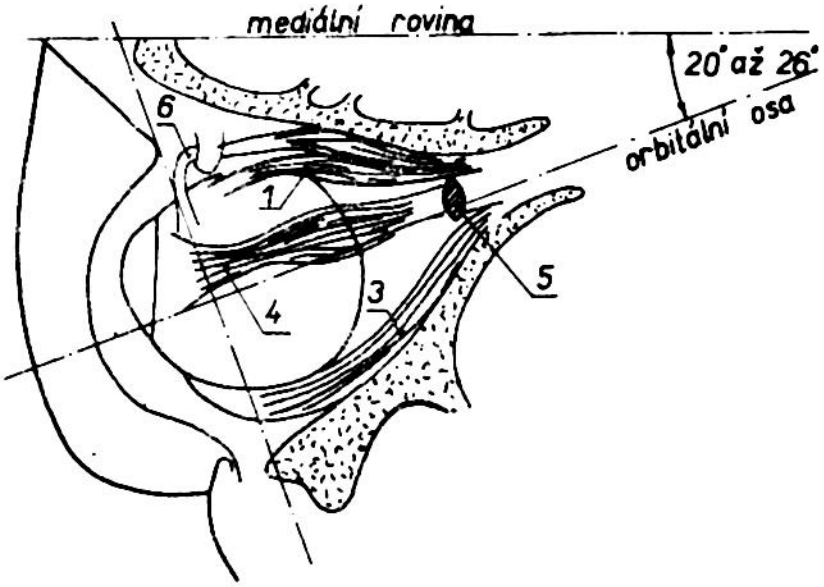
Obr. 12.1.1 Pohled očnicovým vchodem do orbity. Přitom značí 1 horní přímý sval, 2 přímý sval nosní, 3 dolní přímý sval a 4 spánkový přímý sval, 5 řez zvedačem víčka, 6 velký (horní) šikmý sval a 7 malý (dolní) šikmý sval (obliquus bulbi).

s mediální rovinou úhel 20 - 26°. Neleží ve vodorovné rovině, nýbrž přední částí se sklání dolů o 15 až 20°. Z toho plyne, že optická osa oka je vychýlena ve stejném směru jako osa orbitální, pokud je hlava vzpřímena. Osa vidění je vodorovná a rovnoběžná s mediální rovinou. Přitom však výchylky orbitální osy jsou asi 6-kráte větší než výchylky optické osy. Uložení oční koule v očnicové dutině je patrno z obr. 12.1.2 a 12.1.3.



Obr. 12.1.2 Svislý řez levou očnicovou dutinou. Význam jednotlivých očíslovaných detailů souhlasí s obr. 12.1.1. Pouze 8 značí oční nerv a proto je sval 4 přerušen, aby byl vidět.

U vrcholu očnicové dutiny je kanál o průměru 5 mm a délce 10 mm, kterým prochází oční nerv a tepna. Několik dalších otvorů ve stěnách očnicové dutiny slouží k přívodu nervů a cév.



Obr. 12.1.3 Horizontální řez levou očnicovou dutinou. Význam očíslovaných detailů souhlasí s obr. 12.1.1 a 12.1.2.

Očnicová dutina je vyložena tenkou pevnou blanou, zvanou periorbita, která obsahuje svalová vlákna a která může regulovat cirkulaci krve v očnicové dutině. Napětím příslušného svalu je vytlačen obsah očnicové dutiny dopředu. Při poruše míšního

centra, ze kterého jsou svaly inervovány, zapadá oční koule hlouběji do očnicové dutiny.

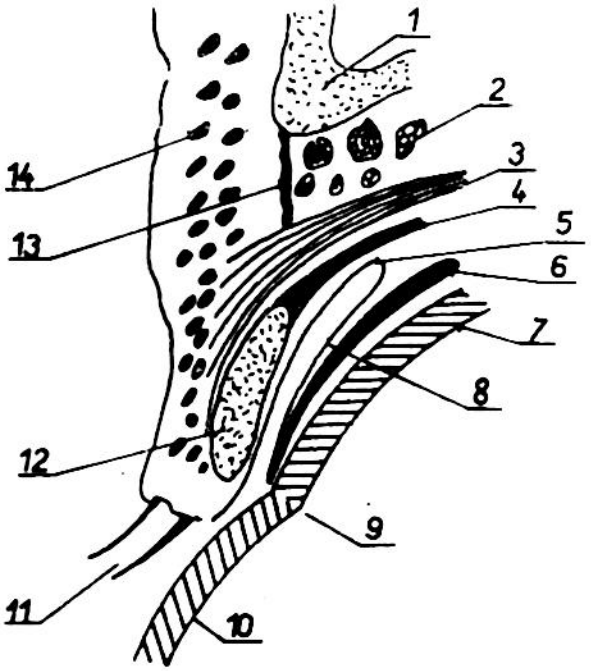
12.2) Víčka (palpebrae)

Očnicové dutiny jsou vpředu uzavřeny víčky, která přidržují oko, ochraňují je a rozdělují slznou tekutinu po celé rohovce. Jsou tvořeny horní a dolní částí, které jsou od sebe odděleny rýhou. Jsou-li víčka sevřena, dotýkají se svými okraji, jsou-li otevřena, odhalí přední část očního bulbu. Při okrajích se obě víčka setkávají a tvoří oční koutky.

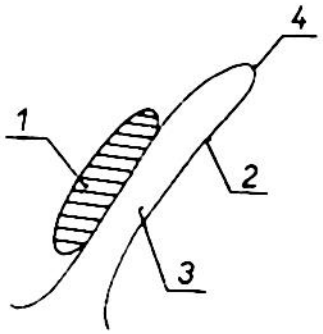
Víčka mají tloušťku asi 3 mm, která se směrem k okraji očnicového vstupu zvětšuje až na dvojnásobek. Skládají se z:

a) velmi jemné, lehce posunlivé, pigmentované kůže, na níž jsou drobné chloupky,
b) tenké podkožní tkáně,
c) svalové vrstvičky, zvané víčkový sval.
   Je tvořen svalovými vlákny, která jako celek tvoří svěrač, který je součástí pohybového ústrojí víček. Vlákna blízká k okraji (řasa) víček ovládají malé pohyby víček, zatímco vlákna bližší k očnicovému vstupu vyvolávají velké pohyby.
d) volné spojivkové tkáně,
e) vazivové přepážky - septum orbitale - napnuté v očnicovém vstupu, která ve víčcích přechází v tuhé vazivové tarsální ploténky, z nichž horní část je tvaru půlměsíčku, uprostřed asi 10 mm vysokého, zatímco dolní srpkovitá část má výšku jen 5 mm. V očních koutcích se tarsální ploténky stýkají a přecházejí ve vláknité vazivo, kterým se upevňují v očnicovém vchodu. Toto vláknité vazivo se štěpí na dva pruhy, které objímají slzný vak. V tarsálních ploténkách jsou velké mazové žlázy, které vyúsťují blíže spojivkového okraje víček a vyměšují mastný sekret, který maství okraje víček a zabraňuje překapávání slz. V horním víčku je těchto žláz 30 - 40, v dolním méně 20 - 30.
f) Spojivka, která má charakter sliznice a přechází z víček volným ohbím (fornixem) na bulbus, kde pokrývá bělimu až k prstenci tvořícímu rozhraní mezi bělimou a rohovkou a její epithel pokračuje až na přední rohovkovou plochu. Celá spojivka je kryta válcovitým epithelem, který je na víčku nízký, na fornixu je vícevrstevnatý a při hraničním prstenci se mění v epithel dlaždicový. Spojivka má barvu sytě růžovou a je s víčky spojena jen v rozsahu tarsálních plotének a s očním bulbem při hraničním prstenci. Tvarem tvoří spojivka jakousi štěrbinu (slepou uličku), do které se otvírají vývody slzných žláz a odvádějí sem slzy.

V koutku na nosní straně tvoří spojivka řasu tvaru půlměsíce, která je zbytkem třetího víčka (tzv. mžurky), se kterým se setkáváme u plazů a ptáků.



Obr. 12.2.1 Svislý řez horním víčkem - 1 okraj kosti očnicové dutiny, 2 tuk, 3 sval zvedající horní víčko, 4 Müllerův sval, 5 ohbí spojivky (fornix), 6 oční pouzdro, 7 bělima, 8 spojivka, 9 prstenec mezi rohovkou a bělimou, 10 rohovka, 11 řasy, 12 tarsální ploténky, 13 vazivová přepážka (septum orbitale), 14 pohybové svaly víček.



Obr. 12.2.2 Spojivková štěrbina - 1 tarsální ploténka, 2 spojivka, 3 spojivková štěrbina a 4 spojivkové ohbí (fornix).

V tzv. slzném jezírku, které tvoří část víčkové štěrbiny na nosní straně, se spojivka vyklenuje v růžový hrbolček 4-5 mm dlouhý a 2-3 mm vysoký, zvaný slzná jahůdka. Na jejím povrchu jsou malé chloupky s poměrně velkými mazovými žlázkami, jejichž náplň sliznicí prosvítá žlutou barvou.

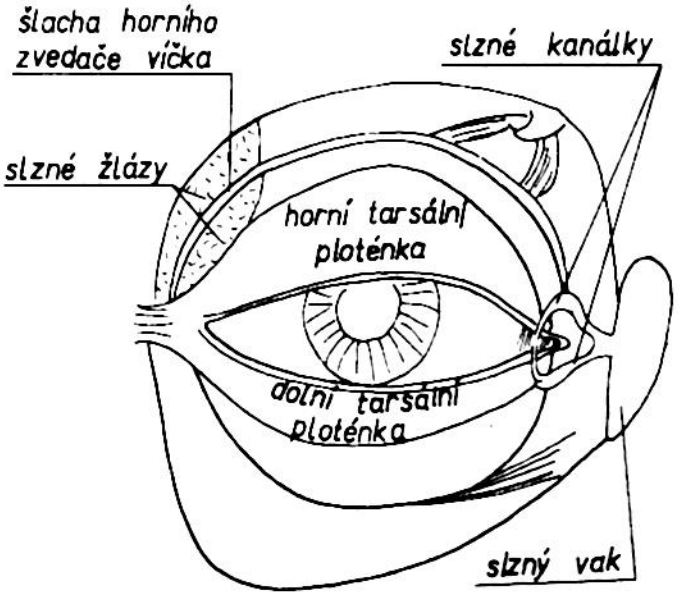
Ve spojivkovém ohbí (fornixu) jsou rozmístěny drobné Krausovy slzné žlázky a při horním obvodu tarsálních plotének jsou malé Wolfringovy žlázky, které vyměšují do spojivkové štěrbiny nepatrné množství hlenovitého sekretu.

6 až 7 mm od vnitřního spojení obou víček nachází se na volném okraji každého víčka tzv. lacrimální bod, tvořící maličký slzný otvůrek na kuželovitých hrbolcích víčkového okraje. Tyto otvůrky tvoří vyústění tenkých, úhlovitě zalomených kanálků, které probíhají pod kůží víček a buď samostatně nebo společným ústím se otvírají do slzného vaku, jak je to vidět na obr. 12.2.3.

Za lacrimálními body se nacházejí řasy, jichž je na horním víčku něco přes sto o délce asi 10 mm a na dolním víčku o něco méně a kratších. Řasy horních víček jsou ohnuty směrem nahoru a obrácené řasy dolních víček směrem dolů. Jejich základna je velmi bohatě inervována, takže jsou velmi citlivé. Příslušné žlázy zajišťují neustále jejich povrchovou ochranu.

12.3) Slzný aparát

Slzná kapalina je vyměšována slznou žlázou (glandula lacrimalis), jejíž objem je roven objemu menší mandle. Je umístěna v blízkosti očního bulbu při vnějším obvodu stropu očnicové dutiny, jak je to vidět na obr. 12.2.3.



Obr. 12.2.3 Schema slzného aparátu.

Slzná kapalina je odváděna kratičkými a tenkými kanálky do ohbí spojivkové štěrbiny, odkud jsou mrkáním roztírány po povrchu bulbu a odváděny trojbokým kanálkem, který vznikne při sevření víček mezi povrchem bulbu a víčky, do slzného jezírka, kde začínají odvodné slzné cesty lacrimálními body. Slzný vak, kam je slzná kapalina přiváděna, je spojen kanálkem (slzovodem) asi 25 mm dlouhým s dolním nosním průduchem.

Slzná kapalina obsahuje NaCl (asi 7 - 8 g/litr), albumin, protein a speciální enzymy, které působí proti spojivkovým mikrobům.

Samovolné vyměšování slzné kapaliny je omezeno na několik kapek za hodinu. Během noci je vyměšování slzné tekutiny úplně přerušeno. Toto spontání vyměšování úplně dostačuje, aby se na očním bulbu stále udržovala tenká vrstvička tekutiny, která jednak vyplňuje nerovnosti rohovkového epithelu, vyživuje ho a zabezpečuje jeho vysýchání.

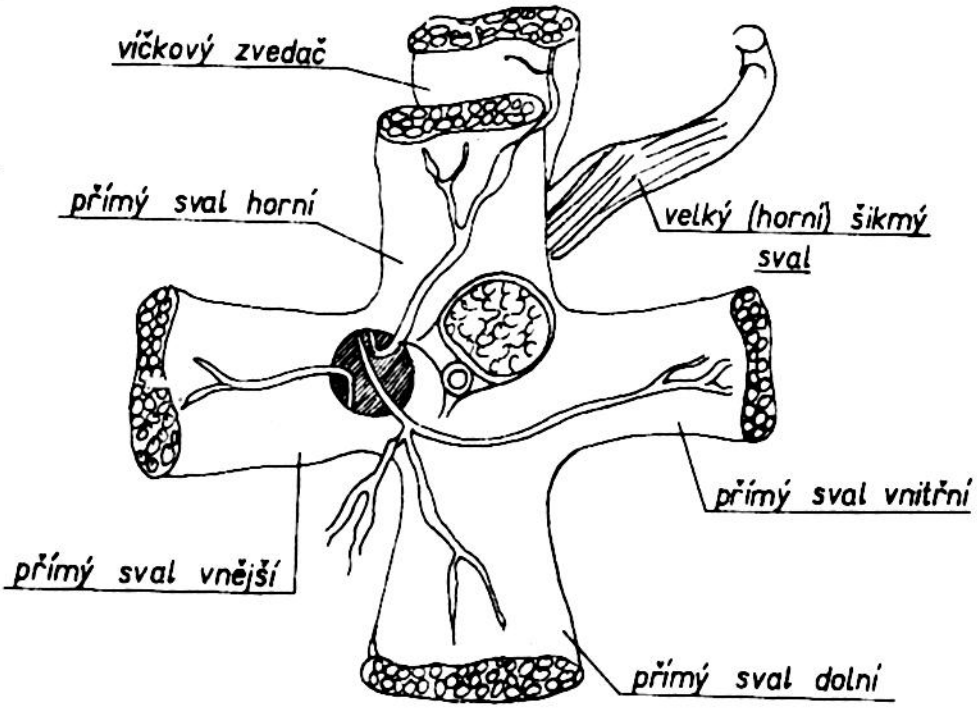
Reflexní pláč, který je vyvolán podrážděním rohovky nebo spojivky, je jednostranný, zatímco pláč psychický je oboustranný.

12.4) Svaly očnicové dutiny

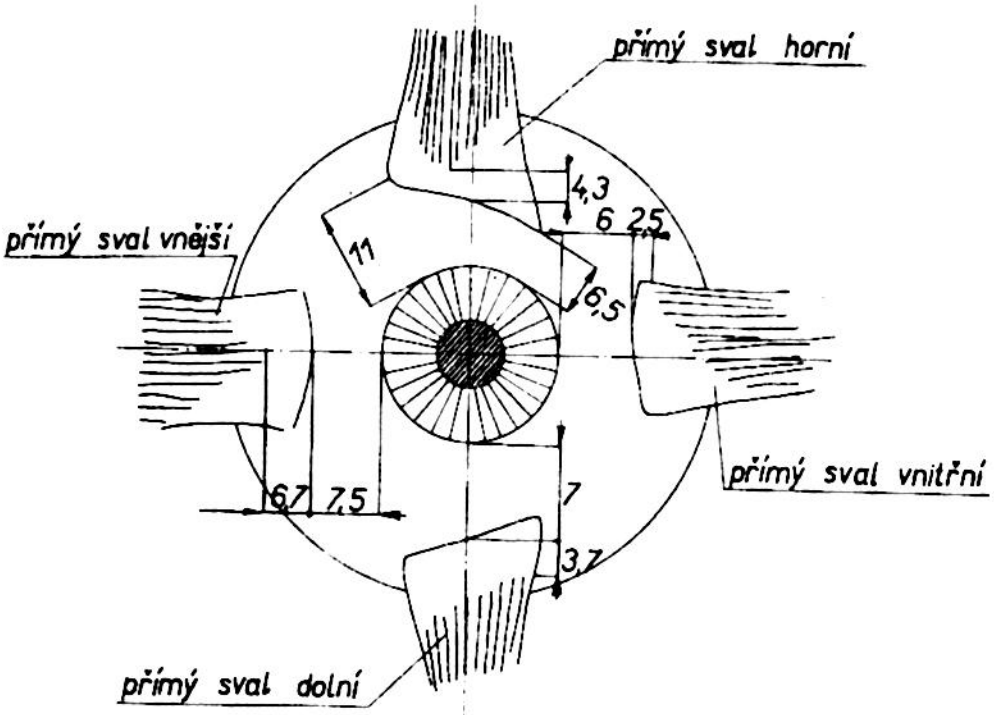
V oční dutině je 7 štíhlých, příčně pruhovaných svalů tvaru stuhy. Čtyři z nich jsou přímé, horní, dolní, vnitřní a vnější, dva šikmé, velký a malý šikmý sval a konečně sedmý je tvořen zvedačem horního víčka. Tyto svaly zajišťují dokonalou pohyblivost očního bulbu a horního víčka. Šest z těchto sedmi svalů s vyjimkou malého (dolního) šikmého svalu, začínají ve vrcholu očnicové dutiny ze společné kruhovité šlachy zvané Zinnova, jak je to vidět na obr. 12.4.1.

Přímé svaly, dlouhé asi 40 mm jsou zakončeny blanitě rozšířenými šlachami, které se připojují na bělimu poněkud před rovníkem očního bulbu, jak je to s příslušnými rozměry znázorněno na obr.12.4.2.

Vlákna šlach jednotlivých svalů se vějířovitě rozšiřují a pronikají tangenciálně mezi meridiánová vlákna bělimy. Střed úponu horního přímého svalu je poněkud posunut směrem spánkovým, zatímco ostatní úpony jsou centrické.



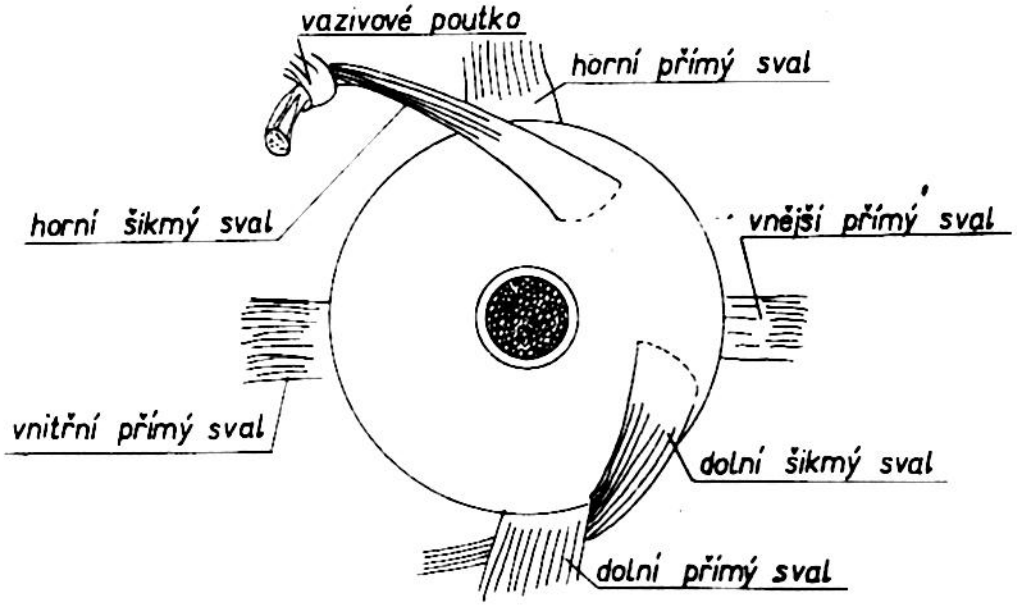
Obr. 12.4.1 Schema začátků svalů očnicové dutiny



Obr. 12.4.2 Schema připojení přímých svalů na oční bulbus.

1212-5083

Připojení horního šikmého a dolního šikmého svalu je vidět z obr. 12.4.3. Horní šikmý sval vychází ze společné Zinnovy šlachy k vazivovému poutku umístěnému při nosní straně stropu očnicového otvoru a příslušná šlacha se pak stáčí dozadu k zadnímu kvadrantu očního bulbu, kde se na něj napojuje. Dolní šikmý sval na rozdíl od předchozích svalů začíná na dolní stěně očnicové dutiny, probíhá po této stěně šikmo nazad směrem ke spánku a napojuje se na oční bulbus v zadním dolním kvadrantu.



Obr. 12.4.3 Schema napojení šikmých svalů na oční bulbus

Zvedač horního víčka probíhá od společné Zinnovy šlachy mezi tarsální ploténkou a přepážkou a napojuje se na víčko mezi kůží a tarsální ploténkou, jak je to naznačeno na obr. 12.2.1.

Struktura všech těchto svalů je zvláštní. Příslušná vlákna jsou velmi jemná o průměru asi 20 mikronů, což je nejmenší hodnota svalových vláken u člověka. Vláknové svazky jsou jen slabě spojeny a velmi bohatě inervovány, čímž se dosahuje velmi jemného odstupňování ve stažitelnosti.

12.5) Oční pouzdro

Oční pouzdro je tvořeno tuhou vazivovou blánou, která vytváří pouzdro kolem celého očního bulbu mimo rohovky. V místě rovníku, kde je nejtlustší, dosahuje jeho tloušťka 3 mm a odtud se oběma směry ztenčuje. V zadní části přechází plynule ve vazivový obal zrakového svazku a v místě, kde prochází tento svazek stěnou očního bulbu, srůstá s bělimou. Spojivka je od očního pouzdra oddělena volnou vrstvou tkáně, která ve vzdálenosti 3 mm od rohovky mizí.

Volné prostory očnicové dutiny mezi svaly, cévami a nervy jsou vyplněny tukem, který tvoří měkkou podušku pro oční bulbus. Očnicový tuk se udržuje i při dlouhém hladovění a mizí teprve v nejkrajnějším stadiu zhubnutí, po spotřebování všech tukových zásob.

12.5) Teorie působení svalů oční dutiny na oko

Je-li oko nepohyblivé, je jen ve zdánlivém klidu. Svaly oční dutiny jsou v neustálé aktivitě, zvané tonus. Jedná se o jakési střední smršťování všech svalů, které je neunavující a jehož původ je reflexivní. O těchto plynulých pohybech je možno se přesvědčit různými metodami. Můžeme pomocí speciálních přístrojů přiložených na víčka slyšet šum, který je způsobován těmito nepřetržitými pohyby svalů. Z toho plyne, že i když je oko v klidu, je neustále taženo čtyřmi přímými svaly do očnicové dutiny, zatímco šikmé svaly táhnou oko vpřed silou asi pětkrát menší. Všech šest svalů táhne společně oko směrem k nosu. Rovnovážná poloha oka je pak určena výslednicí těchto sil, tlakem očního pouzdra, tuků tvořících výplň očnicové dutiny a tlaku obou víček.

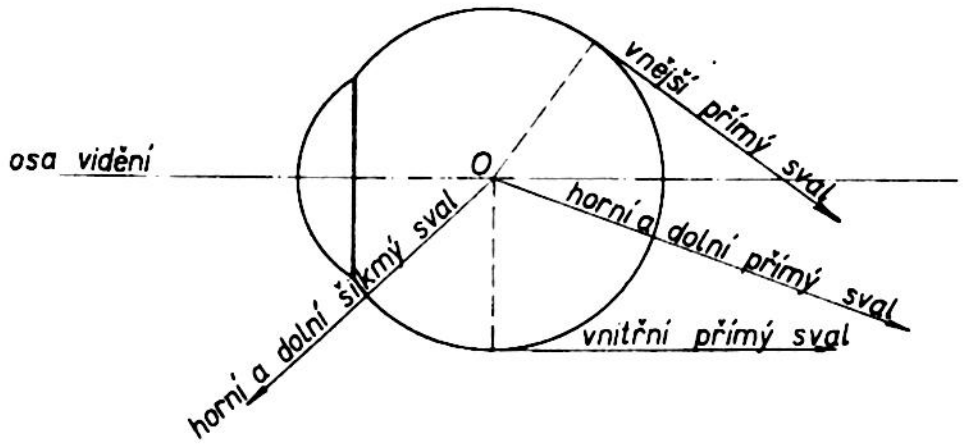
Uvažujme nyní určitou rovnovážnou polohu oka a předpokládejme, že jeden z uvažovaných šesti svalů změní poněkud své napětí. Okamžitě se poruší rovnovážný stav a oko dozná malý pohyb.

Z kinematiky tuhého tělesa je známo, že každý elementární posuv tělesa je možno rozložit na translaci a rotaci. V případě oka je situace taková, že translace je prakticky zanedbatelná.

Z hlediska vidění je nejzajímavější taková rovnovážná poloha, při které vzpřímená hlava přirozeně pozoruje. V této poloze jsou osy vidění horizontální a rovnoběžné s mediální rovinou.

Každou elementární rotaci kolem osy je možno rozložit na tři rotace kolem os vzájemně kolmých. V předchozí rovnovážné poloze bude jedna z těchto tří os svislá. Odpovídající rotace se nazývá addukce, jestliže se pupila pohybuje směrem k nosu, nebo abdukce, pohybuje-li se pupila opačným směrem. Druhá z uvažovaných tří os je horizontální a kolmá na osu pozorování (vidění). Příslušná rotace se nazývá elevací nebo depresí. Třetí osa má směr osy vidění a příslušná rotace se nazývá girací.

Abychom mohli určit vliv zkrácení libovolného z uvažovaných šesti svalů na polohu oka, zjednodušeme si celý problém tak, že budeme předpokládat, že bělima tvoří dokonalou kouli o středu O, že připojení jednotlivých svalů na oční bulbus je bodové a je umístěno v rovnovážné poloze na koncích dvou horizontálních poloměrů v případě vnějšího a vnitřního přímého svalu a na koncích svislého průměru v případě horního a dolního přímého svalu a obou svalů šikmých. Předpokládejme dále, že směry působení sil příslušných k jednotlivým svalům jsou horizontální a že svírají se směrem osy vidění úhly vyznačené na



Obr. 12.5.1 Schema směrů působení sil jednotlivých očnicových svalů při pohledu shora.

obr.12.5.1. Volme dále bod O jako počátek pravoúhlé soustavy tvořené uvažovanými třemi osami rotace.

Za těchto velmi hrubých domněnek dostaneme následující výsledky:

a) Vnější přímý sval vyvolává pouze abdukci. Pro porovnání účinků jednotlivých svalů označíme moment vzhledem k svislé ose (tj. součin síly svalu a ramene OE) za jedničkový.
b) Vnitřní přímý sval vyvolává pouze addukci s jedničkovým momentem.
c) Horní přímý sval táhne pod úhlem 25° vzhledem ke směru osy vidění. Proto příslušná síla F jím vyvolaná se může rozložit na složku rovnoběžnou se směrem osy vidění o velikosti $F \cdot \cos 25^\circ = 0{,}9\ F$ a složku kolmou k ose vidění velikosti $F \cdot \sin 25^\circ = 0{,}4\ F$. Tedy horní přímý sval vyvolává jednak elevaci momentem velikosti 0,9 a jednak giraci momentem velikosti 0,4.
d) Podobně přímý sval dolní vyvolává depresi momentem 0,9 a giraci momentem 0,4.
e) Šikmé svaly působí ve směru, který svírá s osou vidění úhel 50°, takže horní (velký) šikmý sval vyvolává depresi momentem 0,65 a giraci momentem 0,8.
f) Malý šikmý sval vyvolává obdobně elevaci momentem 0,65 a giraci momentem 0,8.

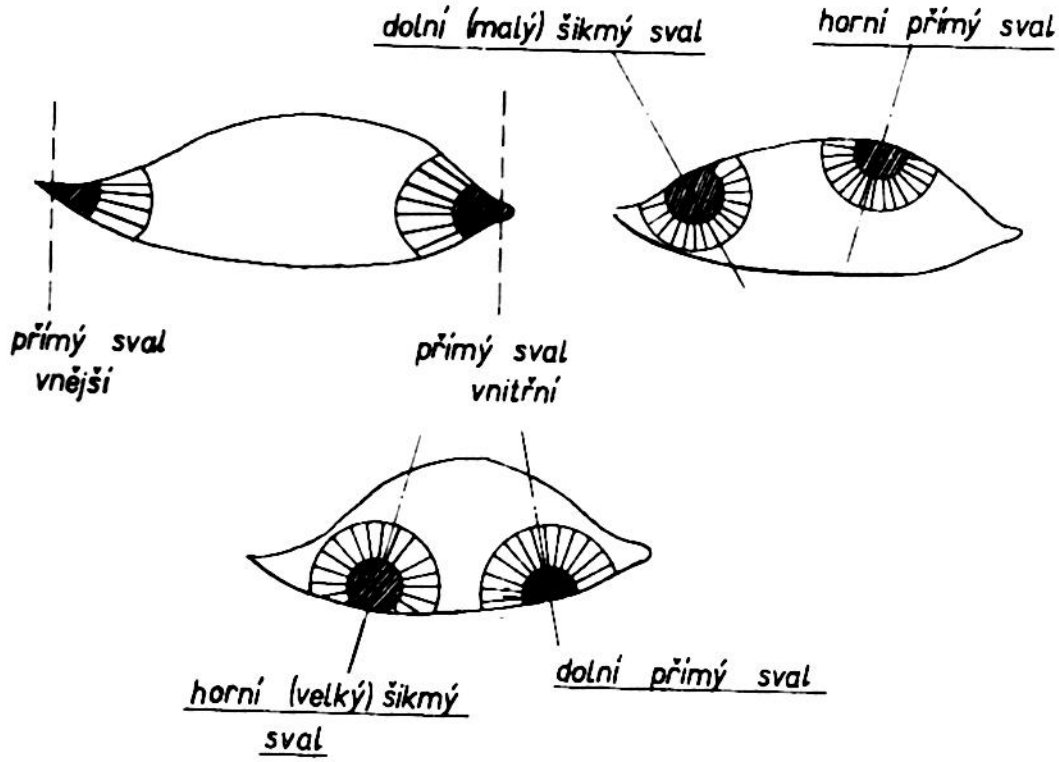
Vyjdeme-li z těchto pravidel, můžeme jednoduchým způsobem určit podíl každého z uvažovaných 6 svalů na libovolném elementárním pohybu oka vzhledem k libovolné rovnovážné poloze.

Vycházíme-li např. již z rovnovážné polohy, která odpovídá šikmému pozorování, můžeme použít rovněž předchozí metody s tím rozdílem, že musíme uvažovat jiné úhly, které svírají směry sil svalů s osou vidění. Je-li např. oko v abdukci 25°, pak oba šikmé svaly nevyvolávají giraci.

Naznačené schema pro určování vlivů jednotlivých svalů na polohu oka se však poměrně odchyluje od skutečnosti. Je to mimo jiné vyvoláno např. tím, že spojení jednotlivých svalů s očním bulbem není bodové a není umístěno v uvažovaných bodech. Působiště sil jednotlivých svalů nutno totiž klást do dotyko-

vých bodů, ve kterých se jednotlivé svaly oddělují od očního bulbu. Tyto body však nesplývají s místy upevnění svalů. Proto např. horní a dolní přímý sval vyvolává též malou addukci a šikmé svaly nepatrnou abdukci.

Proto vliv jednotlivých isolovaných svalů je možno charakterizovat schematem vyjádřeným graficky na obr. 12.5.2.



Obr. 12.5.2 Schema vlivu zkracování jednotlivých očnicových svalů na polohu oka.

Nutno poznamenat, že pro polohy odpovídající šikmému pozorování způsobuje vějířovité upevnění svalů zvýšení všech hodnot vzhledem k hodnotám teoretickým. Obecně je možno říci, že v oblasti od přirozené polohy očí (kdy je hlava vzpřímená a oči pozorují před sebe) 20° na obě strany dochází jen k nepatrným změnám teoretických složek, zatímco elevační a depresivní efekt šikmých svalů roste s addukcí.

Další potíže jsou způsobovány tím, že nikdy nepůsobí jednotlivé svaly isolovaně, nýbrž v párech (vnější - vnitřní přímý sval, horní-dolní přímý sval, horní-dolní šikmý sval) a obyčejně všechny páry působí současně.

12.6) Pohyby víček

Každý pohyb oka je doprovázen pohybem víček. Zvlášť je tato souhra patrná, když pozorujeme směrem vzhůru; víčka se zvednou v tomtéž okamžiku, kdy začneme pozorovat ve změněném směru. Toto vzájemné spojení pohybů víček a oka je tak silné a bezprostřední, že se člověku jen s obtížemi podaří zvednout zrak k obloze při zavřených očích. Horní víčko je zvedáno dříve zmíněným zvedačem; příslušný pohyb je usnadňován pomocí frontálního svalu víčka. Dolní víčko se přitom současně vyklene poněkud dopředu.

Pozorujeme-li směrem dolů, zvedač horního víčka se uvolní a horní víčko se posune směrem dolů, obdobně jako dolní víčko stažením šlachy dolního přímého svalu.

Stupeň otevření víčkové štěrbiny je závislý na svěrači, který působí proti zvedači. Horní víčko je větší a je také pohyblivější než dolní, které se neposouvá více než 2 - 3 mm.

13) Geometrie očních pohybů

13.1) Střed otáčení oka

Budeme-li chápat oční bulbus jako tuhé těleso, pak jeho poloha vzhledem k hlavě je určena 6-ti parametry, nebo jinak řečeno, oko má 6 stupňů volnosti. Ve skutečnosti se počet stupňů volnosti u oka redukuje pouze na tři (rotace kolem tří os), neboť můžeme předpokládat, že u oka existuje jeden pevný bod, jehož poloha vzhledem k hlavě se nemění žádnými pohyby oka. Tento bod se nazývá středem otáčení oka.

Z předchozích úvah je jasné, že oko je uloženo v pyramidální očnicové dutině tak, že není možné předem předvídat existenci pevného bodu, kolem kterého se oko otáčí. Je zřejmé, že existence pevného středu otáčení oka je výsledkem poměrně přesné koordinace vlivů, které udržují oko v rovnováze, tj. svalů, očního pouzdra, tukového polštáře, víček apod.

Existenci středu otáčení předvídal již Kepler, avšak dokázal ji teprve v roce 1862 Donders, který měřil ve vodorovném směru průměr oční pupily, načež umístil před okem svislé vlákno a měřil úhel, o který se oko otočí, aby okraje pupily oka splynuly s tímto vláknem. Z těchto měření vyplynulo, že střed otáčení oka se v průměru nachází 13,5 mm za vrcholem rohovky emmetropického oka, zatímco u oka krátkozrakého je tato vzdálenost větší (až 16 mm) a u oka dalekozrakého menší.

Spojíme-li pozorovaný bod se středem otáčení oka, dostaneme tzv. osu pozorování. Nachází-li se pozorovaný bod daleko, pak osa pozorování splývá s osou vidění, která spojuje pozorovaný bod s předmětovým uzlovým bodem oka. Blíží-li se pozorovaný bod k oku, pak úhel γ , který svírá osa pozorování s optickou osou oka, je menší než úhel α , který svírá osa vidění s optickou osou oka.

Abychom mohli jednoznačně určovat polohu pozorovaného bodu, promítáme ho na kouli, jejíž střed splývá se středem otáčení oka. Jestliže oko neakomoduje, pak můžeme volit poloměr této koule rovný vzdálenosti vzdáleného bodu oka. U emmetropického oka se blíží tato vzdálenost nekonečně velké hodnotě.

Je-li hlava pevná, pak nemůžeme všechny body této koule pozorovat dostatečně zřetelně. Proto zavádíme pojem zorného pole pohybujícího se oka, které se rovná té části uvažované koule, jejíž body vidí oko při maximálním vychýlení ještě zřetelně. U většiny lidí dosahuje toto pole 30 - 35°, aniž by bylo nutno vynaložit zvláštního úsilí. Přitom za počátek se volí přirozená poloha oka, tj. při vzpřímené hlavě je osa pozorování vodorovná a rovnoběžná s mediální rovinou. Maximální hodnota tohoto zorného pole je asi 45° a dolním směrem až 50°. V dolní a nosní části je zorné pole vykrojeno tím, že je odstíněno nosem. Praxe ukazuje, že krátkozraké oko je obyčejně méně pohyblivé.

13.2) Dondersův zákon

Dondersovým zákonem označujeme skutečnost, že tři stupně volnosti oka vzhledem k jeho středu otáčení se vlastně redukují pouze na dva vzájemně nezávislé stupně.

Předpokládejme, že hlava zaujímá libovolnou pevnou polohu. Osa pozorování závisí pouze na poloze pozorovaného bodu, k jehož určení v zorném poli stačí pouze dva parametry. Teoreticky může však oko zaujmout nekonečně mnoho poloh vzhledem k téže ose pozorování, při čemž přechod z jedné polohy do druhé se uskutečňuje rotací kolem osy pozorování. Tato rotace tvoří třetí parametr. Podle Dondersova zákona je tento třetí parametr funkcí předchozích dvou. To znamená, že je-li dána osa pozorování, že je tím dána i poloha oka.

Ve skutečnosti Dondersův zákon se netýká než jen rovnovážných stavů. To znamená, že jestliže zrak přechází z jednoho bodu pozorování na druhý, oční bulbus osciluje kolem druhé osy pozorování určitou krátkou dobu, než se ustálí v rovnovážné poloze, která je určena Dondersovým zákonem.

Dondersův zákon je vlastně vyjádřením přesného funkčního spojení dříve zmíněných tří párů očních svalů. Existence tohoto vzájemného spojení je zřejmá, neboť je-li při určité poloze hlavy určena poloha oka bodem, který oko pozoruje, pak obrazy bodů ležících v sousedství tohoto bodu padají na tytéž elementy sítnice, ať bylo předchozí přemístění směru pozorování jakékoliv. Z to-

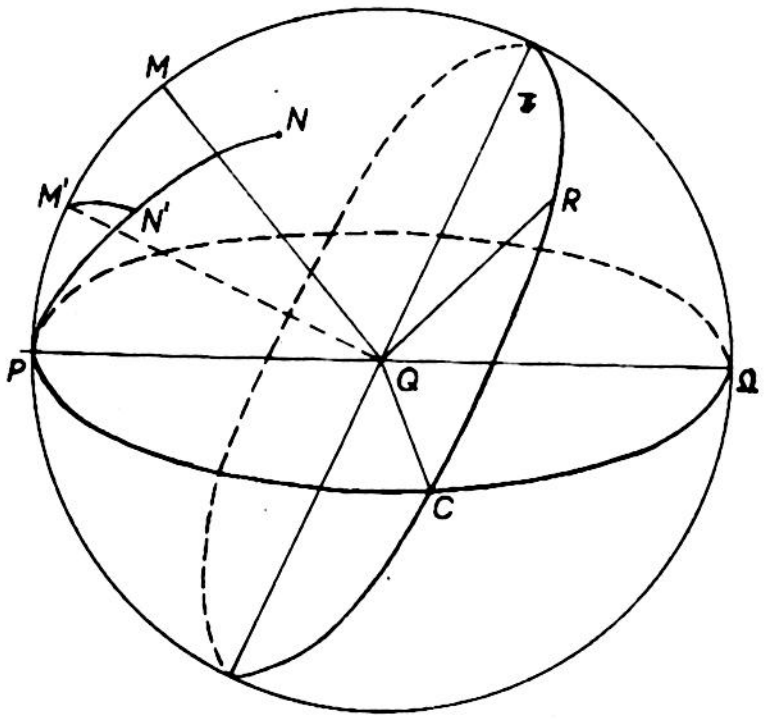
ho vyplývá velká jistota pro odhad polohy předmětů, i když se oči pohybují.

Dondersův zákon se reprodukuje s velkou přesností. Teoretická hranice je určena skutečnostmi danými fysiologií. Svaly jsou totiž tvořeny vlákny, u kterých existují pouze dva stavy, napětí a uvolnění. Délka svalu závisí na počtu najatých vláken, a počet možných délek svalu závisí tedy na počtu vláken. Uvážíme-li např., že horní (velký) šikmý sval oka obsahuje přibližně asi 2.000 vláknových jednotek, pak podle Röschе je možná reprodukce s přesností 20". Měření ukazují, že v praksi je tato reprodukce zajištěna s přesností 6´.

13.3) Zákon Listingův

Listingův zákon je vlastně upřesněním zákona Dondersova a umožňuje určení orientace oka pro každou osu pozorování.

Předpokládejme, že hlava pozorovatelova má určitou pevnou polohu. Pro každou takovou polohu hlavy existuje zvláštní osa pozorování $\overline{QP}$, zvaná primární (viz obr. 13.3.1), taková, že přejdeme-li od této osy $\overline{QP}$ k libovolné jiné $\overline{QM}$, zvané sekundární, pak konečná orientace oka je taková, jako kdyby oko vykonalo rotační pohyb kolem osy procházející bodem Q kolmo na rovinu PQM. To ovšem ještě neznamená, že přechází-li oko od pozorování bodu P k pozorování bodu M, že osa pozorování musí vykonat dráhu danou předchozí situací. Mezi body P a M existuje nekonečně mnoho různých cest, po kterých se může přechod uskutečnit. Podle Dondersova zákona končí všechny tyto cesty toutéž konečnou orientací oka. Tuto orientaci dovoluje Listingův zákon vypočítat.



Obr. 13.3.1 K vysvětlení Listingova zákona

Listingův zákon se velmi jednoduše interpretuje na kouli sorného pole. Přechod z primární polohy P do sekundární polohy M je ekvivalentní rotaci kolem osy $\overline{QC}$ kolmé na $\overline{QP}$ a $\overline{QM}$. Tato rotace je jednoznačně urče-

na obloukem $\overline{PM}$ hlavní kružnice (neboť tento oblouk určuje jak směr osy otáčení, tak i úhel otočení).

Představme si nyní, že s okem je spojena koule o stejném poloměru, jako má koule zorného pole. Je zřejmé, že při přechodu pozorování z bodu P na bod M, probíhajícím po hlavní kružnici $\overline{PM}$, bude klouzat pohyblivá koule spojená s okem po pevné kouli zorného pole tak, že její hlavní kružnice $\overline{PM}$ bude klouzat po téže hlavní kružnici pohyblivé koule. To znamená, že pozorujeme-li libovolnou hlavní kružnici procházející bodem P, že její jednotlivé body se budou stále promítat na tutéž krátkou úsečku na žluté skvrně, která bude mít na sítnici stálý směr.

Předpokládejme nyní, že při pozorování přecházíme ze sekundární polohy M do jiné sekundární polohy N. Podle Dondersova zákona je rozhodující pouze konečná poloha a nikoliv cesta, po které přechod z bodu M do bodu N probíhal. To znamená, že z bodu M můžeme přejít do bodu N také přes bod P, takže přemístění z bodu M do N můžeme rozložit na dvě rotace charakterisované oblouky $\widehat{MP}$ a $\widehat{PN}$. Podle kinematiky pevných těles je možno tyto dvě rotace nahradit jedinou charakterisovanou obloukem $2\widehat{M'N'}$, kde $\widehat{M'N'}$ značí oblouk hlavní kružnice spojující středy oblouků $\widehat{PM}$ a $\widehat{PN}$. Z toho plyne, že příslušná osa rotace je kolmá na rovinu hlavní kružnice $\widehat{M'N'}$ a tedy na poloměr $\overline{QM'}$. Můžeme tedy říci, že každý pohyb oka vycházející z libovolné sekundární polohy M je ekvivalentní rotaci kolem osy kolmé na $\overline{QM'}$ a ležící v rovině π hlavní kružnice kolmé na $\overline{QM'}$.

Nechť $\overline{QR}$ značí libovolnou osu roviny π. Uvažujme rovnoběžku opsanou bodem M při jeho rotaci kolem osy $\overline{QR}$. Sledujeme-li při pozorování tuto rovnoběžku, pak osa $\overline{QR}$ zůstává pevná, a oko se bude pohybovat proto tak, že rovnoběžka koule spojené s okem bude klouzat po téže rovnoběžce pevné koule zorného pole. To znamená, že jednotlivé body této rovnoběžky se budou promítat na kratičkou úsečku na žluté skvrně, jejíž směr na sítnici bude stálý. Takovou kružnici nazýváme směrovou kružnicí.

Uvažujme nyní bod Ω, který je diametrálně protilehlým bodem k bodu P. Z obr. 13.3.1 je zřejmé, že body M a Ω jsou souměrné body vzhledem k rovině π. To znamená, že dříve uvažovaná směrová kružnice prochází bodem Ω, z čehož plyne, že všechny kružnice procházející bodem Ω jsou směrové a tedy i hlavní kružnice procházející bodem P.

Můžeme tedy vyslovit následující větu:

Óáry zorného pole, jejichž směr na sítnici zůstává konstantní (tj. takové óáry, které při sledování okem zůstávají v dotyku s touto úsečkou na žluté skvrně), jsou kružnice procházející bodem Ω diametrálně protilehlým k bodu P.

Listingův zákon je možno ověřit snadno pomocí rovinného zorného pole, které se často zavádí místo pole kulového, jak je to provedeno v několikráte již citované učebnici Y. Le Granda.

Naskytá se ještě otázka, čím je u člověka zajišťován Dondersův nebo Listingův zákon. Předem je možno říci, že není zajišťován anatomií oka.

Uvážíme-li, že vnější a vnitřní přímý sval zajišťuje pouze otáčení oka kolem svislé osy, zatímco horní a dolní přímý sval a horní a dolní šikmý sval zajišťují otáčení kolem vodorovné osy a giraci, vidíme, že na scela obecném pohybu oka se zúčastní současně všechny tři páry těchto svalů. To znamená, že uvedené dva zákony předpokládají přesný vztah mezi působením těchto tří svalových párů.

Vysvětlení těchto vztahů je možno hledat ve dvou směrech. Můžeme např. hledat původ těchto zákonů pouze ve fysiologii tak, že připustíme, že např. při pohybu se oko staví vždy do polohy, které odpovídá minimální svalové úsilí. Nebo můžeme připustit, že oko se staví vždy do takové polohy, která skýtá pozorovatelovi určitou výhodu, např. tak, aby se obrazy všech přímek procházejících bodem v primární poloze (P) samy překládaly, což je výhodné při binokulárním vidění nebo např. změny ve sklonu obrazů předmětů v sekundárné poloze mohou být překážkou při správném určování orientace předmětů a proto minimum těchto změn je pro pozorovatele výhodou.

Závěrem úvah o Dondersově a Listingovu zákonu nutno dodat, že v předchozích úvahách jsme stále předpokládali, že hlava pozorovatelova je pevná. Naskytá se proto otázka, zda tyto zákony zůstanou absolutně platné, když se hlava vykloní. Ukazuje se, že tomu tak úplně není, že sklon hlavy není plně kompensován vhodným natočením očí a že neexistuje ani přesný vztah mezi pohybem očí a hlavy. O natočení (giraci) očí se můžeme snadno přesvědčit, pozorujeme-li např. nějaký detail duhovky v zrcátku při současném stranovém vyklánění hlavy. Toto natáčení očí má nepříznivý vliv v případě vykorigovaného astigmatického oka, neboť meridián rohovky se při naklánění hlavy stáčí vzhledem k hlavě, zatímco meridián brýlových skel zůstává vzhledem k hlavě pevný.

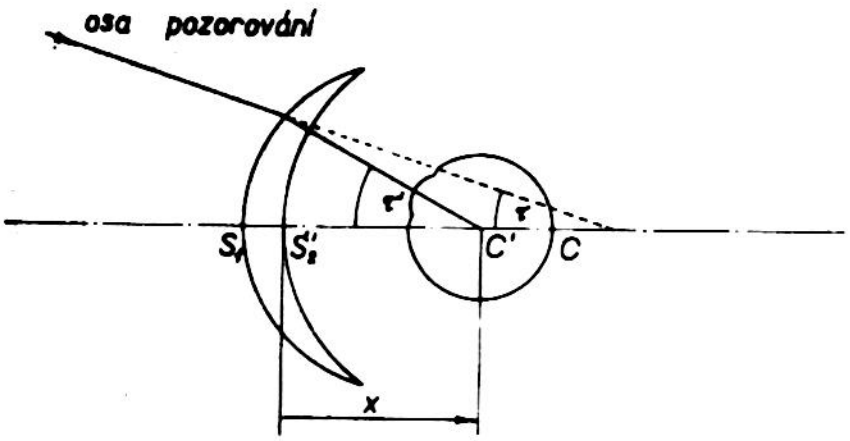
14) Korekce oka v pohybu

Je-li oko korigováno kulovým brýlovým sklem vhodně umístěným před okem, pak existuje určitá poloha osy pozorování oka, která je velmi blízká primární poloze definované v předcházející kapitole, při které tvoří oko spolu s brýlovým sklem centrovanou optickou soustavu. To znamená, že optická osa brýlového skla prochází středem C′ (viz obr. 14.1.1) otáčení oka.

Nechť τ' značí úhel, který svírá osa pozorování oka s optickou osou brýlového skla. Vzhledem k tomu, že tento úhel τ' nabývá při otáčení oka hodnot, které nelze zanedbat, přestává být při vykloněním oka soustava oko - brýlové sklo centrovanou soustavou. Z této skutečnosti vyplývají různé důsledky, které budou předmětem studia této kapitoly, ve které se omezíme na případ dalekých i blízkých předmětů a na oko se sférickou ametropií.

14.1) Odchylka osy pozorování

Pozorujeme-li nějaký boční předmět okrajem kulového brýlového skla umístěného normálním způsobem před okem, pak tento předmět se jeví oku v jiném směru, než ve kterém by se jevil při pozorování bez brýlového skla, neboť okraj brýlového skla působí jako klín. V důsledku toho přehlédne vykloněné krátkozraké oko brýlovým sklem větší zorné pole než oko dalekozraké.



Obr. 14.1.1 K určení odchylky osy pozorování.

