

V. Chlup

UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

Universita Palackého v Olomouci

Fakulta přírodovědecká

Základy technologie optické výroby

I. část

Povaha a vlastnosti optického skla, přirozených i umělých krystalů, organického skla
a technologie jejich výroby

Prof. dr. Engelbert Keprt

Státní pedagogické nakladatelství, n. p.
Praha

V. Chlup

UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

Universita Palackého v Olomouci

Fakulta přírodovědecká

Základy technologie optické výroby

I. část

**Povaha a vlastnosti optického skla, přirozených i umělých krystalů, organického skla
a technologie jejich výroby**

Prof. dr. Engelbert Keprt

**Státní pedagogické nakladatelství, n. p.
Praha**

TECHNOLOGIE OPTICKÉ VÝROBY

1. Úvod

Každý optický přístroj obsahuje nějakou optickou soustavu, která bývá složena z čoček, hranolů, klínů, zrcadel, záměrných deštiček, planparallelních desek apod. Jednotlivé optické součásti jsou zhotoveny ze skla nebo v některých případech z krystalů a v poslední době též z tzv. organického skla. Protože tyto materiály se podstatně liší svou povahou a vlastnostmi od běžných materiálů (především kovů) používaných ve strojírenském průmyslu, vyžaduje si jejich opracování také zvláštních technologií. Proto úkolem těchto přednášek bude především seznámit posluchače se základními problémy technologie optické výroby.

Aby bylo možno snadněji objasnit jednotlivé technologické procesy, je nutné seznámit nejdříve čtenáře s vlastnostmi, povahou a technologií výroby optického skla, přirozených i umělých krystalů nebo organického skla.

Některé optické součásti, jako zrcadla, záměrné plotenky nebo některé plochy čoček a hranolů, musí být opatřeny odraznými nebo interferenčními vrstvami, stupnicemi a záměrnými obrazci. Nanášení těchto vrstev nebo vytváření záměrných obrazců si vyžaduje speciální technologie.

Z toho důvodu bude celá látka rozdělena do tří hlavních částí:

V první části budou probrány materiály používané pro výrobu optických součástí a technologie výroby těchto materiálů.

V druhé části, která tvoří hlavní náplň těchto přednášek, bude čtenář seznámen s vlastní technologií opracování optického skla, krystalů a organického skla.

V třetí části budou pak uvedeny speciální technologie zpracování hotových optických součástí.

A) První část

POVAHA A VLASTNOSTI OPTICKÉHO SKLA, PŘIROZENÝCH I UMĚLÝCH KRYSTALŮ, ORGANICKÉHO SKLA A TECHNOLOGIE JEJICH VÝROBY

2. Historie skla

Jednoduché čočky používané jako brýlová skla nebo lupy byly známé již ve starověku. Ještě dříve před tím, než si lidé osvojili výrobu skla, byly používány k výrobě těchto jednoduchých optických součástí přirozené krystaly. Např. Asyřané a Babyloňané používali k výrobě čoček krystalického křemene. Jako obráběcích nástrojů používali kamenů majících vypuklý nebo dutý tvar a jako brusného materiálu písku různé zrnitosti.

Výrobě jednoduchých optických součástí ze skla předcházelo velmi dlouhé období, ve kterém probíhal vývoj výroby skla. Již 4.000 až 5.000 let před naším letopočtem vyráběli lidé skleněné nádobí a skleněné ozdoby. Složení tohoto skla bylo velmi jednoduché; kmen byl složen z křemenného písku, sody a vápna. Toto sklo bylo málo průhledné a obsahovalo velmi mnoho vnitřních defektů.

První čočky byly používány již dříve před naším letopočtem, jak to potvrzují vykopávky v městech Pompeji a Herkulaneu.

Výroba skleněných zrcadel a brýlových skel v Benátkách ve 13. století, která prakticky dosáhla úrovně dnešních výrobků, patří k nejvýznamnějším pokrokům tehdejší doby.

Na další rozvoj optiky, výroby optického skla a technologie jeho opracování měly vliv v 16. století především práce astronomů, jako Galilea, Keplera, Newtona a jiných. V 17. století se postupně přechází od ruční výroby skla k výrobě stroj-

ní. V téže době objevují se snahy sestrojit achromatické optické soustavy. Tyto snahy měly další podstatný vliv na rozvoj výroby skla. K rozřešení těchto problémů přispěli především L. Euler a M.V. Lomonosov. Euler v roce 1797 dokázal možnost sestavení achromatických soustav za předpokladu použití skel o různých optických konstantách. Tak vznikl požadavek skla o větším indexu lomu. V této oblasti pracoval Lomonosov, který v r. 1749 provedl ve svých leningradských laboratořích obrovské množství taveb skel různých složení.

První achromatický objektiv byl sestrojen a zhotoven anglickým optikem D. Dollondem v r. 1758.

V letech 1762 - 63 vyrobil Lomonosov sklo s velkým indexem lomu, zvané flintové, tím, že do jeho kmene zavedl kysličník olovnatý.

Švýcarovi Guinandovi se podařilo za spolupráce známého optika Fraunhofera téměř po třicetileté úsilovné práci vypracovat v r. 1811 metodu tavení vysokokvalitního optického skla v pánevích o obsahu 400 kg. Tím byly položeny základy k výrobě optického skla. Potom již počaly vznikat první průmyslové výrobní optického skla. Tak v roce 1827 vzniká ve Francii fa Parra - Mantois, v r. 1848 v Anglii fa Chance a v r. 1881 v Německu fa Schott. Tento německý závod pracoval v těsné spolupráci s jenskou universitou, kde působil významný německý optik E. Abbe. Z této spolupráce vznikla velmi široká řada nových optických skel tím, že do jejich kmene byly zavedeny nové prvky. Tento závod zajišťoval především výrobu jenského závodu C. Zeiss.

V téže době v carském Rusku byly jen malé optické závody, které byly vesměs filiálkami některých zahraničních firem, jako Zeiss, Goertz apod. To mělo přirozeně nepříznivý vliv na rozvoj optiky v carském Rusku. Projevilo se to i v Rusko-Japonské válce, kdy ruská armáda neměla ani optických zaměřovačů ani dálkoměrů.

Smutné zkušenosti získané v této válce pomohly několika nadšeným pracovníkům optického průmyslu, kterým se v r. 1905 podařilo organizovat v Leningradě první optickou výrobu v carském Rusku. Avšak ještě v průběhu první světové války

se projevovaly silně vlivy závislosti Ruska na dovozu optických přístrojů z jiných zemí. Proto již v roce 1914 se začala organizovat výroba optického skla. Avšak teprve říjnová revoluce vytvořila obrat ve vývoji optického průmyslu v dnešním SSSR. V roce 1918 vzniká v Leningradě pod vedením akademika D.S. Roždestvenského výzkumný optický ústav GOI (Gosudarstvennyj Optičeskij Institut) a závod na výrobu optického skla LENZOS (Leningradskij zavod optičeskovo stekla). Vzestup optického průmyslu v SSSR byl tak rychlý, že již v r. 1928 se stal SSSR nezávislý na dovozu optického skla ze zahraničí a na konci první pětiletky nezávislý na dovozu veškerých optických přístrojů.

Optický průmysl v ČSSR patří prakticky k nejmladším průmyslovým oborům. První optické přístroje byly vyráběny v Praze řeou Fríč a po první světové válce u fy Srb a Štys. Tato výroba se však prováděla po živnostensku a opírala se o nevelkou technickou základnu. Teprve v letech 1933 se ujala optické výroby bývalá Zbrojovka Brno v přerovské Optikotechně, kde se začala budovat poměrně rozsáhlá technická základna. Tato výroba, stejně jako výroba ve zmíněných pražských závodech, byla odkázána na dovoz optického skla, které se dováželo především z Francie od fy Parra-Mantois. Poměrně rychlý rozvoj československého optického průmyslu byl zabrzděn druhou světovou válkou. Po osvobození naší vlasti Rudou armádou nastává i pro optický průmysl nová éra. Již v roce 1947 začíná se ve Výzkumném ústavu sklářském v Hradci Králové s výzkumem a vývojem optického skla. Zásluhou řady nadšených pracovníků tohoto ústavu, z nichž nutno jmenovat s. prof. Dr. inž. Fanderlíka, s. inž. Kocíka, s. inž. Nebřenského CsC, inž. V. Süssera a pracovníka nového závodu V. Dvořáka a jiné, zahajuje se v ČSSR poměrně velmi rychle výroba optického skla v prvním závodě. Tím se zařadila i ČSSR mezi několik málo evropských států, které si vyrábí optické sklo.

3. Skelný stav

Jak to vyplývá z historického přehledu o vývoji skla, patří sklo k nejstarším hmotám, které dovedl člověk uměle připravit již před pěti až šesti tisíci lety.

Přes tuto dlouhou tradici výroby skla je struktura skla ještě dnes velmi málo známa. Je to způsobeno především tím, že sklo je hmota, která se nachází ve zvláštním stavu, který se liší od krystalických tuhých látek a který se spíše podobá stavu kapalin, od nichž se sklo zase odlišuje tím, že je za normální teploty tuhé a má určitou tvrdost a pružnost.

Věsimněme si proto blíže skelného stavu.

Tuhá látka může být krystalická nebo amorfní. Krystalická tuhá látka je charakterizována pravidelným a souměrným uspořádáním iontů, atomů nebo molekul, které se periodicky opakuje v celém rozsahu uvažované látky. Tato pravidelná struktura se nazývá prostorovou mřížkou. Částice tvořící krystalickou látku jsou umístěny v úzlech této mřížky. Přímým důsledkem pravidelné struktury krystalických tuhých látek je jejich anisotropie, která se projevuje tím, že vlastnosti krystalických látek jsou závislé na směru, ve kterém je uvažujeme. Např. světlo se šíří v různých směrech různou rychlostí.

Existenci prostorové mřížky v krystalické látce je možno dokázat roentgenovou strukturní analýzou. Tato metoda je založena na schopnosti roentgenových paprsků pronikat do prostorové mřížky krystalických látek a odrážet se na jejich úzlech. Paprsky, odrážené na jednotlivých úzlech nebo jejich rovinách, konají různé dráhy a mohou spolu proto interferovat. Značí-li na obr. 3.1 AE čelo vlny dopadajících paprsků a ATB čelo vlny odražených paprsků, pak dráhový rozdíl Δ paprsků II' a 22' je dán vztahem

$$\Delta = 2 b \cdot \sin \alpha , \quad (3.1)$$

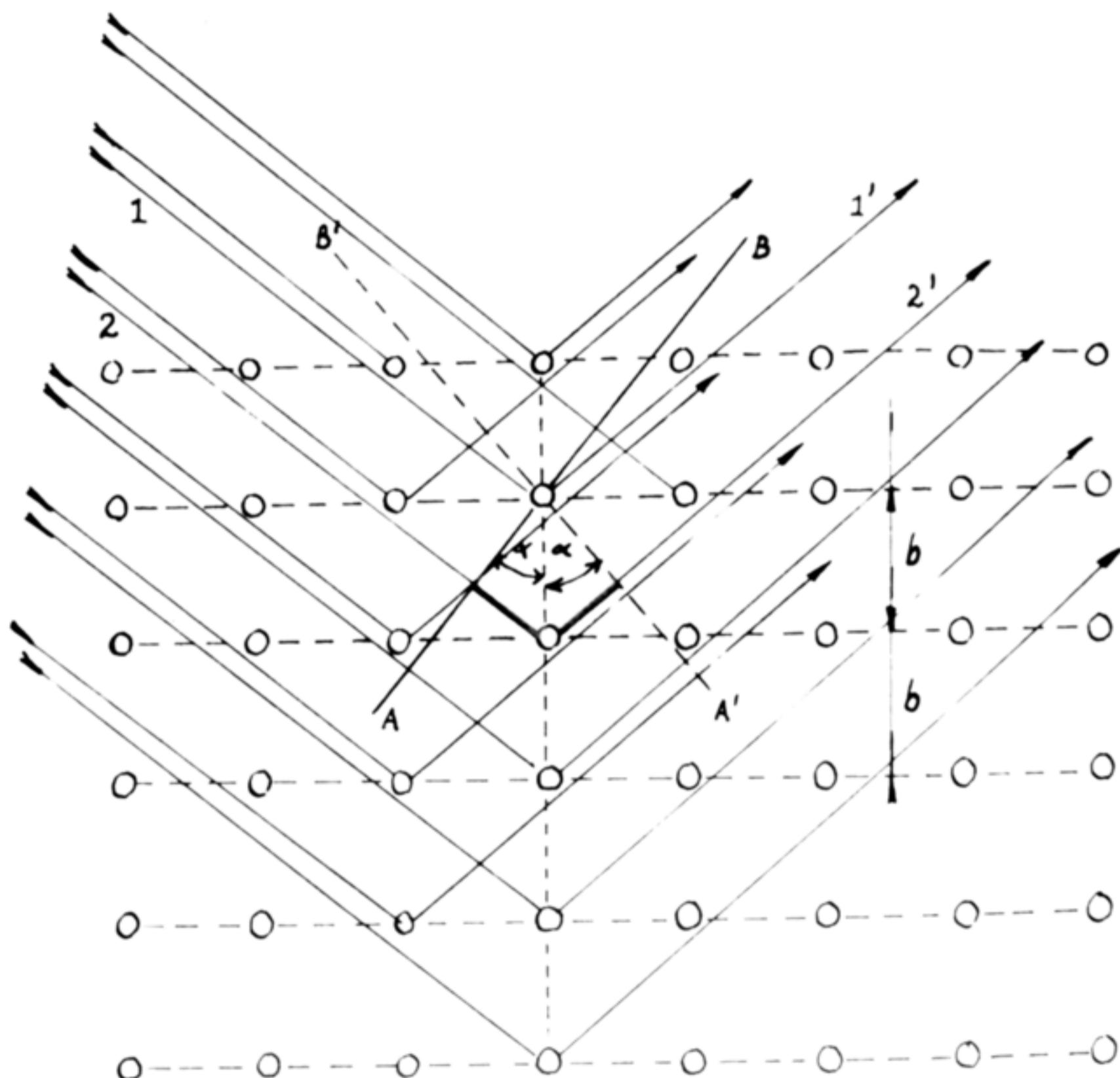
kde b značí vzdálenost rovin úzlů uvažované mřížky. Paprsky II' a 22' dají vznik interferenčnímu maximu, bude-li splněna podmínka