Předpokládejme, že úhel τ' je dostatečně malý, takže můžeme pro příslušné zobrazování použít vztahů platících pro Gaussův prostor. Potom osa pozorování svírá s optickou osou brýlového skla úhel τ a prochází bodem C, jehož obraz C' vytvořený brýlovým sklem je středem otáčení oka. Protože

$$\frac{\tau}{\tau'} = \frac{x'}{y} ,$$

platí podle (9.3.6)

$$\frac{\tau}{\tau'} = \frac{1 - D'_v \cdot x'}{g'} ,$$

kde $x' = \overline{S'_2C'}$. Můžeme tedy psát

$$\tau = \tau' \cdot (1 - D'x') , \qquad (14.1.1)$$

neboť pro tenkou čočku, za kterou můžeme brýlové sklo považovat, je $g' = 1$ a vrcholová lámavost D'_v je rovna skutečné lámavosti brýlového skla D'.

Z tohoto vztahu vyplývají dva velmi důležité závěry:

1) Mezní hodnota úhlu τ' závisí na průměru brýlového skla a na jeho vzdálenosti od oka. Např. pro sklo o průměru 38 mm, umístěné ve vzdálenosti 12 mm od vrcholu rohovky (tj. pro $x' = 12 + 13 = 25$ mm) vychází

$$\operatorname{tg} \tau' = \frac{11}{25} = 0{,}76$$

$$\tau' = 37^{\circ} ,$$

takže podle (14.1.1) dostáváme pro krátkozraké oko o ametropii $D' = -5$ dioptrií

$$\tau = 37\,(1 + 5.0{,}025) = 37.1{,}125 \doteq 42^{\circ}$$

a pro dalekozraké oko o ametropii $D' = +5$ dioptrií

$$\tau = 37\,(1 - 5.0{,}025) = 37.0{,}875 \doteq 32^{\circ} .$$

Z těchto dvou příkladů vyplývá, že člověk s dalekozrakýma očima musí používat k dosažení dostatečného zorného pole brýlových skel o velkém průměru umístěných co nejblíže k oku. Krátkozraký člověk naopak může redukovat průměr brýlových skel, čímž podstatně zmenší jejich váhu. Brýlová skla o průměru menším než 30 mm se nazývají <u>lentikulární</u>. Z důvodů estetických se jim dává tvar eliptický.

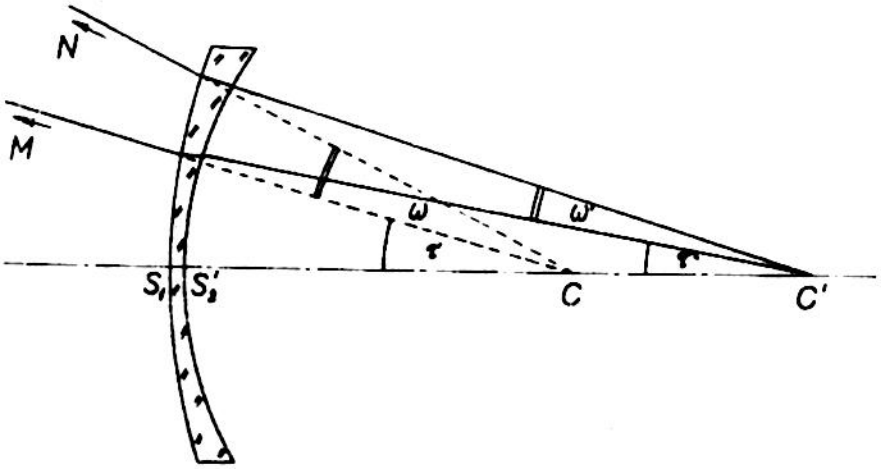
2) Korekční brýlové sklo umístěné před pohybujícím se okem podstatně mění kalibraci zorného pole. Uvažujme např. dva blízké body M a N. Obraz $\overline{MN}$ má jiný rozměr, když jsou body M a N pozorovány okem korigovaným brýlovým sklem než v případě, že tyto body jsou pozorovány pouhým nekorigovaným okem. Např. pozorujeme-li předmět nekorigovaným okem s ametropií $R = -5$ dioptrií, pak podle (7.5.2) se jeví v poměru 1,09 (tj. o 9 %) větší než v případě emmetropického oka. Při pozorování téhož předmětu korigovaným okem o téže ametropii - 5 dioptrií se bude jevit podle (8.6.3) v poměru 1,02krát (tj. o 2 %) větší než v případě emmetropického oka. Tedy prakticky se bude korigovanému oku s ametropií $R = -5$ dioptrií jevit předmět $\overline{MN}$ o 9 - 2 = = 7 % menší.

Z obr. 14.1.2 je zřejmé, že úhel ω' při přechodu pozorování z bodu M na bod N bude menší, než je úhel ω určující úhlovou velikost předmětu $\overline{MN}$ vzhledem k bodu C. Podle příkladu uvedeného na začátku této kapitoly vychází pro toto zmenšení

$$\frac{37}{42} = 0{,}88 \sim 12\ \% .$$

Z tohoto příkladu je vidět, že <u>dynamické</u> změny (12 %) obrazové velikosti jsou znatelnější než změny <u>statické</u> (7 %). To např. vysvětluje zmenšování

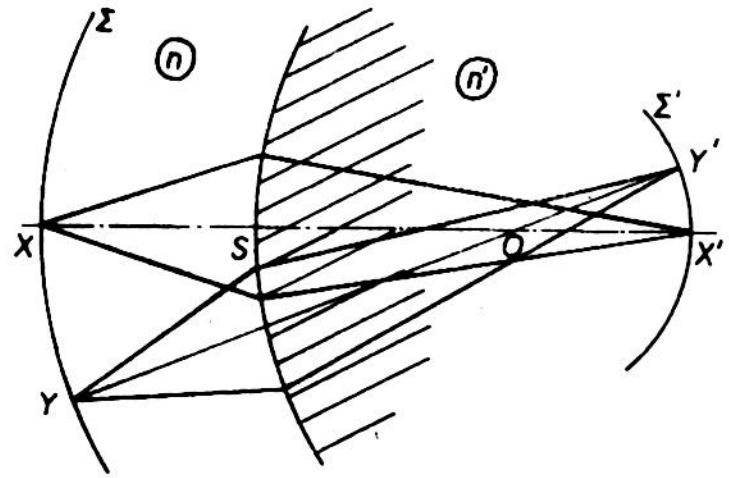
obrazu při pohybu krátkozrakého oka a zvětšování obrazu při pohybu dalekozrakého oka. Tato skutečnost narušuje kompensaci pohybu oka, což se projevuje tím, že s počátku při nošení brýlí se zdá, že se předměty pohybují. Kompensace těchto pohybů se získá opět po určitém přivyknutí na brýle.



Obr. 14.1.2 K určení vlivu okraje brýlového skla na kalibraci zorného pole.

14.2) Astigmatismus šikmých svazků

Uvažujme lámavou plochu o středu křivosti O , která odděluje prostředí o indexech lomu n a n' a tvoří tak jednoduchý dioptr, jak je to naznačeno na obr. 14.2.1.



Obr. 14.2.1 K vysvětlení Petzvalovy plochy

Nechť X a X' tvoří sdružený bodový pár. Uvažujme kulovou plochu Σ procházející bodem X , která je koncentrická s lámavou plochou. Uvažovaný dioptr zobrazí plochu Σ opět do kulové plochy Σ' koncentrické s lámavou plochou a procházející bodem X'.

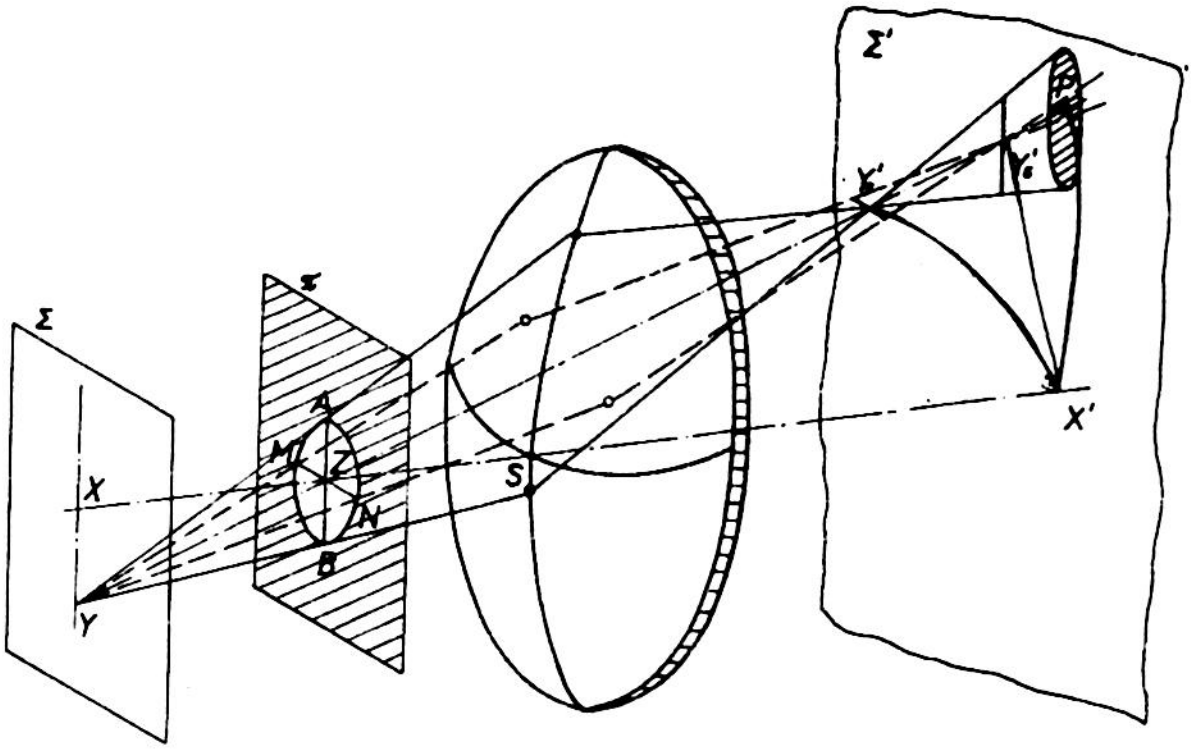
V případě, že předmětová kulová plocha Σ nebude koncentrická s lámavou plochou, pak jejím obrazem bude opět kulová plocha, která ovšem také nebude koncentrická s touto plochou.

Z uvedeného je jasné, že v případě optické soustavy, tvořené řadou lámavých ploch, můžeme postupným zobrazováním najít kulovou plochu, která je obrazem dané předmětové kulové plochy.

Stejným postupem je tedy možno určit kouli, která je obrazem předmětové koule o nekonečně velkém poloměru, tj. roviny. Tato obrazová koule se nazývá Petzvalovou plochou a její křivost Petzvalovou křivostí.

Pokud je zobrazování zatíženo vadami, pak obraz na Petzvalově ploše není dobře definován (není "ostrý"). Všimněme si proto případu, kdy je zobrazení zatíženo astigmatismem.

Uvažujme proto tenkou čočku znázorněnou na obr. 14.2.2. Nechť před touto čočkou je umístěno stínítko $\mathcal{N}$ s kruhovým otvorem soustředným vzhledem k optické ose čočky. Nechť bodem X prochází kolmo na optickou osu rovina Σ a nechť bod Y značí její mimoosový bod.



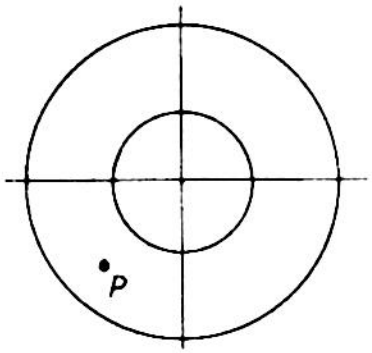
Obr. 14.2.2 K vysvětlení astigmatismu tenké čočky

Astigmatismus uvažované čočky se projeví tím, že paprsky procházející otvorem clony podél svislého průměru $\overline{AB}$ se protnou před Petzvalovou plochou ve vzdálenosti asi 3-krát větší než paprsky vycházející z bodu Y a probíhající podél vodorovného průměru $\overline{MN}$. Nechť dále Y'_T a Y'_S značí tyto průsečíky.

Příslušný paprskový svazek vycházející z mimoosového bodu Y nebude souměrný vzhledem k hlavnímu paprsku procházejícímu středem Z uvažované clony, což se projeví tím, že bod Y bude zobrazen v místě Y'_T jako vodorovná úsečka (fokála) a v místě Y'_S jako svislá úsečka. Petzvalova plocha bude protata tímto nesouměrným svazkem obecně v eliptické plošce, která vyvolává zhoršení jakosti obrazu na Petzvalově ploše.

1212-5083

To má za následek, že např. test s mimoosovým bodem P , znázorněný na obr. 14.2.3, bude zobrazován tenkou čočkou v místě Y'_T resp. Y'_S tak, jak je to naznačeno na obr. 14.2.4 resp. 14.2.5. Je vidět, že v prvním případě budou dokonale zobrazeny pouze směry kolmé na radiální směry a v druhém případě naopak pouze směry radiální.

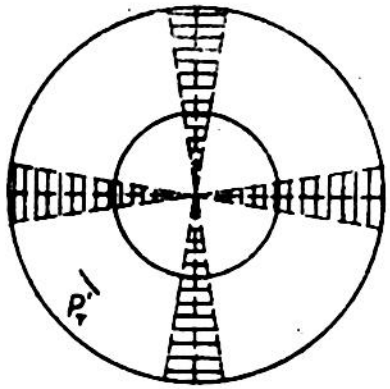


Obr. 14.2.3 Test pro zkoušení astigmatismu

Pro poloměr křivosti r Petzvalovy plochy vychází v případě tenké čočky

$$r = - n f' ,$$

kde n značí index lomu skla, ze kterého je čočka zhotovena, a f' její ohnisková vzdálenost.

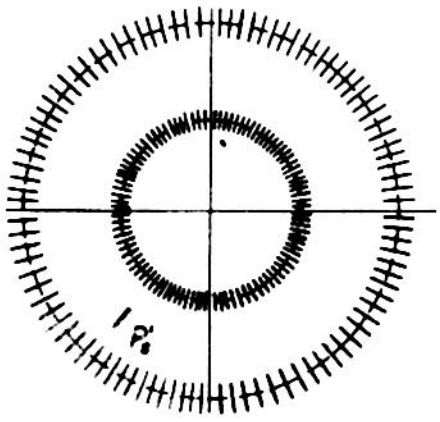


Obr. 14.2.4 Vliv astigmatismu na zobrazení

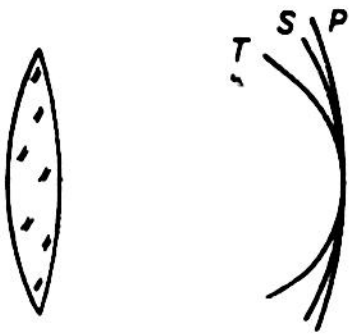
Čím blíže bude ležet rovina obsahující příslušnou clonu k čočce, tím výrazněji se budou odlišovat plochy tangenciálních a sagitálních fokál od Petzvalovy plochy a tento rozdíl se bude zvětšovat s rostoucím zorným polem, jak je to vyznačeno na obr. 14.2.6.

Uvažujme nyní oko, před kterým je umístěno brýlové sklo. Otáčí-li se oko v očnicové dutině, otáčí se s ním i jeho pupila a proto paprsky, které vymezuje, procházejí různými částmi brýlového skla, jak je to naznačeno na obr. 14.2.7.

Jak je patrno, paprskové svazky, vstupující brýlovým sklem do oka, jsou vyoláněny tak, jako kdyby za okem v jeho středu otáčení byla umístěna pevná clona.

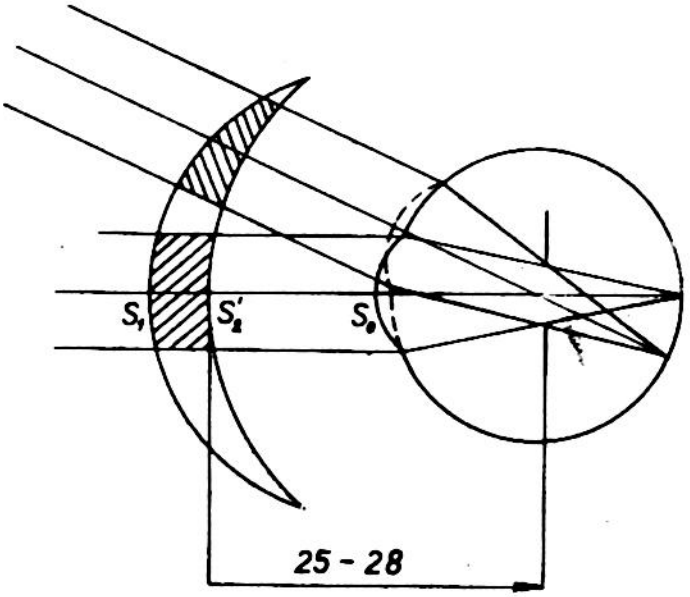


Obr. 14.2.5 Vliv astigmatismu na zobrazení



Obr. 14.2.6 Petzvalova plocha (P) a plochy tangenciálních (T) a sagitálních (S) fokál.

Jak bylo dříve uvedeno, střed otáčení oka leží přibližně 13 - 15 mm za vrcholem jeho rohovky. Brýlové sklo se umísťuje před okem tak, že leží ve vzdálenosti 12 - 13 mm před vrcholem rohovky, aby byl umožněn volný pohyb očních řas. To znamená, že zmíněná clona se nachází ve vzdálenosti 25 - 28 mm za brýlovým sklem.



Obr. 14.2.7 Vzájemná poloha brýlového skla a oka při jeho natáčení.

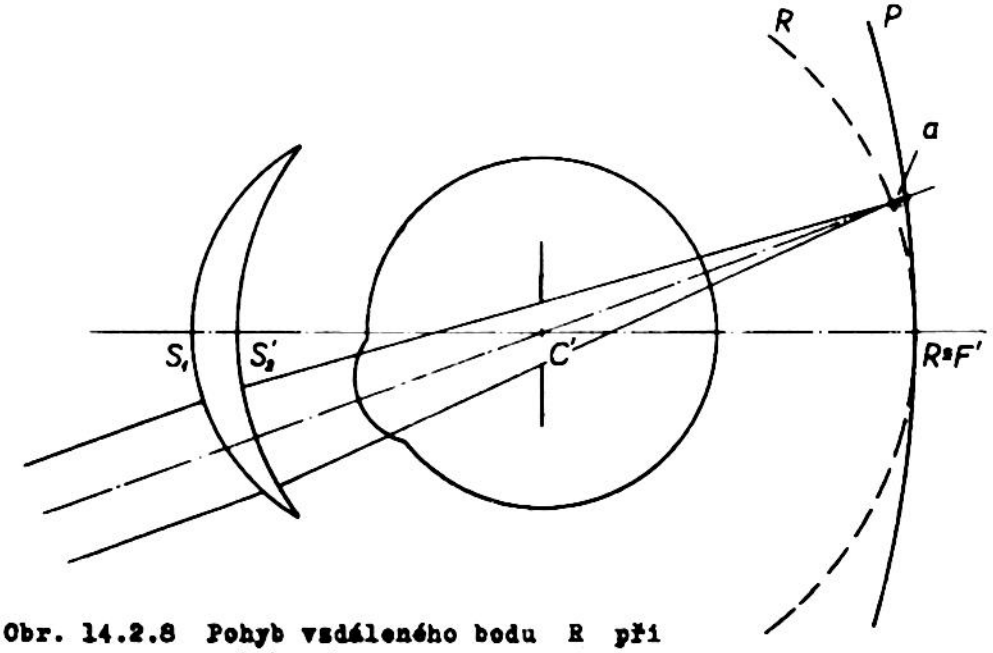
Průměr brýlových skel se volí 35 - 40 mm, aby brýlové sklo umožňovalo, jak již bylo dříve uvedeno, přehlédnout dostatečně velké zorné pole. Tento průměr je nesrovnatelně velký vzhledem k průměru oční pupily, který se prakticky za normálních světelných podmínek pohybuje v rozsahu 3 - 4 mm. Proto otvorová vada a koma brýlových skel je prakticky zanedbatelná. Naproti tomu astigmatismus šikmých svazků u bikonvexních čoček o lámavosti 5 dioptrií a vyšší je značný a vynucuje si změnu akomodace při přechodu od tangenciálního k sagitálnímu obrazu, která dosahuje pro úhel $\tau = 25^{\circ}$ hodnoty větší než 1 dioptrie.

Jak bude dále uvedeno, je možno odstranit u brýlových skel astigmatismus šikmých svazků vhodnou volbou jejich tvaru. Předpokládejme proto, že brýlové sklo má vhodnou volbou tvaru odstraněn astigmatismus. Potom v případě brýlového skla na dálku musí ležet obrazy vzdálených předmětů na Petzvalově ploše. Při pozorování při nevychýleném oku bude tedy obrazové ohnisko tohoto brýlového skla splývat se vzdáleným bodem oka, jak je to vyznačeno na obr. 14.2.8.

Jestliže se oko v očním důlku otáčí, pohybuje se vzdálený bod R oka po kulové ploše o středu splývajícím se středem otáčení oka. Tato kulová plocha má však obecně jiný poloměr křivosti než Petzvalova plocha.

To znamená, že obraz vytvořený brýlovým sklem s potlačeným astigmatismem bude vzdálen od plochy, po které se pohybuje vzdálený bod oka, o hodnotu $\underline{a}$, kterou musí oko překonat akomodací.

Uvažujme např. brýlové sklo s vrcholovou lámavostí $D_v = + 10$ dioptrií. Nechť je vzdálenost brýlového skla od vrcholu rohovky rovna 12 mm. Potom obrazové ohnisko F' brýlového skla leží ve vzdálenosti 88 mm (= 100 - 12) od vrcholu rohovky.



Obr. 14.2.8 Pohyb vzdáleného bodu R při pohybu oka.

Pro odpovídající ametropii oka R vychází podle (8.1.4)

$$R = \frac{D_v}{1 - d\,D_v} = \frac{10}{1 - 0{,}012.10} = 11{,}36 \text{ dioptrií.}$$

Pro poloměr koule, po které se pohybuje vzdálený bod oka, vychází

$$88 - 15 = 73 \text{ mm} .$$

Pro poloměr křivosti Petzvalovy plochy plyne dále

$$- nf' = - 1{,}523 . 100 = - 152{,}3 \text{ mm} .$$

Je vidět, že Petzvalova plocha je plošší než kulová plocha, po které se pohybuje vzdálený bod oka.

Vykloní-li se oko ze své normální polohy o 20^0, oddálí se vzdálený bod oka od Petzvalovy plochy o hodnotu a = 2,36 mm , jak to plyne z následujícího jednoduchého výpočtu podle obr. 14.2.9.

Z obrázku plyne

$$x_1 = 73 . \sin 20^0 = 73 . 0{,}34 = 24{,}8 \text{ mm.}$$

Pro jednoduchost předpokládejme, že

$$x_2 = x_1 = 24{,}8 \text{ mm.}$$

Potom plyne dále

$$h_1 = \frac{x_1^2}{2\,R_1} \doteq \frac{625}{146} \doteq 4{,}3 \text{ mm} .$$

$$h_2 = \frac{x_2^2}{2\,R_2} \doteq \frac{625}{304} = 2{,}06 \text{ mm} ,$$

takže

$$a = \frac{h_1 - h_2}{\cos 20^\circ} = \frac{2{,}24}{0{,}94} = 2{,}38 \text{ mm} .$$

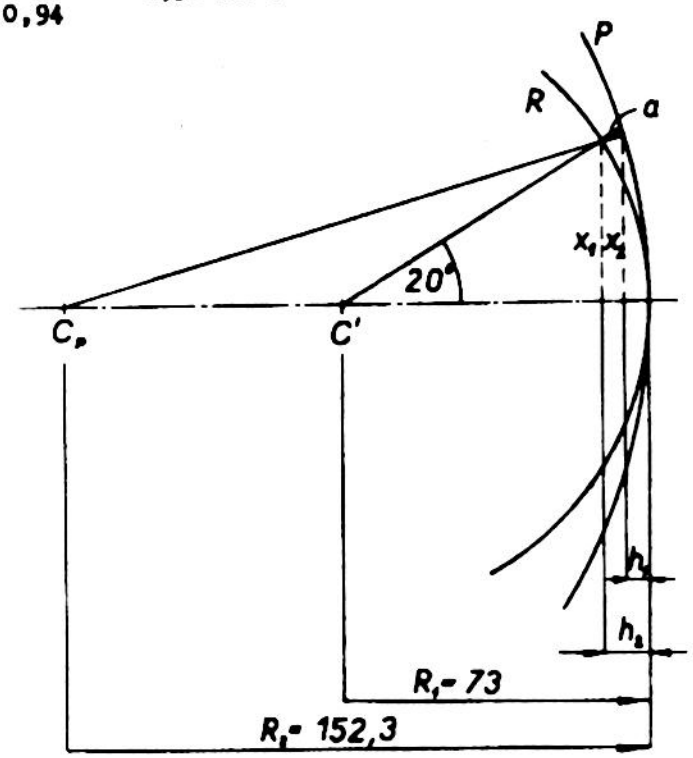
To znamená, že Petzvalova plocha je v uvažovaném směru vzdálena od vrcholu rohovky oka o hodnotu

$$l = 73 + 15 + 2{,}38 \doteq 90{,}4 \text{ mm} .$$

Vyjádříme-li tuto vzdálenost v dioptriích, dostaneme

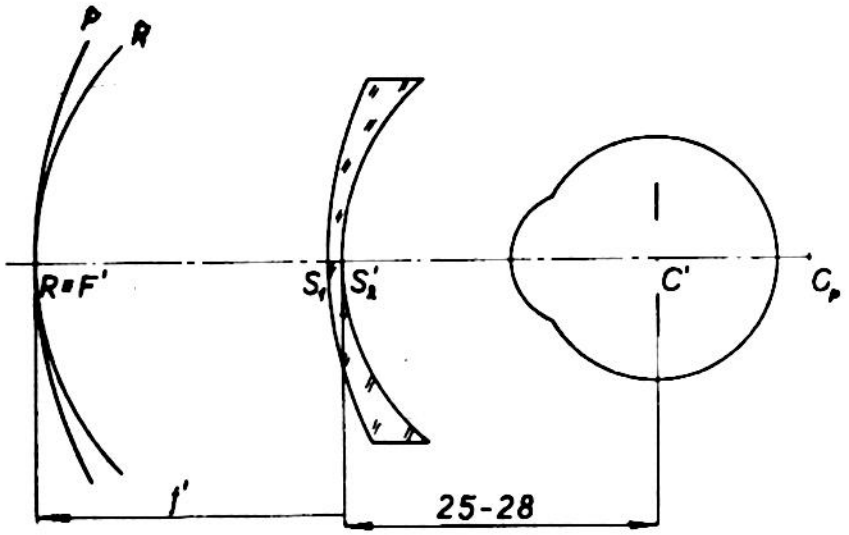
$$\frac{1}{0{,}0904} = 11{,}06 \text{ dioptrií.}$$

Ametropie příslušného oka je však R = 11,36 dioptrií a liší se od předešlé hodnoty prakticky o 1/3 dioptrie, kterou musí oko překonat akomodací.



Obr. 14.2.9 K výpočtu vzdálenosti a vzdáleného bodu oka R od Petzvalovy plochy P.

V případě krátkozrakého oka bude situace příznivější, neboť jak plyne z obr.14.2.10, budou ležet středy Petzvalovy plochy a koule vzdáleného bodu na téže straně brýlového skla (vpravo). Pro brýlové sklo o $f' = -50$ mm, tj. lámavosti $D_v = -20$ dioptrií budou středy obou ploch splývat, zatímco v ostatních případech budou příslušné vzdálenosti menší než u spojného brýlového skla.

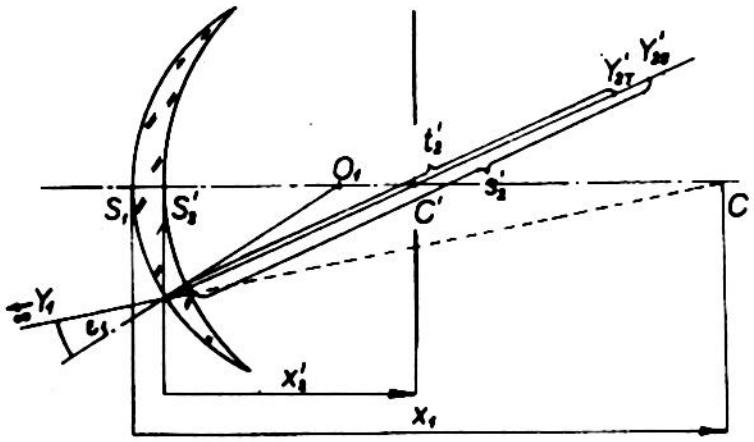


Obr. 14.2.10 K vysvětlení situace a vzdálenosti Petzvalovy plochy a koule vzdáleného bodu v případě rozptylného brýlového skla.

14.3) Korekce astigmatismu šikmých svazků brýlových skel pro vidění na dálku

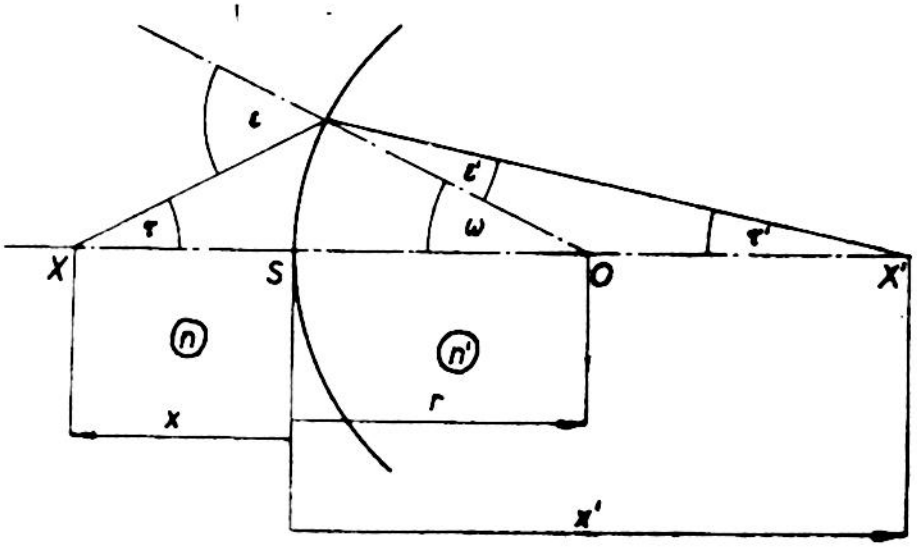
Jak již bylo uvedeno, brýlové sklo, umístěné před otáčejícím se okem, pracuje jako čočka, za níž je umístěna pevná clona, jejíž rovina prochází středem C' otáčení oka, jak je to naznačeno na obr. 14.3.1.

Z geometrické optiky je známo, že pro lom na kulové ploše platí podle obr. 14.3.2



Obr. 14.3.1 Ke korekci astigmatismu šikmých svazků.

$$\left.\begin{aligned} \sin \varepsilon &= \frac{x - r}{r} \cdot \sin \tau \\ \sin \varepsilon' &= \frac{n}{n'} \cdot \sin \varepsilon \end{aligned}\right\} \qquad (14.3.1)$$



Obr. 14.3.2 Lom na kulové ploše.

$$\left.\begin{aligned} \tau' &= \tau + \varepsilon - \varepsilon' \\ x' &= r + \frac{r \,.\, \sin \varepsilon'}{\sin \tau'} \end{aligned}\right\} \qquad (14.3.1)$$

Napíšme nyní čtvrtý vztah pro druhou plochu brýlového skla a dostaneme

$$\sin \varepsilon'_2 = \frac{x'_2 - r_2}{r_2} \,.\, \sin \tau'_2 \,,$$

nebo položíme-li

$$m = - \frac{x'_2 - r_2}{r_2}$$

$$\sin \varepsilon'_2 = - m_2 \,.\, \sin \tau'_2 \,. \qquad (14.3.2)$$

Předchozí vztah můžeme psát ve tvaru

$$m_2 = 1 - \frac{x'_2}{r_2} = 1 + \frac{x'_2}{n_2 - 1} \,.\, D_2 = 1 + \frac{x'_2}{n - 1} \,.\, D_2 \,,$$

kde $D_2 = \frac{1 - n}{r_2}$ je lámavost druhé plochy brýlového skla sbetovaného se skla o indexu lomu $n_2 = n$. Uvážíme-li dále, že pro lámavost D' brýlového skla, uvažovaného jako tenká čočka, platí

$$D' = D_1 + D_2 \,,$$

kde $D_1 = \frac{n - 1}{r_1}$ značí lámavost první jeho plochy, můžeme psát konečně

$$m_2 = 1 + \frac{x_2'}{n-1} D' - \frac{x_2'}{n-1} D_1 \quad . \tag{14.3.3}$$

Pro úhel dopadu ε_2 na druhou plochu platí podle druhého vztahu (14.3.1)

$$\sin \varepsilon_2 = \frac{n_2'}{n_2} . \sin \varepsilon_2' = \frac{\sin \varepsilon_2'}{n} ,$$

neboť $n_2' = 1$ a $n_2 = n$. Podle (14.3.2) můžeme psát dále

$$\sin \varepsilon_2 = - \frac{m_2}{n} . \sin \tau_2' \quad . \tag{14.3.4}$$

Předpokládáme-li, že úhel τ_2' je dostatečně malý, pak pro polohu x_1 bodu C , sdruženého k bodu C', platí

$$\frac{1}{x_2'} = \frac{1}{x_1} + D' \qquad \text{čili}$$

$$x_1 = \frac{x_2'}{1 - D' . x_2'} \quad .$$

Přihlédneme-li ke vztahu (14.1.1), můžeme pak psát pro úhel dopadu ε_1 na první plochu brýlového skla

$$\sin \varepsilon_1 = \frac{x_1 - r_1}{r_1} . \sin \tau_1 = \frac{x_1 - r_1}{r_1} \sin \tau_2' . (1 - D' x_2') ,$$

nebo

$$\sin \varepsilon_1 = - m_1 . \sin \tau_2' , \tag{14.3.5}$$

kde

$$m_1 = \frac{r_1 - x_1}{r_1} (1 - D' x_2') = (1 - \frac{x_1}{r_1}) . (1 - D' x_2') =$$

$$= (1 - \frac{x_2'}{1 - D' x_2'} . \frac{1}{r_1}) . (1 - D' x_2') =$$

$$= 1 - D' x_2' - \frac{x_2'}{r_1} = 1 - D' x_2' - \frac{x_2'}{n-1} . D_1 , \tag{14.3.6}$$

kde D_1 značí lámavost první plochy uvažovaného brýlového skla. Pro odpovídající úhel lomu ε_1' na první ploše pak platí

$$\sin \varepsilon_1' = \frac{\sin \varepsilon_1}{n} = - \frac{m_1}{n} \sin \tau_2' . \tag{14.3.7}$$

Předpokládejme nyní, že na brýlové sklo dopadá úzký paprskový svazek pod úhlem ε_1 tak, že po průchodu brýlovým sklem prochází středem C′ otáčení oka. Nechť tento svazek vychází z předmětového mimoosového bodu Y_1 nacházejícího se v nekonečnu, jak je to naznačeno na obr. 14.3.1.

Protože obecně bude příslušné zobrazování zatíženo astigmatismem, bude bod Y_1 zobrazen sagitálními resp. tangenciálními paprsky do fokál Y'_{2S} resp. Y'_{2T}. Pro polohu těchto obrazů můžeme psát:

$$\frac{n}{s'_1} = \frac{n\cos\varepsilon'_1 - \cos\varepsilon_1}{r_1} \qquad \text{a}$$

$$\frac{1}{s'_2} = \frac{n}{s'_1} + \frac{\cos\varepsilon'_2 - n\cos\varepsilon_2}{r_2} = \frac{n\cos\varepsilon'_1 - \cos\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\cos\varepsilon'_2 - n.\cos\varepsilon_2}{r_2} . \qquad (14.3.8)$$

Podobně platí pro polohu tangenciálního obrazu

$$\frac{n\cos^2\varepsilon'_1}{t'_1} = \frac{n\cos\varepsilon'_1 - \cos\varepsilon_1}{r_1}$$

$$\frac{\cos^2\varepsilon'_2}{t'_2} = \frac{n\cos^2\varepsilon_2}{t'_1} + \frac{\cos\varepsilon'_2 - n\cos\varepsilon_2}{r_2} =$$

$$= \frac{\cos^2\varepsilon_2}{\cos^2\varepsilon'_1}\,\frac{n\cos\varepsilon'_1 - \cos\varepsilon_1}{r_1} + \frac{\cos\varepsilon'_2 - n\cos\varepsilon_2}{r_2} . \qquad (14.3.9)$$

Jsou-li úhly ε_1, ε'_1, ε_2 a ε'_2 malé, pak můžeme psát

$$\cos\varepsilon_1 = (1 - \sin^2\varepsilon_1)^{\frac{1}{2}} \doteq 1 - \frac{1}{2}\sin^2\varepsilon_1 = 1 - \frac{m_1^2}{2}\cdot\sin^2\tau'_2 .$$

Podobně

$$\cos\varepsilon'_1 = 1 - \frac{1}{2}\sin^2\varepsilon'_1 = 1 - \frac{m_1^2}{2n^2}\sin^2\tau'_2$$

$$\cos\varepsilon_2 = 1 - \frac{1}{2}\sin^2\varepsilon_2 = 1 - \frac{m_2^2}{2n^2}\sin^2\tau'_2$$

$$\cos\varepsilon'_2 = 1 - \frac{1}{2}\sin^2\varepsilon'_2 = 1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 .$$

Dosadíme-li hodnoty $\cos\varepsilon_1$, $\cos\varepsilon'_1$, ... $\cos\varepsilon'_2$ do vztahu (14.3.8) resp. (14.3.9), dostaneme

$$\frac{1}{s'_2} = \frac{n - \frac{m_1^2}{2n}\sin^2\tau'_2 - 1 + \frac{m_1^2}{2}\sin^2\tau'_2}{r_1} +$$

$$+ \frac{1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 - n + \frac{m_2^2}{2n}\sin^2\tau'_2}{r_2} =$$

$$= (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{\sin^2\tau'_2}{2}\,\frac{n-1}{n}\left(\frac{m_1^2}{r_1} - \frac{m_2^2}{r_2}\right) \qquad (14.3.10)$$

a podobně

$$\frac{1}{t'_2} = \frac{1}{(1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau_2)^2}\cdot\left[\frac{(1 - \frac{m_2^2}{2n^2}\sin^2\tau'_2)^2}{(1 - \frac{m_1^2}{2n^2}\sin^2\tau'_2)^2}\cdot\frac{n - \frac{m_1^2}{2n}\sin^2\tau'_2 - 1 - \frac{m_1^2}{2}\sin^2\tau'_2}{r_1} +\right.$$

$$\left. + \frac{1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 - n + \frac{m_2^2}{2n}\sin^2\tau'_2}{r_2}\right] =$$

$$= (1+m_2^2\sin^2\tau'_2).(1+\frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\left[(1-\frac{m_2^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\,\frac{n-\frac{m_1^2}{2n}\sin^2\tau'_2-1+\frac{m_1^2}{2}\sin^2\tau'_2}{r_1} +\right.$$

$$\left. + (1 - \frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\,\frac{1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 - n + \frac{m_2^2}{2n}\sin^2\tau'_2}{r_2}\right] =$$

$$= (1+m_2^2\sin^2\tau'_2+\frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2).\left[(1-\frac{m_2^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\,\frac{n-\frac{m_1^2}{2n}\sin^2\tau'_2-1+\frac{m_1^2}{2}\sin^2\tau'_2}{r_1} +\right.$$

$$\left. + (1-\frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\,.\,\frac{1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 - n + \frac{m_2^2}{2n}.\sin^2\tau'_2}{r_2}\right] =$$

$$= \frac{n - \frac{m_1^2}{2n}\sin^2\tau'_2 - 1 + \frac{m_1^2}{2}\sin^2\tau'_2}{r_1} + \frac{1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 - n\frac{m_2^2}{2n}\sin^2\tau'_2}{r_2} +$$

$$+ (m_2^2 \sin^2\tau'_2 + \frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2 - \frac{m_2^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\,\frac{n - \frac{m_1^2}{2n}\sin^2\tau'_2 - 1 + \frac{m_1^2}{2}\sin^2\tau_2}{r_1} +$$

$$+ (m_2^2 \sin^2\tau'_2 + \frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2 - \frac{m_1^2}{n^2}\sin^2\tau'_2)\,\frac{1 - \frac{m_2^2}{2}\sin^2\tau'_2 - n + \frac{m_2^2}{2n}\sin^2\tau'_2}{r_2} .$$

Odtud konečně

$$\frac{1}{t'_2} = (n-1)\,.\,(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) + \frac{\sin^2\tau'_2}{2}\,\frac{n-1}{n}\,(\frac{m_1^2}{r_1} - \frac{m_2^2}{r_2}) +$$

$$+ \sin^2\tau'_2\left[\frac{m_1^2}{n^2}\,\frac{n-1}{r_1} - \frac{m_2^2}{n^2}\,\frac{n-1}{r_1} + m_2^2\,(n-1).\,(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})\right] , \qquad (14.3.11)$$

zanedbáme-li členy vyšších řádů.

Má-li být astigmatismus brýlového skla nulový, musí být

$$\frac{1}{t'_2} - \frac{1}{s'_2} = 0 .$$

Ze vztahů (14.3.11) a (14.3.10) plyne, že astigmatismus bude nulový, bude-li

$$\frac{m_1^2}{n^2}\,.\,\frac{n-1}{r_1} - \frac{m_2^2}{n^2}\,\frac{n-1}{r_1} + m_2^2\,(n-1)\,.\,(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) = 0$$

čili

$$\frac{D_1}{n^2}\,(m_1^2 - m_2^2) + m_2^2\,.\,D' = 0 .$$

Dosadíme-li z (14.3.6) resp. (14.3.3) za m_1 a m_2 příslušné hodnoty, dostaneme

$$\frac{D_1}{n^2}\left[(1 - D'x'_2 - \frac{x'_2}{n-1}\,D_1)^2 - (1 + \frac{x'_2}{n-1}\,.\,D' - \frac{x'_2}{n-1}\,D_1)^2\right] +$$

$$+ (1 + \frac{x'_2}{n-1}\,D' - \frac{x'_2}{n-1}\,D_1)^2\,.\,D' = 0 .$$

Po provedení naznačených úkonů a po úpravě dostáváme odtud dále

$$\frac{D_1 D' x_2'^2}{n^2} - \frac{2 D_1 x_2'}{n^2} + \frac{2 D_1^2 x_2'^2}{n^2 (n-1)} - \frac{D_1 D' . x_2'^2}{n^2 (n-1)^2} - \frac{2 D_1 x_2'}{n^2 (n-1)} + \frac{2 D_1^2 x_2'^2}{n^2 (n-1)^2} + 1 +$$

$$+ \frac{D'^2 x_2'^2}{(n-1)^2} + \frac{D_1^2 x_2'^2}{(n-1)^2} + \frac{2 D' x_2'}{n-1} - \frac{2 D_1 x_2'}{n-1} - \frac{2 D' . D_1 x_2'^2}{(n-1)^2} = 0 .$$

Odtud pak pro D_1 vychází kvadratická rovnice tvaru

$$\frac{D_1^2 x_2'^2}{n(n-1)^2} (n+2) - \frac{D_1 x_2'^2}{n(n-1)^2} \left[D'(n+2) + \frac{2}{x_2'} (n^2 - 1) \right] +$$

$$+ \frac{x_2'^2}{(n-1)^2} \left[D' + \frac{n-1}{x_2'} \right]^2 = 0$$

nebo po úpravě

$$D_1^2 (n+2) - D_1 \left[D'(n+2) + \frac{2}{x_2'} (n^2 - 1) \right] + n \left[D' + \frac{n-1}{x_2'} \right]^2 = 0 \qquad (14.3.2)$$

Lze snadno ukázat, že tato rovnice představuje elipsu.

Pro $n = 1{,}52$ a $\frac{1}{x_2'} = \frac{1}{0{,}025} = 40$ dioptrií

odtud dostáváme

$$3{,}52 . D_1^2 - D_1 \left[3{,}52 D' + 80 . 1{,}37 \right] + 1{,}52 \left[D' + 40 . 0{,}52 \right]^2 = 0$$

čili

$$D_1^2 - D_1 \left[D' + 29{,}78 \right] + 0{,}4318 D'^2 + 17{,}96 D' + 186{,}8 = 0 \qquad (14.3.13)$$

Diskriminant kvadratické části

$$a_{11} \cdot a_{22} - a_{12}^2 = 1 . 0{,}4318 - (-0{,}5)^2 = 0{,}4318 - 0{,}25 = 0{,}1818$$

je skutečně kladný, takže předchozí rovnice představuje elipsu. Je tedy vidět, že korekce astigmatismu šikmých svazků vede ke dvěma řešením, pro které z uvedené kvadratické rovnice vychází

$$(D_1)_{1,2} = \frac{D' + 29{,}78}{2} \pm \sqrt{\frac{(D' + 29{,}78)^2}{4} - 0{,}4318 D'^2 - 17{,}96 D' - 186{,}8}$$

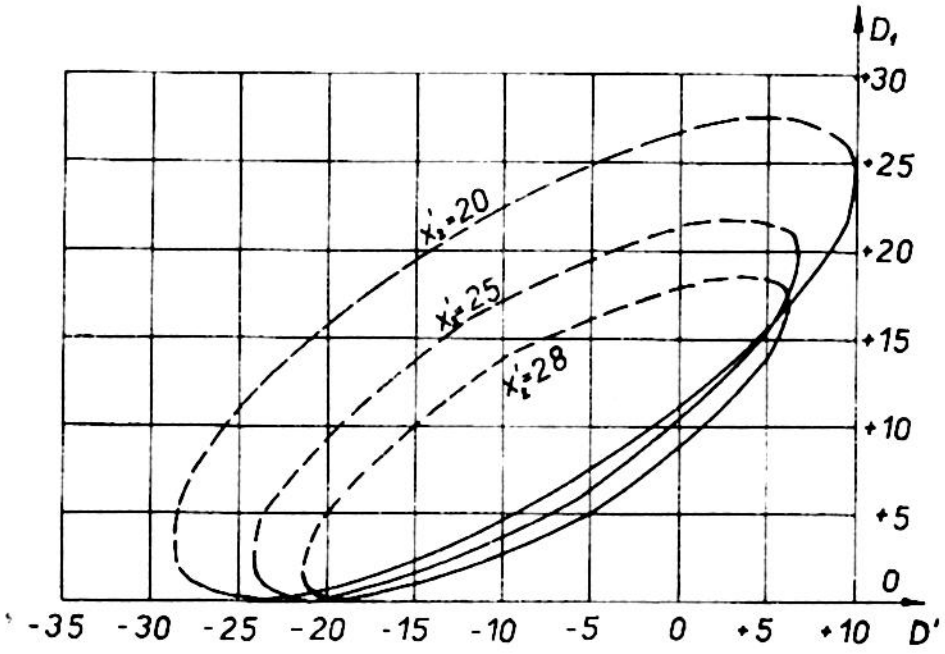
Protože závislost $D_1 = f(D')$ je představována elipsou, musí být řešení reálné jen pro D' ležící v určitých mezích. Jinak řečeno, existují dvě hodnoty D' takové, pro které obě řešení $(D_1)_1$ a $(D_1)_2$ splývají. Jsou to hodnoty, pro které je deskriminant předchozí rovnice roven nule, tj.

$$D'^2 + 16{,}88\,D' - 191{,}7 = 0 .$$

Odtud vychází $D_1' = -24{,}68$ a $D_2' = +7{,}78$ dioptrií. To znamená, že v uvažovaném případě bude řešení reálné pro D' ležící v intervalu

$$-24{,}68 < D' < +7{,}78 .$$

Příslušná elipsa se nazývá Tscherningova. Na obr. 14.3.3 jsou nakresleny tyto elipsy pro tři případy různých poloh středu otáčení oka a sice pro $x_2' = 20$, 25 a 28 mm.



Obr. 14.3.3 Tscherningovy elipsy

Pomocí těchto elips můžeme snadno určit k dané vrcholové lámavosti D' brýlového skla lámavost D_1 první jeho plochy. Např. pro lámavost $D' = -10$ dioptrií vychází pro $x_2' = 28$ mm $D_1 = +2{,}5$ dioptr. nebo $D_1 = +14{,}5$ dioptrií. Uvažujeme-li toto brýlové sklo jako tenkou čočku,

pak pro lámavost D_2 druhé jeho plochy vychází

$D_2 = D' - D_1 = -10 - 2{,}5 = -12{,}5$ dioptrií resp.

$D_2 = -10 - 14{,}5 = -24{,}5$ dioptrií.

Je vidět, že obě řešení vedou k meniskovému tvaru brýlového skla a že první řešení dává plošší čočku, což je z hlediska hospodárnosti výrobně výhodnější.

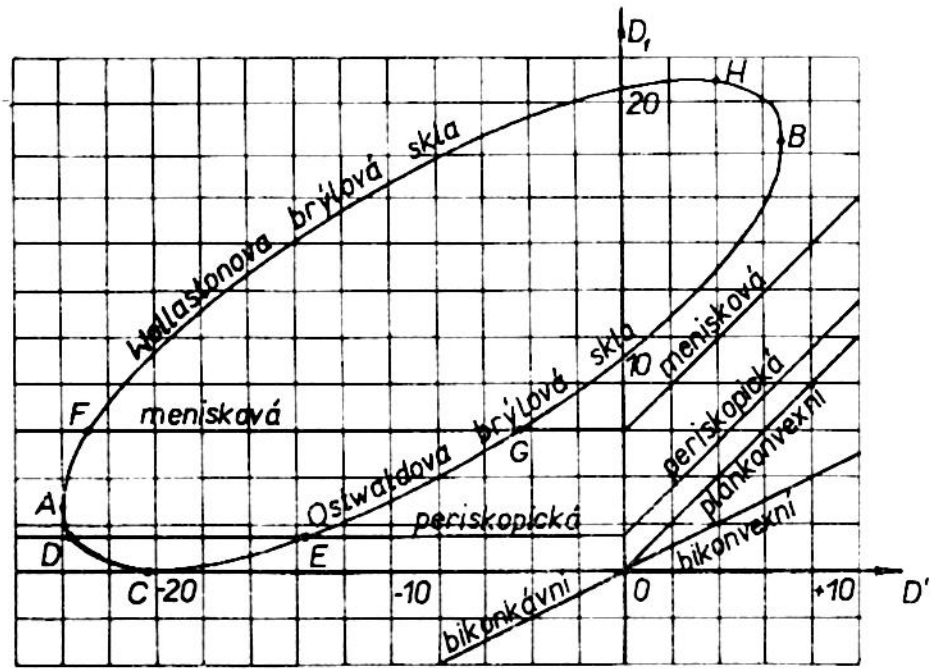
Nutno poznamenat, že menisková skla empiricky určil a zavedl Wollaston a teoreticky vyřešil Ostwald. Proto menisková skla s většími poloměry křivostí se nazývají Ostwaldova a s menšími poloměry křivosti Wollastonova (obr. 14.3.4).