$$\Delta = k \cdot \lambda$$

nebo

$$2b \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda, \quad (3.2)$$

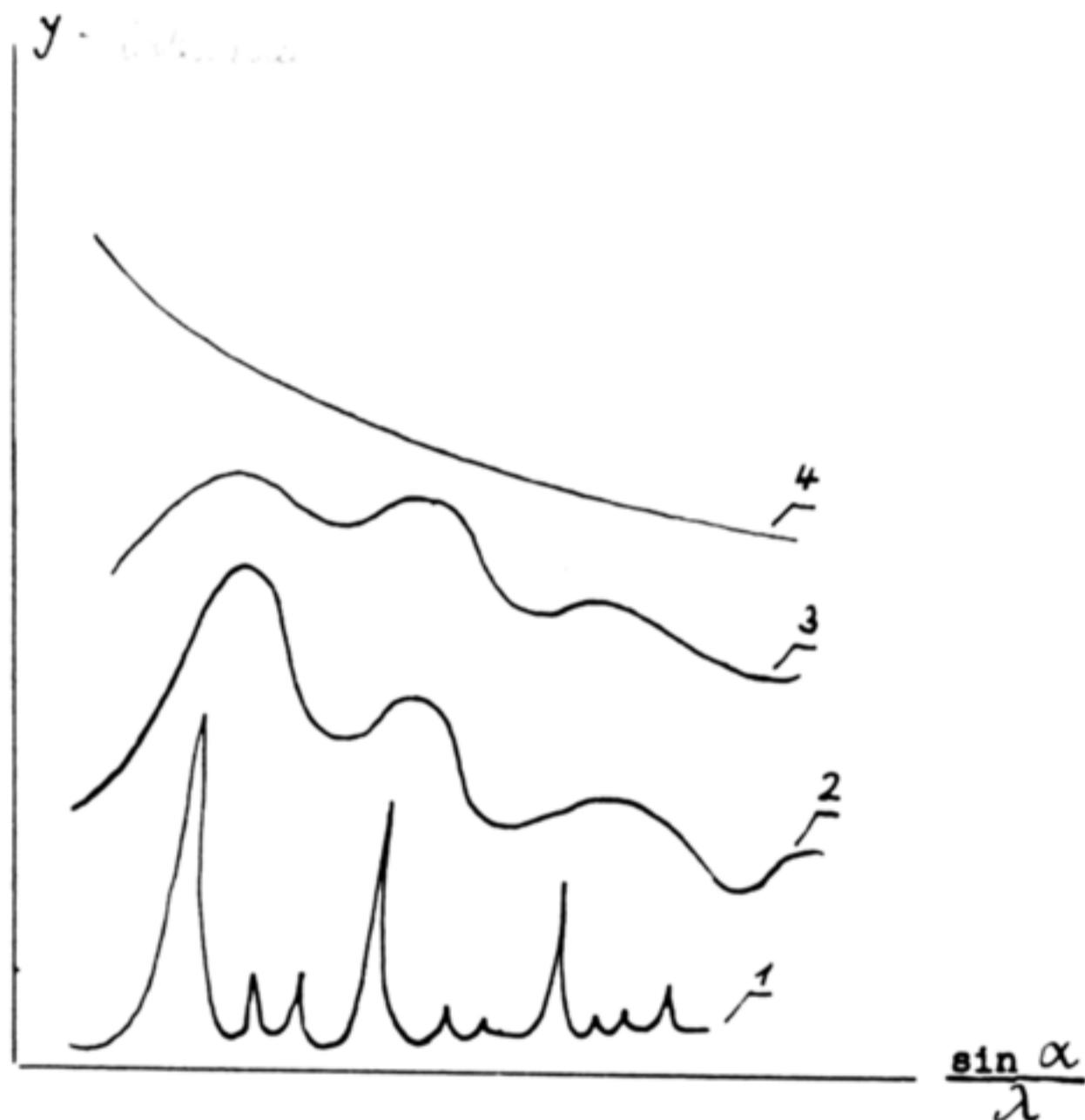
kde k značí celé číslo a λ vlnovou délku příslušných paprsků.



Obr. 3.1

Ze vztahu (3.2) je zřejmé, že intenzita odražených paprsků závisí na dopadu paprsků, tj. na úhlu α a na konstantě mřížky b.

Na následujícím obrázku 3.2 je znázorněna závislost intenzity odražených paprsků na úhlu α (přesně na $\frac{\sin \alpha}{\lambda}$) pro čtyři různé látky: krystalickou (křivka 1), amorfni (křivka 2), kapalinu (křivka 3) a plyn (křivka 4). Z tohoto grafu je vidět, že křivky (1), (2) a (3) se vyznačují podružnými maximy a minimy, která jsou pro amorfni látky a kapaliny méně výrazná než je tomu u krystalických tuhých látek.



Obr. 3.2. Křivky závislosti intenzity odražených roentgenových paprsků v různých prostředích.

Obdoba průběhu těchto křivek v případě krystalických, amorfních a kapalných látek nasvědčuje, že stavba těchto tří látek je obdobná. Rozplynutí jednotlivých maxim v případě amorfních a kapalných látek ukazuje, že jejich struktura je méně uspořádaná než je tomu u krystalů.

Z toho lze usuzovat, že v tuhých amorfních a kapalných látkách neexistuje pravidelná spojitá prostorová mřížka, že však tyto látky obsahují malé, pravidelně uspořádané útvary skupin atomů nebo iontů, které však nejsou v celé hmotě pra-

videlně, souměrně a periodicky seskupeny. Mluvíme proto o symetrii (pravidelnosti) na malou vzdálenost a nesymetrii (nepravidelnosti) na velkou vzdálenost (blízký pořádek a vzdálený nepořádek).

Na základě těchto studií se vytvořily dvě hypotézy o stavbě kapalin, které se staly podkladem pro vysvětlení skelného stavu.

① Podle první hypotézy je kapalina tvořena obrovským počtem velmi malých, silně deformovaných krystalitů. To znamená, že tato domněnka vyzvedává krystaličnost kapalin a jejich nestejnорodost.

② Podle druhé hypotézy je stavba kapalin charakterizována spojitou nepravidelnou prostorovou mřížkou, ve které existuje pouze tzv. "blízký pořádek" v rozložení jednotlivých částic, tj. kolem každé částice kapaliny jsou v nejbližším okolí uspořádány ostatní částice zcela pravidelně. Avšak již ve vzdálosti 10 - 20 Å tento pořádek mizí, takže z hlediska statistického se kapalina jeví jako neuspořádaná a je proto stejnорodá ve všech směrech.

Na základě těchto představ je možno říci, že sklo je typickou tuhou amorfní látkou. Studium jeho vlastností ukazuje, že se podobá krystalickým tuhým látkám i kapalinám. S krytaly má sklo společné některé vlastnosti, jako tvrdost, pevnost, stálý objem a tvar, malou tepelnou roztaživost a kapalinám se podobá vnitřní stavbou.

Ve skelném stavu se nachází mnoho láttek přirozených nebo uměle vyrobených. Ke skelným látkám vzniklým přirozenou cestou patří sopečná magma, pemza, vltaviny, obsidián, některé smoly, jako janter, kopal, šelak apod. Ke sklům vyrobeným uměle patří přechlazené roztoky obsahující kysličníky křemíku, bóru, fosforu, alkalických kovů apod.

Do skelného stavu je možno převést i některé prvky, jako síru, selen, fosfor.

Z uvedeného je vidět, že látky nacházející se ve skelném stavu tvoří poměrně rozsáhlou řadu. Bylo proto nutno skelný stav přesněji definovat. Podle terminologické komise Akademie věd SSSR se sklo definuje takto:

Sklem se nazývá každá tuhá amorfní látka, která vznikla přechlazením kapaliny, nezávisle na jejím chemickém složení a teplotní oblasti tuhnutí, a která se vyznačuje postupně rostoucí viskositou, mechanickými vlastnostmi tuhých látek, při čemž přechod od kapalného stavu do skelného stavu je zvratný.

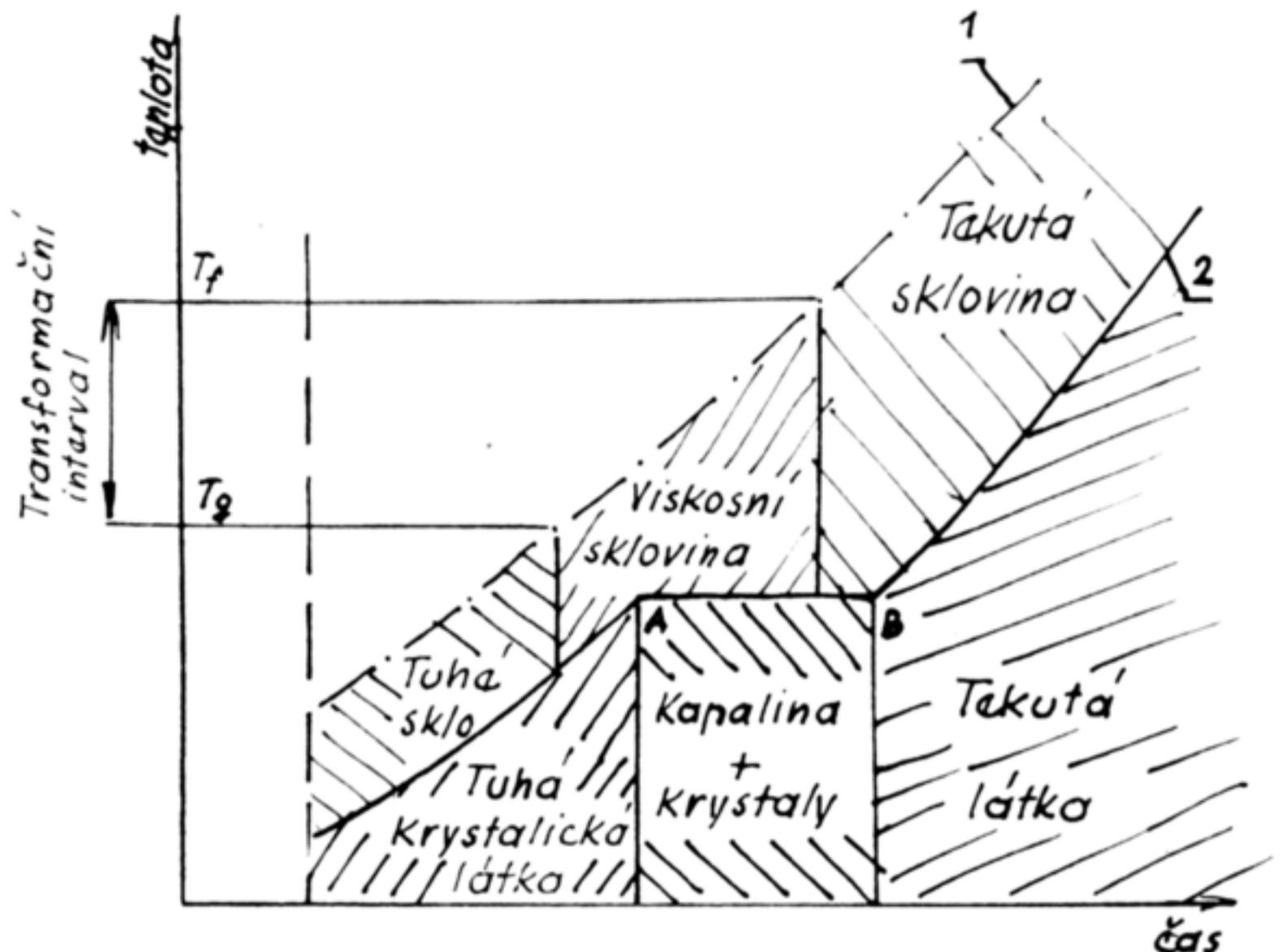
Při dostatečně silném ochlazení tavenin dochází obyčejně ke krystalizaci. Provede-li se však ochlazení roztoku podle určitého režimu až pod teplotu krystalizace, pak ke krystalizaci nedochází. Říkáme, že příslušná látka je přechlazena.

Během ochlazování viskositu roztoku postupně vzrůstá a nabývá poměrně vysokých hodnot řádu 10^{13} poise, při čemž látka postupně ztrácí vlastnosti kapalin a stává se křehkou a přejde do skelného stavu.

Nezávisle na chemickém složení se každé sklo vyznačuje následujícími vlastnostmi:

- a) Sklo je isotropní, tj. má ve všech směrech stejné vlastnosti.
- b) Sklo nemá určitý bod tání.

U krystalických látek, které se vyznačují pravidelnou mřížkou, je pevnost vazeb všech molekul stejná v rozsahu celé mřížky. Při nahřátí látky se pevnost vazby naruší současně pro všechny molekuly při dosažení určité teploty. Znázorníme-li průběh teploty při nahřívání krystalické látky v závislosti na čase, projeví se narušení vazebních sil teplotní prodlevou, jak je to naznačeno na obr. 3.3 úsečkou AB na křivce (2). Tato prodleva odpovídá časovému intervalu, ve kterém vedle kapaliny existují v nahřívané látce současně i krystaly. Po roztavení všech krystalů počne teplota opět stoupat. Na rozdíl od krystalických látek neprobíhá tavení skla při určité teplotě, nýbrž v určitém teplotním intervalu, jak je to patrné z křivky (1) na obr. 3.3. V průběhu nahřívání ztrácí sklo postupně křehkost, stává se viskozním až počne téci a přejde v tekutou sklovinu. Interval teplot, od teploty T_g , při které sklo počne ztráct křehkost, až do teploty T_f , při které přejde sklo do tekutého stavu se nazývá transformačním intervalem.



Obr. 3.3. Křivky průběhu teploty při tavení skla (1) a krystalické látky (2).

- c) Při sklotvorném tuhnutí látky se mění fyzikální vlastnosti látky spojité a nikoliv skokem, jak je tomu v případě většiny vlastností u krystalických látek.

4. Některé názory na skelný stav

a) Názory G. Tammana

Gustav Tamman považuje látku ve skelném stavu za určitý druh stavu přechlazené kapaliny, u níž při přechlazení nedošlo ke krystalizaci.

Podle Tammana je převedení taveniny do skelného stavu podmíněno dvěma faktory - nukleační a lineární krystalizační rychlostí. Nukleační rychlosť udává počet krystalizačních zárodků vznikajících v jednotce hmoty za jednotku času a lineární rychlosť růst krystalů z krystalizačních zárodků. Je-li při ochlazování tavenin dodržován takový režim, že ka-

palina probíhá co nejrychleji teplotami, při kterých nabývají tyto rychlosti vysokých hodnot, tím snadněji se převede tavenina do skelného stavu.

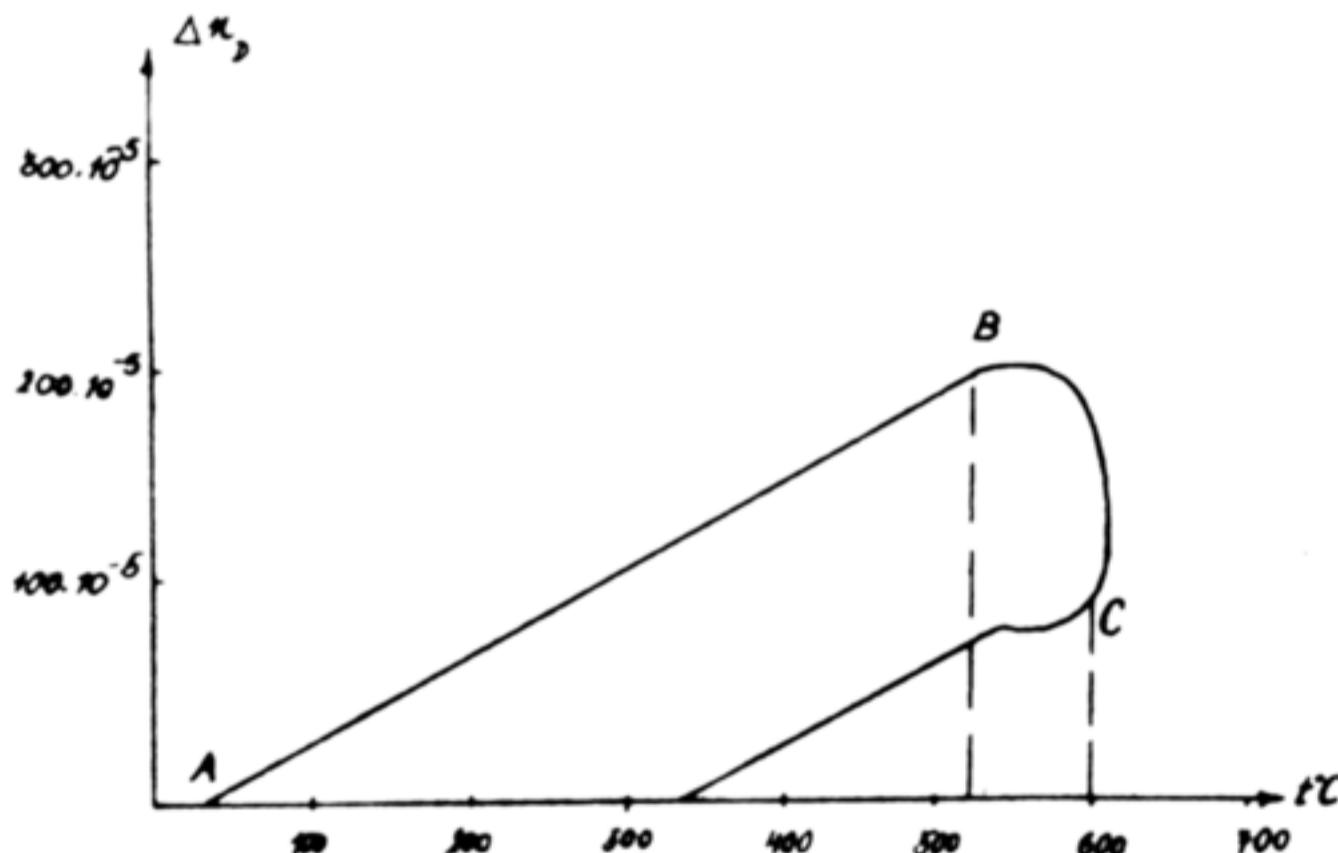
Tamman zjistil, že v transformačním intervalu, při teplotách nižších než je teplota tání krystalické formy příslušné látky, dochází k náhlým změnám vlastností skla. Tamman vysvětloval tyto náhlé změny přechodem molekul skla do rotačního pohybu, který je obdobný pohybu molekul kapalných a plynných látek, Tím se podle Tammana blíží skelný stav více stavu kapalnému a plynnému.

Tamman dále zjistil, že specifický objem skla je vždy větší než specifický objem příslušného krystalu a z toho usoudil na nepravidelné uspořádání skla.

b) Názory A.A. Leběděva

Krystallizace

V roce 1921 studoval v Leningradě akademik A.A. Lebeděv závislost indexu lomu skla na teplotě a zjistil, že při zvyšování teploty v oblasti do 520°C roste index lomu skla prakticky lineárně, jak je to patrno z grafického znázornění na obr. 4.1 (úsečka AB). Při dalším zvyšování teploty nad 520°C v intervalu do 600°C index lomu skla prudce klesá (úsečka BC).



Obr. 4.1. Závislost indexu lomu skla na teplotě.

A.A. Lebeděv dále zjistil, že při ochlazení skla zahřátého do 520°C se index lomu vráti k původní hodnotě, zatím co při ochlazení skla zahřátého nad 520° do 600°C zůstává index lomu na nižších hodnotách. Zahřátí a následující ochlazení skla nad teplotu 600°C nevede k dalším změnám indexu lomu. Protože A.A. Lebeděv prováděl svá studia na sklech, která obsahovala značné množství kysličníku křemičitého, který může existovat v řadě krystalických modifikací, vysvětloval změny indexu lomu v uvedených teplotních intervalech přechodem alfa- na beta-křemen a obráceně.

Na základě těchto studií předpokládal A.A. Lebeděv ve skle krystality o určitém chemickém složení. Přitom se domníval, že uspořádání krystalitů je nepravidelné a že vlastně tyto krystality jsou v podstatě jakési zárodečné krystaly, které jsou od sebe odděleny hmotou s menší uspořádaností.

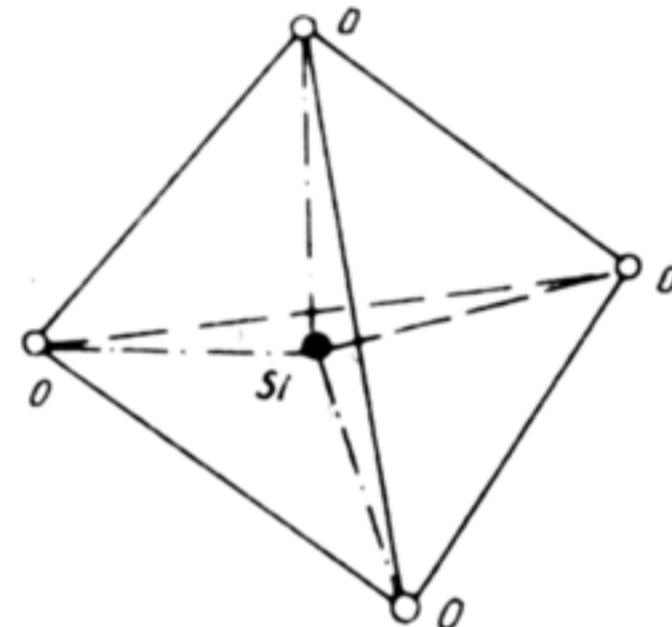
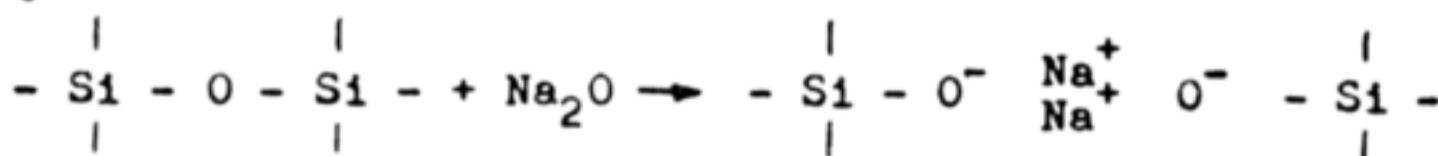
Je tedy možno říci, že podle Lebeděva je skelný stav obdobný nedokonale vyvinutému krystalickému stavu.

Názory Lebeděvovy podepřeli další leningradští pracovníci N.N. Valenkov a E.A. Poraj - Košič výsledky svých roentgenografických studií. Našli u skel, která byla delší dobu udržována na teplotě blízké teplotě měknutí, místo plochých maxim, která jsou charakteristická pro amorfni látky, výrazná maxima typická pro krystalické látky.

c) Názory Zachariassenovy

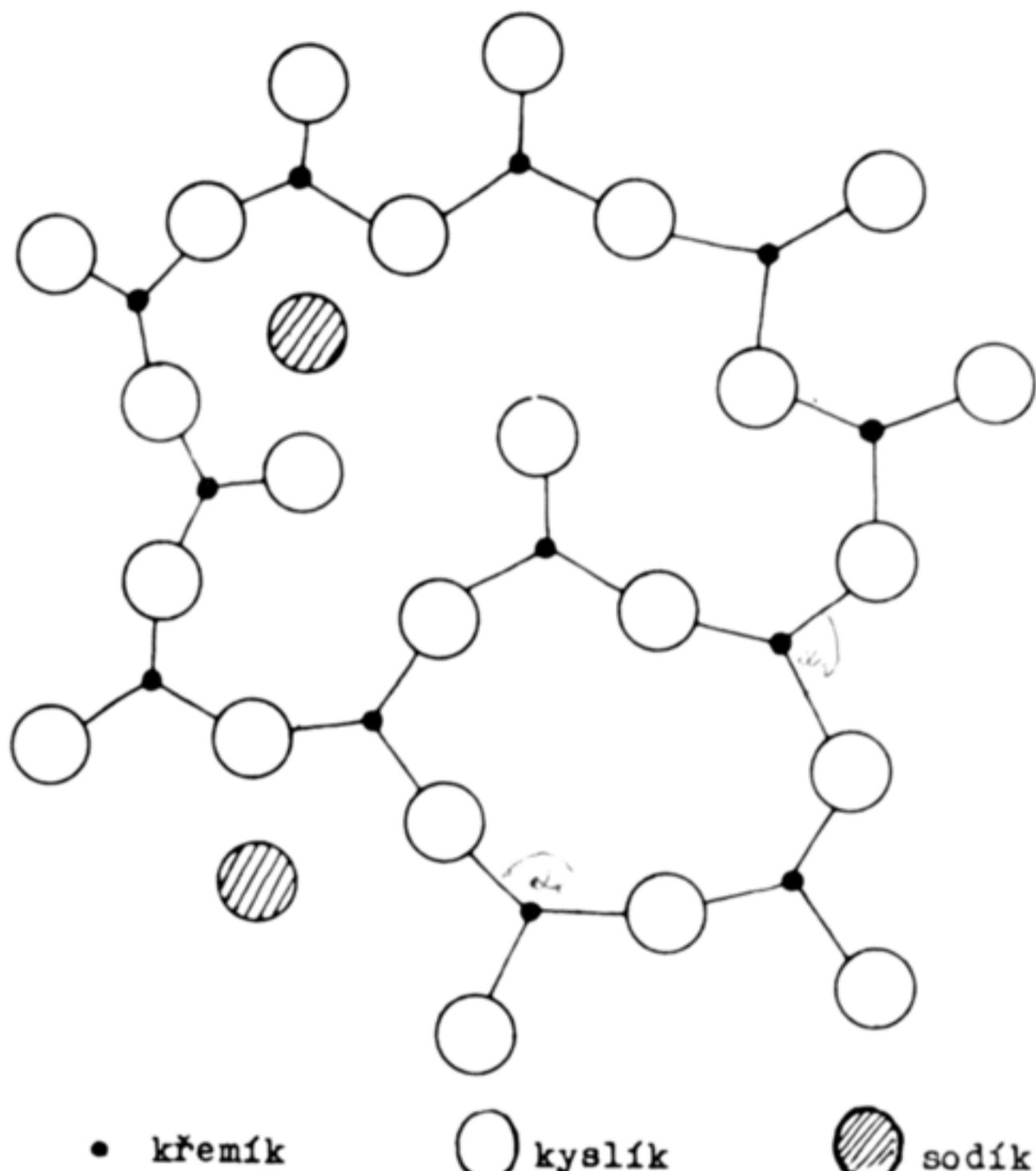
Zachariassen je tvůrcem tzv. teorie spojité nepravidelné prostorové mřížky. Podle této teorie, vyslovené v r. 1932, je sklo považováno za typickou amorfni látku, jejíž mřížka se nevyznačuje takovou periodičností a souměrností v rozložení strukturních prvků, jak je tomu u krystalů. Jestliže je v krystalové mřížce každý strukturní prvek zákonitě orientován vzhledem ke druhému, pak ve skle existuje jakési pravidelnost ve vzájemné orientaci částic pouze v malých vzdálenostech, tj. v samostatných strukturních prvcích (polyedrech). Tomuto uspořádání proto říká Zachariassen "blízký pořádek".