Z obr. 14.3.4 plyne, že brýlové sklo odpovídající bodu C, ve kterém se Tscherningova elipsa dotýká osy D', a jehož lámavost $D' = -20{,}8$ diop-

trií, je plankonkávní, odvrácené rovinnou plochou od oka, přičemž střed otáčení oka splývá se středem křivosti druhé jeho plochy.

Na obr. 14.3.4 jsou graficky vyznačena i ostatní užívaná brýlová skla. Periskopická skla, která mají přední plochu o konstantní lámavosti 1,25 dioptrií, mají odstraněn astigmatismus pro lámavost $D' = -14{,}4$ a $D' = -24{,}3$ dioptrií (body E a D na obr. 14.3.4) a menisková skla, která mají odstraněn astigmatismus pro lámavost $D' = -4{,}4$ a $D' = -23{,}3$ dioptrie (body F a G).

Z toho plyne, že místo Tscherningových brýlových skel můžeme použít s dostatečnou přesností menisková skla pro lámavosti $D' > -10$ dioptrií, periskopická pro lámavosti D' v intervalu -17 až -10 dioptrií a plankonkávní v oblasti lámavostí $D' < -17$ dioptrií.



Obr. 14.3.4 Tscherningova elipsa v porovnání s oblastmi běžných brýlových skel

Hodnoty poloměrů křivosti obou řešení Tscherningovy rovnice jsou obsaženy v tab. 14.3.1 v rozsahu lámavostí D' od + 7 až - 24 dioptrií.

Tab. 14.3.1

D´ dioptrií	1.řešení		2. řešení	
	r_1 mm	r_2 mm	r_1 mm	r_2 mm
7	32,01	55,99	25,36	38,39
6	35,32	59,37	24,72	34,61
5	38,49	60,09	24,47	31,94
4	41,78	61,29	24,39	29,98
3	45,27	61,16	24,43	28,41
2	49,06	60,39	24,52	27,09
1	53,22	59,25	24,74	25,97
0	57,83	57,83	24,99	24,99
-1	62,93	56,22	25,31	24,15
-2	68,84	54,49	25,68	23,38
-3	75,48	52,67	26,11	22,71
-4	83,13	50,82	26,59	22,09
-5	92,04	48,96	27,13	21,54
-6	102,51	47,11	27,73	21,04
-7	114,98	45,29	28,40	20,58
-8	130,03	43,50	29,15	20,17
-9	148,51	41,77	29,99	19,78
-10	171,63	40,09	30,92	19,43
-11	201,18	38,46	31,96	19,11
-12	240,01	36,89	33,13	18,82
-13	294,73	35,37	34,46	18,57
-14	367,35	33,91	35,97	18,33
-15	478,84	32,50	37,70	18,12
-16	658,21	31,14	39,71	17,93
-17	978,67	29,83	42,08	17,77
-18	1652,92	28,55	44,90	17,64
-19	3552,02	27,32	48,35	17,54
-20	14223,55	26,10	52,69	17,48
-21	261500,00	24,90	58,35	17,46
-22	8211,65	23,70	66,20	17,49
-23	1869,99	22,47	78,25	17,62
-24	664,41	21,10	86,07	17,99

14.4) Trigonometrické určení tlustých brýlových skel s korigovaným astigmatismem šikmých svazků.

Tscherningova rovnice (14.3.12), určující lámavost D_1 první plochy brýlového skla v závislosti na jeho celkové lámavosti D', řeší problém brýlových skel s odstraněným astigmatismem pouze za předpokladu, že tloušťka brýlového skla je nula, tj., že brýlové sklo je uvažováno jako tenké čočka. Zavedeme-li však u takto určených brýlových skel konečnou tloušťku, poruší se podmínka pro odstranění astigmatismu, což se projeví tím, že toto sklo vykazuje určitý astigmatismus. Je proto nutno upravit tvar čoček určených Tscherningovou rovnicí a sledovat přitom trigonometrickým výpočtem její astigmatismus.

Postupuje se tak, že tvar brýlového skla se upravuje pro paprsek svírající s opt. osou úhel $\tau = 30^0$ tak dlouho, až se příslušný astigmatismus sníží na přípustnou hodnotu 0,05 dioptrie, tj. až se dosáhne, že

$$\left| \frac{1}{s'_2} - \frac{1}{t'_2} \right| \leq 0{,}05 \text{ dioptrie.}$$

Potom pro úhly $\tau < 30^0$ zůstává zbytkový astigmatismus, který již nepřekročí přípustnou hodnotu 0,05 dioptrií.

Velikost 0,05 dioptrií ještě tolerovatelné hodnoty astigmatismu je zdůvodněna v příloze II. tohoto skripta.

Příslušný postup trigonometrického sledování astigmatismu brýlového skla je zřejmý z příkladu brýlového skla o vrcholové lámavosti $D_v = +5$ dioptrií, uvedeného v příloze III. tohoto skripta.

Naznačeným způsobem se provede návrh brýlových skel potřebných ke korekci sférické ametropie v celém jejím rozsahu. Přitom při volbě osové tloušťky $\underline{d}$ těchto se vychází z tab. 14.4.1 a 14.4.2, kde jsou současně uvedeny i příslušné průměry skel.

Tab. 14.4.1

Lámavost D_v	1	2	3	4	5	6	7
D_{mm}	2,5	2,9	3,2	4,0	4,3	4,7	5,5
δ_{mm}	54	54	54	50	50	50	50

Tab. 14.4.2

Lámavost D_v	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
d_{mm}	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
ϕ_{mm}	54	54	54	50	50	50	50	50	47	47
Lámavost D_v	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20
d_{mm}	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
ϕ_{mm}	47	45	45	45	45	45	45	42	42	42

Naznačeným postupem dostaneme pro každou lámavost spojného resp. rozptylného brýlového skla hodnoty příslušných poloměrů křivosti, které jsou naprosto vzájemně odlišné. To vede ovšem k velmi široké přípravě výroby, neboť pro každý poloměr musí být připravena celá sada brousících a leštících nástrojů, což si vyžádá značných nákladů. Proto se při návrhu těchto brýlových skel postupuje tak, že se sjednotí u několika brýlových skel poloměr r_2 druhých ploch.

Přitom se postupuje nejlépe takto: Pro každou vrcholovou lámavost v rozsahu od - 20 do + 7 dioptrií se určí trigonometrickým propočtem poloměry r_1 a r_2 tak, aby astigmatismus $\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{t_2'}$ byl minimální (prakticky nulový). K příslušným hodnotám poloměru křivosti první plochy r_1 se určí odchylky $+\Delta r_2$ resp. $-\Delta r_2$ poloměru křivosti r_2 druhé plochy, pro které zůstává astigmatismus $\left| \frac{1}{s_2'} - \frac{1}{t_2'} \right| \leq 0{,}05$ dioptrie. Tím dostáváme pro každou jednotlivou vrcholovou lámavost D_v toleranční pole pro poloměr křivosti r_2 druhé plochy. V rámci příslušných tolerančních polí sousedních brýlových skel, pokud se tato pole prolínají, můžeme pro několik skel sjednotit poloměr r_2 tak, aby alespoň pro tři brýlová skla byl tento poloměr stejný.

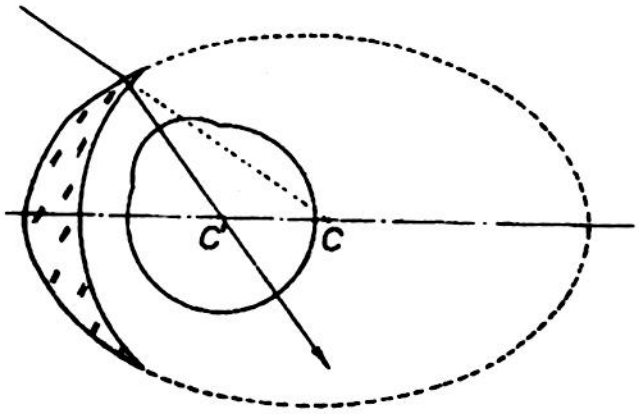
14.5) Astigmatická spojná brýlová skla s vrcholovou lámavostí vyšší než + 7 dioptrií.

Jak vyplývá z předchozích úvah, Tscherningova rovnice, řešící problém astigmatických brýlových skel, dovoluje konstruovat astigmatická spojná skla pouze do + 7 dioptrií. Pro oko s ametropií vyšší než + 7 dioptrií, je sice možno určit zdlouhavým trigonometrickým propočtem poloměry r_1 a r_2 brý-

lového skla, které má potlačeno astigmatismus na minimální míru. Taková skla jsou velmi těžká a neesteticka.

U spojných meniskových brýlových skel s vrcholovou lámavostí větší než + 7 dioptrií vychází astigmatismus kladný $s'_2 > t'_2$. K vyloučení tohoto astigmatismu je nutné použít ke konstrukci příslušného brýlového skla meniskovou čočku s jednou rotačně souměrnou asferickou plochou. Využije se přitom vlastnosti asferických ploch, že hlavní křivosti $\frac{1}{r_s}$ resp. $\frac{1}{r_t}$ jsou různé, zatímco u kulových ploch jsou stejné.

Z výrobních důvodů je třeba pro tento účel použít takovou plochu, jejíž opracování by bylo pokud možno nejhospodárnější. Této podmínce vyhovují nejvíce plochy, jejichž meridián je tvořen kuželosečkami. Přitom asferická plocha se umisťuje jako první, jak je to naznačeno na obr. 14.5.1.



Obr. 14.5.1 Umístění asferické plochy u brýlového skla s vysokou kladnou vrcholovou lámavostí.

Orientujeme-li takto upravené sklo tak, jak je to provedeno na obr. 14.5.2, pak můžeme psát rovnici meridiánu asferické plochy, která má svůj vrchol v počátku příslušné souřadnicové soustavy, ve tvaru

$$y^2 = ax + b\,x^2 . \qquad (14.5.1)$$

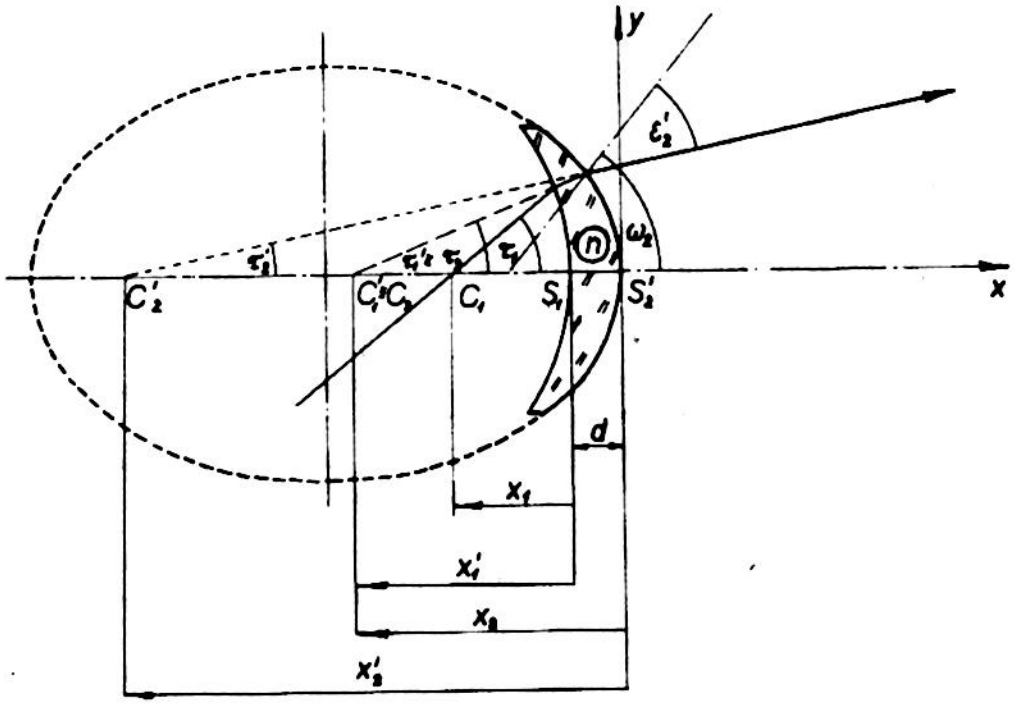
Naším úkolem je určit koeficienty a a b tak, aby brýlové sklo mělo předepsanou vrcholovou lámavost a aby současně astigmatismus šikmého svazku odpovídajícímu úhlu $\tau_1 = 30^\circ$ byl menší než 0,05 dioptrie.

Abychom určili správně vstupní parametry potřebné pro trigonometrické sledování astigmatismu, orientujeme brýlové sklo obráceně, než jak je umístěno normálně před korigovaným okem, jak je to vidět na obr. 14.5.2.

Aby hledané astigmatické brýlové sklo mělo danou vrcholovou lámavost, je nutné, aby poloměr křivosti ve vrcholu meridiánu příslušné asferické plochy byl roven poloměru r_2 daného Tscherningovou rovnicí.

Pro poloměr křivosti křivky platí obecně

$$r = \frac{[1 + y'^2]^{\frac{3}{2}}}{y''} . \qquad (14.5.2)$$



Obr. 14.5.2 K určení vstupních parametrů brýlového skla s vysokou lámavostí a asferickou plochou.

Diferencováním (14.5.1) dostaneme postupně

$$\frac{dy}{dx} = y' = \frac{a + 2bx}{2y} \qquad (14.5.3)$$

$$\frac{dy^2}{dx^2} = y'' = \frac{2y \cdot 2b - 2y'(a + 2bx)}{4y^2} = \frac{4by^2 - (a + 2bx)^2}{4y^3} . \qquad (14.5.4)$$

Dosazením z (14.5.3) a (14.5.4) do (14.5.2) dostaneme

$$r = \frac{\left[1 + \frac{(a + 2bx)^2}{4y^2}\right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{4by^2 - (a + 2bx)^2}{4y^3}} = \frac{\left[4y^2 + (a + 2bx)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{2\left[4by^2 - (a + 2bx)^2\right]} .$$

Tento poloměr nabude ve vrcholu[x)] našeho meridiánu hodnoty

$$r = r_2 = \frac{\pm (a^2)^{\frac{3}{2}}}{-2a^2} = +\frac{a}{2} , \qquad (14.5.5)$$

volíme-li znaménko odmocniny v souhlase s orientací uvažovaného brýlového skla podle obr. 14.5.2.

x) Souřadnice vrcholu: x=0 , y=0 .

Můžeme tedy rovnici (14.5.1) meridiánu asferické plochy psát ve tvaru

$$y^2 = 2 r_2 x + b x^2 . \qquad (14.5.6)$$

Abychom mohli určit astigmatismus tohoto brýlového skla, musíme nejdříve určit polohu vstupní pupily.

V orientaci podle obr. 14.5.2 tvoří střed této pupily bod C_2' sdružený k bodu C_1, který tvoří střed otáčení oka. Je tedy nutno určit sečnou vzdálenost x_2' bodu C_2'. Propočítejme tedy průchod paprsku procházejícího bodem C_1, o sečné vzdálenosti $x_1 = 25 - 28$ mm, svírajícího s optickou osou úhel $\tau_1 = 30^\circ$.

Označíme-li n index lomu příslušného skla, dostaneme postupně pro lom na první ploše

$$\sin \varepsilon_1 = \frac{x_1 - r_1}{r_1} . \sin \tau_1 \qquad (14.5.7)$$

$$\sin \varepsilon_1' = \frac{\sin \varepsilon_1}{n} \qquad (14.5.8)$$

$$\tau_1' = \tau_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_1' \qquad (14.5.9)$$

$$x_1' = r_1 + \frac{r_1 \sin \varepsilon_1'}{\sin \tau_1'} \qquad (14.5.10)$$

$$x_2 = x_1' - d \qquad (14.5.11)$$

$$\tau_2 = \tau_1' . \qquad (14.5.12)$$

Abychom mohli sledovat lom na druhé, asférické ploše, musíme nejdříve určit bod dopadu a úhel normály v tomto bodě s x-ovou osou.

Paprsek lomený na první ploše a dopadající na druhou, asferickou plochu, je charakterisován rovnicí

$$y = - (x - x_2) . \operatorname{tg} \tau_2 . \qquad (14.5.13)$$

Bod dopadu na asferickou plochu je průsečíkem této přímky s asferickým meridiánem, a dostaneme jej řešením rovnice (14.5.13) s rovnicí (14.5.6). Nechť x_{20} resp. y_{20} značí jeho souřadnice.

Pro úhel ω_2 normály v bodě x_{20}, y_{20} vychází

$$\operatorname{tg} \omega_2 = - \frac{1}{\frac{dy}{dx}} \qquad (14.5.14)$$

Z (18.5.3) tedy dostaneme

$$\operatorname{tg} \omega_2 = \frac{2y_{20}}{2\,r_2 + 2\,b\,x_{20}} \,. \qquad (14.5.15)$$

Nyní můžeme již sledovat snadno lom na druhé asferické ploše, neboť

$$\varepsilon_2 = \omega_2 - \tau_2 \qquad (14.5.16)$$

$$\sin \varepsilon'_2 = n \,.\, \sin \varepsilon_2 \qquad (14.5.17)$$

$$\tau'_2 = \omega_2 - \varepsilon'_2 \qquad (14.5.18)$$

a konečně

$$x'_2 = y_{20} \operatorname{cotg} \tau'_2 + x_{20} \,. \qquad (14.5.19)$$

Tím jsme určili polohu x'_2 vstupní pupily. Stačí tedy změnit orientaci brýlového skla tak, aby odpovídalo poloze, při které je používáno, a můžeme určit astigmatismus pro paprsek dopadající pod úhlem $\tau_1 = 30^\circ$. Dříve však ještě je nutno určit poloměry křivosti v hlavních směrech pro bod dopadu x_{20} , y_{20} na asferickou plochu.

Poloměr r_t v tangenciálním řezu je roven poloměru křivosti meridiánu v bodě x_{20} , y_{20} a poloměr r_s v sagitálním směru je roven délce normály v bodě x_{20} , y_{20} vymezené průsečíkem s optickou osou.

Pro poloměr r_t tedy dostáváme

$$r_t = \frac{\left[4\,y_{20}^2 + (2\,r_2 + 2\,b\,x_{20})^2\right]^{\frac{3}{2}}}{2\left[4\,b\,y_{20}^2 - (2\,r_2 + 2\,b\,x_{20})^2\right]} = \frac{\left[y_{20}^2 + (r_2 + b\,x_{20})^2\right]^{\frac{3}{2}}}{b\,y_{20}^2 - (r_2 + b\,x_{20})^2} \,. \qquad (14.5.20)$$

Pro poloměr r_s plyne

$$r_s = \frac{y_{20}}{\sin \omega_2} \,. \qquad (14.5.21)$$

Závěrem je ještě třeba určit velikost šikmé tloušťky brýlového skla $d\grave{}$. Platí

$$d\grave{}_1 = \frac{h_1 - y_{20}}{\sin \tau'_1} \,, \qquad (14.5.22)$$

kde $h_1 = r \,.\, \sin (\tau_1 + \varepsilon_1)$.

Tím máme všechno připraveno pro trigonometrické sledování astigmatismu. Je třeba jen vhodně upravit některé předchozí vztahy s ohledem na změněnou orientaci brýlového skla. Tak dostanou potřebné vztahy tento tvar:

$$x_1 = - x'_2 \qquad (14.5.23)$$

$$\tau_1 = - \tau'_2 \,. \qquad (14.5.24)$$

Vstupní paprsek bude určen rovnicí

$$y = -(x - x_1) \cdot \operatorname{tg} \tau_1 \quad \text{čili}$$
$$y = (x_1 - x) \cdot \operatorname{tg} \tau_1 \,. \qquad (14.5.25)$$

Řešíme-li tuto rovnici s rovnicí meridiánu

$$y^2 = 2 r_1 x + b x^2 \,, \qquad (14.5.26)$$

kde r_1 značí poloměr křivosti meridiánu asferické plochy v jejím vrcholu. Tak dostaneme souřadnice x_{10} , y_{10} bodu dopadu paprsku (14.5.25) na asférickou plochu.

Pro úhel ω_1 normály meridiánu v bodě (x_{10}, y_{10}) pak vychází

$$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{2 y_{10}}{2 r_1 + 2 b x_{10}} \,. \qquad (14.5.27)$$

Potom

$$\varepsilon_1 = \omega_1 - \tau_1 \qquad (14.5.28)$$

$$\sin \varepsilon_1' = \frac{\sin \varepsilon_1}{n} \qquad (14.5.29)$$

$$\tau_1' = \omega_1 - \varepsilon_1' \qquad (14.5.30)$$

$$x_1' = x_{10} + y_{10} \operatorname{cotg} \tau_1' \qquad (14.5.31)$$

$$x_2 = x_1' - d \qquad (14.5.32)$$

$$\tau_2 = \tau_1' \qquad (14.5.33)$$

$$\sin \varepsilon_2 = \frac{x_2 - r_2}{r_2} \sin \tau_2 \qquad (14.5.34)$$

$$\sin \varepsilon_2' = n \cdot \sin \varepsilon_2 \qquad (14.5.35)$$

$$\tau_2' = \tau_2 + \varepsilon_2 - \varepsilon_2' \qquad (14.5.36)$$

$$x_2' = r_2 + \frac{r_2 \sin \varepsilon_2'}{\sin \tau_2'} \qquad (14.5.37)$$

$$h_1 = y_{10} \qquad (14.5.38)$$

$$h_2 = r_2 \cdot \sin (\tau_2 + \varepsilon_2) \qquad (14.5.39)$$

$$d_1' = \frac{h_1 - h_2}{\sin \tau_1'} = \frac{y_{10} - r_2 \sin (\tau_2 + \varepsilon_2)}{\sin \tau_1'} \qquad (14.5.40)$$

$$r_{t1} = - \frac{\left[y_{10}^2 + (r_1 + b x_{10})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{b y_{10}^2 - (r_1 + b x_{10})^2} \qquad (14.5.41)$$

$$r_{s1} = \frac{y_{10}}{\sin \omega_1} . \qquad (14.5.42)$$

Na základě výsledků dosažených vyčíslením těchto vztahů můžeme přejít k trigonometrickému sledování astigmatismu uvažovaného brýlového skla.

V příloze IV. je proveden výpočet brýlového skla s vrcholovou lámavostí + 10 dioptrií.

Když jsme tímto způsobem určili meridián hledané asferické plochy, jehož rovnice má tvar

$$y^2 = 2 r_1 x_1 + b x^2 ,$$

provedeme transformaci této rovnice na středový tvar, abychom mohli rychle určit osy 2p a 2q příslušné elipsy, které musíme znát z důvodů příslušné technologie výroby.

Položme proto

$$x' = x - p$$
$$y' = y$$

a můžeme předchozí rovnici psát ve tvaru

$$y'^2 - b (x' + p)^2 - 2 r_1 (x' + p) = 0$$

nebo po úpravě

$$- b x^2 - 2bpx' - bp^2 + y'^2 - 2r_1 x' - 2r_1 p = 0 .$$

Protože ve středovém tvaru členy s x' vymizí, musí platit

$$- 2bpx' - 2r_1 x' = 0$$

čili

$$p = - \frac{r_1}{b} .$$

Potom předchozí rovnice nabude tvaru

$$\frac{x'^2}{\frac{r_1^2}{b^2}} + \frac{y'^2}{-\frac{r_1^2}{b}} = 1$$

Tedy

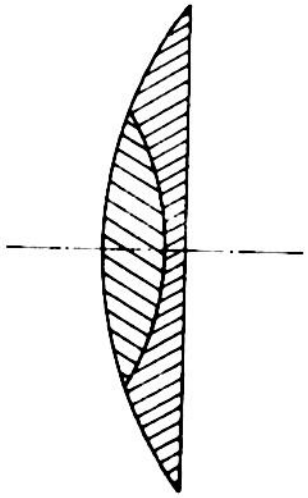
$$p = \pm \sqrt{\frac{r_1^2}{b^2}} = - \frac{r_1}{b}$$

$$q = \pm \sqrt{- \frac{r_1^2}{b}} = + \frac{r_1}{\sqrt{- b}} .$$

Tím je meridián hledané asferické plochy určen i z hlediska výrobního.

Poznámka

Astigmatismus šikmých svazků je možno odstranit též použitím brýlového skla stmeleného z korunové spojky a flintové rozptylky, jak je to naznačeno na obr. 14.5.3. Příslušné brýlové sklo je však poměrně velmi těžké a vyvolává zabarvení obrazu, které je způsobováno disperzí flintového členu.



Obr. 14.5.3 Tmelené brýlové anastigmatické sklo

14.6) Změna lámavosti brýlových skel

Vraťme se na okamžik opět k brýlovým sklům, která nemají odstraněn astigmatismus šikmých svazků, jak tomu je např. v případě bikonvexních a bikonkávních brýlových skel.

Nechť s' resp. t' značí sečnou vzdálenost sagitálního resp. tangenciálního obrazu Y_S' resp. Y_T' měřenou na příslušném hlavním paprsku. Nechť dále značí

$$\Sigma' = \frac{1}{s'} \quad \text{resp.} \quad T' = \frac{1}{t'}$$

příslušné vergence vyjádřené v dioptriích.

Jak již bylo dříve uvedeno, oko snaží se akomodovat tak, aby na sítnici padl nejmenší rozptylový kroužek, který leží mezi oběma obrazy Y_S' a Y_T'. Této poloze odpovídá lámavost

$$\frac{\Sigma' + T'}{2} .$$

Tato hodnota však se může značně odlišovat od vrcholové lámavosti D_v, potřebné ke korekci oka. Jak je patrno z obr. 14.6.1, u brýlových bi-skel dochází ke vzrůstu astigmatismu.

Na tomto obrázku jsou znázorněny hodnoty astigmatismu $T' - \Sigma'$ a změny lámavosti $\frac{\Sigma' + T'}{2} - D_v$ pro úhel $\tau' = 35^0$ pro skla bikonvexní a $\tau' = 30^0$ pro skla bikonkávní.

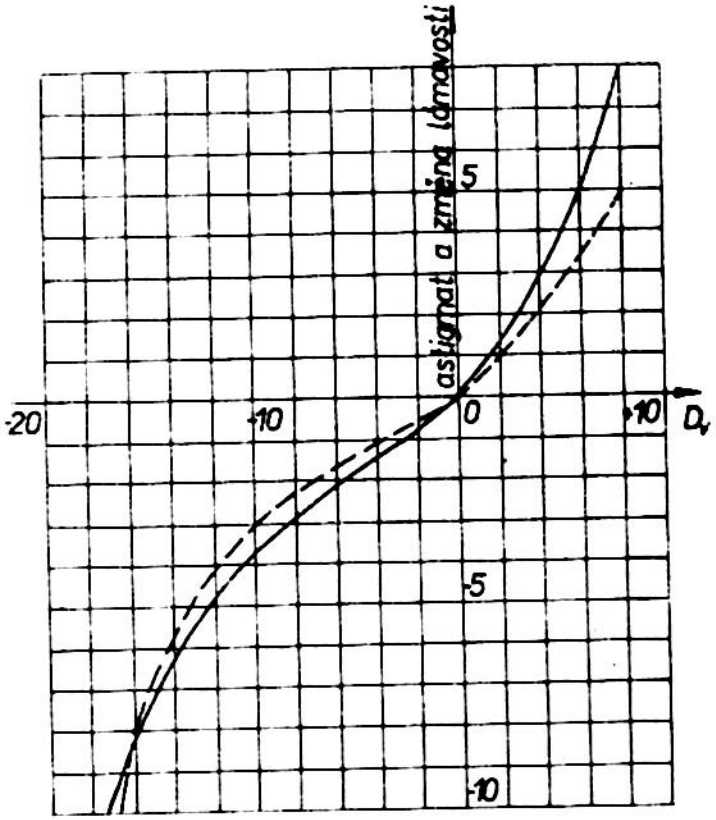
Je vidět, že např. pro brýlové bikonkávní sklo o vrcholové lámavosti $D_v = -4$ dioptrie činí změna lámavosti 1 dioptrii. Tato skutečnost vysvětluje, proč není možno u silně krátkozrakých lidí vykorigovat bikonkávním sklem na optické ose úplně příslušnou ametropii, neboť již při malém vychýlení oka se velmi rychle korekce porušuje.

U plankonvexních brýlových skel je již změna lámavosti značně menší, jak to vysvítá z obr. 14.6.2, na kterém je vyznačen astigmatismus (——) a změna lámavosti (– – –) plankonvexních a plankonkávních brýlových skel a změna lámavosti (-----) punktálních skel (Tscherningových).

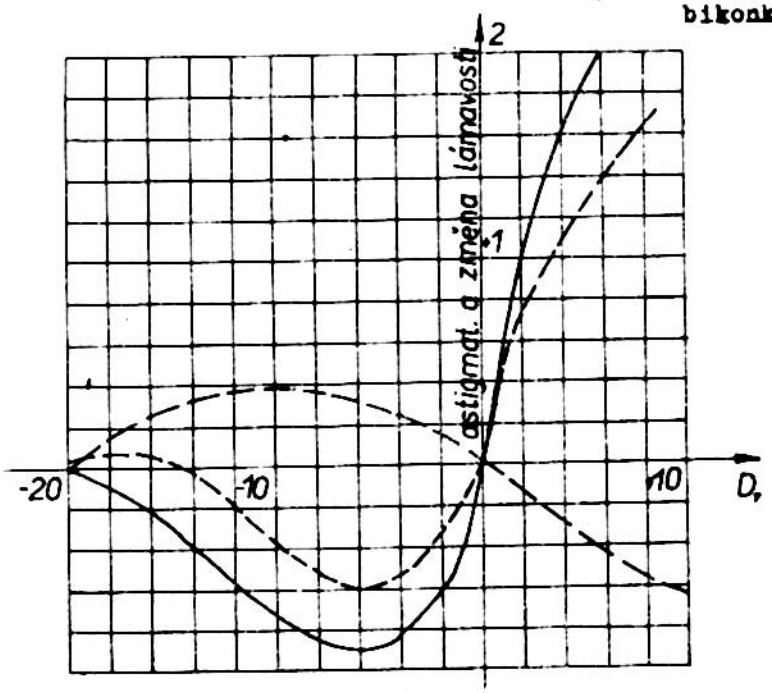
V případě punktálních skel je změna lámavosti způsobena tím, že poloměr $-\frac{n}{D'}$ není shodný s poloměrem koule, po které se pohybuje vzdálený bod oka a jehož hodnota je

$$-\frac{1}{D'} + q' = -\frac{1 - D'q'}{D'} \quad ,$$

kde q' značí vzdálenost středu otáčení oka od brýlového skla.



Obr. 14.6.1 Astigmatismus (——) a změna lámavosti (– – –) bikonvexních a bikonkávních brýlových skel (pro 35° u bikonvexních a 30° u bikonkávních).



Obr. 14.6.2 Astigmatismus (——) a změny lámavosti (– – –) pro plankonvexní skla a změny lámavosti (----) pro punktální skla.

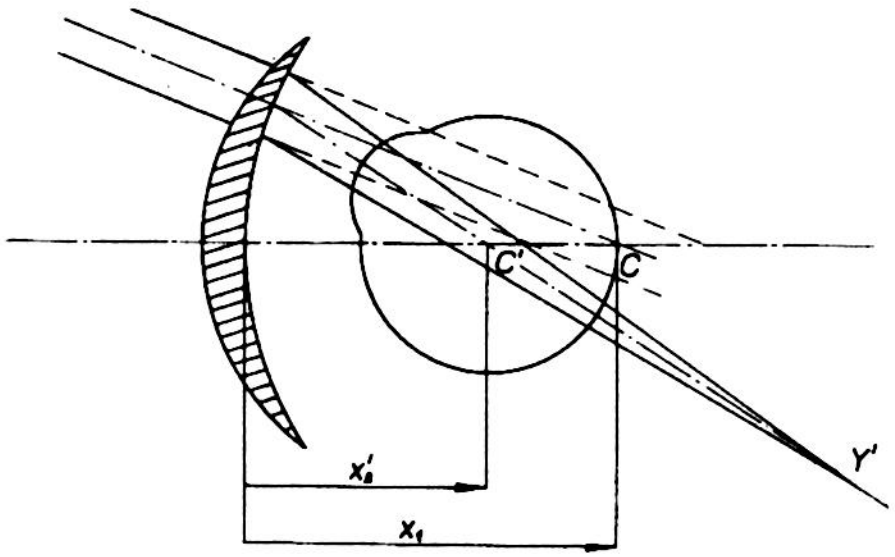
Změna lámavosti u punktálních skel bude nulová, budou-li oba poloměry shodné, tj. bude-li platit

$$\frac{1 - q'D'}{D'} = \frac{n}{D'} \, .$$

Tato rovnice má dvě řešení $D' = 0$ a $D' = \frac{1 - n}{q'}$.

14.7) Korekce astigmatismu šikmých svazků brýlových skel pro vidění na blízko.

Je-li brýlové sklo konstruováno tak, že má odstraněn astigmatismus pro vzdálené předměty a je-li toto sklo použito pro pozorování blízkých předmětů, tj. akomoduje-li oko umístěné za brýlovým sklem, pak je příslušné zobrazování zatíženo slabým astigmatismem, který bývá obyčejně zanedbatelným. Např. při použití punktálního skla Ostwaldova typu, o vrcholové lámavosti D_v = = - 10 dioptrií, pro pozorování předmětu ve vzdálenosti 330 mm od brýlového skla, je zobrazení doprovázeno astigmatismem velikosti 0,13 dioptrií, což je hodnota skutečně zanedbatelná.



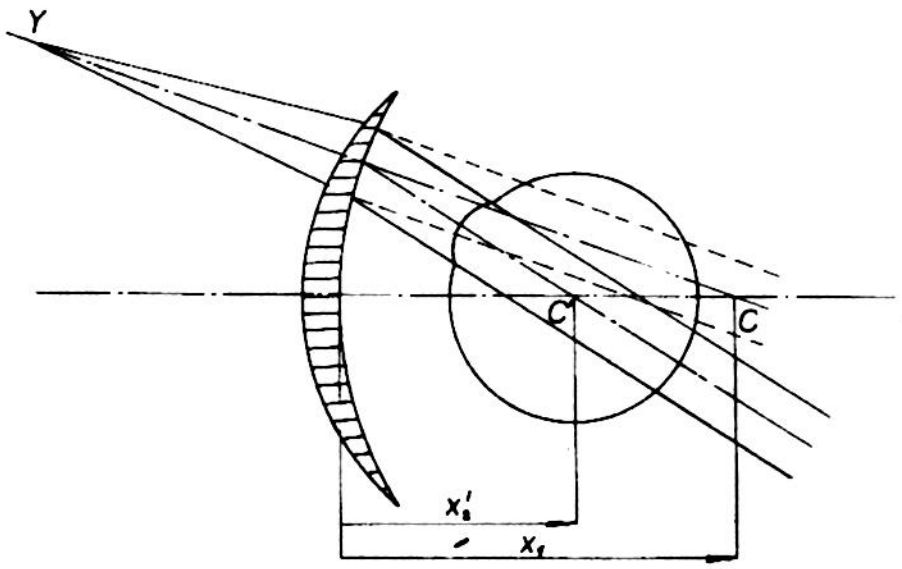
Obr. 14.7.7.1 Pozorování dalekého předmětu Y .

14.7.1) Stařecké oko

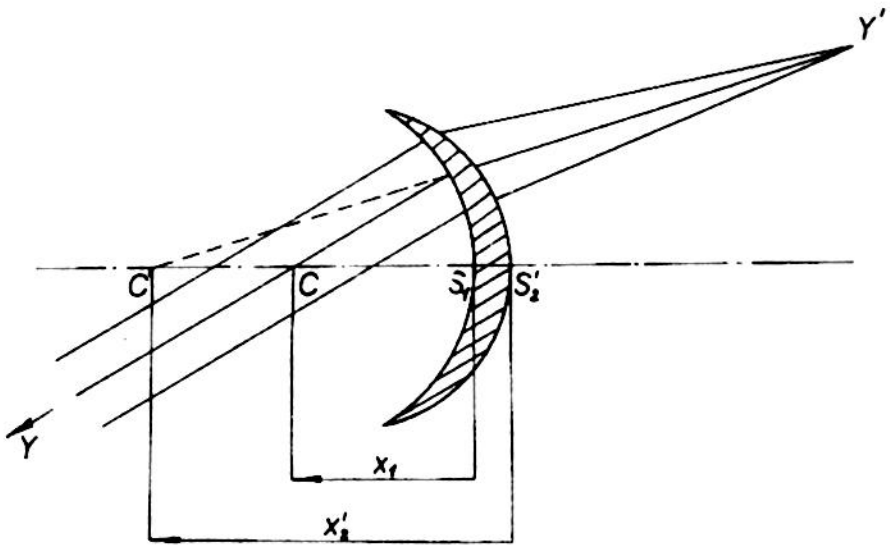
Případ stařeckého emmetropického oka můžeme převést na případ ametropického oka korigovaného na astigmatismus pro pozorování dalekých předmětů. V prvním případě, znázorněném na obr. 14.7.1.1 dopadá na brýlové sklo rovnoběžný paprskový svazek, jehož střední paprsek prochází bodem C , ležícím ve vzdálenosti x_1 , který je transformován brýlovým sklem na kuželový svazek, jehož střední paprsek prochází bodem C´, ležícím ve vzdálenosti x_2' .

V druhém případě dopadá na brýlové sklo kuželový svazek paprsků vycházejících z pozorovaného bodu Y , jehož střední paprsek prochází bodem C´(14.7.7.2).

Obrátíme-li v druhém případě paprskový chod, jak je to naznačeno na obr. 14.7.1.3, pak na brýlové sklo, které uvažujeme jako tenké, dopadá svazek rovnoběžných paprsků, jehož střední paprsek prochází bodem C , a láme



Obr. 14.7.1.2 Pozorování blízkého předmětu Y .



Obr. 14.7.1.3 K určení anastigmatického brýlového skla pro vidění na blízko.

se do kuželového svazku, jehož střední paprsek prochází bodem C′, který je sdruženým bodem k bodu C . Platí tedy pro jeho sečnou vzdálenost x'_2

$$\frac{1}{x'_2} = D' + \frac{1}{x_1} , \qquad (14.7.1.1)$$

kde D′ značí lámavost brýlového skla a x_1 vzdálenost středu otáčení od vrcholu skla (= 25 mm).

To znamená, že Tscherningova rovnice (14.3.12) zůstává v platnosti, když do ní dosadíme za $\frac{1}{x_2}$ hodnotu (14.7.1.1) a za D_1 hodnotu

$$D' - D_1 ,$$

neboť nyní se stává druhá plocha brýlového skla první plochou. Tak dostáváme:

$$(D'- D_1)^2 . (n + 2) - (D'- D_1) . \left[D'(n + 2) + 2(D' + \frac{1}{x_1}) . (n^2- 1)\right] +$$

$$+ n\left[D' + (D' + \frac{1}{x_1}) . (n - 1)\right]^2 = 0$$

nebo po úpravě

$$D_1^2 (n + 2) + D_1 \left[\frac{2}{x_1} (n^2 - 1) + D'(2 n^2 - n - 4)\right] + D'^2(n^3 - 2n^2 + 2) +$$

$$+ \frac{2D'}{x_1} (n^3 - 2n^2 + 1) + \frac{n}{x_1^2} (n - 1)^2 = 0 \qquad (14.7.1.2)$$

Pro $n = 1,52$ a $\frac{1}{x_1} = - 40$ dioptrií odtud plyne dále

$$3,52 D_1^2 - D_1(104,8 + 0,8992 D') + 0,891 D'^2 + 8,72 D' + 657,6 = 0 \qquad (14.7.1.3)$$

Je to opět rovnice elipsy, podobná elipse Tscherningově. Tato elipsa se nedotýká osy D', takže jejím řešením není v žádném případě plankonvexní čočka. Z jejího diskriminantu

$$\frac{(104,8 + 0,8992 D')^2}{4 . 3,52^2} - \frac{0,891 D'^2 + 8,72 D' + 657,6}{3,52}$$

plyne, položíme-li ho rovný nule, že řešení D' předchozí rovnice leží v mezích

$$- 9,67 < D' < 15,27 \text{ dioptrií.}$$

Předpokládejme např., že brýlové sklo má umožnit vidění na vzdálenost 33 cm. Potom $D' = \frac{1}{0,33} = 3$ dioptrie. Z rovnice (14.7.1.3) pak dostáváme pro $D' = 3$ řešení

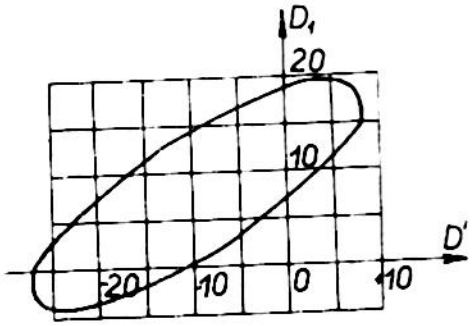
$$D_1 = 9,2 \text{ dioptrie a}$$
$$D_1 = 21,3 \text{ dioptrie.}$$

Porovnáme-li tento výsledek s řešeními, která dává Tscherningova rovnice (viz obr. 14.3.4), vidíme, že se mnoho neliší.

Z toho důvodu se užívají pro vidění na blízko pro stařecké emmetropické oko punktální brýlová skla konstruovaná pro vidění na dálku.

Pro stařecké ametropické oko lze vypočítat brýlová skla pro vidění na blízko, která rovněž odpovídají elipse podobné Tscherningově. Na obr. 14.7.1.4

je znázorněna tato elipsa, navržená M. Rohrem pro lámavost D' tenkých brýlových skel, určených pro vidění na vzdálenost 33 cm při $n = 1{,}52$ a $x_2' =$ = 28 mm.

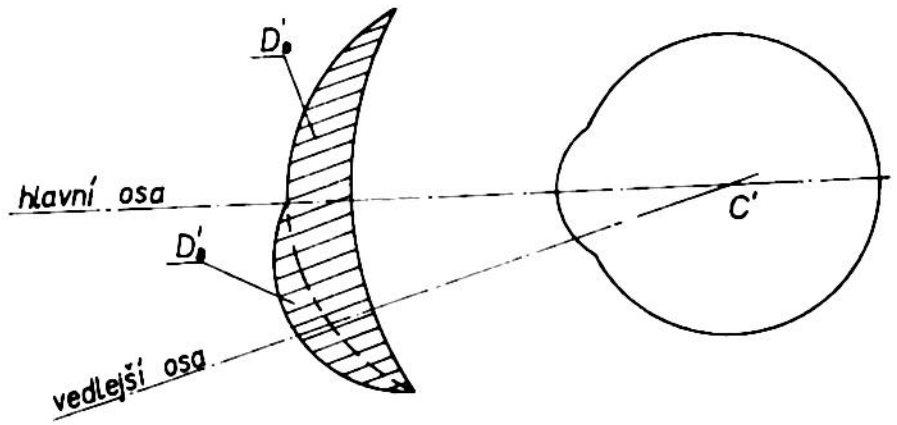


Obr. 14.7.1.4 Anastigmatická brýlová skla pro vidění na vzdálenost 33 cm používaná pro stařecké ametropické oko o ametropii R = D' dioptrií.

14.7.2) Bifokální brýlová skla

Bifokální brýlová skla jsou nejlepším řešením, které umožňuje stařeckému oku vidění na dálku i na blízko s minimálními obtížemi. Sestává ze dvou částí, přičemž horní část má lámavost D_D' odpovídající vidění dalekých předmětů a dolní část má lámavost D_B' odpovídající vidění blízkých předmětů. Rozdíl obou lámavostí činí zpravidla několik dioptrií a je obyčejně

$$D_B' - D_D' \leqslant 4 \text{ dioptrie.}$$



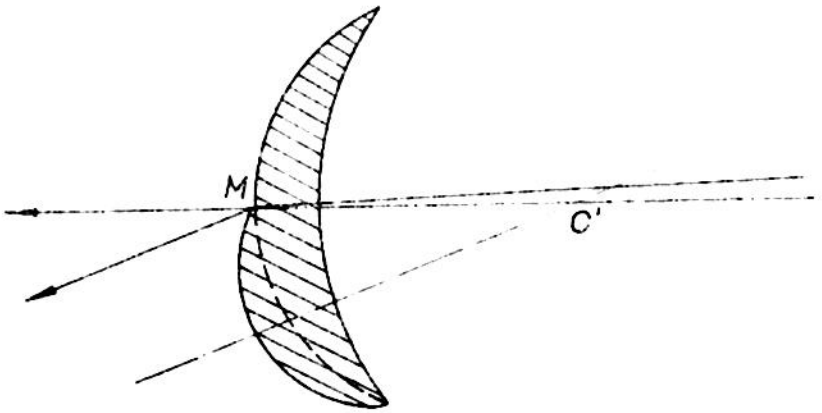
Obr. 14.7.2.1 Princip bifokálního skla.

Každé brýlové bifokální sklo musí splňovat řadu podmínek:

1) Každá z obou částí určených pro vidění na dálku a na blízko musí být prosta optických vad, zejména astigmatismu šikmých svazků. Aby mohl být astigmatismus anulován v obou částech, je nutné, aby obě části bifokálního brýlového skla byly centrovány. To znamená, že optické osy (hlavní i vedlejší) obou částí bifokálního skla musí procházet středem C' otáčení oka, jak je to naznačeno na obr. 14.7.2.1. Tato podmínka je nutná, avšak není dostačující, neboť mimo tuto podmínku musí být u obou částí odstraněn astigmatismus šikmých svazků a to v případě horní části pro předměty vzdálené a v případě dolní části pro předměty blízké.

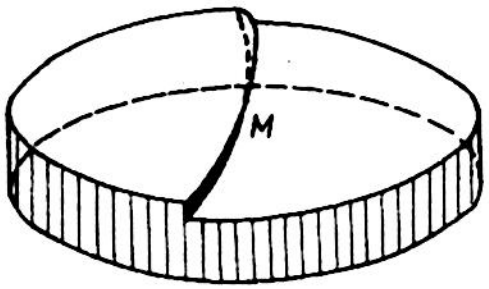
2) Obě části bifokálního brýlového skla se vzájemně setkávají podél rozhraní, které nemá být viditelné.

3) Při přechodu přes rozhraní obou částí bifokálního brýlového skla nemá docházet ke "skoku" obrazu. Tento skok vzniká proto, jak je patrno z obr. 14.7.2.2, protože v příslušném bodě M rozhraní působí dolní část jako klín a odchyluje příslušný paprsek při přechodu rozhraním skokem směrem dolů.



Obr. 14.7.2.2 Vznik skoku obrazu.

Podmínka odstranění skoku obrazu nemůže být splněna ve všech bodech rozhraní, neboť lámavosti obou částí se liší, takže příslušné kulové plochy mají jiný poloměr křivosti. Je známo, že dvě koule o různých poloměrech se však mohou dotýkat pouze v jediném bodě, jak je to vidět z obr. 14.7.2.3.



Obr. 14.7.2.3 Vzhled rozhraní obou částí bifokálního skla.

Aby v tomto jediném bodě M rozhraní nedocházelo ke skoku obrazu, musí se podle obr. 14.7.2.4 paprsek $\overline{YM}$ lámat v uvažovaném bodě M rozhraní oběma polovinami bifokálního skla do téhož bodu C´.

Potom platí pro úhel $\widehat{BC'D}$

$$\widehat{BC'D} = \tau'_D - \tau'_B = \tau_D - \tau_B .$$

Podle (14.1.1) můžeme pro úhly τ psát

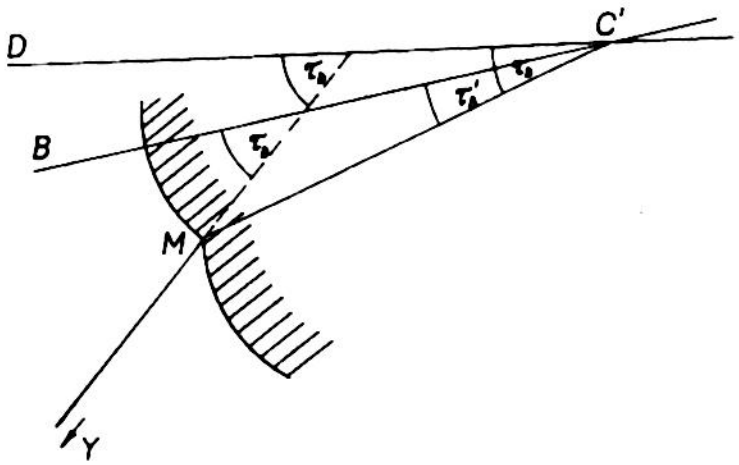
$$\tau'_D - \tau'_B = \tau_D - \tau_B = \tau'_D(1 - D'_D x') - \tau'_B (1 - D'_B x')$$

čili

$$\tau'_D . D'_D = \tau'_B . D'_B , \qquad (14.7.2.1)$$

což je hledaná podmínka pro odstranění skoku obrazu v bodě M .

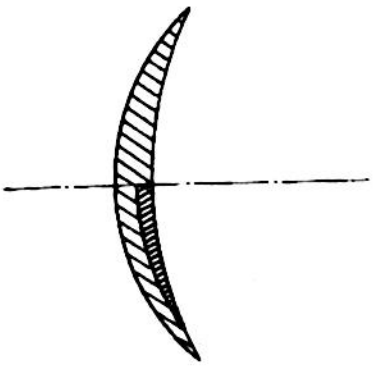
Všimněme si nyní poněkud blíže uspořádání bifokálních brýlových skel. Brýlové sklo může být upraveno tak, že kulové plochy obou částí se budou v bodě M rozhraní dotýkat, jak to bylo naznačeno na obr. 14.7.2.3. Z před-



Obr. 14.7.2.4 K určení podmínky pro odstranění skoku obrazu.

V tomto případě je rozhraní sice neviditelné, ale není možno zase odstranit skok obrazu.

Všimněme si nyní svařovaných bifokálních brýlových skel. Tvar těchto bifokálních brýlových skel je vidět na obr. 14.7.2.6 a 14.7.2.7.

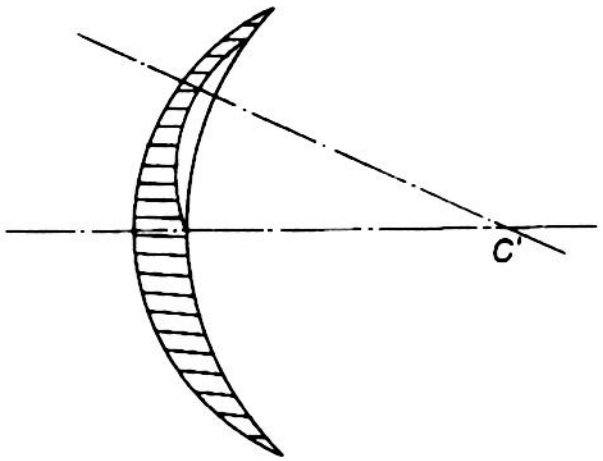


Obr. 14.7.2.6 Svařované bifokální brýlové sklo bez skoku obrazu.