K tomuto názoru došel Zachariasen na základě roentgenografických studií, při kterých zjistil rozdíl mezi krystalickými a skelnými křemičitany a boritany. Příčinu těchto rozdílů hledal Zachariasen v nedokonale souměrném a periodickém uspořádání látek ve skelném stavu. Zatím co Tamman hledal tu to nešouměrnost v měřítku molekul a Lebeděv v měřítku krystallitů, Zachariasen hledal příčinu v nepravidelnosti základních strukturních prvků, tj. polyedrů (u křemíku jsou to tetraedry, u bóru trojúhelníky nebo tetraedry), které jsou tvořeny ionty kyslíků uzavírajícími, tj. koordinujícími základní pozitivní iont křemíku, bóru apod. Podle Zachariasena, který pracoval jako mineralog, je krystalová mřížka tvořena těmito tetraedry, které se spojují tak, že kyslíky, ležící v rozích tetraedru, jsou společně více zmíněným pozitivním iontem Si nebo B. Přitom nejméně tři rohy každého tetraedru musí být spojeny s jiným tetraedrem. To znamená, že jeden roh každého tetraedru může být volný. Tato takto roztržená vazba je překlenuta tím, že se do skla vnese kovový kysličník, např. Na_2O apod. Toto přemostění se obecně vyznačuje takto:



Obr.4.2
Strukturní tetraedr skla.

Tento kovový kysličník se pak umísťuje v mezerách prostorové sítě, nebo lépe řečeno, kolem kovcového iontu, vneseného do skla, se vytvoří taková síť koordinací, že vznikne dutina, ve které je tento iont uzavřen, jak je to patrno z obr. 4.3. Na tomto obrázku je znázorněna struktura sodno křemičitého skla dvourozměrným zobrazením, takže v tomto zobrazení jsou zakresleny pro každý iont Si pouze tři ionty kyslíku. Nepravidelnost ve struktuře skla jeví se pak tak, že u skel jsou úhly, tvořené jednotlivými vazebními směry mezi kyslíky a



Obr. 4.3. Plošné znázornění struktury sodnokřemičitého skla.

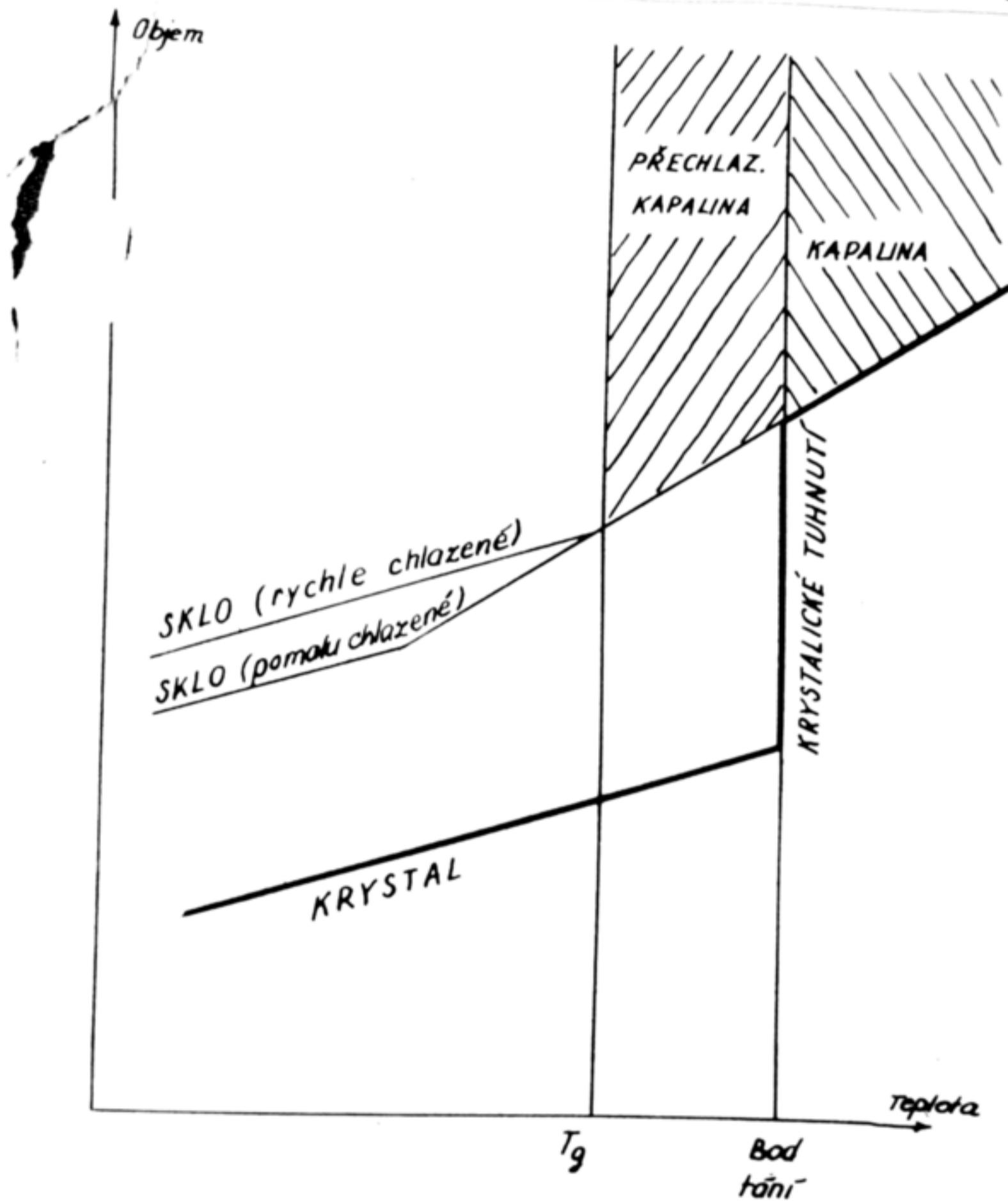
ionty křemíku, různé, zatím co u krystalů jsou stejné.

d) Názory A.A. Appena

Podle A.A. Appena je typickou charakteristikou struktury skla nepravidelně uspořádaná mřížka z kationtů B^{3+} , Si^{4+} , P^{3+} , P^{5+} , a kyslíkových iontů, přičemž stavba mřížky je určena tzv. koordinačními čísly kationtů, tj. počtem iontů kyslíku, které obklopují daný kationt. Změna koordinačního čísla způsobí náhlé změny chemickofyzikálních vlastností skla. Appen nevylučuje takové koordinace, při kterých by ve skle nemohly existovat oblasti určitého chemického složení. Avšak Appen předpokládá, že vliv takových oblastí určitého chemického složení na vlastnosti skla je velmi malý v porovnání s vlivy vyvolanými změnou koordinačního čísla.

e) Závěr

Novější názory o struktuře skla se spíše odklánějí od původního Zachariassenova názoru, alespoň v tom, že neuspořádanost spočívá v základních strukturních útvarech, tj. v tetraedrech a že ve skle neexistují větší útvary, nýbrž naopak předpokládají existenci větších útvarů, které se různě nazývají, jako polymery, struktony, vitrony, kruhy, řetězce apod. Tyto útvary jsou pak příčinou velké viskozity sklovin a způsobují, že při běžném rychlém ochlazení taveniny nedochází ke krysta-



Obr. 4.4 Diagram chování skla

lizaci, ale k přechlazení do stavu přechlazené kapaliny a z ní pak do skelného stavu.

K těmto uzávěrům dospěli i pracovníci Státního výzkumného ústavu sklářského v Hradci Králové, zvláště prof. Dr Inž. M. Fanderlík. Měřením indexu lomu v závislosti na teplotě bylo v tomto ústavě zjištěno, že od laboratorní teploty až po teplotu odpovídající transformačnímu intervalu index lomu skla stoupá, zatím co v transformačním intervalu začne prudce klesat. Avšak na rozdíl od V. Winterové bylo v Hradci Králové zjištěno, že při teplotách nad teploty transformačního intervalu nedochází k obratu, tj. index lomu dále klesá tak jak to odpovídá kapalinám. Tato zjištění pak spíše potvrzuje řetězcovitá nebo i kruhovitá uspořádání strukturních prvků ve skle.

Chování skla z hlediska jeho struktury je možno charakterizovat diagramem podle obr. 4.4. Podle tohoto diagramu existuje sklo pouze pod transformačním intervalom, kdežto nad ním až po bod tání existuje pouze přechlazená tavenina.

5. Skla používaná v optické výrobě

Nepřihlížíme-li k organickým sklům, je možno rozdělit skla uměle vyrobená a používaná v optické výrobě na tři hlavní skupiny:

- a) bezbarvá optická skla
- b) filtrovaná optická skla
- c) technická skla.

Všechna tato skla se vyznačují řadou vlastností, z nichž možno vyzvednou především:

- světelnou propustnost (třeba i v omezeném spektrálním oboru),
- stejnorodost,
- tvrdost při normální teplotě,
- křehkost,
- malou elektrickou a tepelnou vodivost,

- odolnost proti vlivům vody, vzduchu a jiných chemických látek apod.

Vzhledem k tomu, že doposud není známo strukturně-chemické složení skla, vyjadřuje se zatím složení určitého skla procentuálnimi váhovými obsahy jednotlivých kysličníků, jako např.

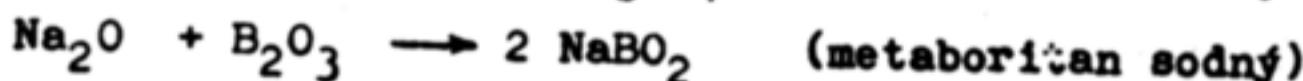
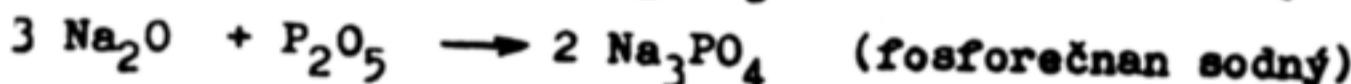
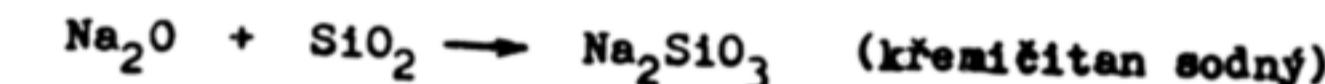
75% SiO_2 ; 15% Na_2O a 10% CaO .

Kysličníky používané k výrobě optického skla se zavádí do příslušných kmenů přímo nebo ve formě různých sloučenin, ze kterých se příslušné kysličníky uvolňují chemickými reakcemi při vysokých teplotách v průběhu tavení skla. Nejběžnější kysličníky a příslušné suroviny, používané při výrobě optických skel, jsou uvedeny v následující tabulce 5.1. Jak je z této tabulky vidět, je možno tyto kysličníky rozdělit takto:

- a) kysličníky sklotvorné
- b) kysličníky alkálií (taviva)
- c) kysličníky dvoj- a vícemocných kovů
- d) anionty.

Ke skupině c) se v novější době řadí i četné jiné kysličníky, mezi nimi i některé vzácnější, jako BeO , SrO , ThO_2 , Ta_2O_5 , CeO_2 , ZrO_2 , La_2O_3 a jiné.

Sklotvorné kysličníky s ostatními se navzájem spojují a vytváří soli, jako křemičitany, boritany, fosforečnany apod.:



Podle povahy sklotvorného kysličníku, který hraje v otázce struktury skla hlavní úlohu, tj. vytváří prvky prostorové mřížky, se dělí optická skla na:

- a) křemičitá
- b) boritokřemičitá
- c) boritá
- d) fosforečná.

V poslední době byla vyvinuta též skla hlinitá.

Tab. 5.1

Skupina	Kysličník	Surovina
sklotvorné kysličníky	SiO_2	křemičitý písek, mletý křemen
	B_2O_3	kyselina boritá H_3BO_3 ; borax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
	P_2O_5	kyselina fosforečná H_3PO_4 ; fosforečnany
kysličníky alkálií	Li_2O	uhličitan lithný Li_2CO_3
	Na_2O	soda Na_2CO_3 ; ledek sodný NaNO_3 ; borax
	K_2O	potaš K_2CO_3 ; ledek draselný KNO_3
kysličníky více mocných kovů	CaO	vápenec CaCO_3 ; dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	MgO	uhličitan hořečnatý MgCO_3 ; dolomit
	ZnO	kysličník zinečnatý ZnO
	, PbO	suřík Pb_3O_4 ; klejt PbO
	BaO	uhličitan barnatý BaCO_3 ; dusičnan barnatý $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$
	CdO	uhličitan kademnatý CdCO_3
	Al_2O_3	hydrát hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$; kaolin $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
	TiO_2	kysličník titaničitý TiO_2
	ZrO_2	kysličník zirkoničitý ZrO_2
Anionty	CeO_2	kysličník ceričitý CeO_2
	F	kazivec CaF_2 ; fluorokřemičitan sodný Na_2SiF_6 ; kyselý fluorid draselný KHF_2

Fyzikálně-chemické vlastnosti optických skel velmi závisí na chemickém složení skla. U většiny skel tvoří základní složku křemen SiO_2 . Tavením samotného křemene je možno získat velmi cenné sklo zv. křemenné sklo. Avšak toto sklo se taví při velmi vysoké teplotě kolem 1800°C . Proto výroba

Tabuľka 5.1

Skupina skla	Označenie skla	Index lomu n_d	ν_d	Složenie skloviny (váhová procenta)										AlF ₃					
				SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	ZnO	BaO	PbO	Sb ₂ O ₃	As ₂ O ₃	TlO ₂	KHP ₂	La ₂ O ₃	ThO ₂	
Korunová skla	K 5	1,5225	59,6	65,0	3,5	-	5,8	13,3	2,5	8,2	-	1,0	-	0,7	-	-	-	-	-
	BaK 1	1,5725	57,5	47,7	4,2	1,0	1,0	7,5	-	8,6	29,0	-	-	1,0	-	-	-	-	-
	BaK 2	1,5400	59,6	59,6	3,0	-	3,0	10,0	-	4,8	19,0	-	-	0,6	-	-	-	-	-
skla barnaté	BaK 4	1,5688	56,0	50,4	5,9	-	4,0	5,0	-	11,5	19,7	2,0	0,5	1,0	-	-	-	-	-
	TK 1	1,6102	56,5	40,1	5,7	2,5	-	-	-	8,5	42,2	0,5	-	0,5	-	-	-	-	-
	SK 4	1,6127	58,6	33,2	11,9	5,5	-	-	-	-	47,8	0,3	0,3	1,0	-	-	-	-	-
skla	SK 10	1,6228	56,9	30,6	11,7	5,0	0,1	-	-	2,0	48,2	0,7	0,8	1,0	-	-	-	-	-
	KF 1	1,5404	50,9	61,5	2,5	-	6,0	12,0	2,0	-	-	15,6	-	0,4	-	-	-	3,0	14,0
	KF 2	1,5263	51,0	66,7	-	-	15,9	-	-	3,5	-	12,9	-	1,0	-	-	-	-	-
skla flintové	KF 3	1,5145	54,7	70,0	-	1,5	16,6	-	-	5,0	-	3,5	0,5	1,0	1,2	1,2	-	-	-
	LP 1	1,5731	42,7	54,3	-	-	4,4	7,8	-	1,0	1,5	30,7	-	0,3	-	-	-	-	-
	LP 2	1,5892	41,0	50,1	1,0	-	4,4	7,9	-	-	2,7	33,6	-	0,3	-	-	-	-	-
skla	LP 7	1,5750	41,3	53,9	-	-	2,5	7,9	-	-	-	34,9	-	0,8	-	-	-	-	-
	F 4	1,6166	36,6	46,9	-	-	-	-	-	6,3	-	-	46,5	-	0,2	-	-	-	-
	F 8	1,5955	39,2	50,2	0,4	-	3,8	5,6	-	-	-	39,7	-	0,3	-	-	-	-	-
skla flintové	SP 2	1,6477	29,5	40,9	-	-	0,5	6,8	-	-	-	50,8	-	1,0	-	-	-	-	-
	SP 5	1,6727	32,2	38,7	-	-	1,5	3,9	-	-	-	55,6	-	0,3	-	-	-	-	-
	SP 6	1,8052	25,5	26,9	-	-	0,5	1,0	-	-	-	71,3	-	0,3	-	-	-	-	-
skla	SP 11	1,7847	25,7	29,2	-	-	2,5	0,5	-	-	-	63,3	-	0,5	4,0	-	-	-	-
	FK 5	1,4875	70,0	56,9	15,7	-	-	5,6	-	-	-	-	-	0,2	-	21,6	-	-	-
	FK 6	1,4453	68,0	47,2	13,5	-	-	-	-	-	-	-	-	32,5	-	-	-	6,5	-

součástí z taveného křemene je technologicky velmi obtížná a proto křemenné sklo našlo poměrně úzkou oblast použití. Přidáme-li ke křemeni jiný kysličník, tzv. tavivo, jako např. Na_2O , K_2O apod., sníží se poměrně značně teplota tavení. Avšak dvousložková skla obsahující vedle SiO_2 pouze kysličníky alkálií, jako Na_2O nebo K_2O nejsou chemicky stálá. Proto se musí do skloviny přidávat současně s Na_2O resp. K_2O též kysličníky dvou-, tří- nebo čtyřmocných prvků. Tyto kysličníky ovlivňují různým způsobem chemicko-fyzikální vlastnosti příslušných skel a je tedy možno jejich vhodnou kombinací sestavit skla předepsaných vlastností. Tabulka 5.1. (str.21) obsahuje několik příkladů složení některých druhů optických skel.

6. Bezbarvá optická skla

Bezbarvá optická skla se používají k výrobě většiny optických součástí přístrojů. Optické vlastnosti jednotlivých druhů optických skel jsou charakterizovány jejich optickými konstantami, k nimž patří především:

- a) index lomu
- b) střední disperse
- c) částečné disperse
- d) relativní částečné disperse
- e) Abbeovo číslo.

a) Index lomu se označuje n_λ , kde λ značí vlnovou délku, pro kterou je index měřen. Nejčastěji místo vlnové délky λ se připisuje k indexu lomu označení příslušné spektrální čáry, např. n_d , n_F , n_C apod.

Indexy lomu optických skel vyráběných ČSSR se měří pro následující vlnové délky, odpovídající spektrálním čarám výbojkové rtuťové, vodíkové nebo heliové.

Tabulka 6.1

Označení indexu lomu	Vlnová délka v m μ	Výbojka
n_g	435,8	Hg
n_F	486,1	H
n_e	546,1	Hg
n_d	587,6	He
n_C	650,3	H

Index lomu měří se podle použité metody s přesností jedničky na čtvrtém resp. pátém desetinném místě, např. $n_d = 1,5163$ nebo $n_C = 1,61504$.

Index lomu skla závisí především na chemickém složení skla a na jeho tepelném zpracování - chlazení.

b) Střední disperse optického skla je určena rozdílem indexů lomu pro vlnové délky odpovídající spektrálním čaram C a F v případě přístrojů používaných k subjektivnímu pozorování (jako jsou dalekohledy, mikroskopy a laboratorní přístroje) a rozdílem indexů lomu pro vlnové délky odpovídající spektrálním čaram g a d v případě fotografických objektivů. Tedy střední disperse značí rozdíly

$$\boxed{n_F - n_C} \quad \text{resp.} \quad \boxed{n_g - n_d}$$

c) Částečné disperse jsou charakterizovány rozdíly indexů lomu pro jiné vlnové délky, tedy rozdíly

$$n_F - n_d, \quad n_F - n_e, \quad n_g - n_F, \quad n_d - n_C.$$

d) Relativní částečné disperse jsou určeny poměry

$$\frac{n_F - n_d}{n_F - n_C}, \quad \frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}, \quad \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}, \quad \frac{n_d - n_C}{n_F - n_C}.$$

Částečné disperze se měří s přesností jednotky pátého desetinného místa, např.

$$n_F - n_C = 0,00824, \quad n_F - n_d = 0,00572$$

a relativní částečné disperze se udávají s přesností jednotky třetího desetinného místa, např.

$$\frac{n_F - n_d}{n_F - n_C} = 0,694, \text{ nebo} \quad \frac{n_F - n_d}{n_F - n_C} = 0,456.$$

e) Abbeovo číslo ν_d je charakterizováno poměrem

$$\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

a udává se s přesností jednotky prvního desetinného místa, např.

$$\nu_d = 63,6 \text{ nebo } \nu_d = 58,0.$$

Jednotlivé tavby téhož druhu skla vykazují přirozeně větší nebo menší odchylky od hodnot, které bývají uvedeny v příslušných katalozích optických skel vyráběných různými výrobci. Tyto odchylky jsou způsobeny jednak malými změnami chemického složení nebo malými změnami fyzikálního stavu skla. Z toho důvodu se rozdělují optická skla vyráběná v ČSSR a v SSSR podle odchylek indexu lomu od jmenovitých hodnot na čtyři kategorie.

Tabulka 6.2

Kategorie n_d	Odchylka indexu n_d
1	do $5 \cdot 10^{-4}$
2	do $7 \cdot 10^{-4}$
3	do $10 \cdot 10^{-4}$
4	do $20 \cdot 10^{-4}$

V katalogu optických skel vyráběných v ČSSR je u každého druhu skla uvedena kategorie, ve které bude sklo dodáno, neuvádě-li objednatele v objednávce výslově jinou kategorii.

Jednotlivé polotovary každého druhu skla mohou být dodávány jako celá várka nebo pouze jako určitá dávka (partie). To znamená, že v druhém případě může obsahovat dávka polotovary z různých várek, takže jejich index lomu může vykazovat větší rozdíly. Aby i přes to bylo možno tyto rozdíly snížit, rozděluje se sklo podle odchylek indexu lomu jednotlivých polotovarů v dávce (partii) na 6 tříd.

Tabulka 6.3

Třída n_d	Maximální rozdíl v n_d uvnitř jedné dávky (partie)
1	do $5 \cdot 10^{-5}$
2	do $10 \cdot 10^{-5}$
3	do $20 \cdot 10^{-5}$
4	do $50 \cdot 10^{-5}$
5	do $100 \cdot 10^{-5}$
6	přes $100 \cdot 10^{-5}$

V zásadě se dodávají československá optická skla určité kategorie ve třídě o jeden stupeň nižší než je stupeň kategorie. Např. optické sklo určitého druhu 2. kategorie se dodává ve 3. třídě.

Podle odchylek střední disperse $n_F - n_C$ od katalogových hodnot se rozdělují optická skla na 4 kategorie.
(Viz tab. 6.4.)

Podobně jako v případě indexu lomu jsou v katalogu čs. optických skel uváděny kategorie, ve kterých se normálně optické sklo dodává.

Tabulka 6.4

Kategorie $n_F - n_C$	Odchylka ($n_F - n_C$)
1	$5 \cdot 10^{-5}$
2	$7 \cdot 10^{-5}$
3	$10 \cdot 10^{-5}$
4	$20 \cdot 10^{-5}$

Podle odchylek střední disperse $n_F - n_C$, o které se mohou lišit jednotlivé polotovary určité dávky (partie), se čs. optická skla rozdělují do 4 tříd.

Tabulka 6.5

Třída podle $(n_F - n_C)$	Odchylka
1	do $1 \cdot 10^{-5}$
2	do $3 \cdot 10^{-5}$
3	do $10 \cdot 10^{-5}$
4	přes $10 \cdot 10^{-5}$

Není-li v objednávce jinak předepsáno, dodává se optické sklo 3. třídy.

Při nákupu skla od jiných zahraničních dodavatelů je nutno vždy v objednávce přesně vymezit přejímací podmínky, které zajišťují požadované hodnoty objednávaného optického skla.

7. Rozdělení optických skel podle jejich optických vlastností

Jednotlivé druhy optických skel se označují písmeny a číslicemi, např. K 2, F 3 nebo BaF 5 apod. Písmeny se označuje skupina, do které příslušný druh skla patří. Číslo uvedené za písmeny udává pořadové číslo příslušného druhu skla ve skupině. U optických skel československé výroby se uvádí za označením skupiny zlomek, jehož čitatel vyznačuje tři desetinná místa indexu lomu n_d a jehož jmenovatel vyznačuje Abbeovo číslo. Např. sklo TF 655/338 značí těžké (T) flintové (F) sklo o indexu lomu $n_d = 1,655$ a Abbeově čísle $\nu_d = 33,8$, nebo BaK 540/596 značí barnaté (Ba) korunové (K) sklo o indexu lomu $n_d = 1,540$ a $\nu_d = 59,6$.