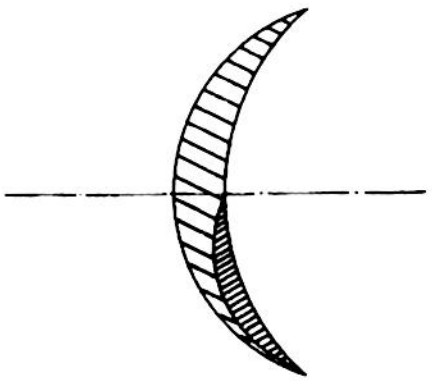
Svařovaná bifokální brýlová skla se zhotovují tak, že se do základního brýlového skla z korunového skla vybrousí kulové lůžko, jehož koule má poloměr křivosti r' a jehož průměr je asi 20 mm, jak je to naznačeno na

chozího je patrno, že je možno zajistit, aby v bodě M rozhraní byl odstraněn skok obrazu. Na druhé straně však rozhraní má schodkovitý tvar a nesplňuje podmínku neviditelnosti.

Brýlové sklo může být uspořádáno též tak, že jedna část může být zhotovena tak, že se do základního skla vybrousí kulová plocha, jak je to vidět na obr. 14.7.2.5.

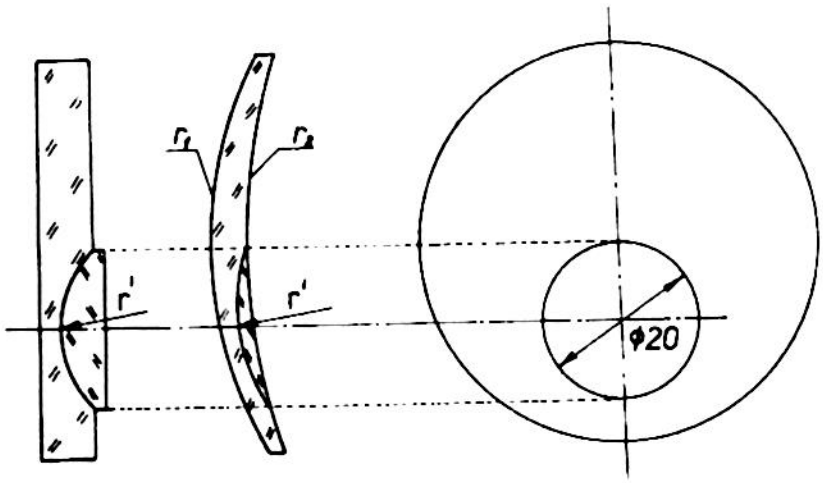


Obr. 14.7.2.5 Úprava horní části bifokálního skla.



Obr. 14.7.2.7 Svařované bifokální brýlové sklo.

obr. 14.7.2.8. Potom se z flintového skla vybrousí plankonvexní vložka o poloměru křivosti r´ shodném s poloměrem křivosti připraveného lůžka. Tato vložka se vloží do připraveného lůžka a obě části se v peci vyhřívají cca na 600° C. Při této teplotě se obě skla taví, aniž se příslušná kulová plocha o poloměru r´ zdeformuje. Po schladnutí se pak na obou stranách vybrousí kulové plochy o poloměrech křivosti r_1 a r_2.



Obr. 14.7.2.8 Princip technologie výroby svařovaných bifokálních brýlových skel.

Poloměr r´ křivosti flintové vložky se určí takto:
Přídavná lámavost D_a, která je rovna lámavosti dolní části bifokálního skla, určené pro pozorování na blízko, zmenšené o lámavost části, určené pro pozorování na dálku, je rovna lámavosti flintové vložky ponořené do prostředí o indexu korunového skla. Tedy

$$D_a = (n' - n) \cdot \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r_2}\right) = \frac{n' - n}{r'} + \frac{n' - n}{n - 1} \cdot D_2$$

kde $D_2 = \frac{1 - n}{r_2}$ značí lámavost druhé plochy bifokálního skla. Index lomu u korunové části se pohybuje kolem 1,52 - 1,53, zatímco index lomu flintové části se pohybuje kolem 1,62 až 1,73.

Zvolíme-li D_a, můžeme z předchozího vztahu určit k dané lámavosti D_2 hledaný poloměr křivosti r´.

Svařovaná bifokální brýlová skla se vyznačují tuhostí a estetickým vzhledem a neviditelným rozhraním. Také jejich výroba je poměrně hospodárná v porovnání s výrobou ostatních druhů bifokálních skel. Avšak v případě skel podle obr. 18.7.2.8 není část, určená pro pozorování na blízko, centrována, takže při přechodu rozhraním nastává skok obrazu. Tento efekt je zvlášť zřetelný u rozptylných skel a proto jsou tato skla pro silnou krátkozrakost zakázána. Konečně disperse flintového skla vyvolává zabarvení obrazu.

Amblyopii je možno podstatně odstranit použitím bifokálních skel, u kterých dolní část, určená pro vidění na blízko, je tvořena tlustým tripletem, který je tvořen dvěma flintovými čočkami oddělenými čočkou korunovou, jež jsou vzájemně svařeny.

III. část

Spojení a spolupráce obou očí

15) Normální binokulární pohyby

V předchozích úvahách jsme se doposud zabývali problémy jednoho izolovaného oka, ať již oka klidného nebo oka v pohybu. Většina lidí však používá při pozorování obou očí. Je proto nutné všimnout si alespoň přehledně některých problémů binokulárního vidění.

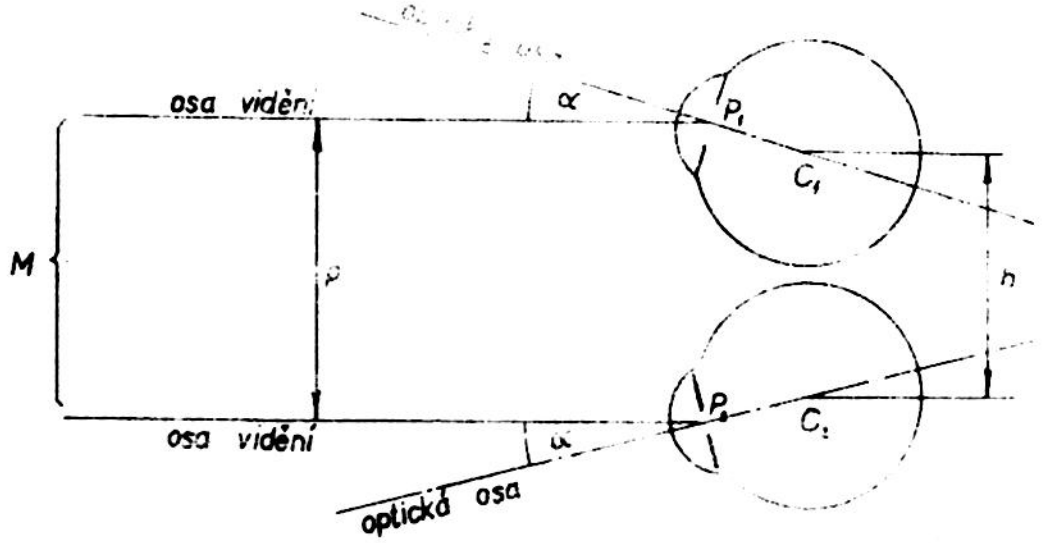
Je zřejmé, že binokulární vidění přináší člověku řadu výhod, zejména v oblasti prostorového vidění. Protože však předmětem těchto skript není otázka prostorového vidění, nýbrž problémy spojené s korekcí oka, nebudeme se v dalším těmito otázkami zabývat a všimneme si pouze problémů binokulárního vidění z hlediska korekce.

Uvažujeme-li normálního jedince, pak spojení jeho obou očí je dáno jednoduchým zákonem: Obě oči pozorují při binokulárním vidění vždy tentýž bod, takže osy vidění (pozorování) obou očí se protínají v tomto bodě. Proto příslušný jedinec vidí pouze jediný předmět, což se vyjadřuje tak, že se říká, že obrazy na sítnicích splynuly. Vytváří-li se obraz téhož předmětu v případě druhého oka na žluté skvrně a v případě druhého oka mimo tuto skvrnu, pak jedinec vidí příslušný předmět zdvojený.

Toto neustálé spojení obou pozorovatelových očí prostřednictvím společného pozorovaného bodu je charakteristické především pro savce, zatímco v případě ostatních obratlovců jsou tyto pohyby očí na sobě nezávislé, nebo k obdobnému spojení dochází pouze zcela nahodile.

15.1) Oční báze

Oční báze b je vzdálenost středů otáčení C_1 a C_2 obou očí a tvoří jeden ze základních parametrů binokulárního vidění. Oční báze se obyčejně liší od interpupilární vzdálenosti p středů P_1 a P_2 očních pupil.



Obr. 15.1.1 Oční báze a interpupilární vzdálenost.

Označíme-li α úhel, který svírá osa vidění s optickou osou skla, pak pro bázi b můžeme psát

$$b = p - 2\,\overline{P_1C_1}\,\sin\alpha \ .$$

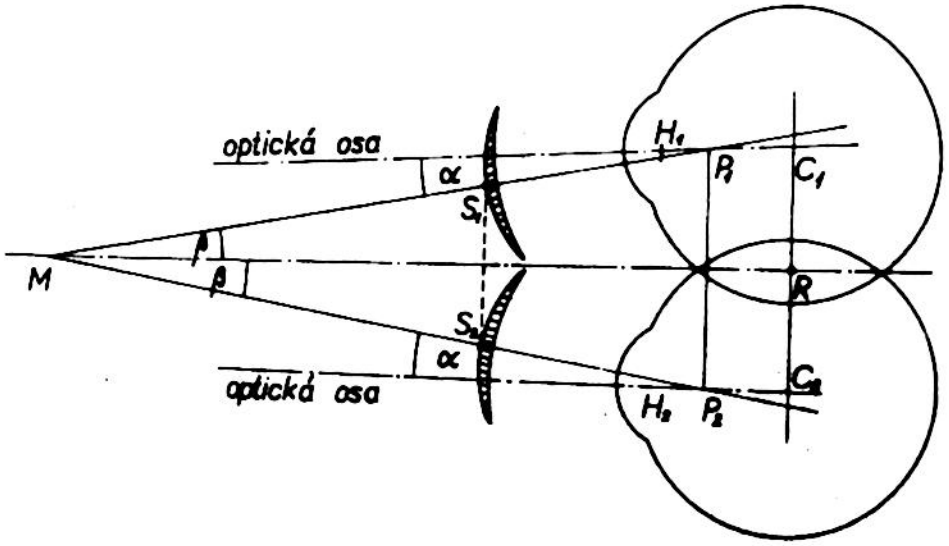
Uvážíme-li, že vzdálenost $P_1C_1 \doteq 10$ mm a $\alpha = 5^\circ$, pak

$$b = p - 2 \,.\, 10 \,.\, 0{,}085 = (p - 17) \text{ mm} \ .$$

Aby mohla být určena velikost oční báze, byla vyvinuta řada metod pro měření interpupilární vzdálenosti. Měření ukázala, že v případě lidí ve věku od 15 do 50 roků se tato vzdálenost pohybuje v mezích 56 - 72 mm u mužů a v mezích 54 - 68 mm u žen.

15.2) Binokulární konvergence

Nechť bod M, který je pozorován současně oběma očima, se blíží k pozorovateli. Potom osy vidění obou očí budou konvergovat. Tato konvergence se měří hodnotou O rovnou převrácené hodnotě vzdálenosti $\overline{MR}$ pozorovaného bodu M od roviny procházející středy otáčení obou očí, vyjádřené v metrech, jak je to naznačeno na obr. 15.2.1.



Obr. 15.2.1 K určení binokulární konvergence.

Tedy

$$C = \frac{1}{MR} \text{ am} ,$$

kde jednotka am značí tzv. metrický úhel. Je-li např. $\overline{MR}$ = 40 cm, je konvergence C rovna

$$C = \frac{1}{0,4} = 2,5 \text{ am} .$$

Z tab. 15.2.1, kde jsou uvedeny hodnoty konvergence C pro různé vzdálenosti, nebo lépe pro různé úhly β (viz obr. 15.2.1), je vidět, že současně se vzrůstající konvergencí se zmenšuje interpupilární vzdálenost, pro kterou platí

$$p = b - \overline{2P_1C_1} \sin (\beta - \alpha) . \qquad (15.2.1)$$

Tab. 15.2.1

stupňů	p_{mm}	C_{am}	$A_{dioptrií}$
0	62,7	0	0
5	61,0	2,79	2,87
10	59,3	5,62	5,90
15	57,5	8,53	9,05
20	55,8	11,58	12,31
25	54,2	14,82	15,63
30	52,5	18,33	18,95

x) Yves Le Grande, Optique Physiologique, I., 213 Paris, 1952. Hodnoty p byly určeny pro b 61 mm, P_1C_1 10 mm a 5°.

V případě pozorovatele s emmetropickým zrakem je přibližování pozorovaného bodu M spojeno mimo konvergenci s akomodací, zajišťující vytvoření středového obrazu na sítnici. Velikost této akomodace A se měří převrácenou hodnotou vzdálenosti $\overline{MH_1}$, kde H_1 značí hlavní bod oka a pro kterou platí

$$\overline{MH_1} = \overline{MP_1} - \overline{H_1P_1} = \frac{P}{2 \sin \beta} - \overline{H_1P_1} . \qquad (15.2.2)$$

Pro teoretické oko je při nulové akomodaci $\overline{H_1P_1}$ = 1,44 mm a 0,84 pro maximální akomodaci A = + 7 dioptrií.

Využijeme-li těchto hodnot, můžeme opakovaným výpočtem určit pro každou hodnotu $\overline{H_1P_1}$ odpovídající hodnotu akomodace A. Tyto hodnoty jsou uvedeny rovněž v předchozí tabulce 15.2.1. Je vidět, že hodnoty A jsou málo vyšší než konvergence C a že je tedy možno místo konvergence vyjádřené v metrických úhlech brát v úvahu akomodaci vyjádřenou v dioptriích a obráceně.

Rovnost konvergence a akomodace přestává v případě nekorigovaného ametropického zraku. Např. krátkozraký jedinec neakomoduje při pozorování svého dalekého bodu, zatímco jeho konvergence je rovna jeho ametropii. Dalekozraký člověk naopak akomoduje více, než odpovídá jeho konvergenci.

Je-li ametropie zraku vykorigována, pak spojení mezi konvergencí a akomodací se opět stane normálním. Z faktu, že člověk s ametropickým zrakem může mít dvě různá spojení mezi konvergencí a akomodací, podle toho, zda má nebo nemá ametropii vykorigována, lze usuzovat na poměrně velkou pružnost tohoto spojení.

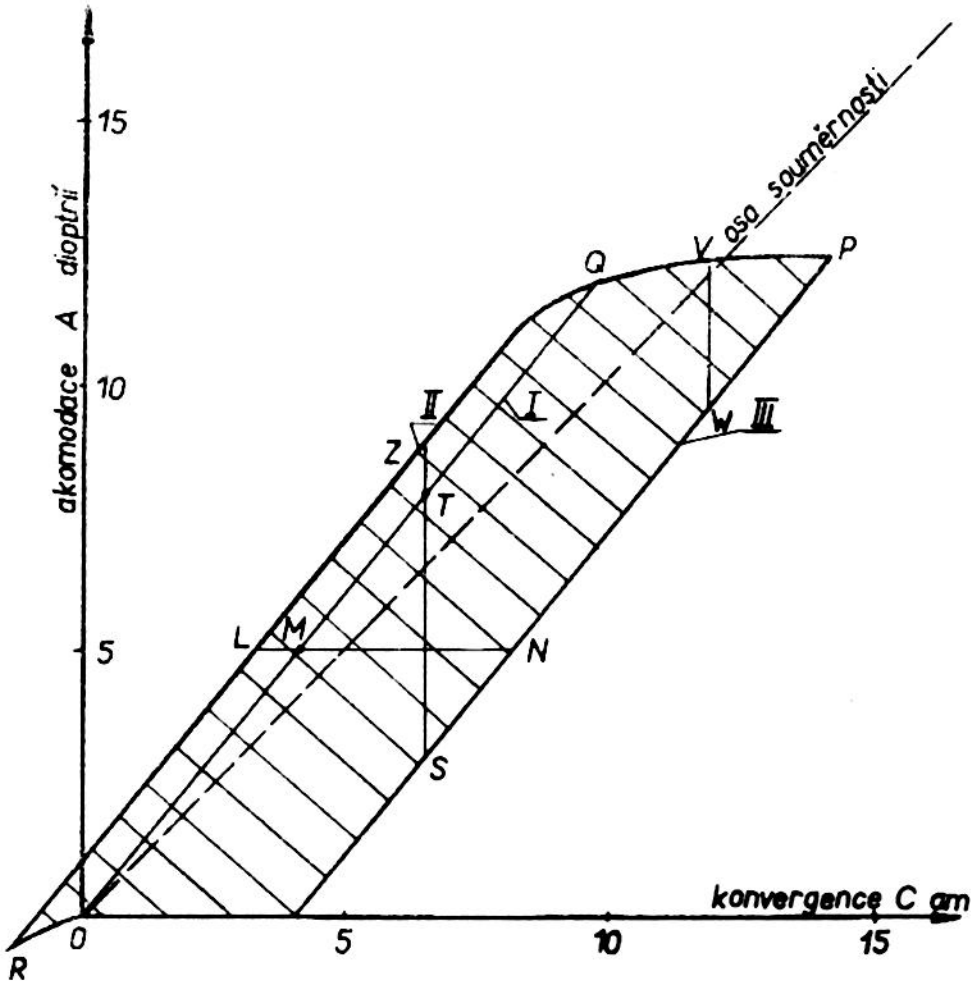
Je-li spojení mezi konvergencí a akomodací emmetropického nestaročkého oka dáno přesně vztahy (15.2.1) a (15.2.2), pak je můžeme graficky vyjádřit přímkou I ≡ $\overline{OQ}$, která je jen velmi málo odchýlena od osy souměrnosti souřadných os $\overline{OC}$ a $\overline{OA}$, jak je to vidět na obr. 15.2.3.

Měření však ukazují, že body odpovídající vzájemnému spojení konvergence a akomodace leží mezi dvěma přímkami II a III rovnoběžně posunutými vzhledem k přímce I. Příslušná oblast je na obr. 15.2.3 vyšrafována. Tento graf dovoluje určit některé hodnoty:

a) amplitudu relativní konvergence pro danou akomodaci. Např. pro akomodaci A = 5 dioptrií je příslušná relativní konvergence dána úsečkou $\overline{LN}$ a obsahuje část $\overline{MN}$, zvanou positivní reservou splynutí, a část $\overline{LM}$, zvanou negativní reservou splynutí obrazů vytvářených na sítnicích obou očí.

Tato amplituda tvoří průměrně hodnotu 6 až 7 am, z čehož 1 až 2 am připadají na negativní reservu.

b) amplitudu relativní akomodace pro danou konvergenci. Např. pro konvergenci 7 am je příslušná relativní akomodace dána úsečkou $\overline{SZ}$, jejíž hodnota činí asi 6 až 7 dioptrií. Tato hodnota však klesá směrem k vyšším hodno-



Obr. 15.2.3 Spojení akomodace a konvergence obou očí.

tám konvergence (VW) a dosahuje své maximální hodnoty pouze do určité optimální konvergence (cca 10 am).

c) absolutní hodnotu maximální akomodace (polohu blízkého bodu binokulárního vidění) odpovídající bodu P .

d) absolutní hodnotu minimální akomodace (polohu vzdáleného bodu binokulárního vidění) odpovídající bodu R .

V předchozích úvahách jsme předpokládali, že pozorovaný bod M se nachází v rovině symetrie obou očí. Za tohoto předpokladu je příslušná konvergence vyvolána stažením obou vnitřních přímých svalů.

Nachází-li se bod M mimo uvedenou rovinu symetrie, pak příslušnou konvergenci vyjadřujeme převrácenou hodnotou vzdálenosti $\overline{MR}$, kde R značí půlící bod oční báse. Z této definice je zřejmé, že v tomto případě bude při stejné hodnotě konvergence C úhel, tvořený osami vidění, menší než v případě, kdy bod M leží v rovině symetrie.

1212-5083

Dále je nutno zdůraznit, že vzdálenost bodu M od obou očí bude různá a že tedy by měly být odlišné akomodace obou očí. To však není možné, neboť podle Hesse lze zjistit pomocí stereoskopu, že maximální přípustný rozdíl v akomodacích obou očí činí pouze 0,25 dioptrie. Z toho důvodu vnucuje bližší oko svoji akomodaci druhému, vzdálenějšímu oku.

Je možno říci, že základní zákon řídící spojení obou očí (společný bod pozorování) je narušován poněkud pouze pro extremní výchylky zraku. Např. oko v abdukci se dívá poněkud níže než druhé oko. Často se stává, že reservy pro splynutí obrazů na sítnicích obou očí jsou různé při pozorování vpravo a vlevo v důsledku anatomické nesouměrnosti nebo v důsledku návyku. V roce 1935 Barker zjistil, že člověk hledící při práci stále směrem doleva, cítí při skončení práce úsilí, které ho nutí : hledět doprava.

Zorné pole binokulárního vidění je přibližně rovné společné části zorných polí obou očí.

Konečně je třeba zdůraznit, že při přibližování pozorovaného předmětu M doznávají obě oči určitou giraci, tj. natočení kolem osy vidění. Velikost tohoto natočení se pohybuje od $1^{\circ}35'$ do $2^{\circ}27'$ při konvergenci měnící se od 5 am do 7 am.

Tato girace se skládá s girací vyvolanou při pozorování předmětů snížených nebo zvýšených vzhledem k horizontu. Tato girace dosahuje při snížených cílech o 20° hodnoty 22′ při konvergenci C = 0 am a $1^{\circ}2'$ při konvergenci C = 5 am. Podobně při převýšených cílech o 20° dosahuje tato girace hodnoty 19′ pro C = 0 am a $2^{\circ}34'$ pro C = 5 am.

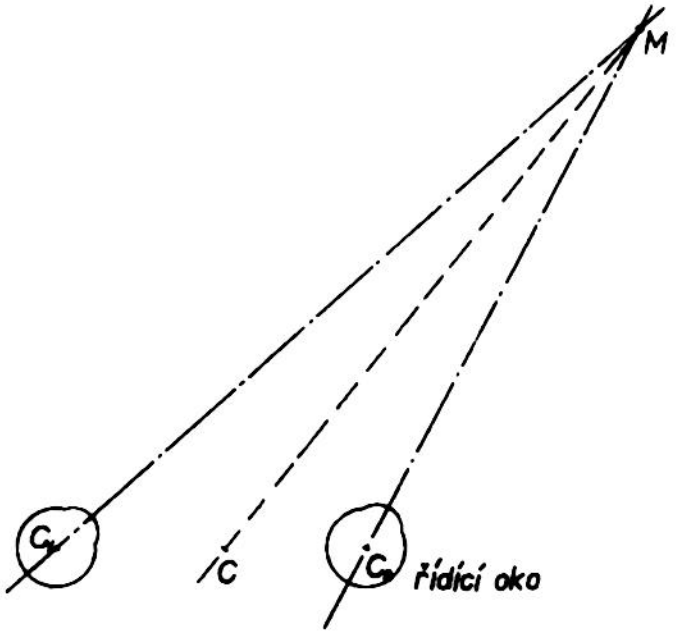
15.3) Střed pozorování

Při monokulárním vidění je zřejmé, že hlavní osa pozorování je současně záměrnou osou, takže polohu pozorovaného předmětu můžeme snadno určit směrem, který je tvořen spojnicí středu otáčení oka a pozorovaného předmětu. Vzdálenost pozorovaného předmětu je dána akomodací. Je tedy možno říci, že polohu pozorovaných předmětů při monokulárním vidění můžeme určit v polárních souřadnicích o počátku splývajícím se středem otáčení oka.

Při binokulárním vidění je tomu však poněkud jinak. Hlavní osy pozorování příslušející k oběma očím se protínají v pozorovaném předmětu. Skutečnost, že existují dvě odlišné osy pozorování, zabraňuje jednoznačnému určení směru pozorovaného předmětu. Člověk se sice během času naučí velmi přesně lokalisovat pozorovaný předmět vzhledem ke svému tělu. Tato schopnost získaná návykem neřeší problém nalezení vhodné souřadné soustavy, která by jednoznačně dovolovala určení polohy pozorovaného předmětu. Nejvhodnější soustavou se jeví, obdobně jako v případě monokulárního vidění, polární soustava,

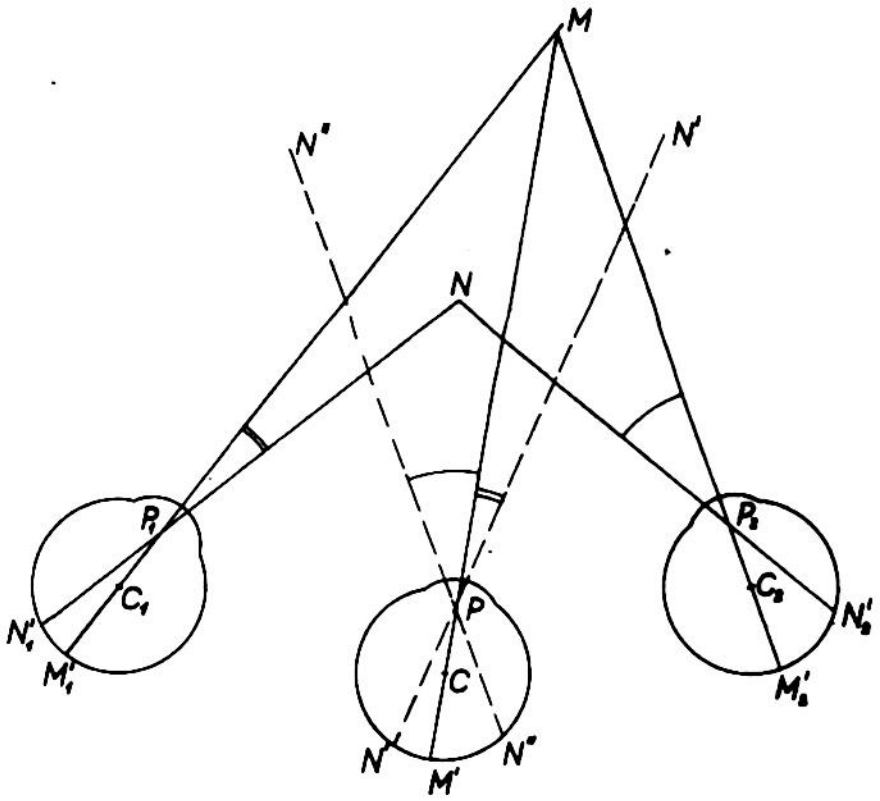
která by měla fiktivní počátek pevně spojený s pozorovatelovým tělem. Ukazuje se, že existuje bod C , ležící mezi oběma očima, zvaný střed pozorování, který lse považovat za tento pevný počátek.

Obvykle se tento bod nenachází přesně uprostřed, nýbrž bývá asymetricky pošinut k levému nebo pravému oku. Podle toho se nazývá oko ležící blíže ke středu pozorování C řídícím okem.



Obr. 15.3.1 Střed pozorování

O existenci středu otáčení se můžeme snadno přesvědčit tak, že při pozorování oběma očima uvedeme do zákrytu dvě svisle postavené tužky nacházející se v určité nevelké vzdálenosti od oka. Zavřeme-li pak pravé oko, bude se bližší tužka jevit levému oku vpravo od zadní tužky a naopak.



Obr. 15.3.2 K vysvětlení zdvojení obrazu

Hering využil středu pozorování k vysvětlení zdvojení obrazu, ke kterému dochází, pozorujeme-li binokulárně dva předměty (svislé pruty, tužky apod.) nacházející se v zákrytu a akomodujeme-li přitom na bližší nebo vzdálenější předmět. Hering totiž předpokládal, že střed pozorování je totožný se středem otáčení tzv.

doplňkového - fiktivního oka, které se otáčí tak, že společný bod M , pozorovaný oběma očima, se promítá na žlutou skvrnu tohoto fiktivního oka, jak je to naznačeno na obr. 15.3.2, kde M_1' resp. M_2' značí obrazy bodu M na žlutých skvrnách obou očí a M' obraz bodu M na žluté skvrně fiktivního oka. Bližší bod N se promítá do bodů N_1' resp. N_2' příslušných očí a do bodů N' resp. N" fiktivního oka. Proto bod N bude tímto okem lokalisován ve směrech $\overline{N'P}$ resp. $\overline{N''P}$, které spolu svírají určitý úhel, takže bod N se bude jevit fiktivnímu oku zdvojeným.

15.3.1) Amplituda splynutí

Zdvojení obrazu uvažované v předchásející kapitole nijak nenarušuje vidění předmětů, na které není právě soustředěna pozornost divákova. Objeví-li se zdvojení obrazů, objevuje se s ním okamžitě reflexní úsilí po jejich ztotožnění (splynutí).

Zdvojení obrazu může být např. vyvoláno špatně řízenou binokulární konvergencí. Z předchozích úvah (obr. 15.2.3) je známo, že při akomodaci A = 0 dioptrií může dojít ke splynutí obrazů v intervalu konvergencí C = - 2 až C = 4 am. Uvážíme-li, že průměrná oční báse je b = 61 mm, pak se při binokulárním vidění dosáhne splynutí obrazů při divergenci pozorovacích os $2\beta = 7^\circ$ ($\operatorname{tg} 2\beta = \frac{61}{1000/2} = 0{,}12$) nebo při konvergenci $2\beta = 14^\circ$ ($\operatorname{tg} 2\beta = \frac{61}{1000/4} = 0{,}24$). Pro akomodaci $A \neq 0$ je možno překlenout konvergenci o hodnotě až 6 am, které odpovídá konvergence $2\beta = 25$ a 30°.

Zdvojení obrazů může být vyvoláno výškovým přesazením. Bylo zjištěno, že je možno ještě dosáhnout splynutí, pokud toto výškové přesazení nepřesáhne hodnotu $2 - 3^\circ$.

Shrneme-li tyto výsledky, můžeme říci, že padne-li obraz předmětu v případě jednoho oka na jeho žlutou skvrnu, že lze ještě dosáhnout splynutí obou obrazů, pokud obraz předmětu nepadne na sítnici druhého oka dále než 7° směrem k nosu nebo 25° směrem ke spánku, nebo konečně není-li výškově přesazen o 2 až 3°. Plocha sítnice vymezená těmito úhly se nazývá plochou splynutí.

15.4) Anomalie binokulárních pohybů.

Jsou-li svaly, ovládající pohyb oka v očnicové dutině, zcela uvolněny tím, že jejich inervace je úplně potlačena, zaujmou oči jakousi rovnovážnou polohu, která je výslednicí působení různých sil a tlaků. Tato rovnovážná poloha očí se nazývá anatomickou. S touto polohou se setkáváme pouze u mrtvol nebo jako následek paralysy. Při anatomické rovnováze osy vidění divergují cca 10°, což je způsobeno tvarem očnicové dutiny.

V normálním případě tonus očních svalů udržuje svaly neustále v částečném napětí, jehož výslednicí je rovnovážná poloha očí, zvaná fysiologická, která je odlišná od rovnováhy anatomické. Oči zaujmou tuto polohu pouze tehdy, potlačíme-li vhodným způsobem (představíme-li před jedno oko klín, nebo deformujeme-li obraz vznikající na sítnici jednoho z obou očí, nebo zavážeme-li jedno z obou očí páskem) snahu po splynutí obrazů vytvářených na sítnicích obou očí.

15.4.1) Heterophorie při vidění na dálku

Předpokládejme, že pozorovatel pozoruje nekonečně vzdálený předmět ležící v horizontální rovině. Je zřejmé, že příslušné osy pozorování jsou vzájemně rovnoběžné. Jsou-li osy pozorování, odpovídající příslušné fysiologické rovnováze, rovněž rovnoběžné, pak nazýváme příslušný stav orthophorií.

Je zřejmé, že se jedná o případ nejmenšího namáhání očí, neboť mimo normální tonus, potřebný k udržení příslušné fysiologické rovnováhy není třeba ke splynutí obrazů žádného dalšího úsilí.

Nejsou-li osy pozorování v případě fysiologické rovnováhy vzájemně rovnoběžné, pak příslušný stav nazýváme heterophorií. Heterophorie je v principu nevýhodná, neboť u pozorovatele nedochází ke splynutí obrazů vznikajících na sítnici obou očí ani při pozorování vzdálených předmětů, než jen za aktivní pomoci příslušných svalů, které musí být ve stavu zvýšeného napětí, což může vést při delším pozorování k únavě. Tedy v případě orthophorie jsou oči v přirozené rovnováze, pozoruje-li příslušný jedinec vzdálený předmět. V případě heterophorie je tato rovnováha vynucená. Oči se snaží neustále z této rovnováhy vychýlit, avšak binokulární splynutí je udržováno na účet větší nebo menší inervace příslušných svalů.

Heterophorie může být:

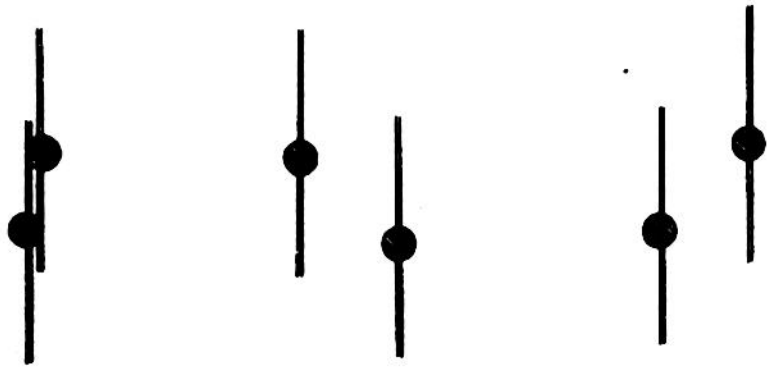
a) esophorií (nebo též endophorií), jestliže příslušné fysiologické rovnováze odpovídá konvergence os pozorování.
b) exophorií, jestliže příslušné fysiologické rovnováze odpovídá divergence os pozorování.
c) hyperphorií, jestliže jedna z obou os pozorování je vychýlena vzhledem k druhé výškově.

Hyperphorie se často kombinuje s eso- resp. exophorií.

Heterophorie se zjišťuje a měří tak, že se ve vzdálenosti cca 5 m umístí test se svislou 3 mm širokou čárou mající uprostřed malý kruhový terčík, jak je to vidět na obr. 15.4.1.1.

Před jedno z obou očí se umístí klín s deviací s 4 až 5° tak, aby jeho lámavá hrana byla vodorovná. Potom orthophorie resp. jednotlivé typy heterophorie se projeví tak, jak je to naznačeno na obr. 15.4.1.2.

Obr.15.4.1.1 Test pro zjišťování heterophorie.



a) orthophorie b) esophorie c) exophorie

Obr. 15.4.1.2 Vzhled obrazů při orthophorii a heterophorii.

15.4.2) Heterophorie při vidění na blízko

Při pozorování blízkých předmětů, jimž odpovídá konvergence C = 3 nebo 4 am, se oči nenacházejí v rovnováze, která by si nevyžadovala svalového úsilí, jak je tomu při pozorování dalekých předmětů, nýbrž příslušný stav obou očí je dán společným úsilím akomodace a konvergence. Heterophorie, která se při vidění na blízko u některých jedinců objevuje, není v žádném vztahu s případnou heterophorií související s viděním na dálku. Lze říci, že výskyt, případně vzrůst exophorie při vidění na blízko je častějším jevem než v případě vidění na dálku.

Heterophorie při vidění na blízko se zjišťuje obdobnými testy jako v případě vidění na dálku, s tím rozdílem, že se tyto testy umisťují ve vzdálenostech, kterým odpovídá konvergence 3 - 4 am.

15.4.3) Cyklophorie

Obtíže se stotožněním obrazů předmětu vznikajících na sítnicích obou očí mohou být způsobeny i tím, že oči desnávají určitou giraci, takže příslušné obrazy jsou poněkud vzájemně pootočeny. Tzv. pozitivní girace, při které se vytáčejí horní části svislého meridiánu očí ven, se objevuje častěji než girace opačná.

Při pozorování vzdálených předmětů, nacházejících se v horizontální rovině, se vyskytuje často pozitivní girace velikosti 2 - 3°. Konvergence a pozorování převýšených předmětů vyvolávají také obyčejně pozitivní giraci.

15.4.4) Příčiny heterophorie

Příčin, které způsobují heterophorii, je řada. Všimněme si alespoň nejdůležitějších.

Nejjednodušším případem heterophorie je tzv. pseudo-heterophorie nebo akomodační heterophorie, která bývá vyvolána sferickou ametropií, která není vykorigována. Např. pozoruje-li dalekozraký vzdálený předmět, musí poněkud akomodovat, což je příčinou určité esophorie. Naopak krátkozraký jedinec pozoruje blízké předměty bez akomodace, což vyvolává určitou exophorii.

Tato pseudoheterophorie vymizí, když jsou oči správně vykorigovány.

Jinou příčinou heterophorie může být ochabnutí akomodační schopnosti, která způsobí, že předmět, zvláště je-li blízký, není zobrazen na sítnici zřetelně (ostře) a toto menší ochabnutí akomodace je spojeno s jakýmsi ochabnutím konvergence, která je pak příčinou určité exophorie.

Konečně častou příčinou heterophorie je určitá anomalie v poloze očí v případě fysiologické rovnováhy. Může být vyvolána oslabením určitého očního svalu, zvláště šikmého, špatným tonusem svalů, špatnou fysiologickou rovnováhou apod.

15.4.5) Strabismus

Pod pojmem strabismus jsou zařazeny velmi vážné vady binokulárního vidění, které úplně vylučují splynutí obrazů vznikajících na obou sítnicích. Strabismus se často rozděluje na:

a) Strabismus paralytický, při kterém jeden nebo více z očních svalů je zasažen paralysou. V důsledku toho je pohyb příslušného oka vymezen a tím je narušena koordinace pohybů obou očí, což se projevuje zdvojením obrazu při binokulárním vidění.
b) Strabismus latentní, který se projevuje tím, že jedno z obou očí je vyřazeno neutralisací jeho obrazu, i když toto oko jako isolovaná jednotka může vidět. Přitom pohyby tohoto oka zůstávají normální.
c) Strabismus typický, zvaný též heterotropií. Obdobně jako v předchozím případě je jedno z obou očí vyřazeno z vidění neutralisací příslušného obrazu, avšak na rozdíl od tohoto případu se příslušné oko vychyluje z normální polohy. Tento strabismus může být konvergentní a objevuje se u dětí od 2 do 4 let, nebo může být divergentní; objevuje se v pozdějším vývoji kolem 8 - 12 roků. Konečně může být strabismus vertikální.

Příčinou tohoto strabismu bývá ametropie očí. Tím vzniká disharmonie v koordinaci akomodace a konvergence, která vyvolává jakousi pseudoheterophorii, která se později transformuje ve strabismus.

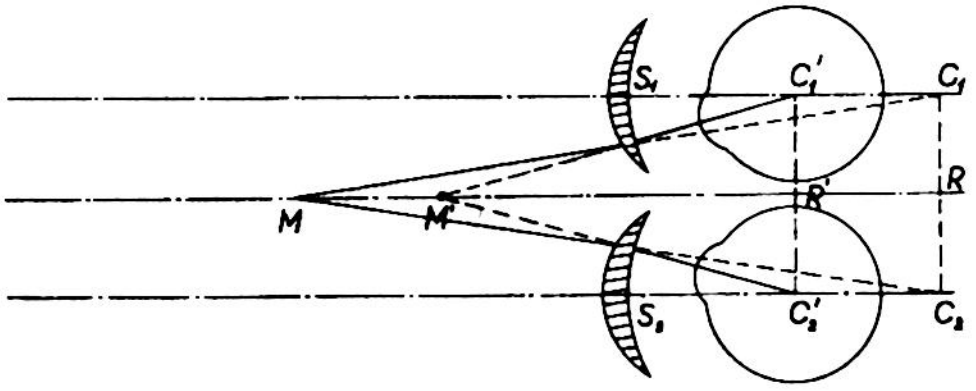
16) Brýlová skla a binokulární vidění

16.1) Vidění dalekých předmětů

Z předchozích úvah je nám známo, že člověk s emmetropickým zrakem nemusí při pozorování dalekých předmětů akomodovat (A = 0) a že také příslušná konvergence pozorovacích os je nulová (C = 0). Tytéž podmínky zůstávají v platnosti i pro vykorigovaný ametropický zrak. Uvažujme např. krátkozrakého člověka, který pozoruje daleký předmět M . Mají-li být při pozorování tohoto předmětu s brýlemi zachovány stejné podmínky jako v případě člověka s emmetropickým zrakem, pak obraz M´ vytvořený brýlovým sklem, musí být na spojnici bodu M se středem vstupní pupily. To bude možné pouze tehdy, bude-li vzdálenost optických os obou brýlových skel shodná s interpupilární vzdáleností. Mimoto při vzpřímené hlavě by měly ležet jejich optické osy v horizontální rovině. Protože však v běžném životě hledíme častěji směrem pod horizont, umísťují se brýlová skla tak, že se optické osy vyklení směrem dolů o 5 - 10^0.

16.2) Vidění blízkých předmětů ametropickým zrakem s akomodační schopností.

Uvažujme ametropického pozorovatele s vykorigovaným zrakem, který pozoruje blízký předmět M . Přitom je si nutno uvědomit, že jeho korekční brýlová skla vykorigovala jeho zrak pro vidění dalekých předmětů. Jak je vidět z obr. 16.2.1, osy pozorování jeho očí se protínají přitom v bodě M´ (který není obrazem bodu M).



Obr. 16.2.1 K vysvětlení vidění blízkých předmětů vykorigovaným akomodujícím ametropickým zrakem.

Nechť C_1' , C_2' značí středy otáčení oka a C_1 , C_2 k nim přidružené předmětové body vzhledem k uvažovaným brýlovým sklům.

Potom z podobnosti trojúhelníků platí

$$\frac{\overline{M'R'}}{\overline{MR}} = \frac{\overline{S_1C_1'}}{\overline{S_1C_1}} \quad . \tag{16.2.1}$$

Napíšeme-li zobrazovací rovnici, která přiřazuje bodům C_1, C_2 body C_1', C_2 můžeme psát, označíme-li D' lámavost příslušných brýlových skel,

$$\frac{1}{\overline{S_1C_1'}} = \frac{1}{\overline{S_1C_1}} + D' \quad .$$

Položíme-li $q' = \overline{S_1C_1'}$, pak z předchozí rovnice plyne dále

$$\frac{1}{\overline{S_1C_1}} = \frac{1}{\overline{S_1C_1'}} - D' = \frac{1 - q'D'}{\overline{S_1C_1'}}$$

čili

$$\overline{S_1C_1'} = \overline{S_1C_1}\,(1 - D'q') \quad .$$

Označíme-li C a C' konvergence příslušné k předmětům resp. k obrazům, pak

$$C = \frac{1}{\overline{MR}} \quad \text{a} \quad C' = \frac{1}{\overline{M'R'}} \quad ,$$

takže (16.2.1) přejde ve tvar

$$C = C'(1 - q'D') \quad . \tag{16.2.2}$$

Nechť A' značí akomodaci, kterou musí vyvinout ametrop, aby svými brýlemi viděl bod M a A akomodaci, kterou musí vyvinout emmetrop, aby viděl tentýž bod. Potom podle dřívějších úvah o akomodaci korigovaného ametropa platí

$$A' = A\,(1 + \delta R)^2 \quad .$$

Podle vztahu (8.1.6)

$$(1 + R\delta) \,.\, (1 - D_s \,.\, \delta) = 1$$

plyne dále

$$A = A'(1 - D_s \,.\, \delta)^2 = A'(1 - 2\,D_s \,.\, \delta) \quad .$$

Protože prakticky q' a 2δ jsou si velmi blízké, můžeme (16.2.2) psát ve tvaru

$$\frac{A}{C} = \frac{A'}{C'} \quad .$$

Je vidět, že poměr akomodace A a jí odpovídající konvergence C zůstává i u vykorigovaného ametropického oka stejný jako u emmetropa, čímž je dokázáno, že správná korekce vylučuje obecně jakoukoliv pseudoheterophorii.

16.3) Vidění starozrakých lidí na blízko

Oko se stává stařeckým, když jeho akomodační amplituda klesne pod určitou hodnotu. Předpokládejme, že tato amplituda klesne na nulu. Umožníme-li takovému zraku vidění na blízko vhodnými brýlovými skly, je nutné umístit tato skla před očima tak, aby při pozorování blízkého předmětu byla příslušná konvergence os vidění rovněž nulová. Dosáhne se toho decentrováním brýlových skel, jak je to naznačeno na obr. 15.2.1. Pozoruje-li se však vzdálenější předmět, objevuje se pak určitá divergence pozorovacích os. To však nemusí být na závadu, neboť ve většině případů neklesne akomodace stařeckého oka zcela na nulovou hodnotu.

Pro vzdálenost středů příslušných brýlových skel plyne podle obr. 15.2.1 postupně:

$$\overline{P_1P_2} = p = 2\overline{MP_1}.\sin\beta = b - 2\overline{P_1C_1}\sin(\beta-\alpha) = b - 2\overline{P_1C_1}\sin\beta\,.\cos\alpha + 2\overline{P_1C_1}\cos\beta\,.\sin\alpha\,.$$

Odtud vychází

$$\sin\beta = \frac{\frac{b}{2} + \overline{P_1C_1}\sin\alpha\cos\beta}{\overline{MP_1} + \overline{P_1C_1}\cos\alpha}\,.$$

Vzhledem k tomu, že úhly α i β jsou malé, můžeme druhý člen v čitateli zanedbat, takže potom

$$2\sin\beta = \frac{b}{\overline{MP_1} + \overline{P_1C_1}\cos\alpha}\,.$$

Pro vzdálenost $\overline{S_1S_2}$ středů obou brýlových skel podle obr. 15.2.1 vychází dále

$$\overline{S_1S_2} = 2\,\overline{MS_1}\,.\sin\beta\,.$$

Dosadíme-li za $2\sin\beta$ z předchozího vztahu vychází konečně

$$\overline{S_1S_2} = b\,\frac{\overline{MS_1}}{\overline{MP_1} + \overline{P_1C_1}\,.\cos\alpha} \doteq b\,\frac{\overline{MS_1}}{\overline{MC_1}}\,. \qquad (16.3.1)$$

Např. pro $\overline{S_1P_1} = 15$ mm a $\overline{P_1C_1} = 10$ mm odtud vychází pro brýlová skla o lámavosti $D_v = 2{,}5$ dioptrie

$$\overline{MS_1} = \frac{1000}{2{,}5} = 400 \text{ mm}$$

$$\overline{MC_1} = \overline{MS_1} + \overline{S_1P_1} + \overline{P_1C_1} = 400 + 15 + 10 = 425 \text{ mm}\,,$$

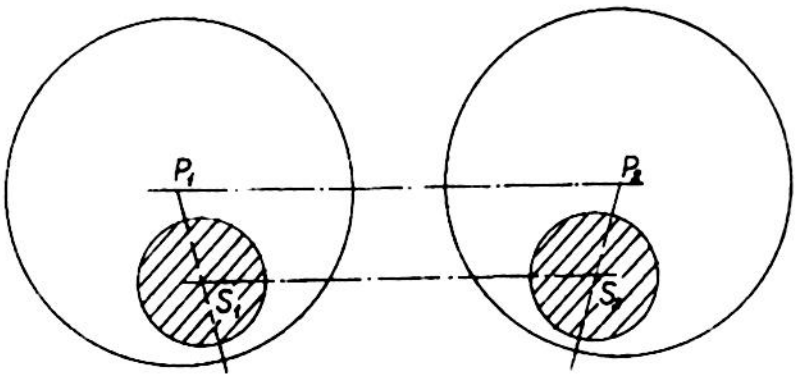
takže

$$\overline{S_1S_2} = b\,.\,\frac{400}{425} = 0{,}942\,b\,.$$

Podobně vychází pro D_v = 3 dioptrie, že $\overline{S_1S_2}$ = 0,931 b a pro D_v = 4 dioptrie $\overline{S_1S_2}$ = 0,909 b. Např. pro brýlová skla o lámavosti D_v = 3 dioptrie vychází vzdálenost středů $\overline{S_1S_2}$ v případě člověka s očním rozestupem b = 62 mm

$\overline{S_1S_2}$ = 62 . 0,931 =

= 57,7 mm .



Obr. 16.3.1 Úprava bifokálních brýlových skel s ohledem na vidění na blízko.

To znamená, že tato skla musí být v příslušné obrubě upevněna tak, aby byla decentrována směrem k sobě o hodnotu $\frac{62 - 57,7}{2}$ = 2 mm .

Stejným způsobem postupujeme při určování vzdálenosti $\overline{S_1S_2}$ částí bifokálních brýlových skel určených pro vidění na blízko. To znamená, že správně přizpůsobená bifokální skla budou upravena tak, jak je to naznačeno na obr. 16.3.1.

16.4) Anisometropie

Anisometropií se rozumí větší rozdíl v ametropiích obou očí. Velmi často se vyskytují případy, kdy tento rozdíl není velký, takže po přesné korekci každého z obou očí není nijak narušováno binokulární vidění. Přesáhne-li však rozdíl v ametropiích 2 dioptrie, objevují se různé potíže. Tento velký rozdíl v ametropiích obou očí se vyskytuje zejména u dalekozrakých lidí.

Jedna potíž spočívá v tom, že obrazy na sítnicích obou očí jsou různě veliké. Tato potíž se dá buď odstranit tím, že se brýlové sklo umístí v předmětovém ohnisku oka, nebo v případě menší anisometropie tím, že přiblíží k oku na kontakt, tj., že se brýlové sklo konstruuje jako kontaktní sklo.

Další obtíž spočívá v tom, že obě oči se natáčejí při pozorování nějakého bodu ležícího mimo optickou osu o různé úhly.