Francouzská skla jsou označována písmeny A, B, ..., E a čtyřmístným číslem. Písmeno udává jednotky a první desetinné místo indexu lomu n_D podle následujícího přiřazení

A	$n_D = 1,4$	D	$n_D = 1,7$
B	$n_D = 1,5$	E	$n_D = 1,8$
C	$n_D = 1,6$		

První dvě čísla uvedená za písmenem udávají další dvě desetinná místa indexu lomu n_D a poslední dvě čísla Abbeovo číslo ν . Např. sklo A 7365 má index lomu $n_D = 1,473$ a $\nu = 65$, nebo sklo D 1130 má $n_D = 1,711$ a $\nu = 30$.

Prakticky všechna optická skla je možno rozdělit do dvou hlavních skupin, na skla korunová (označená K), která se vyznačuje malým indexem lomu n_D a velkým Abbeovým číslem ν a skla flintová (označovaná F), která jsou charakterizována velkým indexem lomu n_D a malým ν .

Přechod mezi těmito dvěma základními skupinami optických skel tvoří tzv. skla korunová - flintová (označovaná KF).

Korunová skla, stejně jako skla flintová se dělí dále na několik skupin. Korunová skla mající velký index lomu se nazývají těžká (označují se SK) a obráceně flintová skla, mající malý index lomu, se nazývají lehká (označují se LF).

Korunová i flintová skla obsahující větší procento barya se nazývají barnatá a označují se BaK resp. BaF, BaLF, BaSF.

Všechny uvedené skupiny skel obyčejně zahrnují v sobě takové druhy optických skel, které mají přibližně obdobné chemické složení a jejich optické konstanty leží v určitých vymezených intervalech (oblastech).

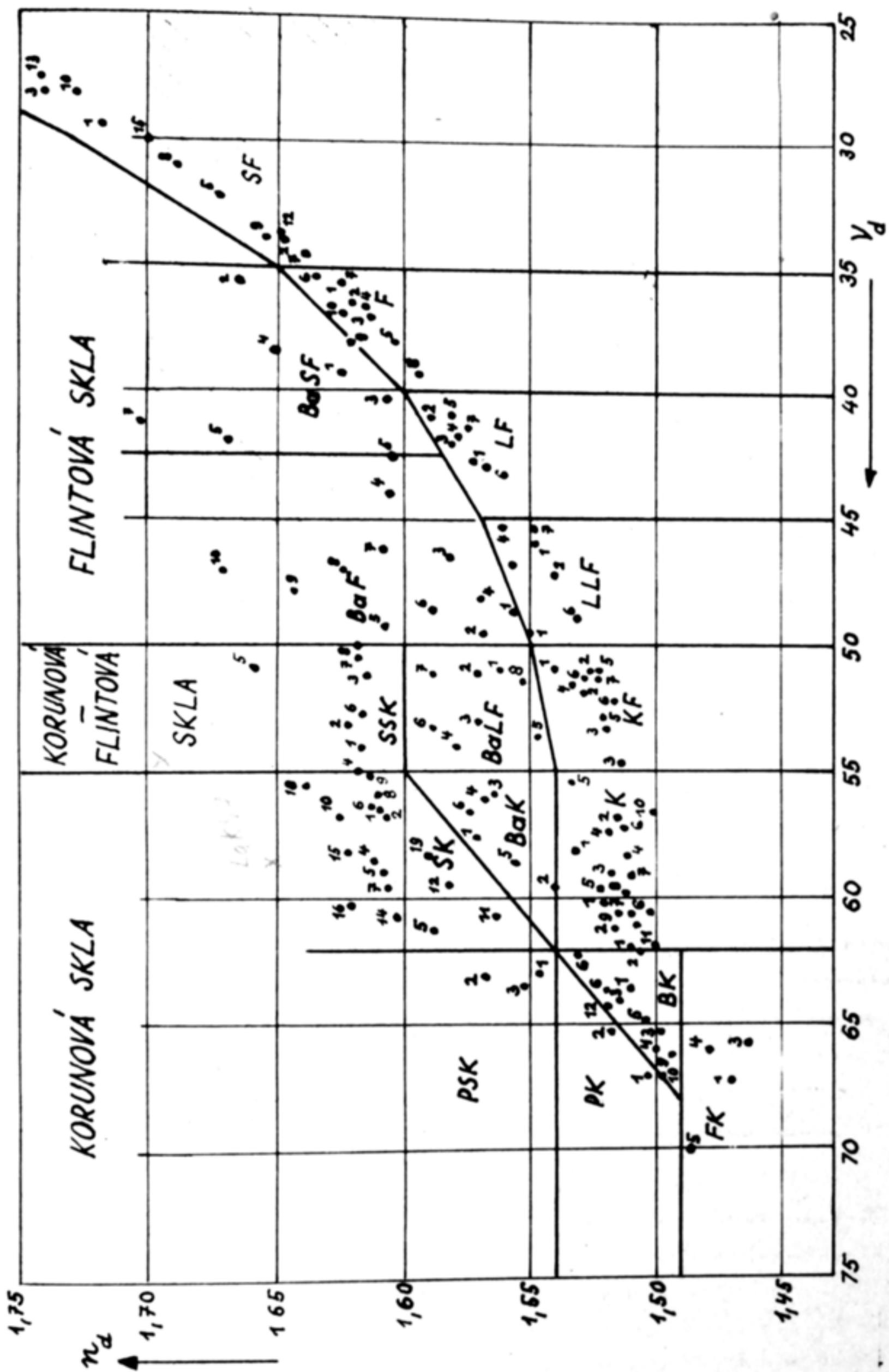
V tabulce 7.1 je uveden přehled některých důležitých skupin optických skel s vyznačením jejich optických konstant a kysličníků, které charakterizují složení těchto skel.

Tabulka 7.1

Skupina skel	Index lomu n_D	Abbeovo číslo	Charakteristické složky příslušných sklovín
Korunová skla K	1,5 - 1,55	55 - 70	Obsah BaO a PbO do 3 %
Korunová skla barnatá BaK	1,54-1,58	64 - 55	Obsah BaO od 3% do 5%
Těžká korunová skla SK	1,56-1,66	62 - 55	Obsah BaO nad 30%
Skla korunová-flintová KF	1,50-1,55	47 - 58	Obsah PbO od 3% do 15% sklu
Lehká flintová skla LF	1,54-1,58	40 -47,5	Obsah PbO od 15% do 40%
Flintová skla F	1,58-1,65	40 - 35	Obsah PbO od 40% do 50%
Těžká flintová skla SF	větší než 1,65	menší než 34	Obsah PbO nad 50%

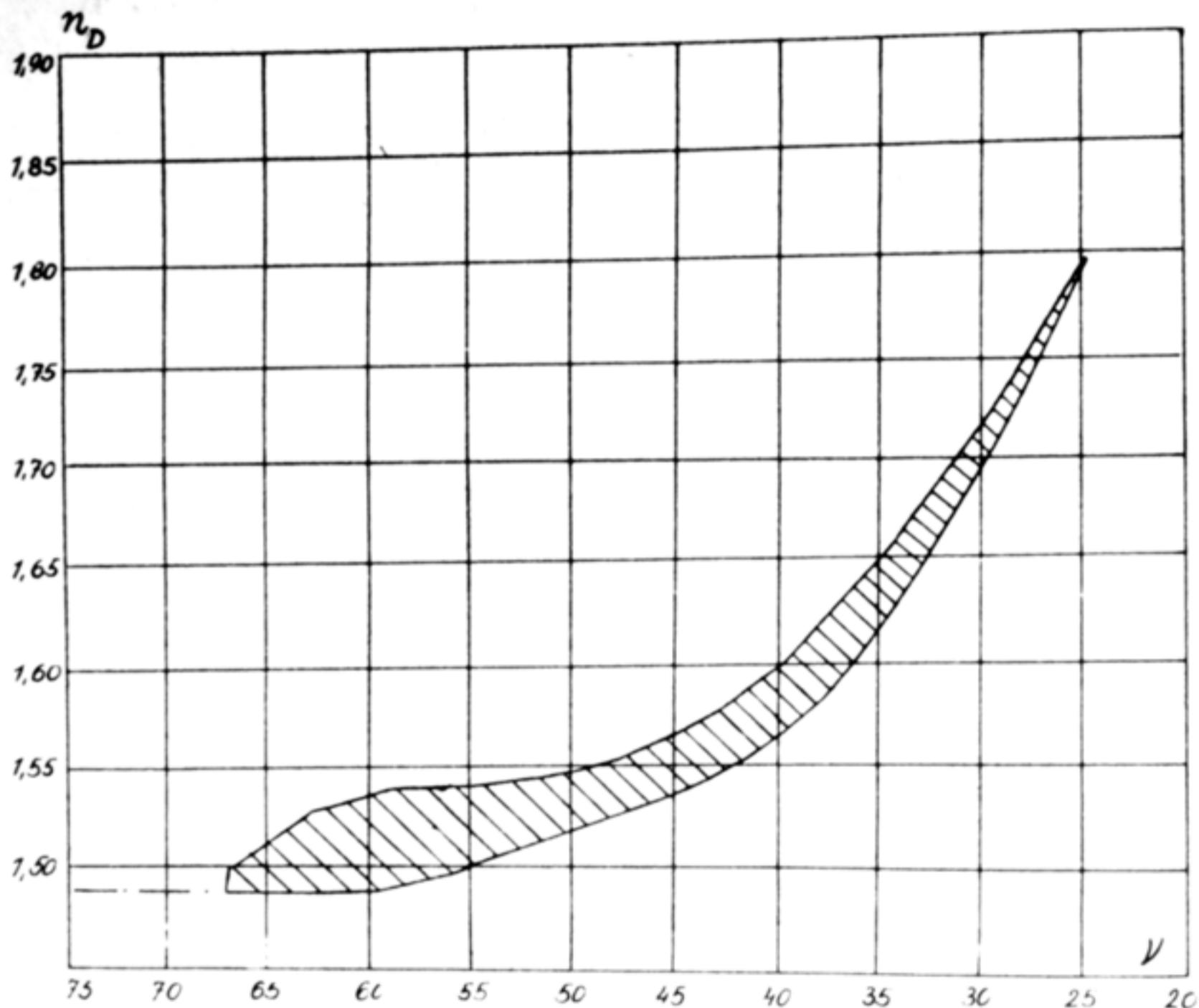
Podle Abbeho se znázorňují optická skla graficky v pravoúhlé soustavě, ve které se na osu úseček nanáší Abbeova čísla ν a na osu pořadnic index lomu n_D . Každému sklu odpovídá v tomto grafu určitý bod a každé skupině určitá oblast, jak je to vidět z obr. 7.1. Na tomto obrázku jsou znázorněna skla podle katalogu fy Schott v Jeně.

V osmdesátých letech minulého století bylo složení optických skel velmi jednoduché a obsahovalo obyčejně kysličník křemičitý, sodný, draselný a olovnatý. Proto také všechna tato skla zaujmala v Abbeově grafu poměrně uzoučkovou oblast, jak je to patrno z obr. 7,2, kde je tato oblast vyrafována. Je vidět, že tato skla se řídila následujícím zá-



Obr. 7.1. Přehled Schottových skel.

konem: s rostoucím indexem lomu klesalo Abbeovo číslo. V důsledku toho nebylo možno konstruovat soustavy dobře korigované. Abbe ukázal, že korigování optických soustav bude umožněno pouze tehdy, budou-li k disposici optický skla, jejichž optické konstanty se budou měnit v daleko širších mezích. Tuto Abbeovu myšlenku umožnil realizovat německý chemik Schott, který zavedl do skla další, dosud nepoužívané složky, jako BaO , B_2O_3 , ZnO , MgO , Al_2O_3 , F a další. Tato skla zaujmají v Abbeově grafu daleko širší oblast, jak je vidět z obr. 7.1.



Obr. 7.2
Graf znázorňující oblast prvních optických skel.

8. Speciální optická skla

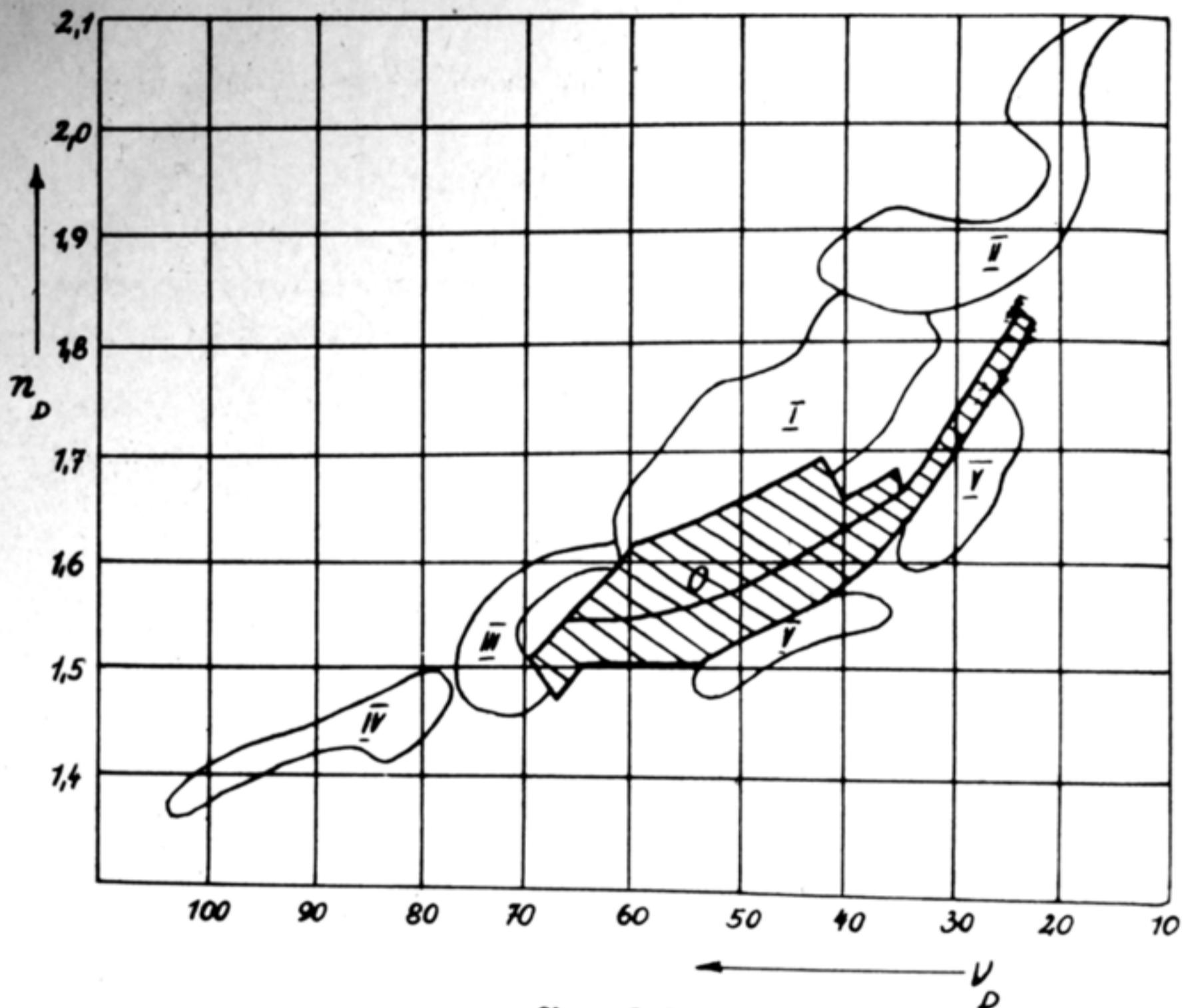
Konstrukce moderních širokouhlých a velmi světelných objektivů si vyžaduje skla, která by měla velký index lomu a jejichž rozptyl by byl charakterizován Abbeovým číslem, které by odpovídalo běžným korunovým sklům. Proto v letech 1934-1950 se začíná období nového výzkumu optických skel. V této době jsou vyvinuta nová skla, která podstatně rozšiřuje oblast skel znázorněnou na grafu 7.1. Tato skla je možno rozdělit do 5 skupin, označených na obr. 8.1 ^{x)} jako I, II, III,... V. Přitom oblast označená jako O obsahuje optická skla dosud běžně vyráběná největším závodem VEB Schott v Jeně. Optické oblasti těchto 5 skupin speciálních optických skel jsou patrný z následující tabulky 8.1.

Skupina	n_D	ν_D
I	1,60 - 1,85	62 - 31
II	1,83 - 2,25	43 - 10
III	1,45 - 1,63	75 - 54
IV	1,35 - 1,49	103 - 77
V	1,48 - 1,75	53 - 24

Během výzkumu těchto speciálních optických skel se ukázalo, že kysličník boritý je vhodnější sklotvornou složkou než kysličník křemičitý nebo fosforečný. Zvláště příznivý vliv na optické vlastnosti vykazovaly kysličníky prvků vzácných zemin berylia a thoria. Šlo nejprve o tzv. Moreyovu seriю speciálních skel fy Kodak. Byly však použity i kysličníky zirkonu, stroncia, titanu, wolframu, tantalu, niobu, obyčejně ve spojení s některými běžnými kysličníky Ba, Zn, Al apod.

Tato skla vyhovovala z hlediska optických i chemických vlastností, avšak při tavení silně korodovala keramické pánve a musila být proto tavena v platinových páničkách.

x) Věda a výzkum v průmyslu sklářském, řada III, 1957.



Obr. 8.1

Graf znázorňující 5 skupin speciálních optických skel.

V průběhu dalšího vývoje byla vyvinuta další zajímavá optická skla s větší nebo menší praktickou použitelností. Sem patří především fluorokřemičitany titaničité, fluorofosforečnany, fluorogermaničitany a fluoroboritany různých kovů. Tato skla vykazují při poměrně nízkém indexu lomu $n_D = 1,4$ velmi malý rozptyl ($V_D = 100$) a mimoto velkou propustnost i v neviditelných oblastech spektra v rozsahu od 3.000 \AA do 5μ .

Po roce 1950 začíná výzkum v oblasti skel seleníkových, selenidových a teluridových. Tyto prvky VI. grupy hrají spolu s kyslíkem prvořadou úlohu při stavbě skelné mřížky. Tato skla vedla k vysokým indexům lomu, např. $\text{PbO} \dots 2,15$; $\text{PbS} \dots 3,9$; $\text{PbSe} \dots 4,6$; $\text{PbTe}_2 \dots 5,3$. Přitom Abbeovo číslo V bylo velmi nízké a dosahovalo i hodnoty 4.

Později se začala zkoumat sklotvornost prvků VII. grupy periodické soustavy, tj. halogenidů (F, Cl, Br, I), která vedla ke sklům o nízkých indexech lomu a vysokých Abbeových číslech.

Přehled optických vlastností některých speciálních optických skel vyráběných v zahraničí je patrný z tab. 8.2.^{x)}

Závěrem nutno ještě poznamenat, že ke speciálním optickým sklům je možno počítat také jenská skla typu SK 21, SK 22, SSK 10 a SSKS 1, jejichž optické konstanty jsou uváděny v katalogu fy Schott VEB Jena.

9. Vliv složení skla na jeho optické konstanty

Optické vlastnosti skla jsou závislé na jeho chemickém složení. V současné době byly prostudovány vlivy kysličníků prakticky všech prvků na optické konstanty skla. Na základě velmi bohatého experimentálního materiálu, který byl nahromaděn během vývoje optického skla, je možno učinit následující závěry:

1. Vliv kysličníku na index lomu a disperzi závisí na povaze kysličníku.
2. Vliv celé řady kysličníků na optické vlastnosti skla je kvalitativně stejný a liší se pouze kvantitativně.
3. Vliv určitého kysličníku na optické konstanty skla je dán strukturně-chemickým komplexem, který vytváří tento kysličník ve sklovině.
4. Vliv některých kysličníků na optické konstanty skel podobného chemického složení se řídí směšovacím zákonem.
5. Vliv mnohých kysličníků zavedených do skla je přímo úměrný množství tohoto kysličníku.

x) Věda a výzkum v průmyslu sklářském, řada III, 1957.

Tabulka 8.2

Typ skla	ν_D	Index lomu n				
		A'	C	D	F	G'
NBS 610/620	62,0	-	1,6067	1,6096	1,6165	1,6220
NBS 639/597	59,7	-	1,6363	1,6395	1,6470	1,6531
NBS 656/582	58,2	-	1,6522	1,6555	1,6634	1,6698
PM-C 4058	57,9	1,63336	1,63714	1,64040	1,64820	1,65450
PM-C 5757	57,2	1,65007	1,65400	1,65739	1,66550	1,67207
EK / 110	56,2	1,68877	1,69313	1,69680	1,70554	1,71255
NBS 673/562	56,2	-	1,6697	1,6733	1,6819	1,6885
Hay 651/558	55,8	-	1,64757	1,65100	1,65924	1,66590
PM-C 5156	55,5	1,64392	1,64794	1,65140	1,65967	1,66635
NBS 682/553	55,3	-	1,6782	1,6819	1,6906	1,6976
NBS 705/540	54,0	-	1,7011	1,7049	1,7142	1,7216
PM-C 9154	54,0	1,68254	1,68689	1,69063	1,69968	1,70701
NBS 714/531	53,1	-	1,7103	1,7143	1,7238	1,7315
Hay 671/520	52,0	-	1,66724	1,67100	1,68018	1,68772
EK / 210	51,2	1,72482	1,72979	1,73400	1,74413	1,75235
PM-D 1748	47,9	1,70807	1,71301	1,71738	1,72798	1,73669
C 83 13	47,8	-	1,69639	1,70065	1,71104	-
EK / 330	47,2	1,74499	1,75043	1,75510	1,76643	1,77571
EK / 310	46,4	1,73491	1,74033	1,74500	1,75638	1,76577
EK / 320	45,8	1,73432	1,73978	1,74450	1,75603	1,76557
EK / 450	41,8	1,79180	1,79814	1,80370	1,81738	1,82880
EK / 448	41,1	1,86714	1,87420	1,88040	1,89564	1,90827

Poznámka:

NBS značí výrobu National Bureau of Standards, Washington
DC - USA

EK - " - Eastman Kodak, Rochester, N.Y., USA

Hay - " - Hayward Scientific Glass Corp.

C - " - Corning Glass Works, Corning N.Y., USA

PM - " - Parra - Mantois, Le Vésinet, Francie

Např. PbO , TiO_2 a Sb_2O_3 podstatně zvyšují index lomu a střední disperse a snižují Abbeovo číslo. Podobně BaO , CaO a ZnO vyvolávají zvýšení indexu lomu a poněkud zvýšení střední disperse, zatím co velmi málo snižují Abbeovo číslo. Zvyšování obsahu SiO_2 a Al_2O_3 ve skle vede ke snížení indexu lomu a střední disperse. Kysličník B_2O_3 u některých skel, podle jejich složení, index lomu zvyšuje, u jiných naopak snižuje.

Index lomu skla a střední disperse se určují pomocí empirických vztahů. L.I. Demkinová sestavila empirické vztahy pro n_D a $(n_F - n_C)$, které dovolují určit tyto konstanty s přesností jednotky na třetím desetinném místě.

$$n_D = \frac{\frac{P_1}{S_1} \cdot n_1 + \frac{P_2}{S_2} \cdot n_2 + \frac{P_3}{S_3} \cdot n_3 + \dots}{\frac{P_1}{S_1} + \frac{P_2}{S_2} + \frac{P_3}{S_3} + \dots} \quad (8.1)$$

$$n_F - n_C = \frac{\frac{P_1}{S_1} (n_F - n_C)_1 + \frac{P_2}{S_2} (n_F - n_C)_2 + \frac{P_3}{S_3} (n_F - n_C)_3 + \dots}{\frac{P_1}{S_1} + \frac{P_2}{S_2} + \frac{P_3}{S_3} + \dots} \quad (8.2)$$

Přitom

P_1, P_2, P_3, \dots značí procentuální obsah kysličníku ve skle

S_1, S_2, S_3, \dots koeficienty jednotlivých kysličníků, pro které je splněn směšovací zákon

n_1, n_2, n_3, \dots indexy lomu jednotlivých kysličníků ve skle

$(n_F - n_C)_1, (n_F - n_C)_2, \dots$ střední disperse jednotlivých kysličníků ve skle.

Hodnoty těchto konstant jsou uvedeny pro nejdůležitější kysličníky v tabulce 8.1.

Aplikujme vztahy (8.1) a (8.2) na skla K 5 a F 4 uvedená v tabulce 5.1 a dostaneme:

Tabulka 8.1^{x)}

Kysličník	n_D	$(n_F - n_C) \cdot 10^5$	S
SiO_2	1,475	595	60
B_2O_3	1,61	750	43
Al_2O_3	1,49	850	102
Sb_2O_3	2,02	4000	170
As_2O_3	1,57	1600	198
PbO	2,46	7700	343
BaO	2,01	2260	213
ZnO	1,96	2850	223
CaO	1,83	1750	86
MgO	1,63	1300	100
K_2O	1,58	1200	94
Na_2O	1,59	1400	62

1. Pro sklo K 5 ($n_D = 1,6225$, $V_D = 59,6$)

$$\begin{aligned}
 n_D &= \frac{\frac{65}{60} \cdot 1,475 + \frac{3,5}{43} \cdot 1,61 + \frac{5,8}{62} \cdot 1,59 + \frac{13,3}{94} \cdot 1,58 + \frac{2,5}{86} \cdot 1,83 + \frac{8,2}{223} \cdot 1,96 + \frac{1}{343} \cdot 2,46 + \frac{0,7}{198} \cdot 1,57}{\frac{65}{60} + \frac{3,5}{43} + \frac{5,8}{62} + \frac{13,3}{94} + \frac{2,5}{86} + \frac{8,2}{223} + \frac{1}{343} + \frac{0,7}{198}} = \\
 &= \frac{1,598 + 0,131 + 0,1487 + 0,2225 + 0,0532 + 0,0720 + 0,00718 + 0,00555}{1,083 + 0,0814 + 0,0936 + 0,1412 + 0,0291 + 0,0368 + 0,00292 + 0,00353} = \\
 &= \frac{2,23811}{1,47155} = 1,5209
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n_F - n_C &= \frac{\frac{65}{60} \cdot 595 + \frac{3,5}{43} \cdot 750 + \frac{5,8}{62} \cdot 1400 + \frac{13,3}{94} \cdot 1200 + \frac{2,5}{86} \cdot 1750 + \frac{8,2}{223} \cdot 2850 + \frac{1}{343} \cdot 7700 + \frac{0,7}{198} \cdot 1600}{\frac{65}{60} + \frac{3,5}{43} + \frac{5,8}{62} + \frac{13,3}{94} + \frac{2,5}{86} + \frac{8,2}{223} + \frac{1}{343} + \frac{0,7}{198}} \cdot 10^{-5} = \\
 &= \frac{645 + 61,2 + 131 + 169,8 + 50,8 + 105,0 + 22,3 + 5,64}{1,47155} \cdot 10^{-5} = \\
 &= \frac{1193,24}{1,47155} \cdot 10^{-5} = 811 \cdot 10^{-5} = 0,00811
 \end{aligned}$$

^{x)} I.I.Kitaigorodskij: Technologija stekla, Moskva 1951

Vypočítáme-li z $n_D = 1,5225$ a $\nu_D = 59,6$ střední disperzi
 $n_F - n_C = \frac{0,5225}{59,6} = 0,00876$, vidíme, že se hodnota nalezená podle (8.2) skutečně neliší ani na třetím místě o jednotku od správné hodnoty.