16.5) Korekce heterophorie a strabismu

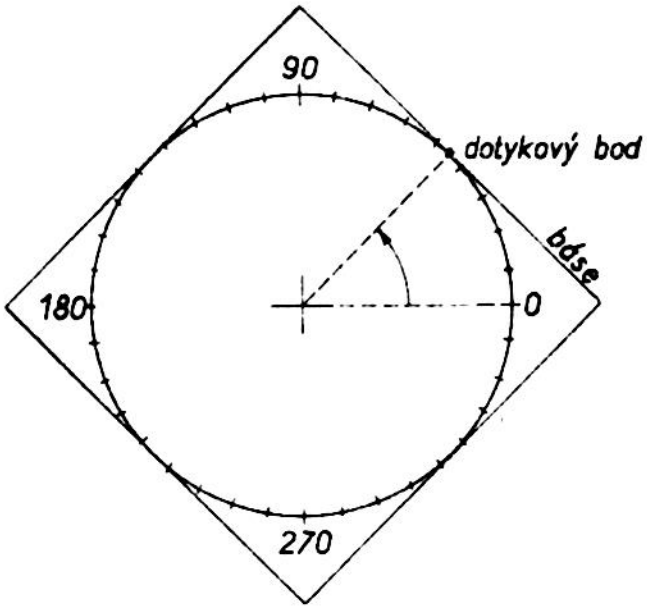
Z předchozích úvah je známo, že v případě orthophorického zraku vykazujícího určitou ametropii, se oči korigují vycentrovanými brýlovými skly. V případě heterophorie nebo strabismu je situace zcela odlišná. Emmetropické oči se korigují klínem (prismatem) a ametropické oči klínem kombinovaným se sférickým nebo torickým brýlovým sklem nebo decentrovaným sférickým resp. torickým brýlovým sklem.

Protože lámavý úhel φ těchto klínů je obyčejně menší než 15°, můžeme pro určování příslušné odchylky δ, kterou vyvolávají, využít plně jednoduchého vztahu

$$\delta = (n - 1)\varphi ,$$

kde n značí index lomu skla, ze kterého je klín zhotoven.

Abychom mohli jednoznačně určit polohu klínu vzhledem k oku, je nutné jednoznačným způsobem vyznačit polohu báse (základny) klínu i směr jeho spádové přímky. Poloha báse se určí slovně: báse nahoře, dole, na spánkové nebo nosní straně. Směr spádové přímky se určí na kružnici některého schematu používaného ke správnému určení astigmatismu. Je také možno určit jednoznačně polohu klínu tak, že určíme polohu dotykového bodu, ve kterém se dotýká báse některé kružnice ze schemat sloužících k určení astigmatismu, jak je to naznačeno na obr. 16.5.1.



Obr. 16.5.1 Schema pro jednoznačné určení polohy klínu

Mimo orientaci klínu je nutno u každého korekčního klínu vyznačit jeho funkční hodnotu, tj. klínovitost φ nebo odchylku δ. Klínovitost φ se určuje ve stupních a často se používá k charakteristice klínových brýlových skel ještě i dnes. Nevýhodou tohoto způsobu hodnocení brýlových skel klínových je, že závisí na indexu lomu skla.

Klín se charakterisuje často i tak, že se jeho odchylka určuje v setinách radiánu (tato jednotka se označuje v). Radián odpovídá $57,3^{\circ}$, takže jeho setina, tzv. centrad (v) je rovna $0,573^{\circ} = 34'$.

Klín se charakterizuje též odchylkou δ, kterou vyvolává. Odchylka se udává obdobně jako klínovitost φ ve stupních.

Zhotovíme-li klín ze skla o indexu lomu $n = 1{,}573$, pak platí

$$\delta = (n - 1)\varphi = 0{,}573\ \varphi \ .$$

To znamená, že odchylka klínu δ vyjádřená v centradech, je rovna klínovitosti φ vyjádřené ve stupních.

Je-li index lomu skla $n = 1{,}52$, pak odchylka δ v centradech je rovna 9/10 klínovitosti vyjádřené ve stupních.

Často se klíny charakterisují tzv. "lámavostí" $\underline{x}$ (což není nejvhodnější označení) vyjádřenou v klínových (prismatických) dioptriích Δ , přičemž platí

$$x = 100\ \mathrm{tg}\ \delta \ . \qquad (16.5.1)$$

To znamená, že klín, mající "lámavost" $x = 1\ \Delta$, vyvolá odchylku, pro kterou platí

$$\mathrm{tg}\,\delta = \frac{1}{100} \ .$$

Z toho plyne, že klín o lámavosti $x = 1\ \Delta$ odchýlí paprsek tak, že ve vzdálenosti 1 metru se pošine ve směru příčném o 1 cm. Vyjádříme-li tuto odchylku úhlově ve stupních, vidíme, že $\delta = 0{,}57^{\circ}$, což odpovídá 1 V .

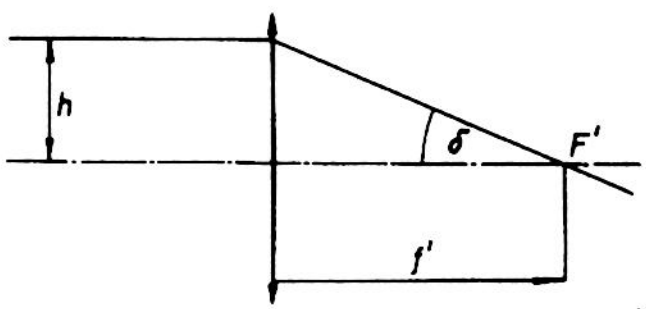
Je tedy možno říci, že obě jednotky, centrad i prismatická dioptrie jsou prakticky stejné.

Klín je možno konečně charakterisovat konvergencí C osy pozorování, kterou vyvolá, když je klín postaven před oko hledící do nekonečna. Od lámavosti klínu vyjádřenou konvergencí v am přejdeme na lámavost klínu vyjádřenou v prismatických dioptriích, když konvergenci C násobíme očním rozestupem $\underline{b}$ vyjádřeným v centimetrech. Např. konvergenci $C = +4$ am odpovídá při bázi $b = 6$ cm lámavost klínu $4 \cdot 6 = 24\ \Delta$.

Jak bylo dříve uvedeno, je možno v případě ametropických očí, kdy je nutno oko korigovat brýlovým sklem a kdy je nutno provést i korekci strabismu nebo heterophorie klínem, umístit před okem současně brýlové sklo i klín. Stejného účinku lze dosáhnout pouhou decentrací vlastního brýlového skla určeného ke korekci příslušné ametropie.

Jak je patrno z obr. 16.5.2, odchýlí se paprsek, dopadající na čočku rovnoběžně s optickou osou ve výšce h , o úhel δ , pro který platí

$$\mathrm{tg}\ \delta = \frac{h}{f'} = h \cdot D_v \ ,$$



Obr. 16.5.2 K určení odchylky δ vzniklé decentrací.

kde D_v značí její vrcholovou lámavost. Vyjádříme-li h v centimetrech, pak

$$100 \operatorname{tg} \delta = h \cdot D_v ,$$

takže pomocí (20.5.1) dostaneme konečně

$$x = h \cdot D_v \quad . \qquad (16.5.2)$$

Tento vztah je nutno chápat takto:

Každý centimetr decentrace brýlového skla je rovnocenný "lámavosti" x (prismat. dioptrií) rovné vrcholové lámavosti D_v (v normálních dioptriích).

Decentrací brýlových skel je možno vykorigovat pouze slabší heterophorii nebo strabismus. V případě větších hodnot je nutno příslušné brýlové sklo konstruovat jako decentrované.

Je-li decentrované sklo torické, je nutno postupovat takto:

Nutnou odchylku δ rozložíme do obou hlavních řezů příslušného brýlového skla. Tím dostaneme složky x_1 a x_2, na které aplikujeme vztah (16.5.2). Tak dostaneme hodnoty h_1 a h_2, o které je nutno decentrovat příslušné brýlové sklo v jeho hlavních řezech.

Velmi podrobně je tento problém řešen v knize L.C.Martina "Technical optics" I, London 1948.

IV. část

Měřicí metody a některé přístroje

17) Měření rozlišovací schopnosti oka

Je známo, že velikost čípků a tyčinek, z nichž je sítnice složena, určuje rozlišovací mez lidského oka. Tato mez činí 1 úhlovou minutu. Převrácená hodnota rozlišovací meze určuje rozlišovací schopnost. To znamená, že oko s rozlišovací mezí 1′ má rozlišovací schopnost

$$V = \frac{1}{1'} = 1 \sim 100\ \% .$$

Je-li rozlišovací mez oka 2′, pak jeho rozlišovací schopnost

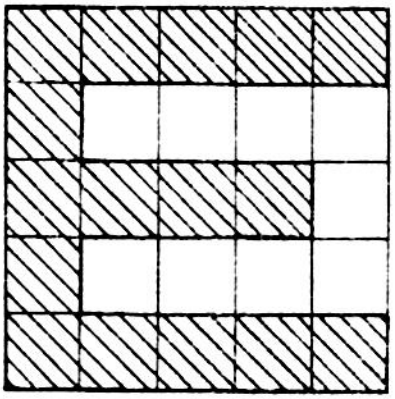
$$V = \frac{1}{2'} = 0{,}5 \sim 50\ \% .$$

Existují jedinci, kteří mají rozlišovací mez menší než 1′, např. i 30" , takže jejich rozlišovací schopnost

$$V = \frac{1}{0{,}5} = 2 \sim 200\ \% .$$

K určování rozlišovací schopnosti oka se používají různé testy, které obsahují řadu písmen, číslic nebo značek, jejichž velikost je zákonitě odstupňována.

Jako značek se nejčastěji používá tzv. Snelliova háku nebo Landoltova prstence. Snelliův hák (viz obr. 17.1) je vepsán do čtverce, který je rozdělen na 25 stejných menších čtvercových polí. Velikost základního čtverce je volena tak, aby z dané vzdálenosti se jevil pod úhlem 5′. Potom jednotlivá čtvercová pole se jeví pod úhlem 1′. Jinak řečeno výška Snelliova háku činí



Obr. 17.1 Snelliův hák.

5′ a šířka jednotlivých jeho částí 1′. Obdobně jako Snelliův hák je konstruován Landoltův prstenec (obr. 17.2). Také tento prstenec je vepsán do čtverce, jehož rozměry se jeví oku z dané vzdálenosti pod úhlem 5′, přičemž šířka prstence se jeví pod úhlem 1′. Prstenec je v jednom místě přerušen mezerou šířky rovněž 1′.

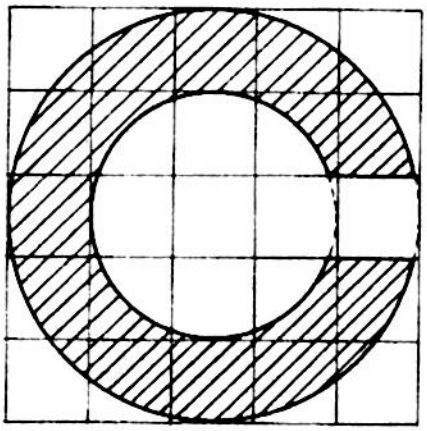
Moderní zkušební testy jsou upraveny tak, aby se pozorovaly ze vzdálenosti 5 m a aby dovolovaly určit rozlišovací schopnost oka s přesností jedničky na prvém desetinném místě. Přitom největší znak je určen tak, aby se jevil ze vzdálenosti 50 m pod úhlem 5′ a příslušné čáry a je oddělující mezery pod úhlem 1′.

Pro šířku t těchto čar tedy vychází

$$t = 50 \cdot 10^{3} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 15 \text{ mm}$$

a pro stranu s příslušného základního čtverce

$$s = 5 \cdot 15 = 75 \text{ mm} .$$



Obr. 17.2 Landoltův prstenec

Tyto rozměry se dodržují přesně pouze u Snelliova háku a Landoltova prstence, zatímco rozměry písmen a číslic se volí poněkud menší, neboť lidská inteligence a tvar písmene poněkud podporují rozlišovací schopnost. Člověk totiž se rozhoduje podle tvaru písmene nebo číslice, i když ještě přesně písmeno nebo číslici nerozlišuje.

Na zkušebním testu je u každého řádku, který obsahuje stejně veliké značky, vyznačena vzdálenost, ze které je právě rozliší jedinec s rozlišovací schopností $V = 1$.

Rozlišovací schopnost zkoušeného oka se pak určí ze vztahu

$$\text{Rozlišovací schopnost} = \frac{\text{Vzdálenost, ze které je značka rozlišena (pozorována)}}{\text{Vzdálenost, ze které může být značka právě rozlišena}}$$

Rozlišuje-li oko např. ze vzdálenosti 5 m pouze největší značku, která může být rozlišena ještě ze vzdálenosti 50 m, pak toto oko má rozlišovací schopnost

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

Herman Snell (1834 1903)

V některých státech se používá testů, které se pozorují ze vzdálenosti 6 m a sice z toho důvodu, že se předpokládá, že na tuto vzdálenost oko nejlépe akomoduje.

Jestliže zkušební místnost nemá potřebnou délku, pozoruje se test v zrcadle, čímž se délka místnosti zdvojnásobí. Velikost značek bývá u jednotlivých testů odstupňována rozličným způsobem. Např. na některých testech je volena velikost jednotlivých značek tak, aby jim odpovídala rozlišovací schopnost V = 0,1; 0,2; 0,3; ..... 0,9; 1 . Těmto značkám odpovídají vzdálenosti

$\frac{5}{0,1}$ = 50 m ; $\frac{5}{0,2}$ = 25 m ; $\frac{5}{0,3}$ = 16,67 m ; ..... $\frac{5}{0,9}$ = 5,56 m ;

$\frac{5}{1}$ = 5 m .

Tato řada se jeví velmi nespojitá v oblasti malých rozlišovacích schopností a je zbytečně hustá na straně velkých hodnot. Lze proto říci, že toto odstupňování vyhovuje pro studium běžných ametropií, kdy rozlišovací schopnost s postupující korekcí rychle vzrůstá na hodnotu 0,7 a dosahuje hodnoty 1 při konečné korekci. Na druhé straně nevyhovuje tato řada v případě jedinců s amblyopickým okem, u kterých i při nejvhodnějším brýlovém skle dosahuje rozlišovací schopnost sotva 0,3 až 0,4.

Proto se dává často přednost jiné řadě s rozlišovacími schopnostmi 0,1 ; 0,125 ; 0,15 ; 0,175 ; 0,2 ; 0,25; 0,3 ; 0,35 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 1 ; 1,2 ; 1,5 .

Nejvhodnější se jeví testy, u nichž jsou jednotlivé značky odstupňovány podle geometrické řady s kvocientem 1,2 , takže jednotlivé rozlišovací schopnosti jim odpovídající mají hodnoty 0,1 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,17 ; 0,20 ; 0,25 ; 0,30 ; 0,35 ; 0,40 ; 0,50 ; 0,60 ; 0,70 ; 0,85 ; 1 ; 1,2 ; 1,4 ; 1,7 ; 2 .

Úprava dvou zkušebních testů je vidět z obr. 17.3 a 17.4.

V případě testů s Landoltovými značkami se považuje značka za rozlišenou, když zkoušený jedinec určí směr, ve kterém je prstenec přerušen mezerou.

Značky všech zkušebních testů mají být naprosto černé na bílém pozadí. Osvětlení testů závisí na problému, který se testem řeší.

Určuje-li se rozlišovací schopnost, mají být testy osvětleny velmi intensivně (přibližně 100 luxů).

Při určování astigmatismu nebo při zkoušení slabého zraku se doporučuje menší osvětlení (asi 10 luxů).

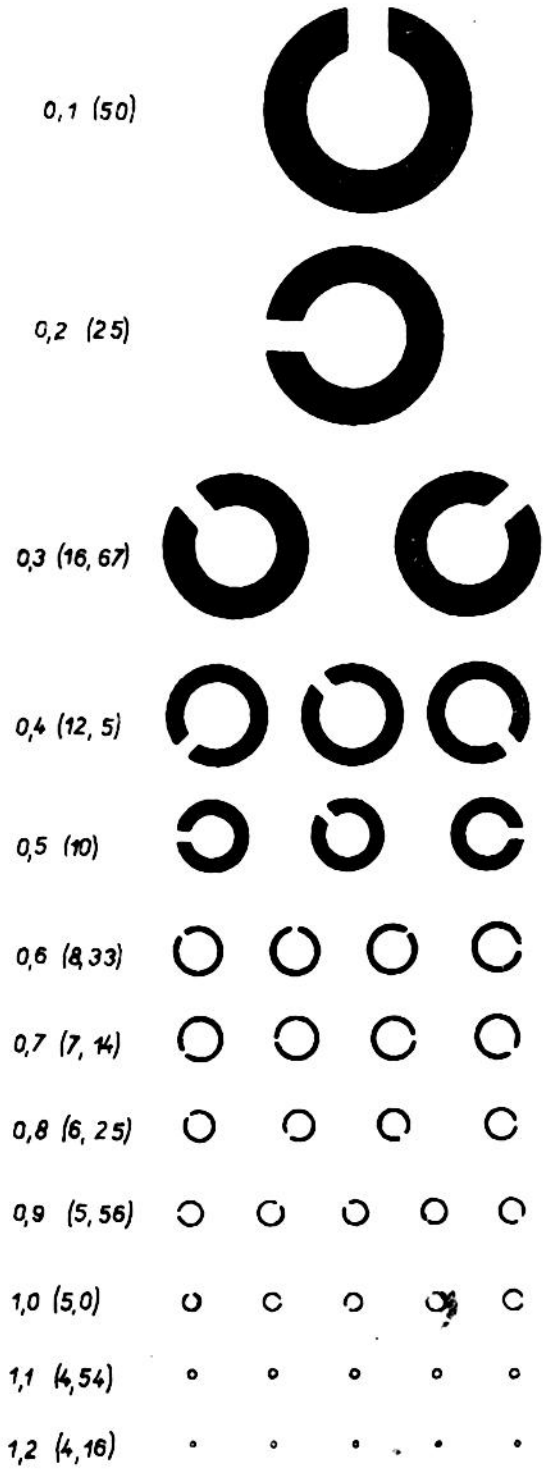
17.1) Zjišťování astigmatismu a příslušných hlavních směrů

Astigmatismus očí se určuje různými způsoby. Všimněme si nejdříve metod využívajících testů.

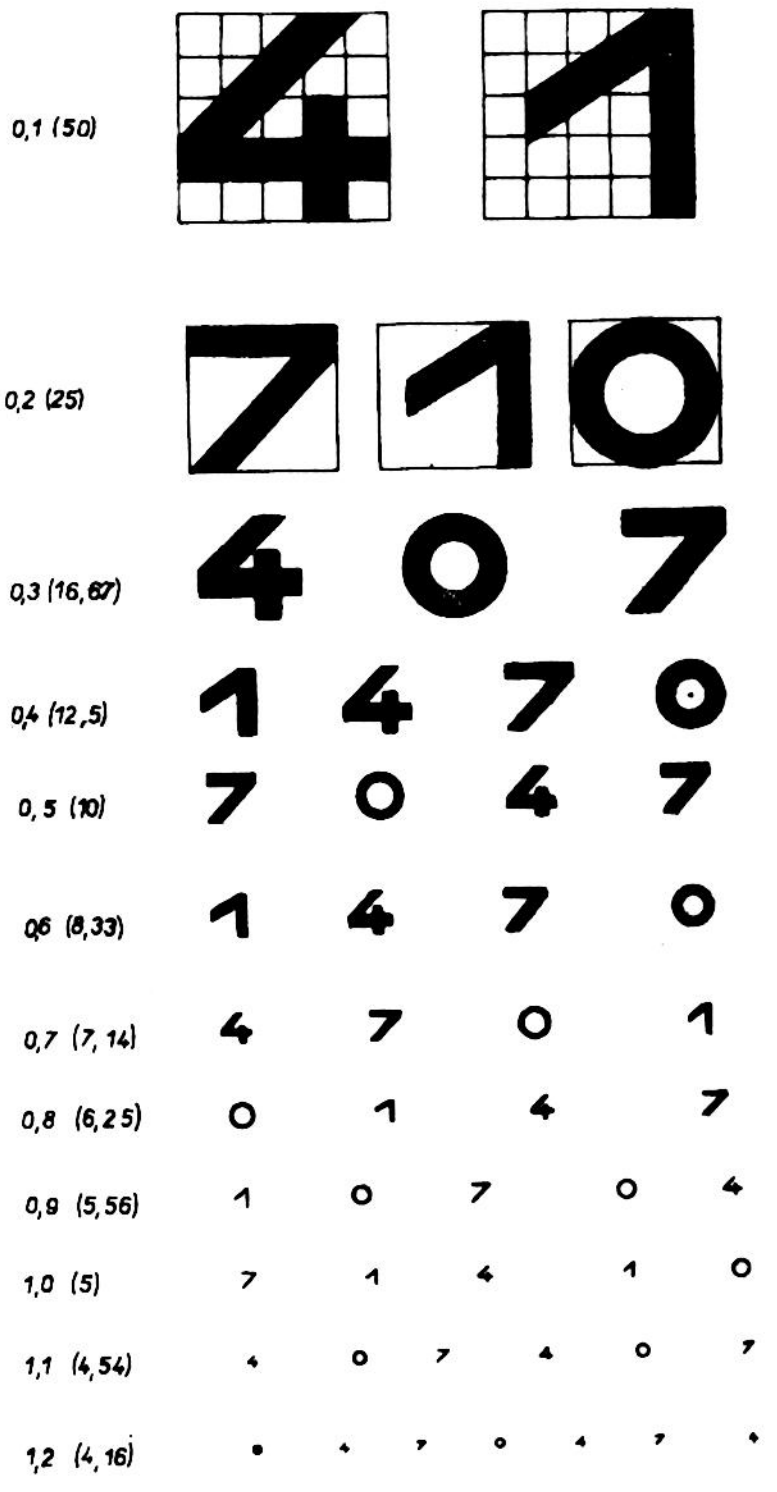
Testy, používané k určování astigmatismu, bývají různě uspořádané. Všechny jsou však založeny na následující vlastnosti astigmatického oka: Astigmatické oko vidí daleko zřetelněji (ostřeji) čáry kolmé na meridián odpovídající menší ametropii.

V kapitole 11., pojednávající o astigmatismu, byly uvedeny dva typy těchto testů. Jak je vidět z obr. 11.9.1, pozůstává jeden z těchto testů z řady radiálně uspořádaných dvojčár, které tvoří vějíř tvaru hodinového ciferníku.

Je-li zkoušené oko astigmatické, vidí nejzřetelněji ty čáry testu, které probíhají kolmo na meridián o menší ametropii, jak je to naznačeno pro určitý případ na obr. 17.1.1. Je možno říci, že směr čar, které astigmatické oko vidí nejzřetelněji, je vlastně směrem osy válcového skla, které je nutno použít k jeho korekci. Z toho důvodu se číslují čáry zkušebních testů často tak, aby na testu bylo možno přímo odečíst směr osy válce. Test, znázorněný na obr. 11.9.2, je vlastně čárový test Foucaultova typu a musí se při zkoušení astigmatického oka natáčet a to tak dlouho, až se nalezne poloha, při které vidí zkoušené oko radiálně probíhající čáry co nejzřetelněji.



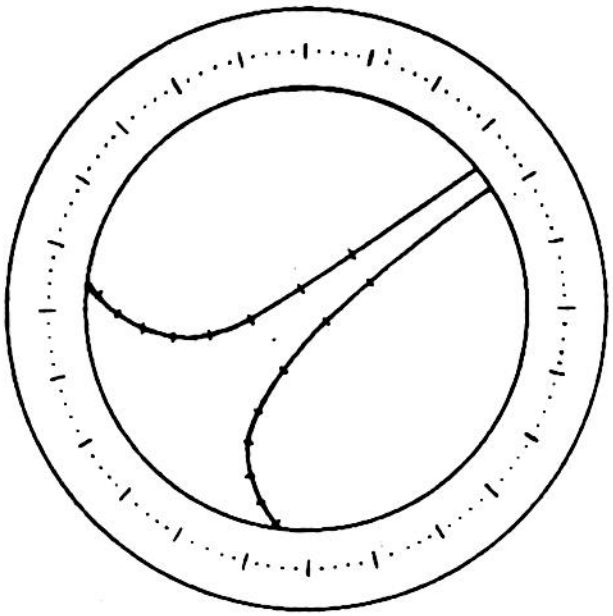
Obr. 17.3 Zkušební test



Obr. 17.4 Zkušební test

Často se používá ke zkoušení astigmatismu Raubitschekova testu (obr. 17.1.2). Tento test sestává ze dvou souměrně umístěných parabol. Protože jednotlivé jejich úseky mění svůj směr, budou vidět zřetelně vždy jen jejich určité části, zatímco ostatní se budou postupně rozplývat. Bude-li směr některého z hlavních řezů oka tvořit osu souměrnosti obou čar, budou se jevit obě zcela stejně. Tímto způsobem je možno určit směr hlavních řezů s přesností $\pm 2^{\circ}$.

Obr. 17.1.1 Vzhled testu, jak jej vidí astigmatické oko



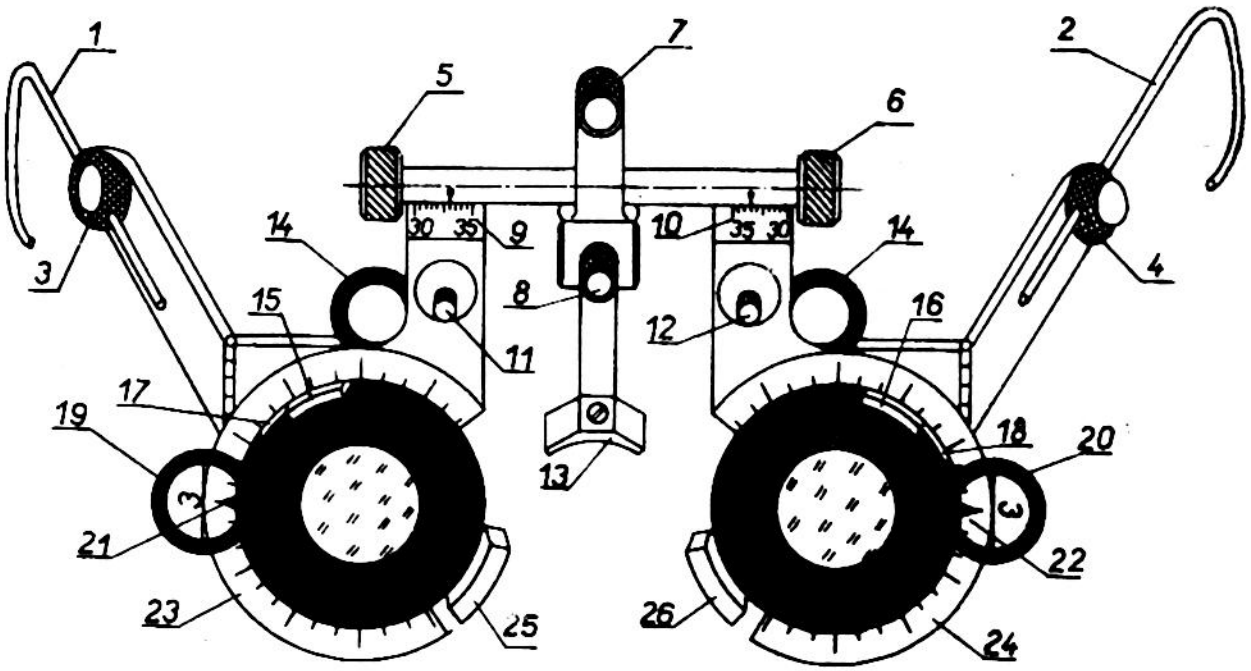
Obr. 17.1.2 Raubitschek-ův test.

17.2) Zkušební brýlová skla

Zkušební brýlová skla slouží k subjektivnímu určování lámavosti oka. V podstatě je to řada bikonvexních resp. bikonkávních tenkých čoček s odstupňovanou lámavostí. Obyčejně do 4,5 dioptrie jsou tato skla odstupňována po 0,25 dioptrie. Skla o vyšších lámavostech jsou pak odstupňována po 0,5 dioptriích. Počet těchto zkušebních brýlových skel bývá různý. Při proměřování očí je možno vystačit i s omezeným počtem těchto skel. Potom je ovšem třeba vyšší hodnoty lámavostí dosahovat tak, že se za sebou umístí dvě nebo i tři skla taková, aby součet jejich lámavostí dal potřebnou lámavost. Tento způsob není však přesný, neboť soustavu dvou nebo tří tenkých čoček nemůžeme považovat za tenkou čočku, takže poloha příslušného hlavního bodu soustavy vzhledem k oku neodpovídá vzdálenosti zkušebních obrub od oka.

Mimo tato zkušební brýlová skla patří k příslušné sadě, tvořené cca 35 páry sférických skel, ještě cca 16 párů válcových brýlových skel, jejichž maximální lámavost bývá až $\pm$ 6 dioptrií. K soupravě náleží dále matná skla k vyloučení jednoho z obou očí, kotoučky s otvorem a štěrbinou, sloužící k určování astigmatismu, brýlová skla klínová a některé pomůcky, jako skla matovaná na jedné polovině plochy apod.

Vzhledem k tomu, že zkušební brýlová skla musí být upevněna centricky, že musí stát kolmo na hlavní osu pozorování a v předepsané vzdálenosti od oka, vkládají se do stavitelných brýlových obrub. Jak je vidět z obr. 17.2.1, jsou tyto obruby upraveny tak, aby do nich bylo možno současně vložit dvě až tři různá zkušební skla, která jsou uložena ve zvláštních lehkých objímkách (obr. 17.2.2), neboť průměr vlastních zkušebních skel se volí z důvodů co nejmenší váhy velmi malý. Objímky (2) zkušebních skel jsou spojeny s vhodným

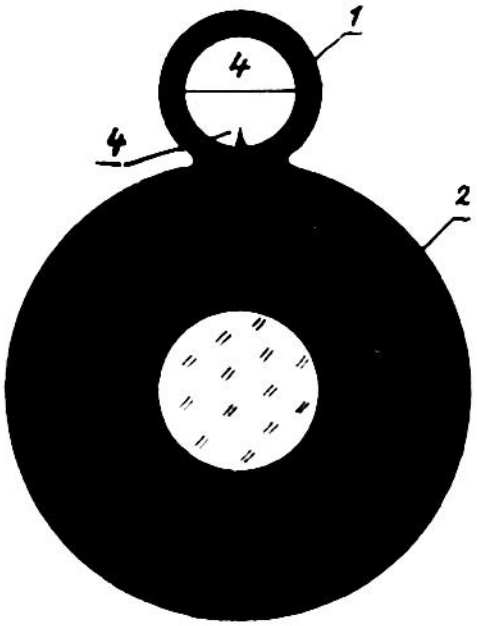


Obr. 17.2.1 Nastavitelné brýlové obruby pro zkoušení brýlových skel.

držadlem (1), které je opatřeno kruhovým otvorem, ve kterém je průhledný kotouček, na kterém je u sferických brýlových skel vyznačena lámavost v dioptriích a v případě válcových brýlových skel ještě indexem (4) směr příslušné osy válce. Zkušební skla se vkládají do drážek držáků (15), (25) resp. (16), (26), kde jsou přidržována plochými pružinami (17) a (18).

Základní sferická skla potřebná ke korekci sferické ametropie se vkládají do zadní části brýlových obrub. Poloha osy případných válcových brýlových skel se určí polohou indexu (21) resp. (22) na úhloměrných stupnicích (23) resp. (24).

Z obr. 17.2.1 je patrno, že brýlové zkušební obruby jsou upraveny tak, že je možno snadno točítky (5) a (6) nastavit potřebný oční rozestup a točítky (11) resp. (12) každé z obou brýlových skel libovolně výškově. Také nosní opěra (13) je výškově i vzhledem k rovině čela stavitelná točítky (8) a (7). Totéž se týká délky stěžejek (1) a (2).



Obr. 17.2.2 Zkušební brýlové sklo

17.3) Praktické zkoušení očí a určování příslušné ametropie.

Zkoušení očí zkušebními brýlovými skly je pouze subjektivní, neboť závisí především na vlastnostech zkoušeného jedince a je nutné, aby zkoušející sám dovedl těchto vlastností pečlivě využít.

Při zkoušce se postupuje tak, že se zkoušený jedinec posadí do vzdálenosti 5 nebo 6 m před test pro určování rozlišovací schopnosti.

Předpokládejme nejdříve, že zkoušíme krátkozrakého jedince. V tomto případě musíme rozeznávat dva odlišné případy:

a) jedinec je mladý, takže má ještě dostatečnou akomodační schopnost,
b) jedinec má již stařecké oči, takže jeho akomodační schopnost je velmi omezená nebo nulová.

Nejdříve je třeba určit ametropii odděleně u každého oka. Obyčejně se začíná pravým okem. Proto levé oko se vyloučí tak, že se před něj umístí matné sklo.

a) Nyní se tážeme zkoušeného, který řádek zkušebního testu ještě přečte. Předpokládejme, že náš jedinec nepřečte žádný řádek a že teprve při sevřených víčcích přečte řádek s největšími znaky. Přidržíme-li před zkoušeným okem spojné zkoušecí brýlové sklo, zjistíme, že rozlišovací schopnost zkoušeného se ještě zhorší. Z toho můžeme usoudit, že se jedná o krátkozrakost.

Proto nyní umístíme před zkoušeným okem zkoušecí brýlové sklo o lámavosti - 1 dioptrie a ptáme se, zda se čtení testu zlepšilo. V kladném případě postupně zvyšujeme lámavost zkoušecího skla po - 0,5 dioptriích. Nechť např. u skla - 2,5 dioptrie přečte zkoušený znaky odpovídající vzdálenosti 6 m. Tedy jeho rozlišovací mez bude 6/6. Zvýšíme lámavost na - 2,75 dioptrií a zkoušíme, zda nepřečte řádek odpovídající vzdálenosti 4 m. V záporném případě se vrátíme zpět ke sklu o lámavosti - 2,5 dioptrie, neboť pro korekci oka je nejdůležitější a nejsprávnější pouze minimální lámavost, při které oko dosáhne nejlepší rozlišovací schopnosti. Tím je pravé oko odzkoušeno. Nalezenou hodnotu - 2,5 dioptrie, rozlišovací mez 6/6 si poznamenáme.

Nyní přejdeme ke zkoušení levého oka. Opět zakrytím pravého oka matným sklem vyloučíme toto oko z funkce. Předpokládejme, že jsme obdobným způsobem našli hodnotu - 3,5 dioptrií, rozlišovací mez 6/6.

Teprve nyní přejdeme k binokulárnímu vidění tím, že odstraníme matné sklo umístěné před pravým okem.

Nyní se např. ukáže, že zkoušený přečte další řádek, takže jeho rozlišovací mez je 4/6.

V zájmu určení minimálních lámavostí pro korekci dané ametropie, umístíme před obě oči zkoušecí sklo + 0,25 dioptrie a zkoušíme, zda se rozlišovací schopnost nezhoršila. V kladném případě umístíme zkoušecí sklo o lámavosti + 0,25 dioptrií pouze před okem o větší lámavosti, tj. v našem případě před levým okem. Střídavým zařazováním a vyřazováním tohoto skla před levé oko se snažíme zjistit, zda zkoušený vidí test pohodlněji, i když ne zřetelněji. V kladném případě zkusme toto zkoušecí sklo + 0,25 dioptrií zaměnit za + 0,5 dioptrií. Předpokládejme, že se rozlišovací schopnost zhoršila. Je proto nutné se vrátit ke sklu s lámavostí + 0,25 dioptrií.

Tedy konečný výsledek zní: pravé oko: - 2,5 dioptrie
levé oko: - 3,25 dioptrie.

b) Předpokládejme nyní, že zkoušený jedinec je starší 45-ti let a že je opět krátkozraký. Obdobným způsobem jako v předcházejícím případě určíme u zkoušeného jedince lámavost korekčních skel potřebných k vykorigování dané krátkozrakosti při pozorování dalekých předmětů. Protože však akomodace zkoušeného je již značně omezena, je třeba určit ještě lámavost brýlových skel, potřebných pro vidění na blízko.

Postupujeme tak, že před nalezená zkoušecí skla nalezená pro vidění na dálku umístíme spojná zkoušecí brýlová skla, jejichž lámavost musíme určit tak, aby spolu s lámavostí skel potřebných pro vidění na dálku, dávala lámavost potřebnou pro vidění na blízko. Pro předběžné určení lámavosti těchto spojných brýlových skel slouží tab. 17.3.1, která obsahuje lámavosti přídavných skel potřebných pro vidění na blízko nezávisle na tom, zda oko je emmetropické, nebo zda se jedná o <u>vykorigované</u> oko ametropické. Lámavosti těchto přídavných skel odpovídají pozorovací vzdálenosti 33,3 cm.

Tab. 17.3.1

Stáří roků	Přídavek v dioptr. pro vidění na vzdálenost 33,3 cm
45	0,75
48	1,25
50	1,50
52	1,75
55	2,0
60	2,25
65	2,50
70	2,75

Předpokládejme, že dříve popsaným způsobem bylo zjištěno, že zkoušený jedinec stáří 52 roků je krátkozraký a že jeho ametropie je např. - 4,5 dioptrie. Podle tab. 17.4.1 je třeba předřadit před skla, korigující jeho oči pro vidění na dálku, spojná skla

o lámavosti + 1,75 dioptrií. Nyní dáme zkoušenému do rukou tištěný text a zjišťujeme, zda dobře rozlišuje. Potom spojná skla zaměníme za jiná o lámavosti + 2 dioptrie. Rozlišení se např. zhorší. Vrátíme se proto ke sklům o lámavosti + 1,5 dioptrií. Ukáže se, že např. zkoušený opět špatněji rozlišuje. To znamená, že první přídavné sklo + 1,75 dioptrií bylo nejvhodnější.

Lámavost skel pro vidění na blízko bude tedy v daném případě

$$-4,5 + 1,75 = -2,75 \text{ dioptrií.}$$

Všimněme si nyní ještě dalekozrakého jedince. Zde je nutno úvodem zdůraznit, že rozlišovací schopnost dalekozrakých jedinců je velmi různá a závisí především na věku zkoušeného. Proto zjištění, že rozlišovací schopnost je 6/6 nemusí být ještě důkazem, že oko je v pořádku - emmetropické.

Všimněme si mladého, patnáctiletého chlapce, který si stěžuje, že při delším pozorování blízkých předmětů zjišťuje, že najednou se mu pozorovaný předmět zneostří a že po delším hledění do dálky se mu opět blízké předměty jeví střetelně, aby se po určité době opět rozplývaly.

Pomocí testové tabule je zjištěno, že např. čte znaky odpovídající vzdálenosti 6 m s určitými chybami, zatímco znaky řádku odpovídajícímu vzdálenosti 8 m čte již hladce. Proto předřadíme před jeho oko spojné zkoušecí sklo o malé lámavosti, např. + 0,5 dioptrie. Zjistíme-li, že se čtení zlepší, předřazujeme před zkoušené oko postupně skla o lámavostech +1 ; + 1,5 ; + 2 ; ... a zjišťujeme, při kterém skle se mu začne jevit řádek odpovídající vzdálenosti 6 m nezřetelně. Nechť je to např. při skle o lámavosti + 2 dioptrie. Vrátíme se proto k nižší lámavosti + 1,75 dioptrií, při které vidí zkoušený jedinec řádek odpovídající vzdálenosti 6 m hladce. Potom pro ametropii zkoušeného oka platí: + 1,75 dioptrií, rozlišovací mez 6/6.

Podobným způsobem se přezkouší i druhé oko. Zjistí se např., že je shodné s prvním, takže jeho ametropie je rovněž + 1,75 dioptrií a rozlišovací mez 6/6.

Nyní necháme zkoušeného číst s nalezenými korekčními skly testovou tabuli binokulárně. Zjistíme, že se výsledek nezhoršil. Proto předřadíme před obě oči přídavné sklo o lámavosti + 0,5 dioptrií. Předchozí výsledek se tím opět nezhoršil. Proto umístíme před obě oči zkoušecí skla o lámavostech 1,75 + 0,5 = = + 2,25 dioptrií a zkoušíme dále, zda se při předřazení před obě oči dalších skel o lámavostech + 0,5 čtení nezhorší. V záporném případě se vrátíme na lámavosti + 2,25 dioptrií, které tvoří konečný výsledek.

Nutno ještě poznamenat, že zatímco při zkoušení krátkozrakého oka jsme se snažili najíti korekční skla o minimální lámavosti, v případě dalekozrakého oka spíše se uchylujeme k vyšším lámavostem korekčních skel.

V předcházejících příkladech jsme předpokládali pro jednoduchost, že zkoušené oko je zatíženo pouze sférickou ametropií. Předpokládejme proto nyní, že zkoušené oko je astigmatické.

Astigmatismus musíme sledovat ve všech těch případech, kdy se nedosáhlo při zkoušce oka žádané rozlišovací schopnosti s použitím sférických korekčních brýlových skel.

Pro zkoušení astigmatismu můžeme opět použít Snelliových testů, při čemž mimo sférických zkoušecích brýlových skel předřadíme před prověřované oko válcové sklo, kterým otáčíme v jeho rovině tak dlouho, až zkoušený sdělí, kdy nejzřetelněji vidí.

Uvažujme např. krátkozrakého jedince. Obdobným postupem, který byl popsán v předcházejících příkladech, zjistíme, že při korekci sférickým zkoušecím sklem o lámavosti - 2,5 dioptrií vidí zkoušený dobře řádek odpovídající vzdálenosti 8 m. Při sklech o lámavostech - 2,75; - 3 atd. zkoušený tvrdí, že vidí lépe, ale řádek odpovídající vzdálenosti 6 m nerozlišuje. Vrátíme se proto ke sklu o lámavosti - 2,5 dioptrií a předřadíme před ně válcové sklo o lámavosti - 0,5 dioptrií tak, aby jeho osa byla vodorovná. Zkoušený prohlašuje, že vidí hůře. Upozorníme proto zkoušeného, že budeme sklem otáčet, aby dával pozor, zda se vidění během otáčení nezlepší. Zkoušený sděluje, že při poloze válcového skla, kdy jeho osa stojí svisle (90^0), vidí lépe, zatímco při dalším otáčení se vidění opět zhoršuje. V optimální poloze rozlišuje znaky řádku odpovídajícímu vzdálenosti 6 m. Zvýšíme-li lámavost válcového skla na - 0,75 dioptrií, zjišťujeme, že se vidění nezlepšilo. Tedy výsledek měření příslušného oka můžeme zapsat takto:

$$- 2{,}5 \text{ kul} \supset - 0{,}5 \text{ vál. } \measuredangle 90^0 .$$

Když jsme obdobným způsobem určili lámavost a osu válcového zkoušecího skla pro druhé oko, necháme zkoušeného číst binokulárně. Potom vyjmeme obě válcová skla. Zjistíme-li, že se vidění zhoršilo, potvrdili jsme si oprávněnost zavedení válcových skel.

Uvažujme nyní dalekozrakého jedince a předpokládejme, že jsme u pravého oka zjistili korekci + 2,5 dioptrie, která zajišťovala rozlišovací mez 6/8 až 6/6. Zvýšíme-li lámavost korekčního skla na + 2,75 dioptrie, nevidí zkoušený ani lépe ani hůře, stejně jako když lámavost korekčního skla zvýšíme na + 3,0 dioptrie.

Předřaďme nyní před korekční sklo + 3,0 dioptrie válcové sklo o lámavosti + 0,5 dioptrie tak, aby jeho osa byla vodorovná. Otáčíme-li jím o 180^0, rozlišovací schopnost oka se stále zhoršuje. Z toho plyne, že oko je astigmatické, neboť v opačném případě by byla rozlišovací schopnost zkoušeného oka ve všech směrech stejná.

Proto válcové sklo o lámavosti + 0,5 dioptrie zaměníme za válcové sklo o lámavosti - 0,5 dioptrie. Nyní bude rozlišovací schopnost oka lepší a při poloze odpovídající 120^0 bude nejlepší, neboť zkoušený bude rozlišovat znaky řádku odpovídajícího vzdálenosti 6 m. Celkový výsledek můžeme tedy zapsat takto:

$$+ 3{,}0 \text{ kul} \supset - 0{,}5 \text{ vál. osa } 120^0 .$$

Dostali jsme sklo mající v obou hlavních řezech lámavost s opačnými znaménky. Musíme je proto přepočíst tak, aby lámavost v obou řezech byla stejného znaménka.

Toto sklo bude mít ve směru 120° lámavost

$$\begin{array}{r} +\ 3{,}0 \text{ dioptrie (kul.)} \\ +\ (0{,}0) \text{ dioptrie (vál.)} \\ \hline +\ 3{,}0 \text{ dioptrie} \end{array}$$

a ve směru 30° lámavost

$$\begin{array}{r} +\ 3{,}0 \text{ dioptrie (kul.)} \\ +\ (-0{,}5) \text{ dioptrie (vál.)} \\ \hline +\ 2{,}5 \text{ dioptrie.} \end{array}$$

Přepočítané sklo můžeme tedy psát

$$+\ 2{,}5 \text{ kul} \bigcirc +\ 0{,}5 \text{ vál. osa } 30^{\circ} .$$

Tím je korekce oka skončena.

Astigmatismus oka se zjišťuje často tzv. zamlžovací metodou. Tato metoda spočívá v transformaci libovolného astigmatismu oka ve složený krátkozraký astigmatismus, kdy obě fokály leží před sítnicí. Dosahuje se toho spojným brýlovým sklem o lámavosti + 1 nebo + 2 až + 4 dioptriích.

Postupujeme tak, že obvyklým způsobem určíme pomocí Snelliových testů rozlišovací schopnost a dále lámavost sferického zkušebního skla, kterým se dosáhne optimální rozlišovací schopnosti. Nyní se před takto vykorigované oko umístí spojné zkoušecí sklo o lámavosti + 1 až + 2 dioptrie, tak, aby zkoušený viděl právě druhý nebo jen třetí řádek testu, které odpovídají vzdálenostem 24 resp. 18 m.

Nyní se použije pro další zkoušky testů určených pro zjišťování astigmatismu (obr. 11.9.1). Proto se nesmí zamlžení vystupňovat tak daleko, aby zkoušený již neviděl čáry těchto testů. Zkoušený vidí čáry testu nezřetelně. Je-li však jeho oko zatíženo astigmatismem, pak může snadno určit, které z čar testu vidí zřetelněji, tj. v černějším zabarvení. Směr těchto čar určí na příslušné stupnici. U některých testů nesouhlasí číslování úhloměrných stupnic testů se stupnicemi zkušebních brýlových obrub. Stupnice testů bývají totiž zrcadlovými obrazy stupnic brýlových obrub. Vidí-li proto zkoušený nejčernější čáry ve směru 130°, pak osa válcového skla u zkoušecích brýlí má směr 40° $(= 130^{\circ} - 90^{\circ})$.

Předpokládejme, že zkoušený jedinec je dalekozraký a že bylo zjištěno obvyklým způsobem, že dosáhne nejlepší rozlišovací schopnosti se zkoušecím sklem o lámavosti + 2,5 dioptrie a že příslušná rozlišovací mez je 6/8. Nyní toto zkoušecí sklo o lámavosti + 2,5 dioptrie zaměníme za sklo o lámavosti + 4 dioptrie. Zkoušený rozliší přitom ještě znaky řádku, kterému odpovídá

vzdálenost 24 m. Za tohoto stavu se jeví zkoušenému nejčernější čáry ve směru 130°.

Nyní se vloží do zkoušecích brýlí válcové sklo o lámavosti - 0,5 dioptrií tak, aby jeho osa zaujímala směr 40°. Ptáme se, zda zkoušený vidí čáry všech směrů stejně černé. V záporném případě zaměníme válcové sklo za jiné s lámavostí - 0,75 dioptrií. Předpokládejme, že zkoušený tvrdí, že nyní směr 130° je ještě málo černější. Zařadíme-li další válcové sklo o lámavosti - 1,0 dioptrie, jeví se mu směr 40° černější. To znamená, že jsme již astigmatismus zkoušeného oka překorigovali. Vrátíme se proto k předchozímu válcovému sklu o lámavosti - 0,75 dioptrie. Tím je zkouška astigmatismu skončena.

Nyní necháme znovu číst Snellův test. Zjistíme např., že zkoušený přečte řádek odpovídající vzdálenosti 10 m. Protože pouze se sférickým zkoušecím sklem bylo již dosaženo hodnoty 6/8, musí být téže hodnoty dosaženo i po korekci astigmatismu, nebo spíše musí být dosaženo lepšího výsledku.

Proto postupně zvyšujeme lámavost sférického skla po + 0,5 dioptriích a zjistíme např., že při zvýšení o 0,5 dioptrií se zvýší rozlišovací schopnost zkoušeného na 6/6.

Můžeme tedy výslednou korekci zapsat takto:

$$+ 3{,}0 \text{ kul} \subset - 0{,}75 \text{ vál. osa } 40^\circ \ .$$

Protože jsme tímto způsobem našli korekční sklo mající v hlavních směrech lámavosti opačných znamének, musíme toto sklo přepočítat.

Nalezené sklo má ve směru 40° lámavost

$$\begin{array}{l} + \ 3 \text{ dioptrie (kul.)} \\ \underline{- (0{,}0) \text{ dioptrie (vál.)}} \\ + \ 3 \text{ dioptrie} \end{array}$$

a ve směru kolmém, tj. 130° má lámavost

$$\begin{array}{l} + \ 3 \text{ dioptrie (kul.)} \\ \underline{(-0{,}75) \text{ dioptrie (vál.)}} \\ + \ 2{,}25 \text{ dioptrie} \end{array}$$

Tedy přepočítané sklo můžeme psát ve tvaru

$$+ 2{,}25 \text{ kul.} \subset + 0{,}75 \text{ vál. osa } 130^\circ \ .$$

Tím je korekce oka skončena.

Méně přesnou metodou pro určování astigmatismu je tzv. <u>štěrbinová metoda.</u> Přitom se postupuje takto: Obvyklým způsobem se vykoriguje oko na nejlepší rozlišování. Potom se před příslušné sférické zkoušecí sklo umístí

clona s 1 mm širokou podélnou štěrbinou, která se rychle otáčí ve své rovině. Aby toto rychlé otáčení bylo usnadněno, bývají některé zkoušecí brýlové obruby opatřeny ozubeným převodem. Během tohoto otáčení zkoušíme, při které poloze štěrbiny zkoušený vidí nejzřetelněji a při které nejhůře.

Uvažujme např. krátkozraké oko a předpokládejme, že bylo vykorigováno zkoušecím brýlovým sklem o lámavosti - 3 dioptrie. Se sklem o lámavosti - 3,5 dioptrie nevidí zkoušený lépe, takže lze se domnívat, že nalezená rozlišovací mez 6/10 se dá zlepšit pouze odstraněním předpokládaného astigmatismu. Abychom vyloučili možnost dané astigmatické oko v kterémkoliv hlavním směru překorigovat, snížíme nalezenou optimální lámavost sférického skla z - 3 dioptrií na - 2,5 dioptrií. Teprve nyní umístíme před tímto sklem štěrbinu a zjišťujeme, že zkoušený nejlépe rozlišuje při 30° a nejhůře při 120°. Předpokládejme, že v této poslední poloze rozlišuje zkoušený jedinec pouze znaky řádku odpovídajícího vzdálenosti 24 m. Proto štěrbinu ponecháme v příslušné poloze a nahradíme sférické sklo o lámavosti - 2,5 dioptrií sklem o lámavosti - 3 dioptrií. Nechť např. zkoušený rozliší nyní znaky řádku odpovídajícího vzdálenosti 12 m. Proto ještě zvýšíme lámavost zkoušecího sférického skla z - 3 dioptrií na - 3,25 dioptrií, se kterými rozliší znaky řádku odpovídajícího vzdálenosti 10 m. To znamená, že jsme i v nalezeném hlavním směru (120°) dosáhli stejné rozlišovací schopnosti jako ve směru kolmém.

Kontrolu měření provedeme tak, že sklo - 3,25 dioptrií zaměníme za - 2,5 dioptrie a otočíme štěrbinu o 90°. Zkoušený vidí nyní stejně zřetelně jako v předcházejícím případě. Výsledek měření můžeme tedy zapsat takto:

$$-2{,}5 \text{ kul.} \bigcirc -0{,}75 \text{ vál. osa } 30^{\circ} .$$

Tato kombinace zajišťuje rozlišovací mez 10/6. Proto zvýšíme lámavost sférického skla na - 2,75 dioptrií, při které zkoušený rozliší znaky odpovídající vzdálenosti 6 m. Tedy konečný výsledek zní:

$$-2{,}75 \text{ kul.} \bigcirc -0{,}75 \text{ vál. osa } 30^{\circ} .$$

Štěrbinová metoda se s výhodou využívá v případě smíšeného astigmatismu oka.

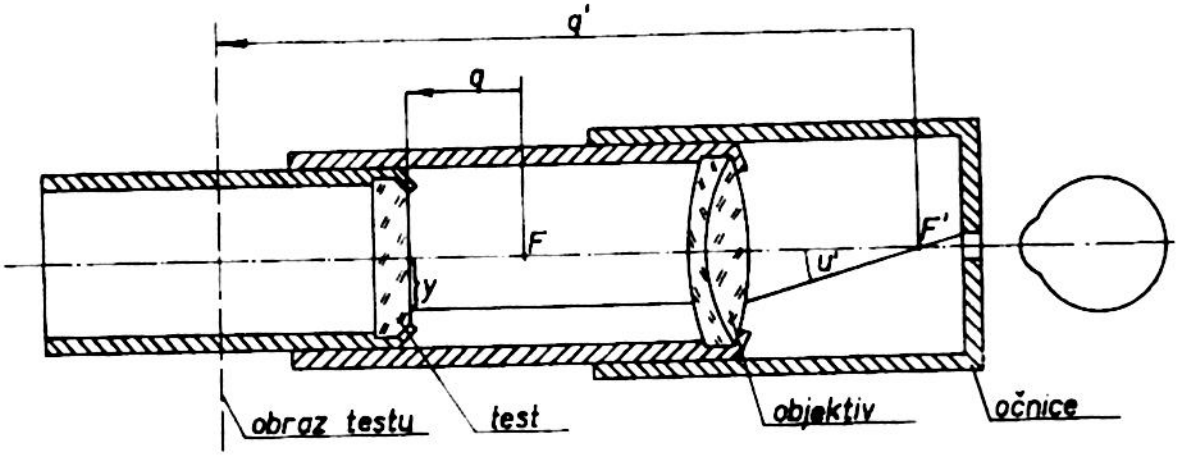
17.4) Subjektivní optometry

Do skupiny subjektivních optometrů zahrnujeme přístroje, které umožňují jedinci, aby si sám změřil vlastní ametropii a tedy i příslušnou korekci. U většiny těchto přístrojů se staví pouze jedno oko za okulár optometru, což je velmi nepříznivé z hlediska akomodace. Potíže, které jsou tímto způsobem vyvolány, se poněkud zmenší, jestliže necháme druhé oko, které zůstává otevřeno, hledět na monotonně zbarvenou plochu nebo ještě lépe na nějaký vzdálený test.

Subjektivní optometry rozdělujeme podle způsobu nastavení na nejlepší obraz na tři druhy:

a) optometry využívající dokonalé definice (ostrosti) obrazu,
b) optometry využívající zdvojení obrazu,
c) optometry využívající zabarvení obrazu.

a) Přístroje prvního druhu realizují v podstatě metodu zkoušení oka zkušebními skly a testy. K nejjednodušším zařízením tohoto druhu patří optometr Badalův. V principu je to kolimátor. Je tvořen tubusem o průměru cca 30 mm, na jehož jednom konci je uložen spojným objektivem o lámavosti D . Do druhého volného konce je nasunut druhý tubus, na jehož vnitřním konci je uložena skleněná ploténka se vhodným testem; může to být např. fotograficky zmenšený Snelliův test.



Obr. 17.4.1 Badalův optometr.

Nechť q' značí vzdálenost obrazu testu vytvořeného objektivem od jeho obrazového ohniska F'. Označíme-li f' ohniskovou vzdálenost objektivu, pak podle Newtonovy zobrazovací rovnice platí

$$qq' = -f'^2 ,$$

nebo pro vergenci $X' = \frac{1}{q'}$

$$X' = \frac{q}{f'^2} = -q D^2 .$$

Volíme-li D tak, aby $D^2 = 250$, pak z předcházejícího vztahu plyne, že změně q o 4 mm odpovídá změna X' o 1 dioptrii. Proto výsuvný tubus je opatřen stupnicí dělenou v dioptriích, při čemž každý celý milimetr značí 0,25 dioptrií. Stačí, jak bylo uvedeno, volit lámavost objektivu

$$D = \sqrt{250} = 15{,}8 \text{ dioptrií} .$$

Na optometru je nasunuta výsuvná očnice, která umožňuje nastavit oko do předepsané vzdálenosti vzhledem k objektivu optometru.

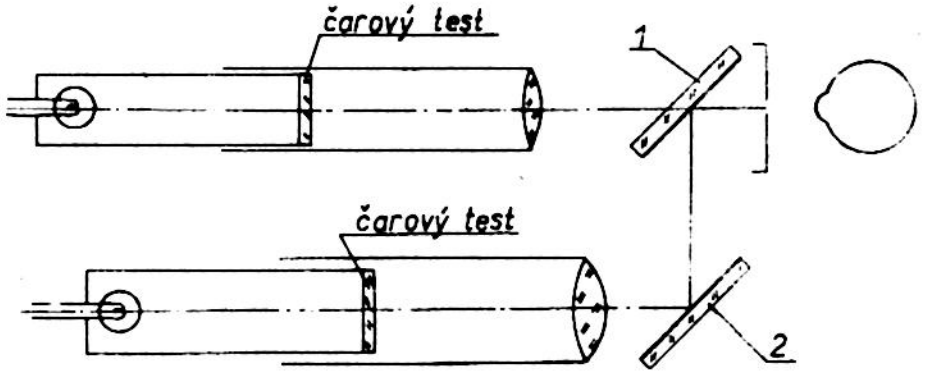
Splývá-li obrazové ohnisko F´ s předmětovým hlavním bodem oka, pak příslušná vergence X´ určuje hlavní refrakci (za předpokladu, že oko neakomoduje) a naměřená rozlišovací schopnost je rozlišovací schopnost přirozená a je nezávislá pro dané oko na výtahu posuvného tubusu obsahujícího příslušný test, neboť podle obr. 17.4.1 je vidět, že oko bude vidět úsečku y pod stejným úhlem u´, ať je vzdálenost q jakákoliv.

Splývá-li obrazové ohnisko F´ s předmětovým ohniskem oka, pak vergence X´ určuje ohniskovou refrakci a příslušná rozlišovací schopnost odpovídá absolutní rozlišovací schopnosti, která není teoreticky závislá na osové ametropii.

Splývá-li obrazové ohnisko F´ s bodem, ve kterém bude umístěno příslušné korekční brýlové sklo, pak naměřená rozlišovací schopnost je tzv. relativní. V tomto případě pracuje optometr zcela stejně jako metoda zkoušecích brýlových skel využívající Snellioových testů.

Diferenciální optometr de Gramontův slouží k určování astigmatismu. V podstatě je tvořen dvěma Badalovými optometry, které obsahují čárové testy orientované vzájemně na sebe kolmo. Pomocí zrcadel (1) a (2), z nichž (1) je polopropustné, vidí oko současně obě soustavy testových čar. Nastavením tubusů na nejzřetelnější obrazy dostaneme dvě hodnoty refrakcí, jejichž rozdíl je hledaný astigmatismus.

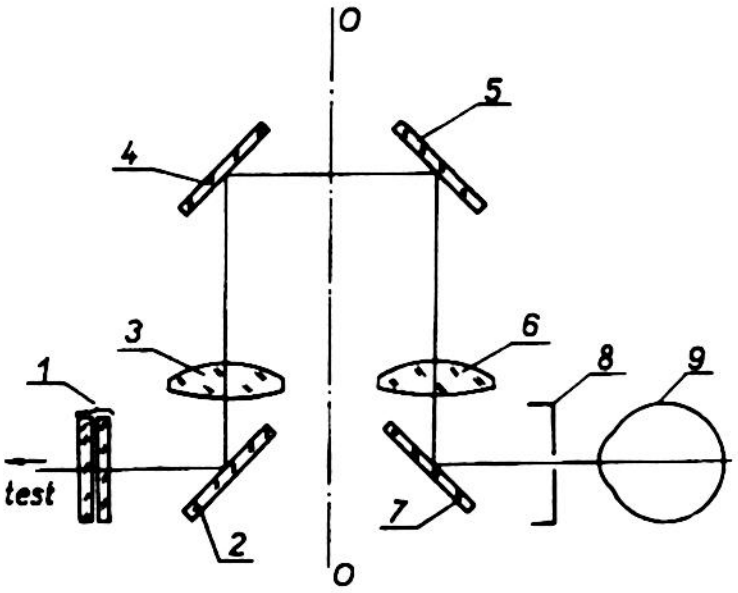
Schema dalšího optometru, zvaného Thornerovým variatorem, je vidět na obr. 17.4.3. U tohoto přístroje je test nahražen skutečným Snellioovým testem, umístěným v předepsané vzdálenosti před Thornerovým optometrem. Tento test je zobrazován objektivem (3) tak, že příslušný obraz tvoří teprve test pro objektiv (6), který má funkci objektivu Badalova optometru. Přístroj má 4 odrazná zrcadla, z nichž zrcadla (3) a (7) jsou pevná, zatím co zrcadla (4) a (5) se jako celek posouvají ve směru $\overline{OO}$. Tím je umožněna plynulá změna refrakce v rozsahu - 20 až + 20 dioptrií. Mimoto je přístroj vybaven dvojicí válcových čoček (1) o lámavostech - 3 dioptrie, která dovoluje podle jejich polohy zavést do soustavy válcovou lá-



Obr. 17.4.2 Schema de Gramontova optometru

mavost V rozsahu 0 až - 6 dioptrií s volitelným směrem osy válce.

Druhá skupina optometrů, využívajících zdvojení obrazu, je založena na Scheinerově pokusu. Umístíme-li před pupilu oka stínítko s řadou malých otvorů, pak vhodnému předmětu bude na sítnici odpovídat pouze jediný obraz jen tehdy, bude-li předmět a sítnice tvořit sdružený pár.



Obr. 17.4.3 Schema Thornerova variatoru

Předmětem může být tenké vlákno umístěné v ohniskové rovině objektivu kolimátoru. Umístíme-li před okem zkoušeného jedince stínítko se dvěma štěrbinami, bude emmetropické oko vidět vlákno jako jednoduchou čáru. V případě ametropického oka bude obraz zdvojen. Začleníme-li mezi zkoušené oko a objektiv kolimátoru čočku o vhodné lámavosti, můžeme dosáhnout toho, že opět oba obrazy vlákna splynou v jediný. Lámavost vložené čočky pak určuje měřenou ametropii.

Natočíme-li celé zařízení kolem osy kolimátoru, můžeme tímto způsobem určit refrakci oka v libovolném meridiánu.

Poslední skupina optometrů využívá barevné vady oka. Abychom pochopili funkci těchto optometrů, je třeba si uvědomit, že oko jevící se v bílém světle jako emmetropické, zůstává emmetropickým nebo přechází ve slabě dalekozraké v červeném světle a naopak se stává krátkozrakým až - 1,5 dioptrie v modrém světle.

Helmholtz proto použil ke zkoušení oka světelného zdroje, před který umístil kobaltový skleněný filtr, který propouští červené a modré světlo. Rozptylový kroužek je pak lemován červeným nebo modrým okrajem, podle toho, je-li oko akomodováno na červenou nebo modrou barvu. Není-li rozptylový kroužek lemován vůbec, pak se oko vyznačuje refrakcí - 0,7 dioptrie. Landolt využil této metody k měření astigmatismu. Umístil ve vzdálenosti 5 m malý světelný zdroj za kobaltový filtr.

Podle druhu astigmatismu se tento zdroj jevil takto (tab. 17.4.1):

Tab. 17.4.1

Typ astigmatismu	Vzhled pozorovaného zdroje
Dalekozraký - jednoduchý	purpurová elipsa s červenými okraji
Dalekozraký - složený	modrá elipsa s červenými okraji
Krátkozraký - jednoduchý	purpurová elipsa s modrými okraji
Krátkozraký - složený	červená elipsa s modrými okraji
Smíšený	purpurový kroužek lemovaný jedním směrem červeně a druhým modře

17.5) Objektivní přístroje pro zkoušení očí

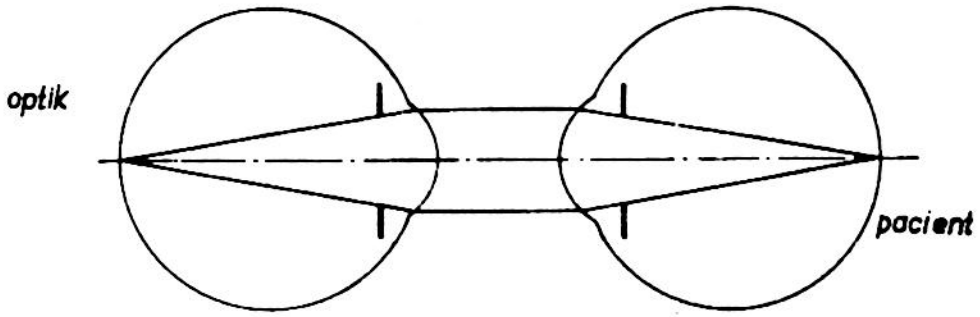
Přístroje, popsané v předcházející kapitole, byly nazvány subjektivní, neboť výsledek zkoušky byl do určité míry závislý na vlastnostech a údajích zkoušeného jedince.

Všimněme si proto nyní alespoň přehledně některých přístrojů, které umožňují objektivní měření. Do této skupiny přístrojů patří především tzv. oftalmoskopy.

Abychom se mohli v dalších úvahách snadněji a stručněji vyjadřovat, budeme zkoušeného jedince nazývat pacientem (i když se vlastně o nemocného v pravém slova smyslu nejedná) a zkoušejícího optikem (neboť zkoušející nemusí být vždy lékařem).

Oftalmoskopy jsou v podstatě přístroje, které umožňují optikovi nahlédnout do oka pacientova. Představme si, že oba, pacient i optik, jsou emmetropové. Potom neakomodující optik vidí sítnici pacienta, dívá-li se do jeho oka tak, jak je to naznačeno na obr. 17.5.1. Přitom optická soustava pacientova oka pracuje jako lupa, která zvětšuje obraz jeho sítnice 15x. Uvážíme-li, že zvětšení lupy je dáno vztahem

$$m = \frac{250}{f'},$$

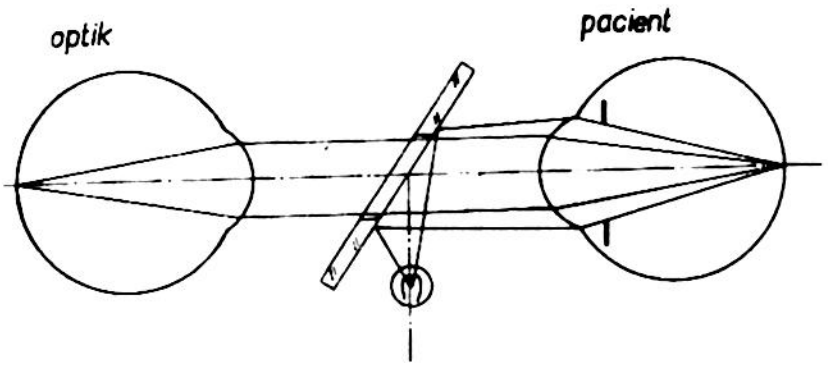


Obr. 17.5.1 Princip pozorování sítnice pacienta optikem.

kde f' je ohnisková vzdálenost lupy vyjádřená v milimetrech a přihlédneme-li k tomu, že lámavost oka jako celku je $D = 60$ dioptrií, pak z tohoto vztahu plyne

$$m = 250 \cdot \frac{D}{1000} = \frac{60}{4} = 15 \times .$$

Potíž spočívá v tom, že v případě naznačeném na obr. 17.5.1 není do oka pacientova přiváděno žádné světlo, takže pozadí oka se jeví úplně tmavé. Něco málo světla, které se do pacientova oka dostává, je prakticky jednak skoro úplně pohlceno uvnitř oka a ta část, která vystoupí z pacientovy pupily a vstupuje do pupily optikovy má zobrazit optikovu pupilu na sítnici pacientovu. Protože optikova pupila se jeví jako zcela tmavá, nedostává se na sítnici pacientova oka žádné světlo, čímž je celý okruh uzavřen, takže můžeme říci, že optik pacientovu sítnici nevidí.



Obr. 17.5.2 Osvětlení sítnice pacientova oka rovinným zrcátkem

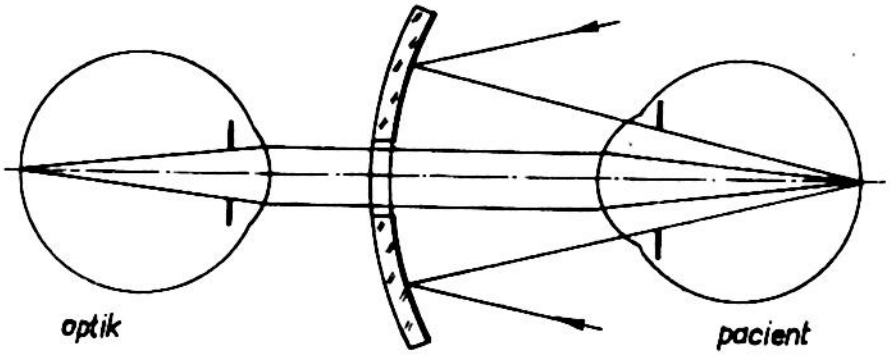
Tomu lze odpomoci pouze tak, že se mezi pacientovo a optikovo oko začlení rovinné nebo duté zrcátko s malým kruhovým otvorem, jak je to naznačeno na obr. 17.5.2 resp. 17.5.3.

Je-li sítnice pacientova oka dobře osvětlena, pak optik vidí zřetelně zvětšený a do červena zabarvený obraz sítnice se všemi jejími detaily.

Pacientova sítnice se může pozorovat dvěma metodami, <u>přímou</u> a <u>nepřímou</u>.

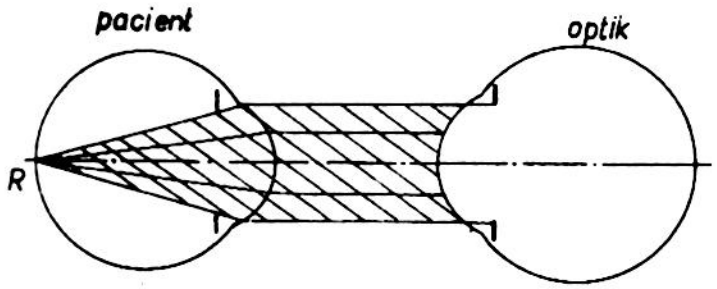
V prvním případě pozoruje optik přímo sítnici, zatímco v druhém případě se sítnice pacientova oka zobrazí nejdříve vhodnou optickou soustavou před

jeho oko, kde je teprve pozorována.

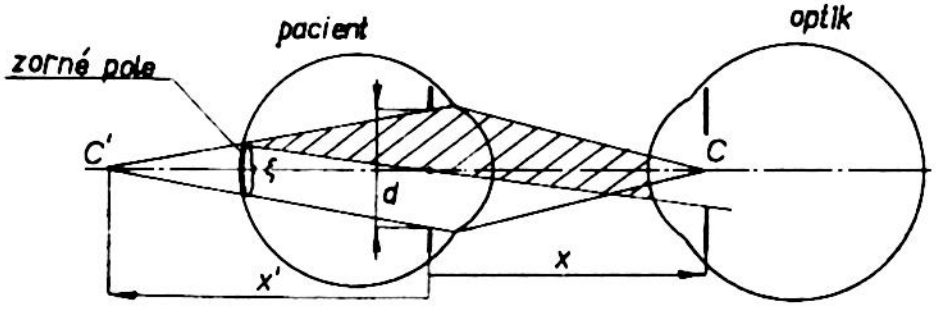


Obr. 17.5.3 Osvětlení sítnice pacientova oka dutým zrcátkem

Všimněme si velikosti zorného pole, tj. velikosti plochy sítnice pacientova oka, která může být pozorována. Velikost této části sítnice (pole) závisí na tom, jak ji budeme definovat. Obdobně jako je tomu u zorného pole lupy, můžeme považovat za zorné pole onu část sítnice pacientova oka, která má tu vlastnost, že paprsky, vycházející z libovolného jejího bodu a procházející jeho oční pupilou projdou buď všechny, nebo jen část nebo pouze jediný z nich pupilou optikova oka. Na obr.17.5.4 až 17.5.6 jsou vyznačena tato pole příslušnými paprskovými svazky. Předpokládáme-li, že průměr pacientovy i optikovy pupily je stejný, pak zorné pole podle prvého požadavku se redukuje pouze na jediný bod R sítnice pacientova oka. Paprsky vycházející z tohoto bodu a procházející pupilou pacientova oka projdou všechny pupilou optikova oka.

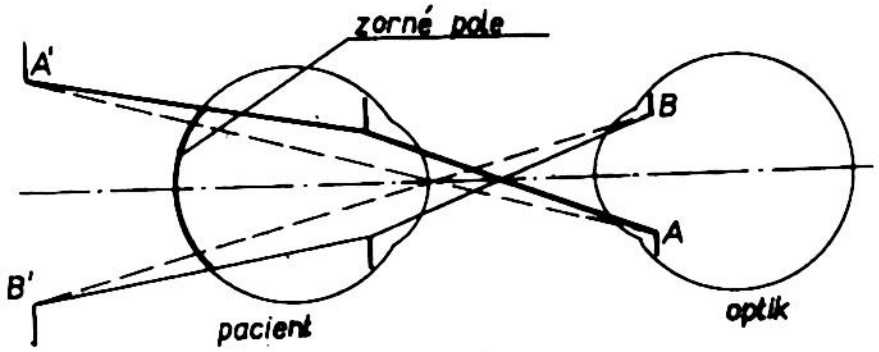


Obr. 17.5.4 K definici zorného pole oftalmoskopu



Obr. 17.5.5 K definici zorného pole oftalmoskopu

V druhém případě, kdy žádáme, aby ze zorného pole, tj. z pozorované části pacientova oka, prošlo pupilou optikova oka alespoň 50 % všech paprsků



Obr. 17.5.6 K definici zorného pole oftalmoskopu

prošlých pacientovou pupilou, je zorné pole vymezeno kuželem, jehož vrchol C' je obrazem středu C pupily optikova oka vytvořeným soustavou pacientova oka; jak je to vidět z obr. 17.5.5.

Konečně v třetím případě, kdy žádáme, aby z okraje zorného pole, tj. pozorované části sítnice pacientova oka, prošel alespoň jediný paprsek, je zorné pole dáno kuželem, který je určen jednak pupilou pacientova oka a jednak obrazem $\overline{A'B'}$ pupily $\overline{AB}$ optikova oka, vytvořeným soustavou pacientova oka, jak je to vidět na obr. 17.5.6.

Protože k rozlišení detailů na sítnici pacientova oka je nutné, aby byla sítnice co nejvíce osvětlena, můžeme v praxi počítat pouze se zorným polem určeným druhým požadavkem. Pro velikost ξ tohoto pole platí podle obr. 17.5.5

$$\frac{\xi}{d} = \frac{x' - f_0'}{x'}$$

$$\frac{1}{x'} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f_0'} \quad ,$$

nebo zavedeme-li vergence $X = \frac{1}{x}$, $X' = \frac{1}{x'}$ a lámavost oka $D = \frac{1}{f_0'}$, dostaneme dále

$$\frac{\xi}{d} = \frac{\frac{1}{X'} - \frac{1}{D}}{\frac{1}{X'}} = \frac{D - X'}{D}$$

$$X' + X = D \quad .$$

Po dosazení z druhé rovnice do první dostáváme dále

$$\frac{\xi}{d} = \frac{D - D + X}{D} = \frac{X}{D}$$

čili

$$\xi = d \cdot \frac{X}{D} \quad . \qquad (17.5.1)$$

Aby průměr ξ zorného pole byl co největší, musíme volit $|X|$ co největší. Nechť $|X| = 30$ dioptrií, pak pro $D = 60$ dioptrií je

$$\xi = \frac{d}{2} .$$

To znamená, že obecně při $d = 4$ mm bude $\xi = 2$ mm , takže zorné pole ani neobsáhne slepou skvrnu, jejíž průměr se pohybuje od 1,5 do 1,8 mm.

Je tedy možno říci, že přímá metoda neumožňuje přehlédnout než jen nepatrnou část sítnice, ovšem při velkém zvětšení $m = 15$ x .

Toto malé zorné pole bude však využito pouze tehdy, bude-li zorné pole osvětlovače odpovídat svou velikostí zornému poli pozorovací části. Podle obr. 17.5.7 platí pro úhlovou velikost světelného zdroje

$$\alpha = \xi . D .$$

Volíme-li $\xi = 2$ mm, pak pro $D = 60$ dioptrií vychází:

$$\alpha = 0{,}002.60 = 0{,}12$$

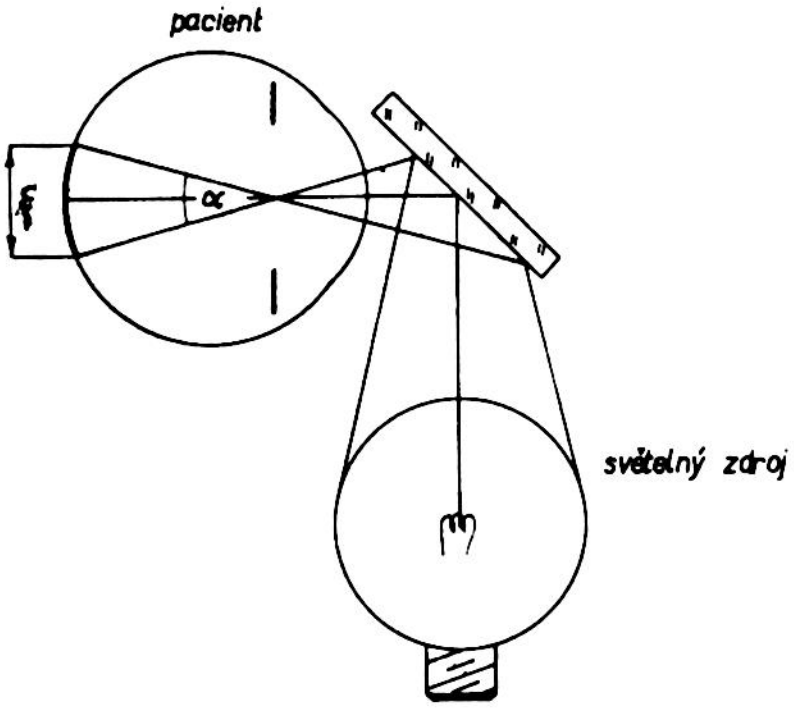
čili

$$\alpha \doteq 7^{\circ} .$$

Této hodnoty se např. dosáhne, když jako světelného zdroje použijeme žárovičku s matnou baňkou o průměru 5 cm, kterou umístíme do vzdálenosti

$$L = \frac{5}{0{,}12} = 42 \text{ cm}$$

od pacientova oka.

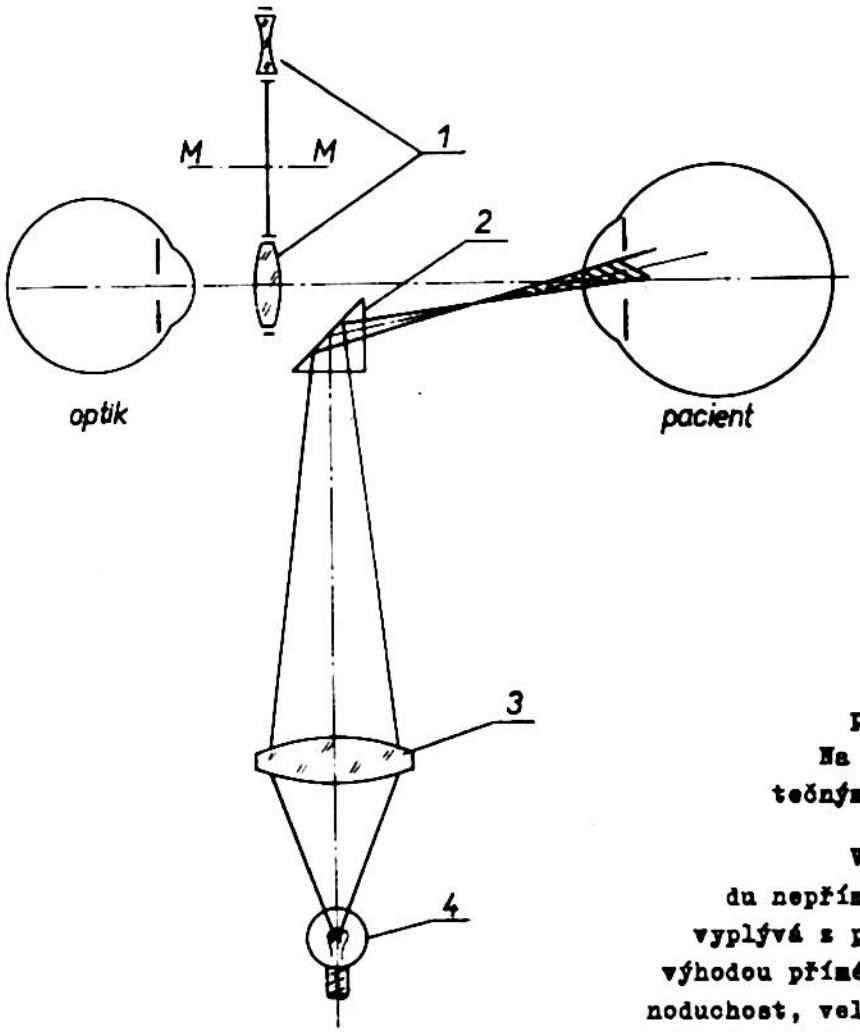


Obr. 17.5.7 K určení polohy a velikosti osvětlovacího zdroje

Doposud jsme předpokládali, že oko pacientovo stejně jako oko optikovo je emmetropické. Předpokládejme proto nyní, že oba mají ametropické oči.

Budeme-li korigovat brýlovými skly oko pacienta i optika, pak je celý problém převeden na předcházející případ. Výhodnější než korigovat každé z obou očí zvlášť je sdružit mezi pacientovo a optikovo oko jediné brýlové bi-sklo, jehož lámavost je rovna součtu lámavostí brýlových korekčních skel

pacienta a optika. Aby bylo možno rychle určit lámavost tohoto bi-skla, upravují se oftalmoskopy tak, že horní část přístroje obsahuje řadu spojných a rozptylných čoček o malém průměru, které jsou zamontovány do kovového kotouče, který tvoří jakýsi revolver. Při otáčení revolveru defilují rychle jednotlivé čočky před optikovým okem, který tak může rychle najít nejvhodnější čočku. Princip oftalmoskopu je vidět z obr. 17.5.8. Osvětlovač je tvořen žárovkou (4), jejíž světlo je usměrňováno do pacientova oka kondensorem (3) a hranolkem (2). Jak je z obr. 17.5.8 patrno, využívá se k osvětlení dolní poloviny pacientovy pupily a k pozorování její horní poloviny.

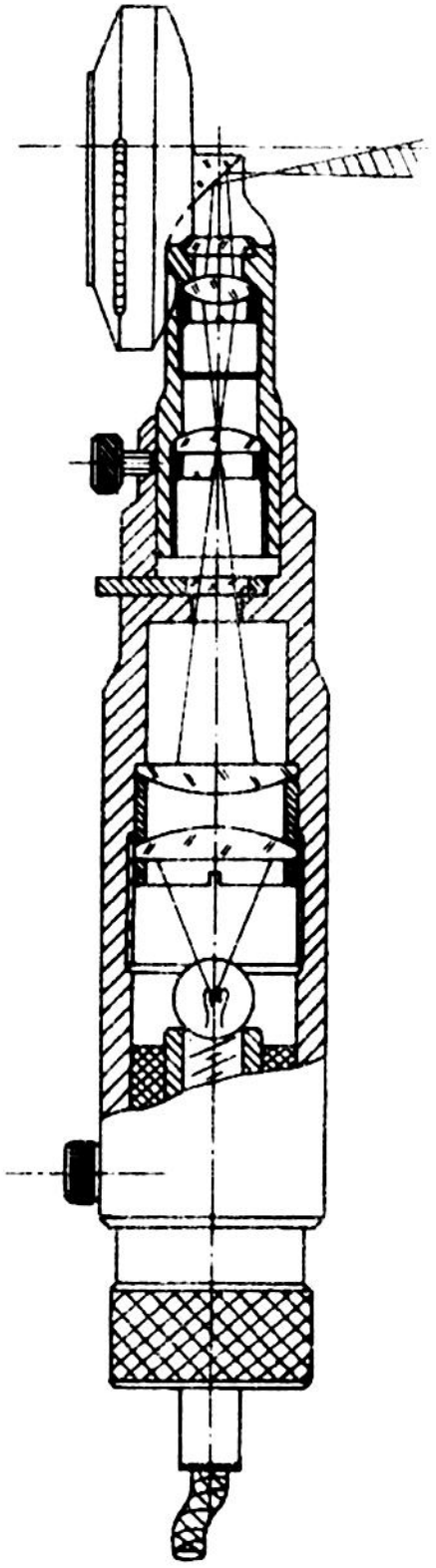


Obr. 17.5.8 Princip oftalmoskopu.

Je-li optik emmetropem, nebo má-li oči správně vykorigovány, pak mu oftalmoskop umožňuje rychle určit pacientovu ametropii. Na obr. 17.5.9 je řez skutečným oftalmoskopem.

Všimněme si nyní případu nepřímé oftalmoskopie. Jak vyplývá z předcházejících úvah, výhodou přímé oftalmoskopie je jednoduchost, velké zvětšení a dobrá světelnost. Proto se této metody využívá k pozorování jemných detailů sítnice, cév apod. Nevýhodou přímé metody je malé zorné pole.

Chceme-li proto pozorovat větší část sítnice, musíme použít nepřímé metody. Tato metoda využívá jednoduché čočky, která se umísťuje do malé vzdálenosti před pacientovo oko. Je-li pacient emmetrop a neakomoduje-li, pak v ohniskové rovině této čočky se vytváří obraz S´ sítnice S , který je pozorován optikem. Metoda se nazývá často metodou převrácených obrazu, neboť obraz S´ sítnice S pacientova oka je převrácený.



Obr. 17.5.9 Řez oftalmoskopem

1212-5083

Určeme zorné pole, které umožňuje tato metoda přehlédnout. Nechť body M a N značí okrajové body pole. Spojme tyto body se středem C pupily pacientova oka. Mají-li být tyto body optikem ještě viditelné, pak musí být volena lámavost čočky (1) tak, aby paprsky $\overline{MC}$ resp. $\overline{NC}$ po průchodu touto čočkou procházely pupilou optikova oka. V nejlepším případě můžeme lámavost čočky volit tak, aby se tyto paprsky lámaly do bodu C′, který tvoří střed pupily optikova oka. To znamená, že body C a C′ tvoří sdružený pár vzhledem k čočce (1). Nechť ξ značí průměr pozorovaného pole a α příslušnou jeho úhlovou hodnotu. Potom podle obr. 17.5.10 můžeme psát

$$\xi = \frac{\alpha}{D} \quad ,$$

kde D značí lámavost pacientova oka. Pro úhel α můžeme psát s dostatečnou přesností

$$\alpha = \frac{2h}{x} \quad ,$$

kde 2h značí průměr čočky (1). Potom z předcházejícího vztahu plyne

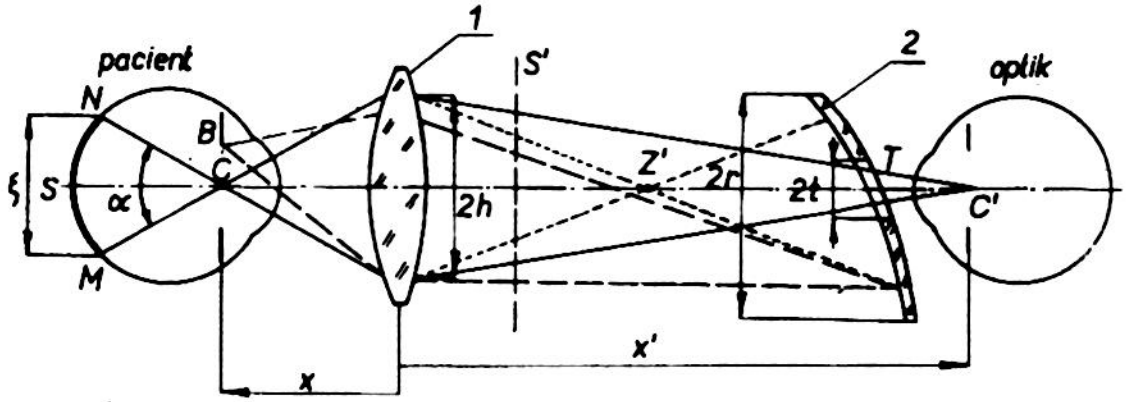
$$\xi = \frac{2h}{Dx} \quad . \qquad (17.5.2)$$

Pro body C a C′ můžeme psát

$$\frac{1}{x'} - \frac{1}{x} = D_{\check{c}} \quad , \qquad (17.5.3)$$

kde $D_{\check{c}}$ značí lámavost čočky (1). Vzdálenost x se obyčejně volí asi 10 cm (neboť optik se obyčejně opírá rukou, držící tuto čočku před pacientovým okem, o jeho čelo). Na druhé straně obraz S′ sítnice S nemá ležet před optikovým okem v menší vzdálenosti než 25 cm. Můžeme proto klást

$$x' = 0{,}25 + \frac{1}{D_{\check{c}}} \quad .$$



Obr. 17.5.10 Princip nepřímé oftalmoskopické metody.

Dosadíme-li za $x = -0,1$ a za x' předchozí hodnotu do (17.5.3), můžeme psát dále

$$\frac{1}{0,25 + \frac{1}{D_{\check{c}}}} + \frac{1}{0,1} = D_{\check{c}} \ ,$$

čili

$$D_{\check{c}}^2 - 10\, D_{\check{c}} - 40 = 0 \ .$$

Odtud plyne

$$D_{\check{c}} = 13 \text{ dioptrií.}$$

Volíme-li průměr $2h$ této čočky 4 cm, pak z (17.5.2) plyne pro hledané zorné pole

$$\xi = \frac{2h}{Dx} = \frac{0,04}{60 \,.\, 0,01} = \frac{1}{150} \text{ m} = 6,6 \text{ mm} \ .$$

Pro zvětšení m obrazu S' sítnice pak vychází

$$m = \frac{D}{D_{\check{c}}} = \frac{60}{13} = 4,6 \ .$$

Je-li pacient ametrop, pak se toto zvětšení změní a sice v případě krátkozrakého pacienta bude menší (např. pro $R = -5$ dioptrií bude $m = 3,1$) a pro dalekozrakého bude větší (např. pro $R = +5$ dioptrií bude $m = 8$).

Aby mohlo být nalezené zorné pole plně využito, je nutné, aby zorné pole osvětlovače odpovídalo tomuto poli. Označíme-li $2t$ průměr otvoru v osvětlovacím zrcadle (2), pak je třeba, aby jeho obraz, vytvořený čočkou (1) v blízkosti pupily pacientova oka byl menší, než je její průměr d . Podle předcházejících úvah bude velikost obrazu $2t'$ dána vztahem

$$2t' = \frac{2t}{m} = \frac{2t}{4,6} \ .$$

Volíme-li $2t = 4$ mm, bude $2t'$ menší než 1 mm, což je vyhovující.

Má-li být pro osvětlení využito celého průměru d pupily pacientova oka, musí mít osvětlovací zrcadlo průměr alespoň $2r = 4{,}6 \cdot d$. Při $d = 4$ mm vychází tedy průměr osvětlovacího zrcadla $2r = 18{,}4$ mm.

Budeme-li uvažovat bodový zdroj Z, pak tento zdroj musí být zobrazen osvětlovacím zrcadlem (2) do bodu Z', který musí ležet ve vzdálenosti $\overline{Z'T}$, pro kterou platí podle obr. 17.5.10:

$$\overline{Z'T} = x' \frac{r}{r + h} .$$

Např. pro $x' = 10 \cdot 4{,}6 = 46$ cm, $r = 0{,}92$ cm a $h = 2$ cm odtud vychází

$$\overline{Z'T} = 46 \cdot \frac{0{,}92}{2 + 0{,}92} \doteq 15 \text{ cm} ,$$

takže zrcadlo musí mít ohniskovou vzdálenost o něco menší (neboť svět. zdroj je v konečné vzdálenosti), tj. cca 10 - 12 cm. Vzhledem k tomu, že ve skutečnosti není světelný zdroj bodový, nýbrž má určitý průměr, je možno použít jako osvětlovacího zrcadla i zrcadla s větší ohniskovou vzdáleností.

17.6) Oční refraktometry

Oční refraktometry jsou přístroje sloužící k objektivnímu měření pacientovy ametropie. Název pro tyto přístroje nebyl volen právě šťastně, neboť v optické praksi se obyčejně rozumí refraktometrem přístroj na měření indexu lomu. Podle principu rozlišujeme dva druhy očních refraktometrů.

V případě refraktometrů prvního druhu se promítá vhodným zařízením na sítnici pacientova oka určitý test. Správná definice obrazu testu (zaostření) na sítnici se kontroluje oftalmoskopem.

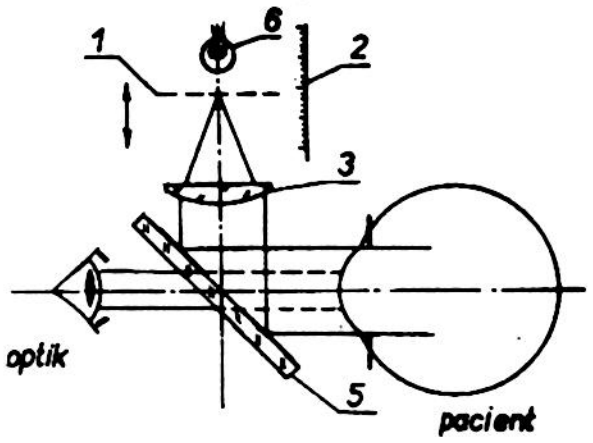
V druhém případě se určuje poloha obrazu sítnice vytvořeného optickou soustavou pacientova oka. Sítnice zde pak hraje úlohu sekundárního zdroje, který využívá světla přivedeného na sítnici osvětlovačem a které vrací ve formě rozptýleného světla. Osvětlení sítnice je možno provést rovnoměrným světlem a potom při určování polohy obrazu sítnice vlastně hledáme obrazy jejích detailů. Nebo na sítnici můžeme, obdobně jako v předcházejícím případě, promítnout vhodný test, jehož polohu určujeme obyčejně metodou paralaxy.

Výhodou očních refraktometrů je nezávislost měření na pacientovi a dále rychlost měření.

Na druhé straně se oční refraktometry vyznačují řadou nedostatků, z nichž nutno jmenovat zejména:

a) Oko pacientovo může být snadno vyprovokováno k akomodaci světlem, které je do něho přiváděno osvětlovačem. Tento nedostatek lze odstranit tím, že necháme pacienta pozorovat vhodný vzdálený předmět uměle vytvořený.
b) Difusní světelný zdroj tvořený sítnicí nemusí splývat s vrstvičkou čípků a tyčinek, čímž může být vyvolána určitá chyba v nastavení obrazu sítnice.
c) Aberace optické soustavy oka a ohybové jevy nedovolují využít při měření celého průměru pupily. To však může na druhé straně způsobit, že skutečná nastavovací rovina, odpovídající případu, kdy je využívána celá pupila, leží v jiném místě než nastavovací rovina odpovídající využívané části pupily při měření.

Princip konstrukčního provedení očního refraktometru prvního druhu je patrný z obr. 17.6.1, který představuje tzv. Hardyho stigmatometr.



Obr. 17.6.1 Hardyho stigmatometr.

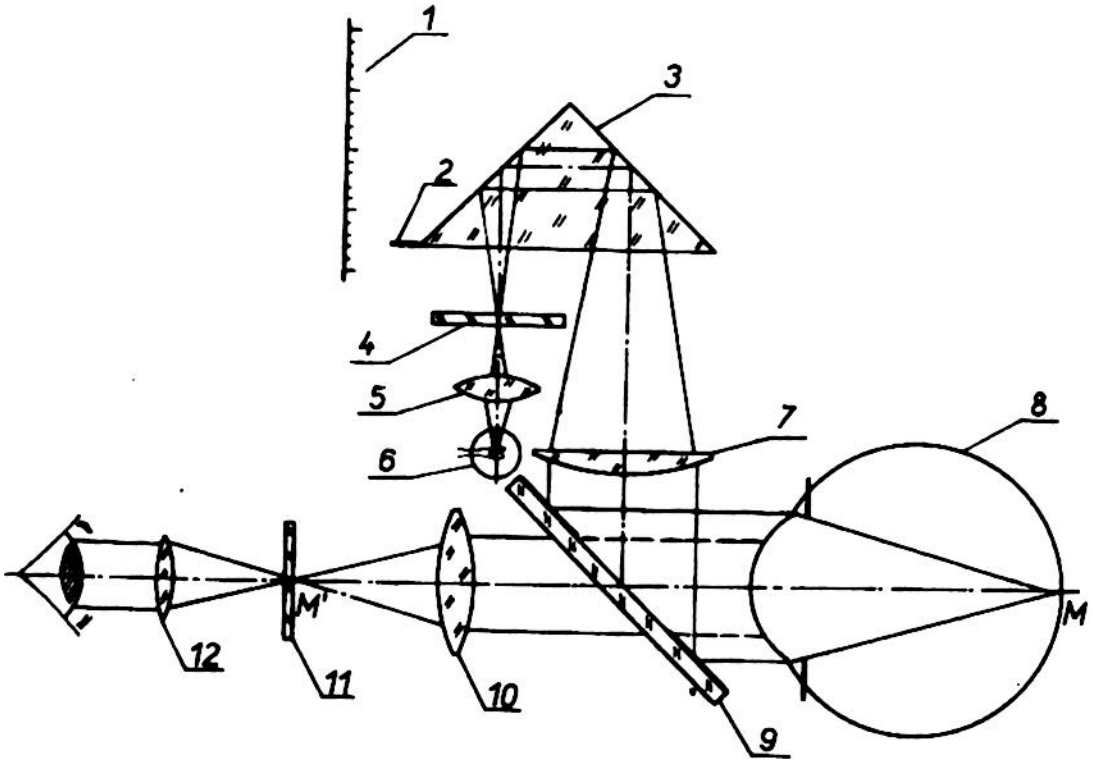
Záměrný obrazec (test) (1), prosvětlený žárovkou (6) se posouvá ve směru optické osy jednoduchého objektivu (3) kolimátoru tak dlouho, až optik vidí na sítnici pacientova oka zřetelný obraz testu. Test sestává z řady vzájemně rovnoběžných čar a malého testu, který slouží k přesnému nastavení jeho obrazu na sítnici. Natáčením testu kolem optické osy je možno provést měření lámavosti oka v různých meridiánech a určit tak astigmatismus.

Aby se vyloučila akomodace pacientova oka, je nutné při měření sadit s přibližováním testu (1) k objektivu (3).

Na obr. 17.6.2 je znázorněno schema Rodenstockova refraktometru. Na rozdíl od Hardyho přístroje je test (4) kolimátoru pevný vzhledem k objektivu (7). Nastavení obrazu testu na sítnici se dosáhne posouváním pravoúhlého hranolu (3), čímž se dosáhne stejného účinku jako při posouvání testu vzhledem k objektivu. Proto je hranol (3) opatřen indexem (2), proti kterému se čte na stupnici (1) hledaná ametropie pacientova oka.

Pozorování správného nastavení testu na sítnici pacientova oka se provádí dalekohledem sestávajícím z objektivu (10) a okuláru (12). K vyloučení ametropie optikova oka slouží záměrný kříž (11), na který je třeba před měřením nastavit okulár (12) dalekohledu.

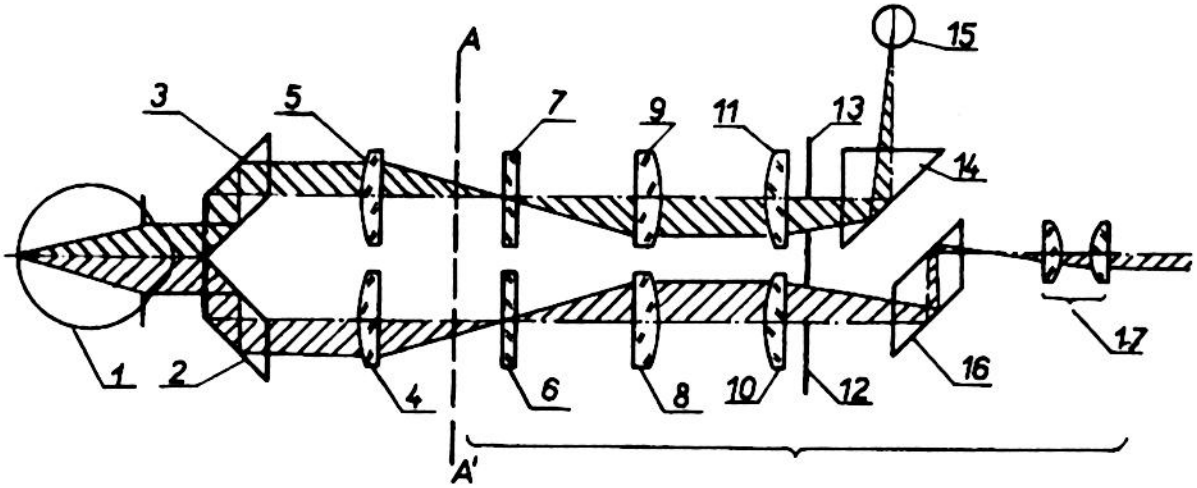
Aby bylo možno zlepšit jakost obrazu testu, bylo by třeba vyloučit škodlivé reflexy a závoje. Reflexy, vznikající na vnější ploše rohovky, je možno vyloučit pouze využitím principu Thornerova oftalmoskopu, podle kterého se



Obr. 17.6.2 Optická soustava Rodenstockova očního refraktometru.

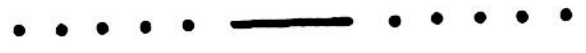
využívá k osvětlení sítnice pouze jedné poloviny a k pozorování pouze druhé poloviny pacientovy pupily.

Princip Thornerova očního refraktometru je vidět na obr. 17.6.3. Světlo zdroje (15), který je umístěn v ohniskové rovině objektivu (11), je tímto objektivem transformováno ve svazek rovnoběžných paprsků. Objektiv (6) spojí opět tento svazek do ohniskové roviny, ve které je umístěn test (7), který



Obr. 17.6.3 Princip Thornerova očního refraktometru.

je dalším objektivem (5) promítán na sítnici pacientova oka. Po rozptýlení dopadlého světla sítnicí se tento obraz promítá objektivem (4), shodným s objektivem (5), do jeho ohniskové roviny, kde je umístěna záměrná značka (6). V této rovině je obraz testu pozorován dalekohledovou lupou, tvořenou předsádkou (8) a dalekohledem s objektivem (10) a okulárem (17). Správné nastavení obrazu testu na sítnici pacientova oka se dosáhne osovým posuvem pravé části refraktometru vymezené rovinou $\overline{AA'}$.



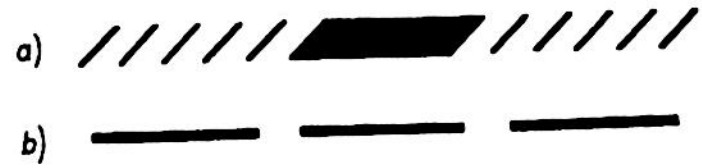
Obr. 17.6.4 Úprava testu Thornerova očního refraktometru.

Test (7) má tvar znázorněný na obr. 17.6.4.

V případě, že obraz tohoto testu promítaného do pacientova oka, nepadne přesně na sítnici, bude vzhled testu odpovídat přibližně obr. 17.6.5.

Obr. 17.6.5 Vzhled obrazu testu na sítnici, není-li provedeno správné nastavení.

Je-li pacientovo oko zatíženo astigmatismem, pak obraz testu nabude tvaru podle obr. 17.6.6 a) resp. b), podle toho, se kterou fokálou splývá právě poloha obrazu testu.



Obr. 17.6.6 Vzhled obrazu testu v případě, že oko pacientovo je astigmatické.

Hledaná ametropie se čte po správném nastavení obrazu testu na sítnici na lineární dioptriové stupnici proti indexu spojenému s pohyblivou pravou částí přístroje.

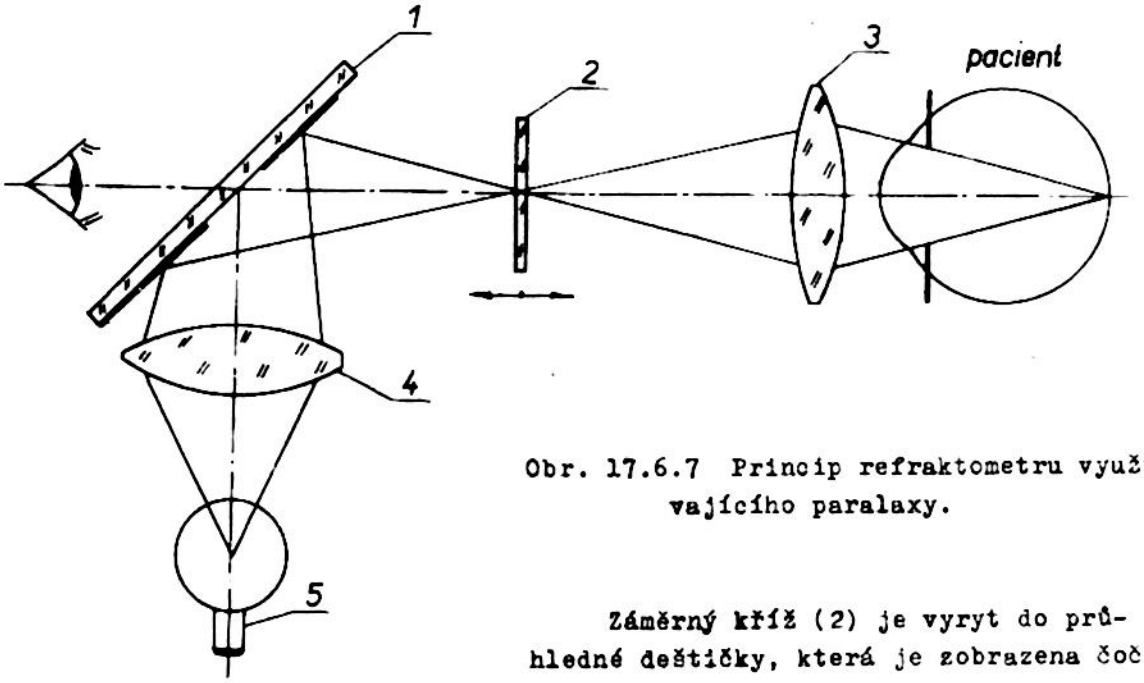
Aby se vyloučila akomodace pacientova oka, je v rovině testu (7) umístěna záměrná značka ve tvaru hvězdy, která slouží jako fixační bod pro pacienta, který má pacient zkoušeným okem pozorovat tak, aby ji viděl co nejzřetelněji.

Reflexy vznikající na vnější ploše rohovky pacientova oka a příslušné rozptýlené světlo zachycují clony (12) a (13) tvaru půlkruhu, které jsou umístěny v místech, kde vznikají obrazy pacientovy pupily, vytvořené objektivy (5), (9) a (11) resp. (4), (8) a (10).

Aby se vyloučila akomodace optikova oka, postupuje se při měření ametropie tímto refraktometrem tak, že se pohyblivá část přístroje přibližuje pomalu k oku tak, aby se nepřešlo místo nejzřetelnějšího (nejostřejšího) obrazu testu.

Všimněme si nyní ještě očního refraktometru druhého druhu. Tyto přístroje jsou založeny na Fickově myšlence z r. 1893.

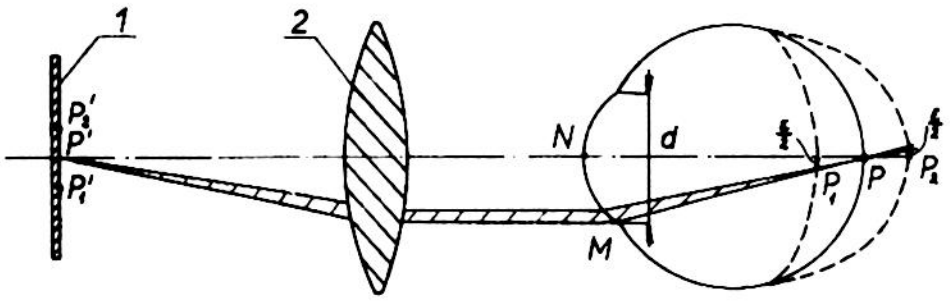
Představme si oftalmoskop upravený pro nepřímou metodu, jak je to naznačeno na obr. 17.6.7.



Obr. 17.6.7 Princip refraktometru využívajícího paralaxy.

Záměrný kříž (2) je vyryt do průhledné destičky, která je zobrazena čočkou (3) na sítnici pacientova oka. Světlo rozptýlené sítnicí, zobrazí sítnici spolu s příslušným obrazem záměrného kříže zpět do roviny vlastního kříže (2). Zde jsou oba kříže pozorovány. Správné nastavení obrazu kříže na sítnici pacientova oka se dosáhne osovým posuvem testu (2). Indikátorem správné polohy je vymizení paralaxy, která se objeví při příčném pohybu optikova oka mezi vlastním záměrným křížem a jeho zpětným obrazem.

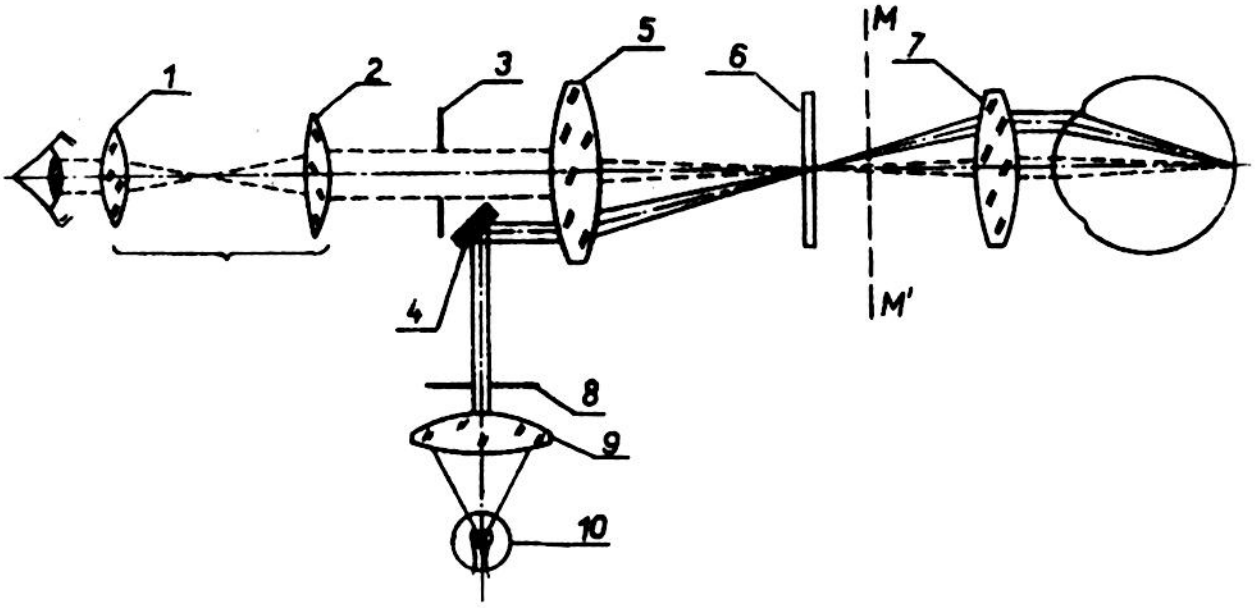
Na tomto principu pracuje prakticky Henkerův paralaxový refraktometr. Představme si, že úzký osvětlovací svazek vstupuje do oka malou, excentricky umístěnou ploškou pupily v místě M . Nechť tento svazek protíná sítnici pacientova oka, které předpokládejme emmetropické, na jeho optické ose (obr. 17.6.8) v bodě P . Rozptýlené světlo zobrazí místo kolem bodu P zpětnou cestou do bodu P′, ve kterém je umístěn vhodný záměrný obrazec (1.)



Obr. 17.6.8 Princip Henkerova paralaxového refraktometru.

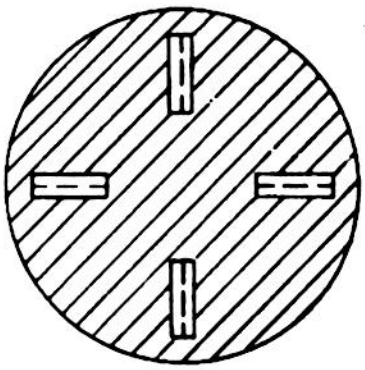
1212-5083

Bude-li oko pacientovo ametropické, pak uvažovaný svazek protne sítnici v bodě P_1 resp. P_2, který bude ležet mimo optickou osu. Proto také jejich zpětné obrazy P_1' resp. P_2' budou ležet v rovině testu (1) mimo optickou osu. To znamená, že mezi vlastním záměrným obrazcem P' a obrazy P_1' resp. P_2' se objeví paralaxa, která vymizí pouze tehdy, bude-li rovina testu sdružená se sítnicí pacientova oka vzhledem k soustavě, tvořené čočkou (2) a pacientovým okem.



Obr. 17.6.9 Princip paralaxového očního refraktometru.

Princip konstrukční úpravy paralaxového očního refraktometru je znázorněn na obr. 17.6.9. Jak je z tohoto obrázku vidět, vhodný test (6), jehož provedení je naznačeno na obr. 17.6.10, je prosvětlen úzkým paprskovým svazkem, který je vymezen ze světla zdroje (10) clonou (8) a který je usměrněn malým zrcátkem (4) a čočkou (5) tak, aby vstupoval do pacientova oka okrajem jeho pupily. Zpětný obraz vytvořený difusním světlem vráceným sítnicí pacientova oka se pozoruje v rovině testu (6) dalekohledovou lupou tvořenou dalekohledem s objektivem (2) a okulárem (1) a předsádkou (5).



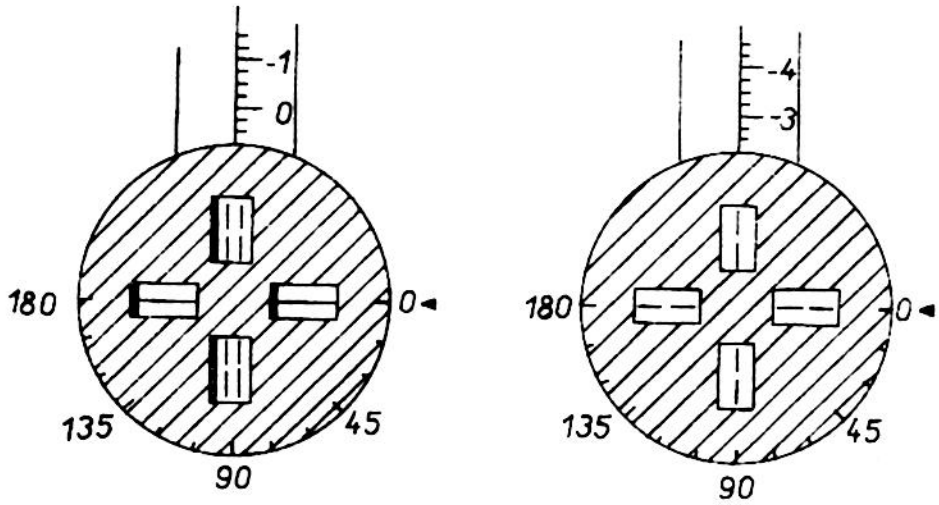
Obr. 17.6.10 Úprava testu paralaxového očního refraktometru.

Při měření se posouvá levá část přístroje (až po rovinu MM') ve směru osy tak dlouho, až vymizí paralaxa mezi vlastním testem a jeho zpětným obrazem. Úprava testu je naznačena na obr. 17.6.10. Vlastní test je opatřen ne-

propustnou vrstvou, do které jsou provedena čtyři obdélníková okénka radiálně uspořádaná. Každé okénko obsahuje tenkou přerušovanou střední příčku.

Vzhled roviny testu v případě ametropického a astigmatického oka je vyznačen na obr. 17.6.11 a 17.6.12.

Všimněme si ještě přesnosti tohoto přístroje. Předpokládejme, že je požadováno, aby ametropie pacientova oka byla měřena s přesností $\pm$ 0,25 dioptrie.

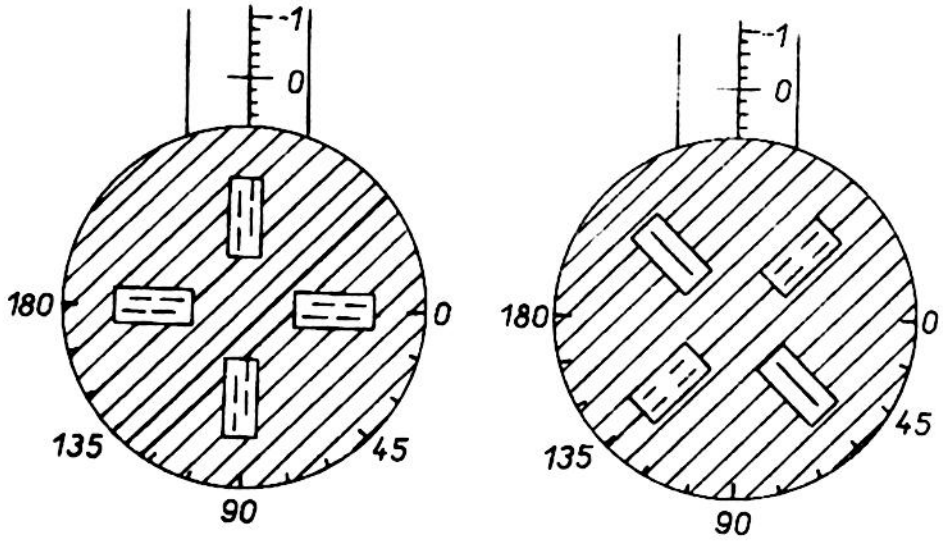


Obr. 17.6.11 Pohled na rovinu testu v případě ametropického oka: a) před, b) po odstranění paralaxy.

Pokud test (1) (viz obr. 17.6.8) nebude přesně v rovině sdružené se sítnicí vzhledem k optické soustavě tvořené čočkou (2) a soustavou pacientova oka, bude příslušný svazek protínat sítnici v bodech P_1 resp. P_2, jejichž vzdálenost $\varepsilon/2$ od optické osy bude rovna poloměru rozptylového kroužku, pro jehož velikost platí podle (7.4.1)

$$\varepsilon = -d \frac{X - R}{R + D},$$

kde $X - R = 0{,}25$ dioptrie, $R = \frac{1}{r}$ je vergence vzdáleného bodu a D lámavost pacientova oka. Přitom $R + D = 60$ dioptrií. d značí průměr pacientovy pupily.



Obr. 17.6.12 Pohled na rovinu testu v případě astigmatismu a) před, b) po natočení testu do jednoho z hlavních směrů.

Určeme δ pro případ, že $d = 1{,}5$ mm . Z předchozího vztahu plyne

$$\delta = -1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0{,}25}{60} = 6{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 6{,}2 \text{ mikronů.}$$

Uvážíme-li, že rozlišovací mez optikova oka, vyjádříme-li ji v milim. (vztaženo na smluvní vzdálenost zřetelného vidění), je přibližně $7 \cdot 10^{-2}$ mm , musíme volit zvětšení dalekohledové lupy

$$m = \frac{7 \cdot 10^{-2}}{6{,}2 \cdot 10^{-3}} = 12 \text{ x} .$$

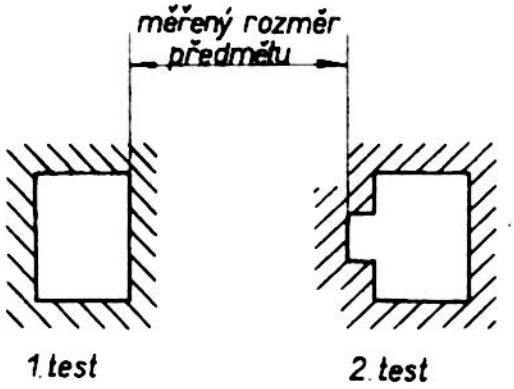
17.7) Přístroje pro měření astigmatismu rohovky

Měření poloměru křivosti rohovky v různých meridiánech je založeno na měření velikosti obrazu nějakého předmětu, vytvořeného rohovkou jako vypuklým zrcadlem. Příslušné přístroje se nazývají oftalmometry nebo často keratometry.

Všimněme si podrobněji alespoň jednoho z nich, oftalmometru Javal-Schiötzova.

Protože obrazy předmětů vytvořené rohovkou jako vypuklým zrcadlem jsou velmi malé, bylo by velmi obtížné změřit jejich velikost nějakou přímou metodou. Z toho důvodu se postupuje tak, že předmět je vytvořen dvěma vhodně upravenými testy, jejichž vzdálenost je měnitelná. Potom měřený rozměr předmětu je vzdálenost přilehlých okrajů obou testů. Velikost tohoto rozměru v příslušném obrazu vytvořeném rohovkou jako zrcadlem se měří dalekohledovou lupou. Přitom se tato lupa upravuje tak, že do rovnoběžného paprskového chodu mezi objektiv dalekohledu a předsádku se umístí zdvojovací soustava, jako např. Wollastonův hranol, biprisma, diasporametr apod.

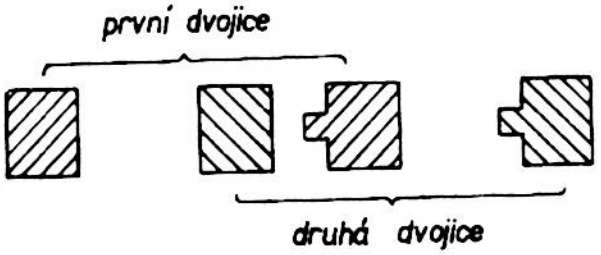
V zorném poli dalekohledové lupy se objeví zdvojený obraz pozorovaného předmětu, jak je to naznačeno na obr. 17.7.2. Vhodnou změnou vzdálenosti obou částí testu lze docílit toho, že vnitřní obrazy obou dvojic se budou právě dotýkat, jak je to vidět na obr. 17.7.3. Tím je vlastně převedeno měření velikosti obrazu na měření velikosti předmětu, jehož obraz, vytvořený rohovkou jako zrcadlem, má stále stejnou velikost.



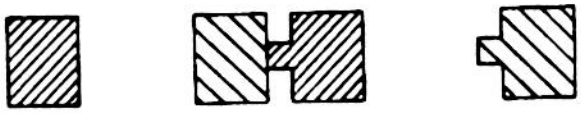
Obr. 17.7.1 K vysvětlení principu Javal-Schiötzova oftalmometru.

Principiální schema Javal-Schiötzova oftalmometru je znázorněno na obr. 17.7.4.

Předmětové testy jsou prosvětlovány vhodně upravenými osvětlovači (6) a (7), které jsou posuvně uloženy na kruhových saních (5) opatřených úhloměrnou stupnicí nebo stupnicí udávající přímo lámavost rohovky v dioptriích. Posuv obou testů se provádí ozubenými převody upravenými tak, že jejich vzdálenost od optické osy dalekohledové lupy je stále stejná.



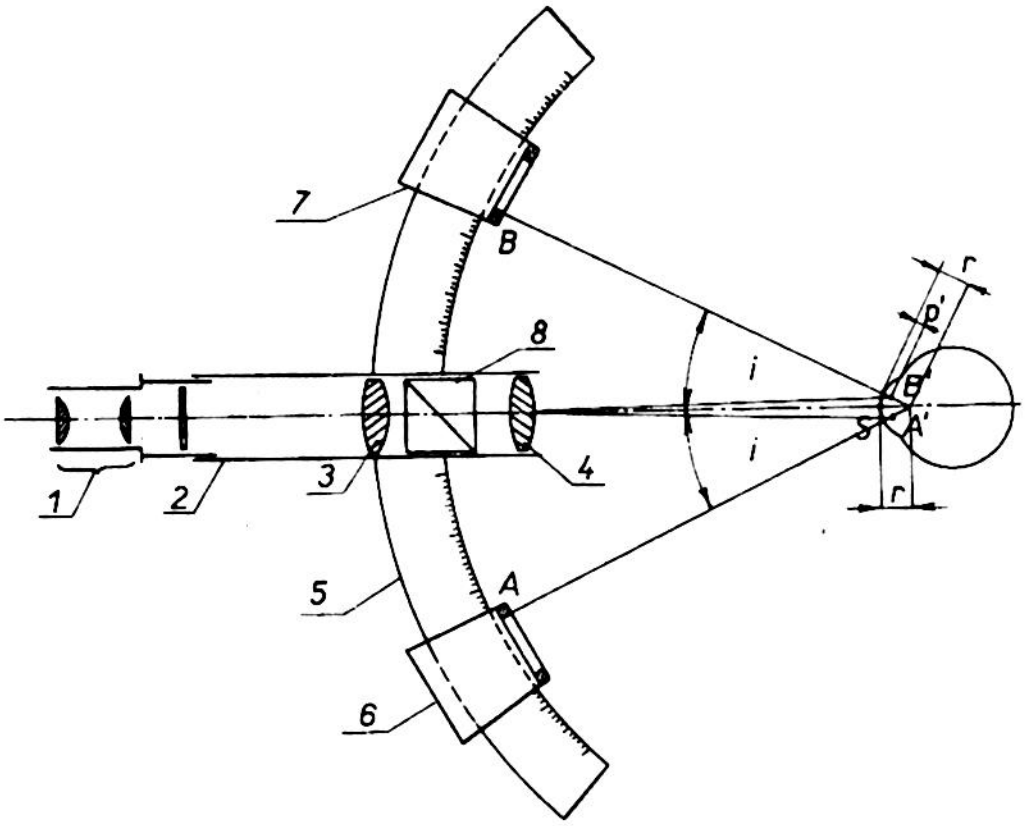
Obr. 17.7.2 Rozdvojení obrazu testu



Obr. 17.7.3 Nastavení vnitřních obrazů na dotyk.

Vnitřní body A resp. B těchto testů se zobrazují do bodu A´ resp. B´, pro jejichž vzdálenost p´ od vrcholu S rohovky platí

$$\frac{1}{p'} + \frac{1}{p} = -\frac{2}{r},$$



Obr. 17.7.4 Princip Javal-Schiötzova oftalmometru.

1212-5083

kde p je vzdálenost testů od vrcholu S a r poloměr křivosti rohovky v daném meridiánu. Z předchozí rovnice plyne dále

$$p' = \frac{p \cdot r}{r - 2p} .$$

Protože velikost obrazu $\overline{A'B'}$ je stále stejná a závisí pouze na úhlu sdvojení Wollastonova hranolu, můžeme podle obr. 17.7.4 psát

$$2 (r - p') \cdot \sin i = \overline{A'B'} .$$

Protože $\overline{A'B'}$ bývá asi 3 mm, můžeme psát dále

$$2 \sin i \cdot \left[r - \frac{pr}{r - 2p} \right] = 3$$

čili

$$2 \sin i \, r^2 - 6 p r \sin i = 3 r - 6 p$$

nebo konečně

$$2 \sin i \, r^2 - 3r (2 p \sin i + 1) + 6 p = 0 .$$

Určíme-li měřením úhel i a známe-li vzdálenost p, můžeme z této kvadratické rovnice určit hledaný poloměr r rohovky v měřeném meridiánu.

Nechť např. $p = - 200$ mm a $i = 10^0$. Potom dostaneme

$$0{,}348 \, r^2 - 3r (- 400 \cdot 0{,}174 + 1) - 1200 = 0$$

čili

$$r^2 + \frac{205{,}8 \cdot r}{0{,}348} - \frac{1200}{0{,}348} = 0 .$$

Odtud

$$r_{1,2} = - 295{,}7 \pm \sqrt{87434 + 3448{,}3} = - 295{,}7 \pm 301{,}3 = + 5{,}6 \text{ mm} .$$

Pro lámavost rohovky pak platí

$$D = \frac{n - 1}{r} = \frac{0{,}3375}{r} ,$$

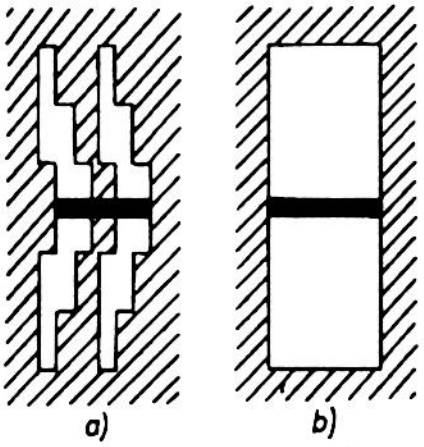
kde $n = 1{,}3375$ je index lomu rohovky.

Aby se ještě přesnost měření zvýšila, upravuje se jeden z obou testů do tvaru podle obr. 17.7.5a, zatímco druhý je tvořen obdélníkovým polem (b). Oba testy jsou rozděleny tmavou čarou na dvě poloviny. Tato čára slouží k usnadnění nastavení správného meridiánu. Aby bylo možno správný meridián vyhledat, je celý přístroj otočný kolem osy totožné s optickou osou dalekohledové lupy.

17.8) Přístroj pro měření očního rozestupu

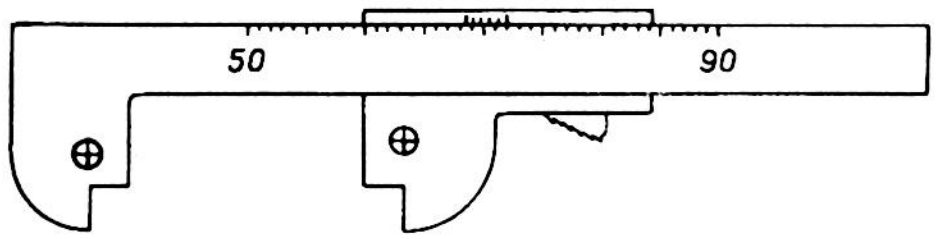
Z úvah o korekci oka v souvislosti s binokulárním vidění vyplynulo, že pro správnou korekci zraku je nutno zhotovit brýle tak, aby středy brýlových skel byly od sebe vzdáleny o hodnotu rovnou očnímu rozestupu. Proto oční rozestup patří mezi důležité parametry, které je třeba při správné korekci očí zjišťovat.

Pro měření očního rozestupu byla vyvinuta řada různých přístrojů. Všimněme si alespoň principu některých z nich.



Obr. 17.7.5 Tvar testů Javol-Schiötzova oftalmometru

Nejjednodušší z nich je tvořen upraveným kontaktním měřítkem. Čelisti tohoto měřítka jsou opatřeny kruhovými otvory, ve kterých jsou umístěny drátěné kříže, jak je to vidět na obr. 17.8.1.

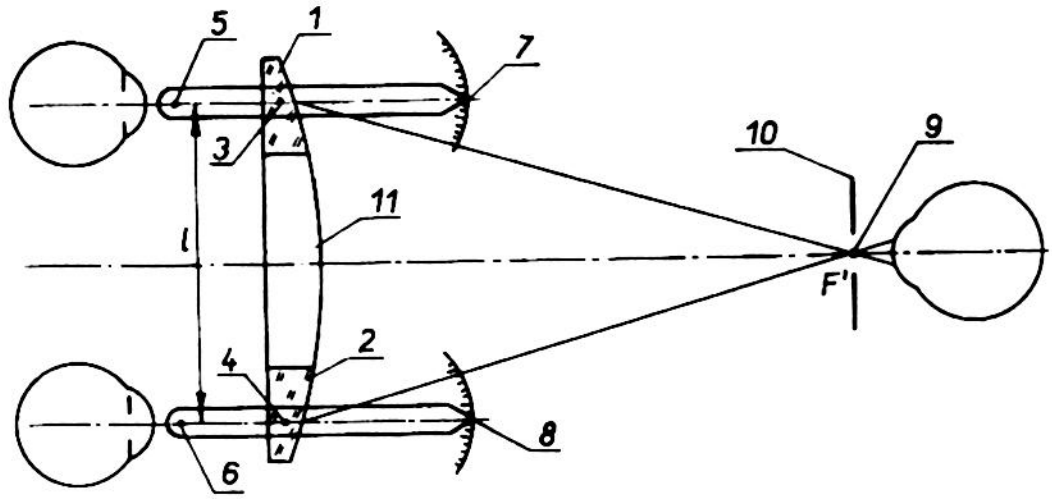


Obr. 17.8.1 Kontaktní měřítko upravené pro měření očního rozestupu.

Jiný princip zařízení pro měření očního rozestupu je vidět z obr. 17.8.2. Je v podstatě tvořeno dvěma objektivy (1) a (2), které jsou excentricky vyříznuté z jediné jednoduché čočky (11), takže mají společné obrazové ohnisko F' v bodě (9), kde je umístěna clona (10) s malým otvorem, ve kterém je napjato svislé vlákno. Ve vzdálenosti l jsou dva středy otáčení (3) a (4) pák, které nesou na svých koncích, přivrácených k očím pacienta, svislé kovové záměrné značky.

Optik, proměřující pacienta, vidí otvorem v cloně (10) obě pacientovy pupily a před nimi záměrná vlákna (5) a (6). Natáčením pák, nesoucích tato vlákna, umístí vlákna tak, aby se mu jevila v zákrytu s vláknem (9) a současně půlila obě pupily. Příslušný oční rozestup se přečte na stupnicích (7) a (8).

Velmi jednoduchý přístroj pro měření očního rozestupu je tvořen vhodnou krabičkou o délce cca 12 cm, která je na jedné straně opatřena otvory, tvořícími vhledy pro pacientovy oči, a která má na vnitřní protilehlé stěně rovinné zrcátko s milimetrovým měřítkem.

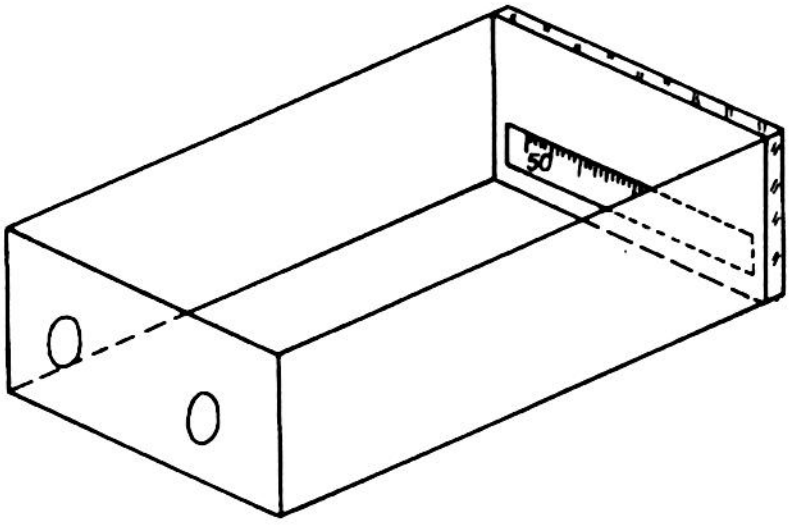


Obr. 17.8.2 Princip optického zařízení pro měření očního rozestupu.

Pacient vidí v tomto zrcátku ve dvojnásobné vzdálenosti vlastní pupily a může snadno na příslušném milimetrovém měřítku určit polohu jejich středů.

17.9) Fokometry

Závěrem kapitoly pojednávající o nejdůležitějších přístrojích používaných v oční praksi, je nutno se ještě zmínit o přístrojích používaných k měření vrcholové lámavosti brýlových skel.



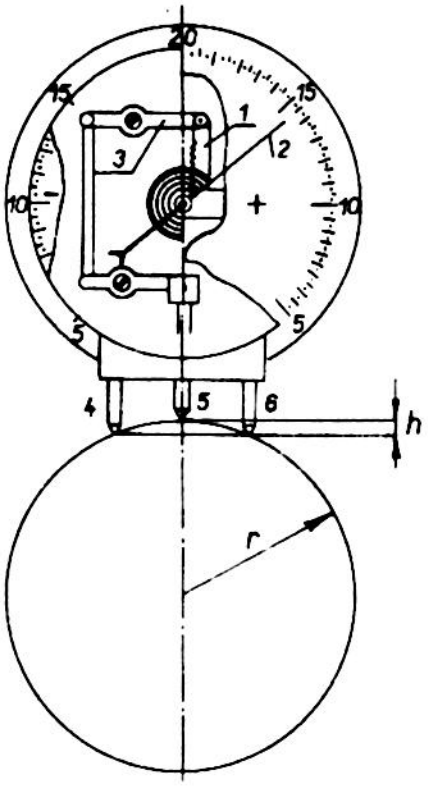
Obr. 17.8.3 Jednoduché zařízení pro měření očního rozestupu.

Nejjednodušším způsobem určíme lámavost brýlového skla tak, že určíme poloměr křivosti jeho lámavých kulových ploch. Pro lámavost plochy pak platí

$$D = \frac{n - 1}{r} ,$$

kde r je hledaný poloměr křivosti a $n = 1{,}523$ index lomu skla, ze kterého je brýlové sklo zhotoveno.

Měření poloměru křivosti ploch brýlových skel se provádí tzv. hodinkovým sférometrem. Tento sférometr má tři nožičky, dvě pevné a prostřední pohyblivou, jejichž osy leží ve společné rovině. Sférometr se klade na měřenou kulovou plochu tak, aby tyto nožičky ležely na hlavní kružnici plochy. Posuv střední nožičky je roven výšce kruhového oblouku vymezeného na této hlavní kružnici oběma krajními nožkami. Měří se na kruhové stupnici s natočení ručičky (2), na kterou se pohyb přenáší pákovým mechanismem (3) a ozubenou tyčí (1), která natáčí pastorek spojený s touto ručičkou.

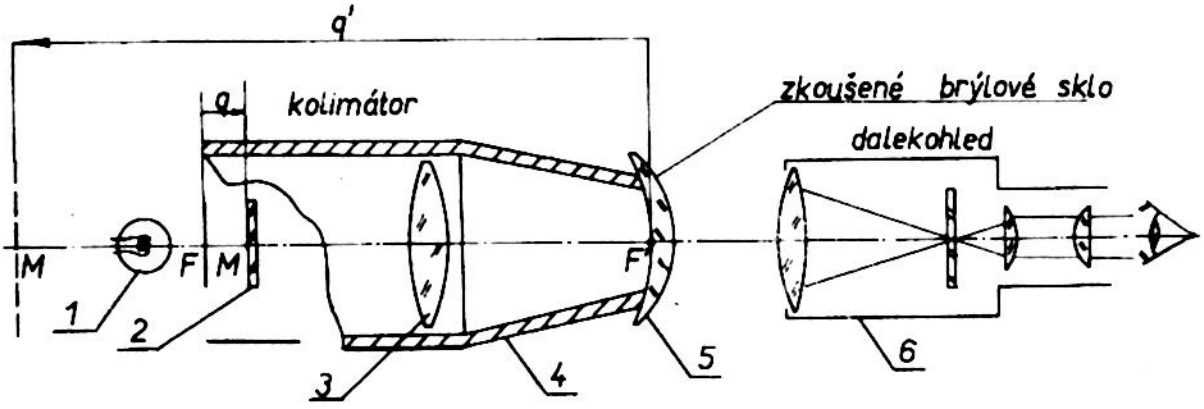


Obr. 17.9.1 Hodinkový sférometr

Stupnice je dělena přímo v lámavostech $\frac{n-1}{r}$ vyjádřených v dioptriích (viz obr. 17.9.1). Lámavost brýlového skla je pak rovna součtu lámavostí obou jeho ploch.

Fokometr slouží k přímému měření vrcholové lámavosti brýlových skel. V principu je tvořen kolimátorem a dalekohledem. Kolimátor je opatřen vhodně upraveným testem (2) prosvětleným žárovkou (1), který se posouvá v určitém rozmezí po obou stranách předmětového ohniska F jeho objektivu ve směru jeho optické osy.

Měřené brýlové sklo (5) se opírá o čelní plochu tubusu (4) kolimátoru, která splývá s obrazovou ohniskovou rovinou objektivu, jak je to naznačeno na obr. 17.9.2.



Obr. 17.9.2 Princip fokometru

Je-li q' vzdálenost testu M od předmětového ohniska objektivu kolimátoru a q' vzdálenost příslušného jeho obrazu M' od jeho obrazového ohniska F', pak podle Newtonovy zobrazovací rovnice platí:

$$qq' = -f'^2 ,$$

kde f' značí ohniskovou vzdálenost objektivu kolimátoru.

V zorném poli dalekohledu fokometru budeme vidět test kolimátoru zřetelně pouze tehdy, bude-li jeho obraz M', vytvořený objektivem (3) kolimátoru, ležet v předmětovém ohnisku měřeného brýlového skla. To znamená, že vzdálenost $-q'$ je rovna $\frac{1}{D_v}$, kde D_v značí vrcholovou lámavost měřeného brýlového skla.

Stačí tedy posouvat při měření test (2) vzhledem k objektivu (3) tak dlouho, až se v zorném poli objeví zřetelně obraz testu kolimátoru.

Opatříme-li kolimátor vhodnou stupnicí, můžeme na ni určit polohu testu, tj. vzdálenost q, pro kterou platí

$$q = -\frac{f'^2}{q'} = +f'^2 \cdot D_v .$$

Tuto stupnici můžeme upravit tak, aby udávala přímo měřenou lámavost D_v v dioptriích. Z předcházejícího vztahu vyplývá, že dioptriová stupnice je lineární. Pro posuv q, odpovídající změně lámavosti $\Delta D_v = 1$ dioptrie, vychází

$$q = f'^2 .$$

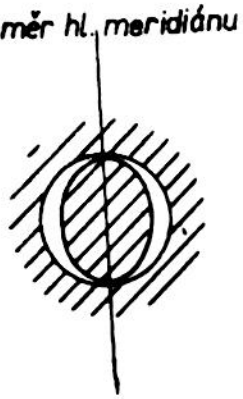
Volíme-li např. $f' = 80$ mm, dostáváme

$$q = 0{,}08^2 = 0{,}0064 \text{ m} = 6{,}4 \text{ mm} .$$

Protože pro kladnou lámavost vychází posuv q kladný, musíme test (2) k objektivu (3) kolimátoru přibližovat a naopak pro záporné lámavosti D_v musíme test od objektivu (3) oddalovat.

Test fokometru bývá různě upraven. Mívá např. tvar prstence podle obr. 17.9.3. Tato úprava usnadňuje určení osy torického brýlového skla, jak je to vidět na obr. 17.9.4.

Obr.17.9.3 Tvar testu fokometru.



Obr.17.9.4 Vzhled testu v případě torického skla.

Příloha I

Výpočet optických parametrů teoretického oka z naměřených rozměrů a konstant uvedených v tab. 4.3.1.

1) Výpočet optických parametrů rohovky.

Ze vztahu (4.1.9) plyne pro lámavost jednotlivých ploch rohovky:

$$D_1 = \frac{n_1' - n_1}{r_1} = \frac{1,3771 - 1}{7,8 \cdot 10^{-3}} = 48,35 \text{ dioptrií}$$

$$D_2 = \frac{n_2' - n_2}{r_2} = \frac{1,3374 - 1,3771}{6,5 \cdot 10^{-3}} = -6,11 \text{ dioptrií}$$

Pro lámavost rohovky jako celku plyne dále podle vztahu (4.11)

$$D = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \delta = 48,35 - 6,11 + 48,35 \cdot 6,11 \cdot \frac{0,55.10^{-3}}{1,3771} = 42,36 \text{ dioptrií}$$

Pro polohy hlavních bodů plyne podle (4.1.12) a (4.1.13)

$$\overline{P_1P} = n_1 \delta \frac{D_2}{D} = 1 \cdot \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{1,3771} \cdot \frac{(-6,11)}{42,36} = -5,76 \cdot 10^{-5} \text{m} = -0,0576 \text{ mm}.$$

Podobně $\overline{P_2'P'} = -n_2' \cdot \delta \cdot \frac{D_1}{D} = -1,3374 \cdot \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{1,3771} \cdot \frac{48,35}{42,36} =$

$$= -6,10 \cdot 10^{-4} \text{ m} = -0,61 \text{ mm}.$$

Pro ohniskové vzdálenosti plyne podle (4.1.4) resp. (4.1.5)

$$f = -\frac{n_1}{D} = -\frac{1}{42,36} = -0,02361 \text{ m} = -23,61 \text{ mm}$$

$$f' = \frac{n'}{D} = \frac{1,3374}{42,36} = 0,03157 \text{ m} = 31,57 \text{ mm}.$$

Nalezené výsledky je možno vyznačit graficky, jak je to provedeno na obr. I.1.

2) Výpočet zjednodušené rohovky

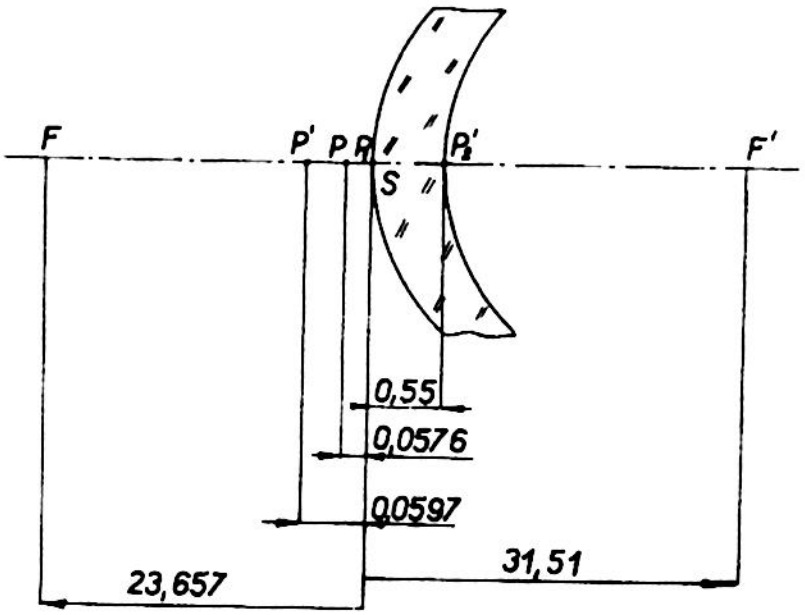
Z předchozího příkladu vyplývá, že hlavní body P a P' leží velmi blízko vrcholu S rohovky. Pro jednoduchost můžeme předpokládat, že splývají

s vrcholem S . Potom můžeme rohovku nahradit jedinou lámavou plochou o vrcholu S a poloměru křivosti r . Pro tento poloměr r pak plyne ze vztahu (4.1.9) pro lámavost jediné plochy

$$D = \frac{n' - n}{r}$$

za předpokladu, že podle (4.1.5) budeme klást za

$$D = \frac{n'}{f'}$$



Obr. I.1 Grafické vyznačení poloh hlavních bodů a ohnisek u rohovky.

$$r = \frac{n' - n}{D} = \frac{n' - n}{n'} \cdot f =$$

$$= \frac{1,3374 - 1}{1,3374} \cdot 31,51 = 7,95 \text{ mm} .$$

Tuto hodnotu můžeme s dostatečnou přesností zaokrouhlit na r = 8 mm .

Poznámka

Nutno poznamenat, že vnější plocha rohovky je stále pokryta vrstvičkou slané kapaliny, jejíž index lomu je prakticky totožný s indexem lomu očního moku, tj. má hodnotu 1,3374. Zvážíme-li tuto skutečnost, pak se můžeme dívat na rohovku jako na rozptylný meniskus ponořený do prostředí o indexu lomu 1,3374. Vypustíme-li na chvíli ze stavby oka tento rozptylný meniskus a budeme-li uvažovat rohovku pouze jako lámavou plochu oddělující vzduch a oční mok, pak pro její lámavost dostaneme

$$D_1 = \frac{n' - n}{r} = \frac{0,3374}{7,8 \cdot 10^{-3}} = 43,26 \text{ dioptrií.}$$

Pro lámavost samotného menisku ponořeného do očního moku plyne, uvažujeme-li jej jako tenkou čočku,

$$D_2 = (n' - n)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = (1,3771 - 1,3374) \cdot \left(\frac{1}{7,8 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{6,5 \cdot 10^{-3}}\right) =$$

$$= 0{,}0397 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{7{,}8} - \frac{1}{6{,}5}\right) = -1{,}03 \text{ dioptrie.}$$

Je tedy vidět, že rohovka se chová za daných podmínek jako velmi slabý rozptylný meniskus o lámavosti přibližně - 1 dioptrie.

Pro lámavost rohovky jako celku, tj. i s tímto záporným meniskem pak plyne

$$D_{\text{rohovky}} = D_1 + D_2 = 43{,}26 - 1{,}03 = 42{,}23 \text{ dioptrií.}$$

Malý rozdíl mezi touto hodnotou a hodnotou určenou v prvním příkladu vyplývá z toho, že jsme rohovku uvažovali jako tenký meniskus.

3) Oční čočka

Určení optických parametrů čočky je velmi obtížné, neboť index lomu se v čočce mění a je tedy možno s obtížemi určit pouze střední hodnotu.

Měření se provádí na vyjmuté čočce ponořené do sklivce, nebo se určuje ztráta lámavosti u lidí, kterým byla oční čočka vyoperována. Všechna tato měření dávají poněkud odlišné výsledky, z nichž je možno podle Tscherninga usoudit, že střední hodnota indexu lomu oční čočky je asi 1,42.

Vyjdeme-li z této hodnoty, z velikosti poloměrů křivosti a tloušťky oční čočky, můžeme určit její lámavost a polohu hlavních bodů.

Pro lámavost přední plochy plyne

$$D_1 = \frac{n_1' - n_1}{r_1} = \frac{1{,}42 - 1{,}3374}{10{,}2 \cdot 10^{-3}} = 8{,}098 \text{ dioptrií.}$$

Podobně plyne pro lámavost druhé plochy

$$D_2 = \frac{n_2' - n_2}{r_2} = \frac{1{,}336 - 1{,}42}{-6{,}0 \cdot 10^{-3}} = 14 \text{ dioptrií .}$$

Pro lámavost oční čočky jako celku pak dostáváme

$$D = D_1 + D_2 - D_1 D_2 \delta = 8{,}098 + 14 - 8{,}098 \cdot 14 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1{,}42} = 22{,}098 - 0{,}314 =$$

$$= 21{,}784 \text{ dioptrií.}$$

Pro polohy hlavních bodů pak plyne

$$\overline{P_1P} = \overline{S_1P} = n \cdot \delta \cdot \frac{D_2}{D} = 1{,}3374 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1{,}42} \cdot \frac{14}{21{,}78} = 2{,}42 \text{ mm} .$$

Podobně

$$\overline{P_2'P'} = \overline{S_2P'} = -n' \delta \frac{D_1}{D} = -1{,}336 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1{,}42} \cdot \frac{8{,}09}{21{,}78} = -1{,}396 \text{ mm} .$$

Vztáhneme-li polohu hlavních bodů P a P' na vrchol S rohovky, pak pro jejich vzdálenosti měřené od tohoto vrcholu bude platit

$$\overline{SP} = 3{,}6 + 2{,}42 = 6{,}02 \text{ mm}$$
$$\overline{SP'} = 3{,}6 + 4 - 1{,}396 = 6{,}204 \text{ mm} .$$

4) Oko jako celek.

Pro lámavost teoretického oka plyne

$$D_o = D_{roh} + D_{čoč} - D_{roh} \cdot D_{čoč} \cdot \delta \quad , \quad \text{kde}$$

$D_{roh} = 42{,}36$ dioptrií
$D_{čoč} = 21{,}78$ dioptrií a

$$\delta = \frac{\overline{SP}_{čoč}}{n} - \frac{\overline{SP'}_{roh}}{n'} = \frac{(6{,}02 - 0{,}0597) \cdot 10^{-3}}{1{,}3374} = 4{,}55 \cdot 10^{-3} \text{ m} ,$$

takže

$$D = 42{,}36 + 21{,}78 - 42{,}36 \cdot 21{,}78 \cdot 4{,}55 \cdot 10^{-3} = 64{,}14 - 4{,}19 = 59{,}95 \text{ dioptrií.}$$

Pro ohniskové vzdálenosti plyne

$$f = -\frac{n}{D} = -\frac{1}{59{,}95} = -16{,}70 \cdot 10^{-3} \text{ m} = -16{,}7 \text{ mm}$$

$$f' = \frac{n'}{D} = \frac{1{,}336}{59{,}95} = 22{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 22{,}3 \text{ mm} .$$

Pro polohy hlavních bodů plyne dále

$$\overline{P_1P} = n \cdot \delta \frac{D_2}{D} = 1 \cdot 4{,}55 \cdot 10^{-3} \frac{21{,}78}{59{,}95} = 1{,}65 \text{ mm}$$

a tedy

$$\overline{SP} = 1{,}65 - 0{,}0597 = 1{,}59 \text{ mm}$$

a podobně

$$\overline{P_2'P'} = -n'\delta \cdot \frac{D_1}{D} = -1{,}336 \cdot 4{,}55 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{42{,}36}{59{,}95} = -4{,}29$$ a tedy

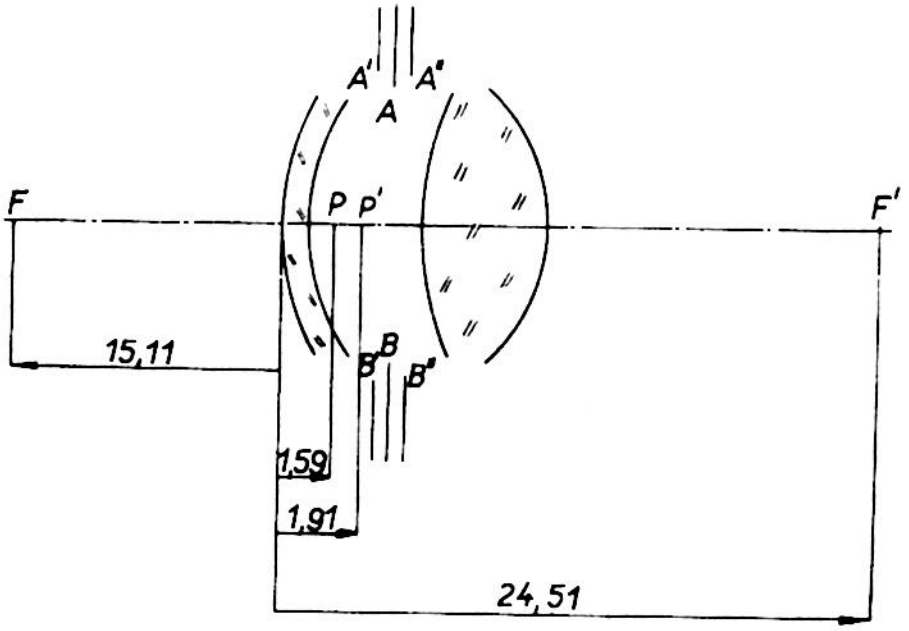
$$\overline{SP}' = 6{,}20 - 4{,}29 = 1{,}91 \text{ mm} .$$

Pro polohu ohnisek plyne konečně

$$\overline{SF} = -16{,}7 + 1{,}59 = -15{,}11 \text{ mm}$$

$$\overline{SF}' = 22{,}3 + 1{,}91 = 24{,}21 \text{ mm} .$$

Poloha hlavních bodů a ohnisek u teoretického oka jako celku je znázorněna na obr. I.2.

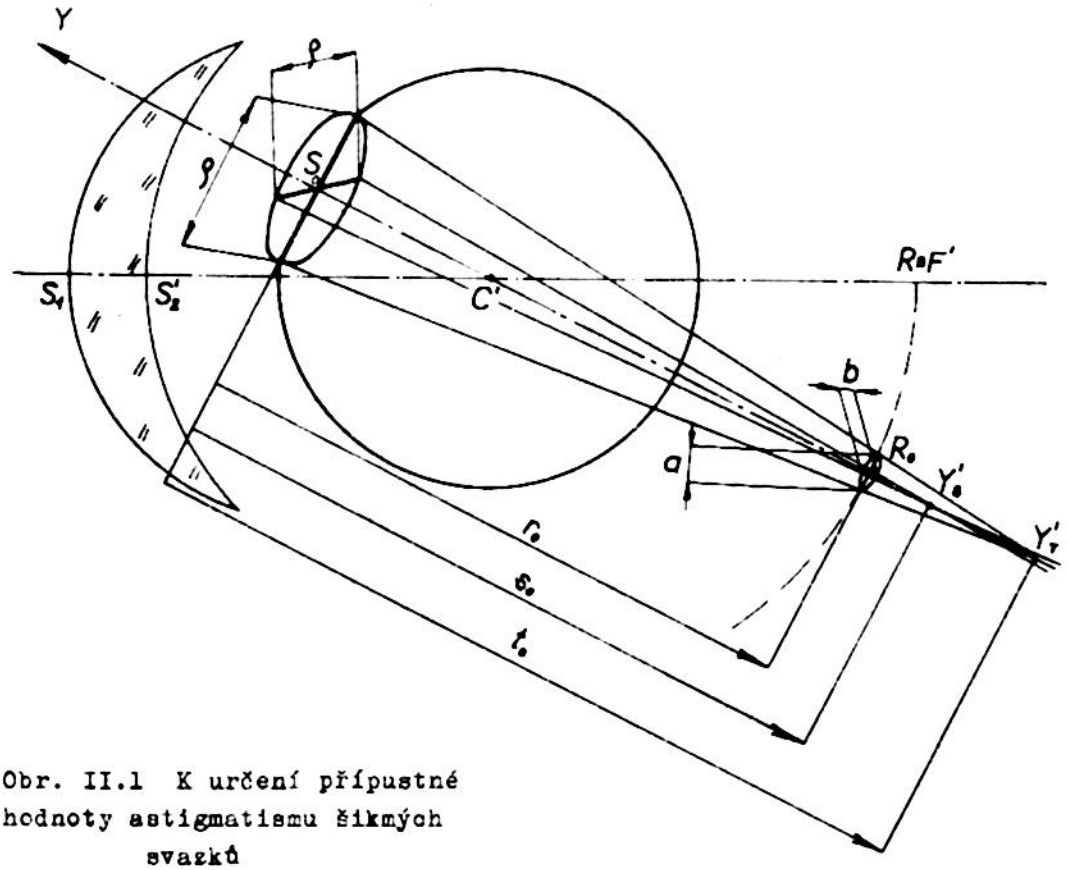


Obr. I.2 Vyznačení polohy hlavních bodů a ohnisek u teoretického oka

Příloha II

Určení přípustné hodnoty astigmatismu šikmých svazků

Uvažujme dalekozraké oko korigované meniskovým brýlovým sklem.



Obr. II.1 K určení přípustné hodnoty astigmatismu šikmých svazků

Otáčí-li se oko v očnicové dutině kolem bodu C', pak jeho vzdálený bod se pohybuje po kouli o středu C' a při určitém natočení oka přejde do polohy R_0.

Nechť takto vykloněné oko pozoruje vzdálený bod Y. Tento bod bude zobrazen šikmým svazkem, který bude obecně zatížen astigmatismem, takže jeho obraz bude tvořen dvěma fokálami v místech Y'_T a Y'_S. Koule, po které se pohybuje vzdálený bod oka R, protne tento svazek, jak již bylo dříve uvedeno, v elipse o osách $\underline{a}$ a $\underline{b}$. Označíme-li vzdálenosti $\overline{S_0R_0} = r_0$, $\overline{S_0Y'_S} = S_0$ a $\overline{S_0Y'_T} = t_0$, můžeme psát pro úhly ε_s a ε_t, pod kterými se nám jeví osy $\underline{a}$ a $\underline{b}$ ze středu S_0 pupily oka, vztahy

$$\varepsilon_s = \frac{a}{r_0} \qquad \text{resp.} \qquad \varepsilon_t = \frac{b}{r_0} .$$

Značí-li ρ průměr oční pupily, pak z podobnosti trojúhelníků plyne

$$\frac{a}{\rho} = \frac{s_o - r_o}{s_o} \qquad \text{resp.} \qquad \frac{b}{\rho} = \frac{t_o - r_o}{t_o} \ .$$

Dosadíme-li z těchto vztahů do předchozích, můžeme psát dále

$$\varepsilon_s = \rho \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{s_o}\right) \qquad \text{resp.} \qquad \varepsilon_t = \rho \left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{s_o}\right) \ .$$

Aby oko vnímalo uvažovanou eliptickou plošku ještě jako bod, je nutné, aby obě z obou jejích os se jevily oku pod úhly ε_s resp. ε_t menšími než jedna úhlová minuta.

Oko si přitom pomáhá samo tím, že akomodací pošine bod R_o mezi body Y_S' a Y_T', takže pak

$$|\varepsilon_s| \leq \varepsilon \qquad \text{a} \qquad |\varepsilon_t| \leq \varepsilon \ ,$$

kde ε značí úhel, pod kterým se jeví fokály v bodech Y_S' resp. Y_T' ze středu oční pupily S_o.

Pro tento úhel platí

$$\varepsilon = \frac{\ell_s}{s_o} \doteq \frac{\ell_t}{t_o} \ ,$$

kde ℓ_s resp. ℓ_t značí délky příslušných fokál v bodech Y_S' resp. Y_T'.

Z podobnosti trojúhelníků platí dále

$$\frac{\ell_s}{\rho} = \frac{t_o - s_o}{t_o}$$

čili

$$\varepsilon = \rho \frac{t_o - s_o}{t_o} = \rho \cdot \left(\frac{1}{s_o} - \frac{1}{t_o}\right) .$$

Zanedbáme-li vzdálenost brýlového skla od vrcholu rohovky vzhledem k s_o resp. t_o, můžeme s dostatečnou přesností psát

$$\varepsilon = \rho \cdot \left(\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{t_2'}\right) \ ,$$

kde s_2' resp. t_2' značí sečné vzdálenosti obrazů Y_S' resp. Y_T' na uvažovaném šikmém papršku.

V předchozích úvahách o přípustném astigmatismu jsme položili

$$\left| \frac{1}{s'_2} - \frac{1}{t'_2} \right| \leqslant 0{,}05 \text{ dioptrie.}$$

Pro průměr oční pupily $\varrho = 5$ mm plyne z předchozích dvou vztahů

$$\varepsilon = 0{,}005 \cdot 0{,}05 = 0{,}00025$$

čili

$$\varepsilon = 0{,}85 \text{ minuty.}$$

Protože úhel ε vyšel menší než jedna minuta, je přípustný astigmatismus velikosti 0,05 dioptrie přijatelný, jak bylo třeba dokázat.

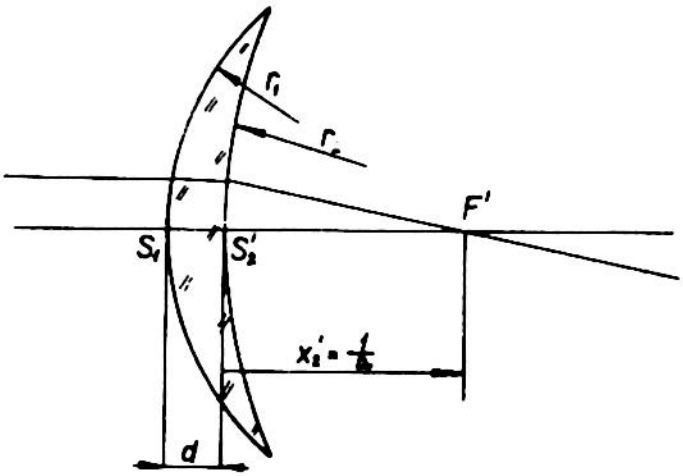
Příloha-III

Trigonometrické sledování astigmatismu šikmých svazků u brýlového skla o vrcholové lámavosti D_v 5 dioptrií

Podle tab. 14.3.1 plyne na základě Tscherningovy rovnice pro poloměry křivosti ploch brýlového skla o vrcholové lámavosti $D_v = + 5$ dioptrií

$$r_1 = 38{,}49 \text{ mm} \qquad r_2 = 60{,}09 \text{ mm} .$$

Volme nyní tloušťku skla $S_1S_2' = 4{,}2$ mm a proveďme korekci poloměru křivosti r_2 druhé plochy tak, aby byla zachována původní vrcholová lámavost brýlového skla $D_v = + 5$ dioptrií.



Obr. III.1 K určení astigmatismu

Podle obr. III. 1 platí pro lom na první ploše

$$\frac{n_1'}{x_1'} - \frac{n_1}{x_1} = \frac{n_1' - n_1}{r_1} ,$$

kde $n_1' = n$ a $n_1 = 1$.

Pro $x_1 = \infty$ plyne odtud

$$x_1' = \frac{n}{R_1} ,$$

kde $R_1 = \frac{n - 1}{r_1}$ značí lámavost první plochy. Pro sečnou vzdálenost x_2 můžeme pak psát

$$x_2 = x_1' - d = \frac{n}{R_1} - d$$

Podobně platí pro lom na druhé ploše

$$\frac{n_2'}{x_2'} - \frac{n_2}{x_2} = \frac{n_2' - n_2}{r_2}$$

kde $n_2 = n$ a $n_2' = 1$, takže můžeme psát dále

$$\frac{1}{x_2'} - \frac{n}{x_2} = \frac{1 - n}{r_2} ,$$

kde $\frac{1-n}{r_2}$ značí lámavost druhé plochy.

Uvážíme-li podle obr. III.1, že

$$x_2' = \frac{1}{D_v} = \frac{1}{5},$$

můžeme psát dále

$$5 - \frac{n}{\frac{n}{R_1} - d} = R_2 .$$

Odtud pak plyne pro náš konkretní případ

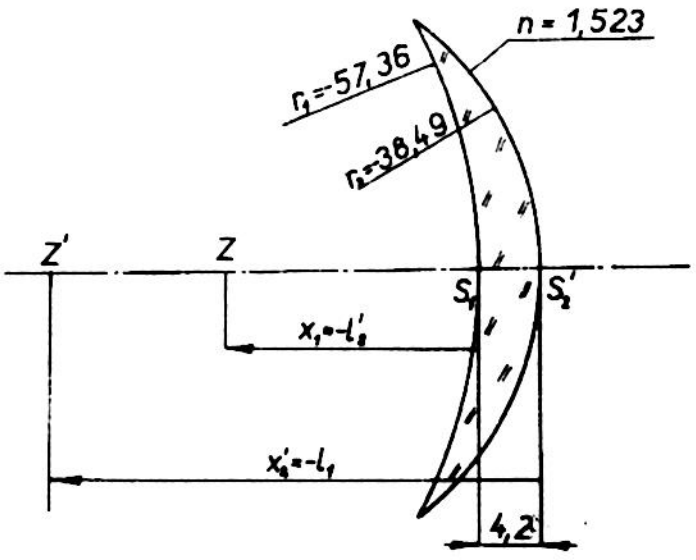
$$R_2 = 5 - \frac{1,523}{\frac{1,523}{\frac{0,523}{0,03849}} - 0,0042} = 5 - \frac{1,523}{\frac{1,523}{13,587} - 0,0042} =$$

$$= 5 - \frac{1,523}{0,11208 - 0,0042} = 5 - 14,117 = - 9,117$$

čili

$$r_2 = \frac{- 0,523}{- 9,117} = 0,05736 \text{ m} = 57,36 \text{ mm} .$$

Určeme pro tuto čočku astigmatismus pro $\tau_1 = 30^\circ$. Nejdříve však musíme určit polohu vstupní pupily z podmínky, že výstupní pupila má procházet středem otáčení oka, tj. $l_2' = 25$ mm .



Obr. III.2

Musíme proto na chvíli změnit orientaci brýlového skla, jak je to naznačeno na obr. III.2, a určit propočtem paraxiálního paprsku polohu l_1 vstupní pupily. Příslušný výpočet je obsažen v tab. I.1.

Tedy

$x_2' = - l_1 = - 33,704$ mm

čili

$l_1 = + 33,704$ mm .

1212-5083

Tab. III.1

	První plocha	Druhá plocha
n' n	1,523 1,0	1 1,523
r d	-57,36 4,2	-38,49 -
$n : x$ $(n'-n) : r$	- 0,04 - 0,0091178	- 0,043258 0,013588
$n' : x$ x'	- 0,0491178 - 31,008	- 0,029670 -33,704
$x'- d$	-35,208	

Nyní propočítáme brýlovým sklem v původní správné orientaci paprsek procházející středem vstupní pupily (ℓ_1 = 33,704 mm) a svírající s optickou osou úhel $\tau_1 = 30^\circ$. Postupně dostaneme:

1) $\sin \varepsilon_1 = \frac{\ell_1 - r_1}{r_1} \cdot \sin \tau_1 = \frac{33,704 - 38,49}{38,49} \cdot 0,5 = - \frac{4,786 \cdot 0,5}{38,49} =$

$= - 0,06362$

$$\underline{\varepsilon_1 = - 3^\circ 38' 51''}$$

2) $\sin \varepsilon'_1 = \frac{n_1}{n'_1} \sin \varepsilon_1 = \frac{1}{1,523} (- 0,06362) = - 0,041763$

$$\underline{\varepsilon'_1 = - 2^\circ 23' 39''}$$

3) $\tau'_1 = \tau_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon'_1 = 30^\circ$

$+ 2^\circ 23' 39''$

$32^\circ 23' 39''$

$- 3^\circ 38' 51''$

$28^\circ 44' 48''$

4) $\ell'_1 = r_1 + \frac{r_1 \sin \varepsilon'_1}{\sin \tau'_1} = 38,49 + \frac{38,49 (- 0,041763)}{\sin 28^\circ 44' 48''} = 38,49 - 3,3431 =$

$= 35,1469$ mm .

5) $\ell_2 = \ell'_1 - d_1 = 35,1469 - 4,2 = 30,9469$ mm .

6) $\tau_2 = \tau'_1 = 28^\circ 44' 48''$

7) $\sin \varepsilon_2 = \frac{\ell_2 - r_2}{r_2} \sin \tau_2 = \frac{30,9469 - 57,36}{57,36} \sin 28^\circ 44' 48" = - 0,22146$.

$$\underline{\varepsilon_2 = - 12^\circ 47' 41"}$$

8) $\sin \varepsilon'_2 = \frac{n_2}{n'_2} \sin \varepsilon_2 = 1,523 \cdot (- 0,22146) = - 0,33728$

$$\underline{\varepsilon'_2 = - 19^\circ 42' 40"}$$

9) $\tau'_2 = \tau_2 + \varepsilon_2 - \varepsilon'_2 =$

$28^\circ 44' 48"$
$+ 19^\circ 42' 40"$
$48^\circ 27' 28"$
$- 12^\circ 47' 41"$
$35^\circ 39' 47"$

10) $\ell'_2 = r_2 \frac{r_2 \sin \varepsilon'_2}{\sin \tau'_2} = 57,36 + \frac{57,36 (- 0,33728)}{\sin 35^\circ 39' 47"} = 57,36 - 33,183 =$

$= 24,177$ mm .

11) $h_1 = r_1 \sin (\tau_1 + \varepsilon_1) = 38,49 \sin (30^\circ - 3^\circ 38' 51") = 17,464$ mm

12) $h_2 = r_2 \sin (\tau_2 + \varepsilon_2) = 57,36 \cdot \sin (28^\circ 44' 48" - 12^\circ 47' 41") = 14,799$ mm.

13) $d'_1 = \frac{h_1 - h_2}{\sin \tau'_1} = \frac{17,464 - 14,799}{\sin 28^\circ 44' 48"} = 5,5414$ mm

14) $n_1 \cos \varepsilon_1 = 1 \cos (- 3^\circ 38' 51") = + 0,99799$

15) $n'_1 \cos \varepsilon'_1 = 1,523 \cos (- 2^\circ 23' 39") = + 1,5217$

16) $\psi_1 = \frac{1}{r_1} (n'_1 \cos \varepsilon'_1 - n_1 \cos \varepsilon_1) = \frac{1,5217 - 0,99799}{38,49} = \frac{0,52371}{38,49} =$

$= 0,013607$

17) $n_2 \cos \varepsilon_2 = 1,523 \cos (- 12^\circ 47' 41") = + 1,4852$

18) $n'_2 \cos \varepsilon'_2 = 1 \cdot \cos (- 19^\circ 42' 40") = 0,94147$

19) $\psi_2 = \frac{1}{r_2} (n'_2 \cos \varepsilon'_2 - n_2 \cos \varepsilon_2) = \frac{0,94147 - 1,4852}{57,36} = - \frac{0,54373}{57,36} =$

$= - 0,0094792$

20) $n_1 \cos^2 \varepsilon_1 = 0,99595$

21) $n_1' \cos^2 \varepsilon_1' = 1,5204$

22) $n_2 \cos^2 \varepsilon_2 = 1,4483$

23) $n_2' \cos^2 \varepsilon_2' = 0,88634$

24) $$s_1' = \frac{n_1'}{\frac{n_1}{s_1} + \psi_1} = \frac{1,523}{0,013607} = \underline{111,93 \text{ mm}} .$$

25) $s_2 = s_1' - d_1' = 111,93 - 5,5414 = 106,3886$ mm

26) $$s_2' = \frac{n_2'}{\frac{n_2}{s_2} + \psi_2} = \frac{1}{0,0048378} = \underline{206,7 \text{ mm}}$$

27) $$t_1' = \frac{n_1' \cos^2 \varepsilon_1'}{\frac{n_1 \cos^2 \varepsilon_1}{t_1} + \psi_1} = \frac{1,5204}{0,013607} = \underline{111,74 \text{ mm}}$$

28) $t_2 = t_1' - d_1' = 111,74 - 5,5414 = \underline{106,1986 \text{ mm}}$

29) $$t_2' = \frac{n_2' \cos^2 \varepsilon_2'}{\frac{n_2 \cos^2 \varepsilon_2}{t_2} + \psi_2} = \frac{0,88634}{0,0041588} = \underline{213,12 \text{ mm}}$$

30) $$\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{t_2'} = \frac{1}{0,2067} - \frac{1}{0,21312} = 4,8378 - 4,6921 = 0,1457 \text{ dioptrie}$$

Tedy astigmatismus $A = 0,1457$ dioptrie.

Protože je větší než tolerovatelná hodnota $A = 0,05$ dioptrie, upravíme brýlové sklo tak, že budeme volit poloměr r_1 první plochy poněkud větší a sice $r_1 = 44,00$ mm . Pro příslušný poloměr r_2 druhé plochy tlustého brýlového skla dostaneme postupně:

$$R_2 = \frac{D_v - R_1}{1 - R_1 \cdot \frac{d}{n}} = \frac{5 - \frac{0,523}{0,044}}{1 - \frac{0,523}{0,044} \cdot \frac{0,0042}{1,523}} = -\frac{6,886}{0,967221} = -7,1193 \text{ dioptrie}$$

a tedy

$$r_2 = \frac{1 - n}{R_2} = \frac{- 0{,}523}{- 7{,}1193} = 0{,}073462 = \underline{+ 73{,}462 \text{ mm}} .$$

Obdobným způsobem jako v předchozím případě určíme polohu vstupní pupily ℓ_1 tak, aby sledovaný paprsek procházel opět středem otáčení oka ($\ell_2' = 25$ mm). Změníme proto na chvíli orientaci brýlového skla, takže

$x_1 = - \ell_2' = - 25$ mm, $r_1 = - 73{,}46$ mm a $r_2 = - 44{,}0$ mm a $d = 4{,}2$ mm .

Výsledky jsou uvedeny v tab. III.2.

Tab. III.2

	První plocha	Druhá plocha
n' n	1,523 1,0	1,0 1,523
r d	-73,46 4,2	-44,0 -
$n : x$ $(n'-n) : r$	- 0,04 - 0,0071195	- 0,041785 0,011886
$n' : x$ x'	- 0,0471195 -32,248	- 0,029899 -33,445
$x' - d$	-36,448	

Dostáváme

$$x_2' = - \ell_1 = - 33{,}445 \text{ mm} \qquad \text{čili}$$

$$\ell_1 = 33{,}445 \text{ mm} .$$

Nyní opět provedeme výpočet astigmatismu pro paprsek svírající s optickou osou úhel $\tau_1 = 30^\circ$. Dostaneme postupně jako v předcházejícím případě:

1) $$\sin \varepsilon_1 = \frac{\ell_1 - r_1}{r_1} \sin \tau_1 = \frac{33{,}445 - 44{,}0}{44{,}0} \cdot 0{,}5 = - 0{,}11994$$

$$\underline{\varepsilon_1 = - 6^\circ 53' 20''}$$

2) $$\sin \varepsilon_1' = \frac{n_1}{n_1'} \sin \varepsilon_1 = - \frac{0{,}11994}{1{,}523} = - 0{,}078755$$

$$\underline{\varepsilon_1' = - 4^\circ 31' 01''}$$

3) $\tau'_1 = \tau_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon'_1 = 30^\circ$
$+ 4^\circ 31' 01''$
$34^\circ 31' 01''$
$- 6^\circ 53' 20''$
$27^\circ 37' 41''$

4) $\ell'_1 = r_1 + \frac{r_1 \sin \varepsilon'_1}{\sin \tau'_1} = 44{,}0 + \frac{44{,}0\ (-\ 0{,}078755)}{\sin 27^\circ 37' 41''} = \underline{36{,}5274 \text{ mm}}$

5) $\ell_2 = \ell'_1 - d_1 = 36{,}5274 - 4{,}2 = 32{,}3274 \text{ mm}$

6) $\tau_2 = \tau'_1 = 27^\circ 37' 41''$

7) $\sin \varepsilon_2 = \frac{\ell_2 - r_2}{r_2} \sin \tau_2 = \frac{32{,}7276 - 73{,}46}{73{,}46} \sin 27^\circ 37' 41'' = - 0{,}25965$

$\underline{\varepsilon_2 = - 15^\circ 2' 57''}$

8) $\sin \varepsilon'_2 = \frac{n_2}{n'_2} \sin \varepsilon_2 = 1{,}523\ (-\ 0{,}25965) = - 0{,}39546$

$\underline{\varepsilon'_2 = - 23^\circ 17' 38''}$

9) $\tau'_2 = \tau_2 + \varepsilon_2 - \varepsilon'_2 = 27^\circ 37' 41''$
$+ 23^\circ 17' 38''$
$50^\circ 55' 19''$
$- 15^\circ 2' 57''$
$35^\circ 52' 22''$

10) $\ell'_2 = r_2 + \frac{r_2 \sin \varepsilon'_2}{\sin \tau'_2} = 73{,}46 + \frac{73{,}46\ (-\ 0{,}39546)}{\sin 35^\circ 52' 22''} = 73{,}46 - 49{,}549 =$

$= 23{,}911 \text{ mm}$

11) $h_1 = r_1 \sin (\tau_1 + \varepsilon_1) = 44{,}0 \cdot \sin (30^\circ - 6^\circ 53' 20'') = 17{,}271 \text{ mm}$

12) $h_2 = r_2 \sin (\tau_2 + \varepsilon_2) = 73{,}46 \sin (27^\circ 37' 41'' - 15^\circ 2' 57'') = 15{,}999 \text{ mm}$.

13) $d'_1 = \frac{h_1 - h_2}{\sin \tau'_1} = \frac{17{,}271 - 15{,}999}{\sin 27^\circ 37' 41''} = 2{,}743 \text{ mm}$

14) $n_1 \cos \varepsilon_1 = 1 \cdot \cos (- 6^\circ 53' 20'') = + 0{,}99278$

15) $n'_1 \cos \varepsilon'_1 = 1{,}523 \cdot \cos (- 4^\circ 31' 01'') = + 1{,}5183$

16) $n_2 \cos \varepsilon_2 = 1{,}523 \cos (-15^\circ 2' 57'') = +1{,}4708$

17) $n_2' \cos \varepsilon_2' = 1 \cdot \cos (-23^\circ 17' 38'') = +0{,}91848$

18) $\psi_1 = \frac{1}{r_1}(n_1' \cos \varepsilon_1' - n_1 \cos \varepsilon_1) = \frac{1{,}5183 - 0{,}99278}{44{,}0} = 0{,}011943$

19) $\psi_2 = \frac{1}{r_2}(n_2' \cos \varepsilon_2' - n_2 \cos \varepsilon_2) = \frac{0{,}91848 - 1{,}4708}{73{,}46} = -0{,}0075187$

20) $n_1 \cos^2 \varepsilon_1 = 0{,}9856$

21) $n_1' \cos^2 \varepsilon_1' = 1{,}5135$

22) $n_2 \cos^2 \varepsilon_2 = 1{,}4203$

23) $n_2' \cos^2 \varepsilon_2' = 0{,}8436$

24) $s_1' = \frac{n_1'}{\frac{n_1}{s_1} + \psi_1} = \frac{1{,}523}{0{,}011943} = 127{,}52$ mm

25) $s_2 = s_1' - d_1' = 127{,}52 - 2{,}743 = 124{,}777$ mm

26) $s_2' = \frac{n_2'}{\frac{n_2}{s_2} + \psi_2} = \frac{1}{\frac{1{,}523}{124{,}777} - 0{,}0075187} = \frac{1}{0{,}0046943} = \underline{213{,}02 \text{ mm}}$.

27) $t_1' = \frac{n_1' \cos^2 \varepsilon_1'}{\frac{n_1 \cos^2 \varepsilon_1}{t_1} + \psi_1} = \frac{1{,}5135}{0{,}011943} = 126{,}73$ mm

28) $t_2 = t_1 - d_1' = 126{,}73 - 2{,}743 = 123{,}987$ mm

29) $t_2' = \frac{n_2' \cos^2 \varepsilon_2'}{\frac{n_2 \cos^2 \varepsilon_2}{t_2} + \psi_2} = \frac{0{,}8436}{\frac{1{,}4203}{123{,}987} - 0{,}0075187} = 214{,}26$ mm

30) $\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{t_2'} = \frac{1}{0{,}21302} - \frac{1}{0{,}21426} = 4{,}6943 - 4{,}6672 = 0{,}0271$ dioptrie.

Tedy astigmatismus vyjádřený v dioptriích splňuje požadovanou toleranci, takže příslušné sklo bude mít parametry:

$$r_1 = + 44{,}0 \text{ mm} , \quad r_2 = + 73{,}46 \quad d = 4{,}2 \quad a \quad n = 1{,}523 .$$

Příloha IV.

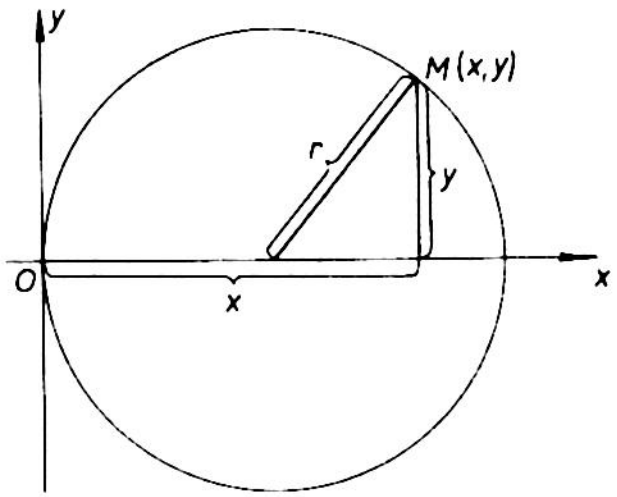
Určení parametrů brýlového skla s asferickou plochou o lámavosti D´ = + 10 dioptrií

Uvažujme brýlové sklo s lámavostí D´= + 10 dioptrií a volme poloměr druhé, kulové plochy hodnotu r_2 = + 130,5 mm. Nechť dále je index lomu příslušného skla n = 1,523 a osová tloušťka d = 6,2 mm .

Nechť pro poloměr první plochy, uvažované jako kulová plocha, vychází z předepsané lámavosti D´ a tloušťky d hodnota r_1 = + 39,464 mm .

Potom rovnici meridiánu příslušné asferické plochy můžeme psát ve tvaru

$$y^2 = 78{,}928\, x + b\, x^2 .$$



Obr. IV.1. K určení konstanty b rovnice meridiánu asferické plochy.

V této rovnici je ještě třeba určit koeficient b . Kdyby příslušný meridián byl kruhový, bylo by b = - 1 , neboť rovnice

$$y^2 = 2\, r\, x - x^2$$

představuje kružnici o poloměru r , která má svůj střed na x-ové ose a dotýká se osy y-ové, jak je to vyznačeno na obr. IV.1.

Volme proto b = - 0,70 , takže rovnice meridiánu nabude tvaru

$$y^2 = 78{,}93\, x - 0{,}7\, x^2 .$$

Můžeme tedy aplikovat vztahy

(14.5.7) a další a dostaneme postupně

1) x_1 = - 25 mm

2) τ_1 = - 30°

3) r_1 = - 130,5 mm

4) $$\sin \varepsilon_1 = \frac{x_1 - r_1}{r_1} \sin \tau_1 = \frac{-25 + 130{,}5}{-130{,}5} \cdot (-0{,}5) = 0{,}404214$$

$$\underline{\varepsilon_1 = 23°50'31"} .$$

5) $$\sin \varepsilon'_1 = \frac{\sin \varepsilon_1}{n} = \frac{0{,}404214}{1{,}523} = 0{,}26541$$

$$\underline{\varepsilon'_1 = 15°23'27"}$$

6) $\tau_1' = \tau_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_1' = -30^\circ$

$$\begin{array}{r} -\ 15^\circ 23' 27'' \\ \hline -\ 45^\circ 23' 27'' \\ +\ 23^\circ 50' 31'' \\ \hline -\ 21^\circ 32' 56'' \end{array}$$

7) $x_1' = r_1 + \dfrac{r_1 \sin \varepsilon_1'}{\sin \tau_1'} = -130{,}5 + \dfrac{-130{,}5 \cdot 0{,}26541}{\sin(-21^\circ 32' 56'')} = -36{,}202$ mm .

8) $x_2 = x_1' - d = -36{,}202 - 6{,}2 = -42{,}402$ mm

9) $\tau_2 = \tau_1' = -21^\circ 32' 56''$

10) Lomený paprsek je pak vyjádřen rovnicí

$$y = -(x + 42{,}402) \cdot \operatorname{tg}(-21^\circ 32' 56'') \quad \text{čili}$$

$$y = 0{,}39489\, x + 16{,}744$$

11) Řešme tuto rovnici s rovnicí meridiánu asferické plochy brýlového skla orientovaného podle obr. 14.5.2:

$$y^2 = -78{,}928\, x - 0{,}7\, x^2$$

a dostaneme

$$(0{,}39489\, x + 16{,}744)^2 = -78{,}928\, x - 0{,}7\, x^2$$

nebo po úpravě

$$0{,}85594\, x^2 + 92{,}153\, x + 280{,}37 = 0 .$$

Řešením této rovnice dostaneme

$$(x_{20})_{1,2} = \frac{46{,}0765}{0{,}85594} \pm \sqrt{\left(\frac{46{,}0765}{0{,}85594}\right)^2 - \frac{280{,}37}{0{,}85594}} = -53{,}831 \pm 50{,}695 =$$

$$= \begin{cases} -3{,}136 \text{ mm} \\ -104{,}526 \text{ mm} \end{cases}$$

Pro náš případ má význam pouze první řešení. Pro y-ovou souřadnici y_{20} bodu dopadu pak vychází dále

$$y_{20} = 0{,}39489\,(-3{,}136) + 16{,}744 = 15{,}5056 \text{ mm} .$$

12) Pro úhel ω_2 normály v bodě dopadu (x_{20}, y_{20}) dostáváme dále

$$\operatorname{tg}\ \omega_2 = \frac{2y_{20}}{2r_2 + 2\,b\,x_{20}} = \frac{2 \cdot 15{,}5056}{-78{,}928 + 2{,}0 \cdot 0{,}7 \cdot 3{,}136} = -0{,}41605$$

$$\omega_2 = -22^\circ 35' 22''$$

$0{,}84742\ x^2 - 91{,}759\ x + 279{,}2 = 0$

a odtud

$$(x_{10})_{1,2} = \frac{45{,}8795}{0{,}84742} = \sqrt{\left(\frac{45{,}8795}{0{,}84742}\right)^2 - \frac{279{,}2}{0{,}84742}} = 54{,}139 \pm 51{,}004 =$$

$$= \begin{cases} 3{,}135 \text{ mm} \\ 105{,}143 \text{ mm} \end{cases}$$

Pro první řešení, které má jediné pro náš případ význam, vychází

$y_{10} = 16{,}709 - 0{,}38395 \cdot 3{,}135 = 16{,}709 - 1{,}2037 = 15{,}5053$ mm

9) $$\operatorname{tg} \omega_1 = \frac{2y_{10}}{2r_1 + 2b\,x_{10}} = \frac{2 \cdot 15{,}5053}{78{,}928 - 1{,}4 \cdot 3{,}135} = \frac{31{,}0106}{74{,}539} = 0{,}41603$$

$$\underline{\omega_1 = 22^\circ 35' 19''}$$

10) $$\varepsilon_1 = \omega_1 - \tau_1 = \begin{array}{r} 22^\circ 35' 19'' \\ \underline{- 21^\circ 00' 17''} \\ 1^\circ 35' 02'' \end{array}$$

11) $$\sin \varepsilon'_1 = \frac{\sin \varepsilon_1}{n} = \frac{\sin 1^\circ 35' 2''}{1{,}523} = 0{,}018155$$

$$\underline{\varepsilon'_1 = 1^\circ 02' 25''}$$

12) $$\tau'_1 = \omega_1 - \varepsilon'_1 = \begin{array}{r} 22^\circ 35' 19'' \\ \underline{- 1^\circ 02' 25''} \\ 21^\circ 32' 54'' \end{array}$$

13) $x'_1 = x_{10} + y_{10} \cdot \operatorname{cotg} \tau'_1 = 3{,}135 + 15{,}5053 \cdot \operatorname{cotg} 21^\circ 32' 54'' =$

$= 3{,}135 + 39{,}265 = \underline{42{,}4 \text{ mm}}$.

14) $x_2 = x'_1 - d = 42{,}4 - 6{,}2 = 36{,}2$ mm

15) $\tau_2 = \tau'_1 = 21^\circ 32' 54''$

16) $$\sin \varepsilon_2 = \frac{x_2 - r_2}{r_2} \sin \tau_2 = \frac{36{,}2 - 130{,}5}{130{,}5} \cdot \sin 21^\circ 32' 54'' = - 0{,}26541$$

$$\underline{\varepsilon_2 = - 15^\circ 23' 27''}$$

17) $\sin \varepsilon'_2 = n \sin \varepsilon_2 = 1{,}523\ (-\ 0{,}26541) = -\ 0{,}40421$

$$\underline{\varepsilon'_2 = -\ 23^\circ 50' 31''}$$

18) $\tau'_2 = \tau_2 + \varepsilon_2 - \varepsilon'_2 =$

$$\begin{array}{r} 21^\circ 32' 54'' \\ +\ 23^\circ 50' 31'' \\ \hline +\ 45^\circ 23' 25'' \\ -\ 15^\circ 23' 27'' \\ \hline +\ 29^\circ 59' 58'' \end{array}$$

19) $x'_2 = r_2 + \dfrac{r_2 \sin \varepsilon'_2}{\sin \tau'_2} = 130{,}5 + \dfrac{130{,}5\ (-\ 0{,}40421)}{\sin 29^\circ 59' 58''} = 130{,}5 - 105{,}5 =$

$= \underline{25\ \text{mm}}$

Tím byla ověřena správnost předchozího výpočtu.

20) $h_1 = y_{10} = 15{,}5053\ \text{mm}$

21) $h_2 = r_2 \cdot \sin (\tau_2 + \varepsilon_2) = 130{,}5 \sin (21^\circ 32' 54'' - 15^\circ 23' 27'') =$

$= 130{,}5 \sin 6^\circ 09' 27'' = 13{,}983\ \text{mm}\ .$

22) $d'_1 = \dfrac{h_1 - h_2}{\sin \tau'_1} = \dfrac{15{,}5053 - 13{,}983}{\sin 21^\circ 32' 54''} = \dfrac{1{,}5223}{\sin 21^\circ 32' 54''} = 4{,}1447\ \text{mm}\ .$

23) $r_{t1} = -\ \dfrac{\left[y_{10}^2 + (r_1 + b\, x_{10})^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{b y_{10}^2 - (r_1 + b\, x_{10})^2} =$

$$= -\ \frac{\left[15{,}5053^2 + (39{,}464 - 0{,}7 \cdot 3{,}135)^2\right]^{\frac{3}{2}}}{-0{,}7 \cdot 15{,}5053^2 - (39{,}464 - 0{,}7 \cdot 3{,}135)^2} = \frac{\sqrt{1629{,}4^3}}{1557{,}28} =$$

$= 42{,}237\ \text{mm}$

24) $r_{s1} = \dfrac{y_{10}}{\sin \omega_1} = \dfrac{15{,}5053}{\sin 22^\circ 35' 19''} = 40{,}365\ \text{mm}$

25) $n_1 \cos \varepsilon_1 = 1 \cdot \cos 1^\circ 35' 02'' = 0{,}9996$

26) $n'_1 \cos \varepsilon'_1 = 1{,}523 \cdot \cos 1^\circ 02' 25'' = 1{,}5227$

27) $n_2 \cos \varepsilon_2 = 1{,}523 \cdot \cos (-\ 15^\circ 23' 27'') = 1{,}4684$

28) $n'_2 \cos \varepsilon'_2 = 1 \cdot \cos (-\ 23^\circ 50' 31'') = 0{,}91466$

29) $n_1 \cos^2 \varepsilon_1 = 0,99922$

30) $n_1' \cos^2 \varepsilon'_1 = 1,5225$

31) $n_2 \cos^2 \varepsilon_2 = 1,4157$

32) $n_2' \cos^2 \varepsilon'_2 = 0,8366$

33) $\psi_{1t} = \frac{1}{r_{1t}} (n_1' \cos \varepsilon'_1 - n_1 \cos \varepsilon_1) = \frac{1,5227 - 0,9996}{42,237} = 0,012385$

34) $\psi_{1s} = \frac{0,5231}{r_{1s}} = \frac{0,5231}{40,365} = 0,012959$

35) $\psi_2 = \frac{1}{r_2} (n_2' \cos \varepsilon'_2 - n_2 \cos \varepsilon_2) = \frac{0,91466 - 1,4684}{130,5} = - 0,0042432 .$

36) $s_1' = \frac{n_1'}{\frac{n_1}{s_1} + \psi_{1s}} = \frac{1,523}{0,012959} = 117,52 \text{ mm}$

37) $s_2 = s_1' - d_1 = 117,52 - 4,1447 = 113,3753 \text{ mm}$

38) $s_2' = \frac{n_2'}{\frac{n_2}{s_2} + \psi_2} = \frac{1}{\frac{1,523}{113,375} - 0,0042432} = 108,81 \text{ mm}$

39) $t_1' = \frac{n_1' \cos^2 \varepsilon'_1}{\frac{n_1 \cos^2 \varepsilon_1}{t_1} + \psi_{1t}} = \frac{1,5225}{0,012385} = 122,93 \text{ mm}$

40) $t_2 = t_1' - d_1 = 122,93 - 4,1447 = 118,7853 \text{ mm}$

41) $t_2' = \frac{n_2' \cos^2 \varepsilon'_2}{\frac{n_2 \cos^2 \varepsilon_2}{t_2} + \psi_2} = \frac{0,8366}{\frac{1,4157}{118,7853} + 0,0042432} = 108,99 \text{ mm} .$

42) $\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{t_2'} = \frac{1}{0,10881} - \frac{1}{0,10899} = 0,016 \text{ dioptrie}$

Tedy hledaný astigmatismus je v požadovaných mezích. Tím je výpočet skla ukončen. Konečné parametry tedy jsou:

1212-5083

Meridián asferické plochy

$y^2 = - 78,928\ x - 0,7\ x^2$

$r_2 = + 130,5$ mm

$d = 6,2$ mm .

Zbývá ještě pro výrobu určit osy příslušného eliptického meridiánu.

Obsah

Str.

1) Úvod 3

I. část - KLIDNÉ OKO A JEHO KOREKCE 5

2. Zrak a jeho orgány 5

3. Stavba oka - tvar oka 5
3.1 Jednotlivé části oka 6
3.2 Bělima 7
3.3 Rohovka 8
3.4 Cévnatka 9
3.5 Sítnice 9
3.6 Ciliární těleso 12
3.7 Duhovka 13
3.8 Oční čočka 14
3.9 Oční mok 16
3.10 Sklivec 16

4. Rozměry a optické vlastnosti oka 16
4.1 Základní vztahy geometrické optiky oka 17
4.2 Oko jako centrovaná optická soustava 19
4.3 Oko teoretické 20
4.4 Oko zjednodušené 21
4.5 Oko redukované 23
4.6 Pupily 24
4.7 Rozptylový kroužek 25
4.8 Úhel vidění 29

5. Akomodace 30
5.1 Akomodační rozsah 31
5.2 Stárnutí oka 31
5.3 Změny odehrávající se v oku během akomodace 33

6. Teorie akomodace 35
6.1 Příčiny vyvolávající deformaci oční čočky 35
6.2 Způsob přenášení akomodačních změn ciliárního tělesa na oční čočku 36
6.3 Tvar čočky při akomodaci 36
6.4 Akomodační ústrojí některých živočichů 38

7. Sférická ametropie 40
7.1 Příčiny ametropie 41
7.2 Prodloužení oka 43
7.3 Akomodační amplituda u ametropického oka 43
7.4 Vidění krátkozrakého oka na dálku 46
7.5 Vidění krátkozrakého oka na blízko 47
7.6 Vidění dalekozrakého oka na dálku 48
7.7 Vidění dalekozrakého oka na blízko 48
7.8 Rozlišovací schopnost oka 49
7.9 Ametropie křivostí 50

8. Korekce sférické ametropie 51
8.1 Určení lámavosti korekčního brýlového skla 57
8.2 Poloha brýlových skel 57
8.3 Soustava oko - brýlové sklo 58
8.4 Pupily oka korigovaného brýlovým sklem 60
8.5 Tolerování lámavosti korekčních brýlových skel . . 61
8.6 Velikost obrazu na sítnici oka korigovaného brýlovým sklem 63
8.7 Akomodace oka korigovaného brýlovým sklem 65
8.8 Velikost obrazu na sítnici oka v případě ametropie křivostí 67

Str.

9. Kulová korekční brýlová skla 67
9.1 Označování brýlových skel 67
9.2 Vrcholová lámavost 68
9.3 Teorie vrcholové lámavosti 69
9.4 Různé tvary brýlových skel 73
9.5 Jednoduchý výpočet vrcholové lámavosti brýlových skel 79
9.6 Změna vrcholové lámavosti vyvolaná změnou vzdálenosti brýlového skla od oka 81
9.7 Spojení dvou brýlových skel 84

10. Presbytie, aphakie a amblyopie 85
10.1 Presbytie - stárnutí oka 85
10.2 Oko s vyjmutou oční čočkou (aphakie) 92
10.3 Amblyopie 97

11. Osový astigmatismus 99
11.1 Astigmatismus rohovky 102
11.2 Teoretické astigmatické oko 104
11.3 Označení osového astigmatismu 106
11.4 Astigmatismus oční čočky 107
11.5 Vidění nekorigovaného astigmatického oka 110
11.6 Akomodace nekorigovaného astigmatického oka 114
11.7 Korekce astigmatismu 115
11.8 Akomodace oka s korigovaným astigmatismem 116
11.9 Brýlová skla sloužící ke korekci osového astigmatismu oka 117
11.10 Obecně zkřížené válce 126
11.11 Nepravidelný astigmatismus 131

II. část - OKO V POHYBU A JEHO KOREKCE 134

12. Očnicová dutina a oční svaly 134
12.1 Očnicová dutina 134
12.2 Víčka 136
12.3 Slzný aparát 138
12.4 Svaly očnicové dutiny 138
12.5 Oční pouzdro 140
12.5 Teorie působení svalů oční dutiny na oko 141
12.6 Pohyby víček 144

13. Geometrie očních pohybů 144
13.1 Střed otáčení oka 144
13.2 Dondersův zákon 145
13.3 Zákon Listingův 146

14. Korekce oka v pohybu 148
14.1 Odchylka osy pozorování 149
14.2 Astigmatismus šikmých svazků 151
14.3 Korekce astigmatismu šikmých svazků brýlových skel pro vidění na dálku 157
14.4 Trigonometrické určení tlustých brýlových skel s korigovaným astigmatismem šikmých svazků 167
14.5 Astigmatická spojná brýlová skla s vrcholovou lámavostí vyšší než + 7 dioptrií 168
14.6 Změna lámavosti brýlových skel 175
14.7 Korekce astigmatismu šikmých svazků brýlových skel pro vidění na blízko 177

III. část - SPOJENÍ A SPOLUPRÁCE OBOU OČÍ 184

15. Normální binokulární pohyby 184
15.1 Oční báze 185
15.2 Binokulární konvergence 185
15.3 Střed pozorování 189
15.4 Anomalie binokulárních pohybů 191

Str.

16. Brýlová skla a binokulární vidění 195
16.1 Vidění dalekých předmětů 195
16.2 Vidění blízkých předmětů ametropickým zrakem s akomodační schopností 195
16.3 Vidění starozrakých lidí na blízko 197
16.4 Anisometropie 198
16.5 Korekce heterophorie a strabismu 199

IV. část - MĚŘICÍ METODY A NĚKTERÉ PŘÍSTROJE 202

17. Měření rozlišovací schopnosti oka 202
17.1 Zjišťování astigmatismu a příslušných hlavních směrů 205
17.2 Zkušební brýlová skla 207
17.3 Praktické zkoušení očí a určování příslušné ametropie 209
17.4 Subjektivní optometry 215
17.5 Objektivní přístroje pro zkoušení očí 219
17.6 Oční refraktometry 227
17.7 Přístroje pro měření astigmatismu rohovky 234
17.8 Přístroj pro měření očního rozestupu 237
17.9 Pokometry 238

Příloha I. 241
Příloha II. 246
Příloha III. 249
Příloha IV. 258

Seznam literatury 265

- - - - - -

OVEDECK

OJÚ

Autor:	prof. RNDr. Engelbert K e p r t
Název:	TEORIE OPTICKÝCH PŘÍSTROJŮ III. OKO A JEHO KOREKCE
Vydavatel:	Universita Palackého v Olomouci
Určeno:	pro posluchače přírodovědecké fakulty UP
Vedoucí katedry:	prof. RNDr. Engelbert K e p r t
Povoleno:	rektorátem University Palackého v Olomouci, dne 5. 11. 1965 — Čj. 4410/65 D-05*50264
Nakladatel:	Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1
Číslo publikace:	1212 - 5083
Vydání:	první 1966
Náklad: 300 výtisků	Stran: 268
AA: 19,64	VA: 20,56
Tematická skupina a podskupina	17/32
Tiskárna:	Středočeské tiskárny, n. p., provoz 17 - 1791/66
Druh tisku:	rotaprintem

17 - 015 - 66	Cena: Kčs 15,50 — A

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou v redakci nakladatelství