2. Pro sklo F 4 ($n_D = 1,6166$, $\nu_D = 36,6$)

$$n_D = \frac{\frac{46,9}{60} 1,475 + \frac{6,3}{94} 1,58 + \frac{46,5}{343} 2,46 + \frac{0,2}{198} 1,57}{\frac{46,9}{60} + \frac{6,3}{94} + \frac{46,5}{343} + \frac{0,2}{198}} = \\ = \frac{1,59548}{0,98671} = 1,6169$$

$$n_F - n_C = \frac{\frac{46,9}{60} \cdot 595 + \frac{6,3}{94} \cdot 1200 + \frac{46,5}{343} \cdot 7700 + \frac{0,2}{198} \cdot 1600}{0,98671} \cdot 10^{-5} = \\ = \frac{1589 \cdot 10^{-5}}{0,98671} = 1627 \cdot 10^{-5} = 0,01627$$

Správná hodnota střední disperse činí

$$n_F - n_C = \frac{0,6166}{36,6} = 0,01685$$

Opět je vidět, že nalezené hodnoty se neliší od správných hodnot o více než jednotku na třetím desetinném místě.

10. Ukazatelé jakosti skla

Každé optické sklo je charakterizováno jednak optickými vlastnostmi, jednak řadou druhých vlastností, jako součinitelem pohlcování, optickou stejnorodostí, šlírovitostí, bublinatostí, dvojloinem apod.

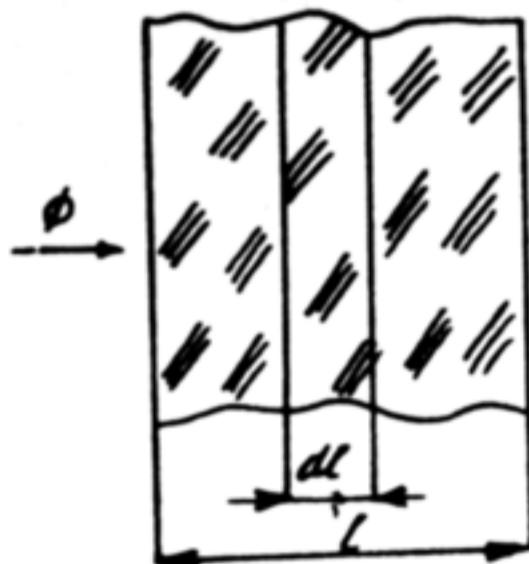
Tato druhá skupina vlastností tvoří tzv. ukazatele jakosti skla.

Definice optických konstant a ostatních ukazatelů jakosti a rozdělení jednotlivých druhů skel podle odchylek sku-

tečných hodnot těchto ukazatelů od katalogových hodnot jsou dány československou státní normou ČSN 71 0114.
Všimněme si nyní blíže jednotlivých ukazatelů jakosti.

a) Součinitel pohlcování světla

Nechť na skleněnou desku o tloušťce l dopadá světelný tok ϕ . Vymezme v této desce planparallelní vrstvičku o tloušťce dl. Nechť dále značí - $d\phi$ úbytek světelného toku při jeho průchodu vrstvičkou o tloušťce dl. Potom můžeme psát



$$-d\phi = k \cdot \phi \cdot dl, \quad (9.1)$$

kde k je konstanta závislá jen na vlastnostech skla, která se nazývá součinitelem pohlcování světla.
Pišme tento vztah ve tvaru

Obr.9.1 Skleněná deska

$$\frac{d\phi}{\phi} = -k \cdot dl \quad (9.2)$$

a integrujme jej v mezích od 0 do l . Tím dostaneme zákon, podle kterého ubývá světelný tok při průchodu deskou o tloušťce l . Můžeme tedy psát

$$\int_0^l \frac{d\phi}{\phi} = -k \int_0^l dl$$

čili

$$\ln \phi_l - \ln \phi_0 = -kl \quad (9.3)$$

Přitom ϕ_0 značí světelný tok dopadající na desku ($l = 0$) a $\phi_l = \phi$ světelný tok vystupující z desky. Vztah (9.3) můžeme psát dále ve tvaru

$$\ln \frac{\phi}{\phi_0} = -kl$$

čili

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-kl} \quad (9.4)$$

Tento vztah tvoří pak hledaný zákon. Píšeme-li vztah (9.3) ve tvaru

$$k \ell = \ln \frac{\phi}{\phi_0} = \ln \left(\frac{1}{\tau} \right), \quad (9.5)$$

kde $\tau = \frac{\phi}{\phi_0}$ ^{x)} značí tzv. součinitel propustnosti, můžeme říci, že součinitel pohlcování k je roven přirozenému logaritmu převrácené hodnoty součinitele propustnosti desky o tloušťce l = 1 cm.

$$\tau = \frac{1}{e} \ln \left(\frac{1}{\tau} \right)$$

Měření součinitele pohlcování k můžeme proto převést na měření součinitele propustnosti τ . Světelné toky ϕ a ϕ_0 můžeme měřit fotoelektricky. Je-li závislost fotoelektrického proudu fotočlánku na světelném toku lineární, pak

$$\tau = \frac{\phi}{\phi_0} = \frac{m}{m_0} \quad (9.6)$$

kde m a m_0 značí výchylky (údaje) elektrického měřicího přístroje. Můžeme tedy z naměřených hodnot m a m_0 určit součinitele propustnosti τ a pomocí něho součinitel pohlcování světla k.

Vzhledem k tomu, že světelný svazek dopadající na měřený vzorek skla se na obou jeho plochách také částečně odráží a protože množství odraženého světla je závislé mimo jiné i na vlastnostech měřeného skla, je nutno při výpočtu součinitele pohlcování respektovat tyto ztráty.

Je-li n index lomu příslušného skla, je odrazivost příslušných ploch vzorku

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2.$$

To znamená, že do vzorku vstupuje místo dopadajícího toku tok

$$\phi_0 - \phi_0 \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \phi_0 \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right].$$

x) 100-násobek součinitele propustnosti se nazývá propustností P. Tedy $P = 100 \tau$.

$$\phi = \phi_0 \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] e^{-\ell l}$$

Nechť ϕ značí tok vystupující ze vzorku. Tento tok je opět ochuzen o světlo odražené na výstupní ploše. Kdyby nebylo těchto ztrát, vystupoval by ze vzorku světelný tok o velikosti

$$\frac{\phi}{1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2} .$$

Pro součinitel pohlcování pak vychází ze vztahu (9.5)

$$k = \frac{1}{\ell} \ln \frac{\phi_o \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]}{\phi} =$$

$$\frac{1}{1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2}$$

$$= \frac{1}{\ell} \cdot \ln \frac{\phi_o}{\phi} \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right]^2$$

čili

$$k = \frac{1}{\ell} \left\{ 2 \ln \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] - \lg \frac{\phi}{\phi_o} \right\} \quad (9.7)$$

nebo

$$k = \frac{1}{\ell} \left\{ 2 \ln \left[1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \right] - \lg \frac{n}{n_o} \right\} \quad (9.8)$$

Vliv odrazivosti funkčních ploch vzorku skla, jejíž skutečná hodnota je závislá nejen na indexu lomu, nýbrž také na řadě jiných činitelů, lze vyloučit použitím standardních skleněných deštiček, které se přiloží ke vstupní a výstupní ploše vzorku pomocí immersní kapaliny o indexu lomu, který je shodný s indexem lomu vzorku s přesností 10^{-2} .

Měření se provede tak, že se nejdříve určí světelný tok (výchylka i_o na měřicím přístroji), jsou-li světelnému svazku postaveny do cesty obě deštičky spojené immersní kapalinou a potom světelný tok (výchylka i), je-li do cesty paprskového svazku zařazen vzorek s přiloženými standardními deštičkami. Potom hledaný součinitel pohlcování k je dán vztahem

$$k = \frac{1}{\ell} \ln \frac{i_o}{i} . \quad (9.9)$$

Optické sklo se charakterizuje středním součinitelem pohlcování světla pro bílé světlo a v souhlase s citovanou normou ČSN 710114 se optické sklo dělí na 6 kategorií definovaných tabulkou 9.1.

Tabulka 9.1

Kategorie	Součinitel pohlcování <u>k</u>
00	do 0,004
0	do 0,006
1	do 0,008
2	do 0,010
3	do 0,015
4	do 0,020

Měření součinitele pohlcování se provádí na fotometru, který dovolí měřit poměr světelných toků $i_0/i = v$ s přesností $\pm 0,5\%$. Ze vztahu (9.9) vychází diferencováním pro chybu dk, se kterou je možno určit součinitele pohlcování světla k

$$dk = \frac{1}{l} - \frac{dv}{v} = \frac{1}{l} \frac{1}{v} \cdot \frac{v}{100} \cdot 0,5$$

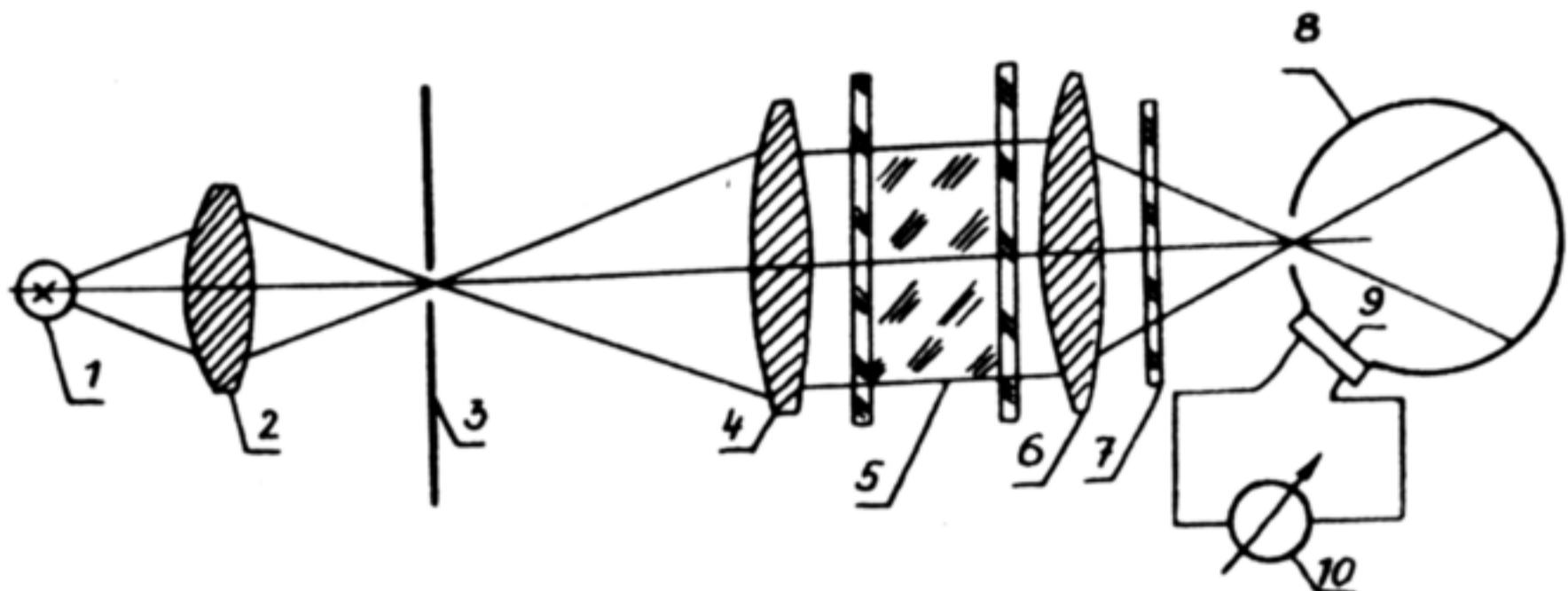
čili

$$dk = \frac{0,005}{l} .$$

Abychom mohli měřená skla rozdělit na kategorie podle tab.9.1, je nutné provádět měření na vzorcích, jejichž tloušťka $l = 10 \text{ cm}$. Potom

$$dk = \frac{0,005}{10} = 0,0005 ,$$

což je ve shodě s tabulkou 9.1. Pomocí vzorků s tloušťkou l menší než 10 cm bychom nenaměřili součinitele k s přesností, která by umožnila začlenit měřené sklo do správné kategorie. Schéma příslušného fotometru je znázorněno na obr. 9.2. Světlo žárovky (1) je soustředěno kondensorem (2) do otvoru ve stinítku (3), které je umístěno v ohniskové rovině objektivu



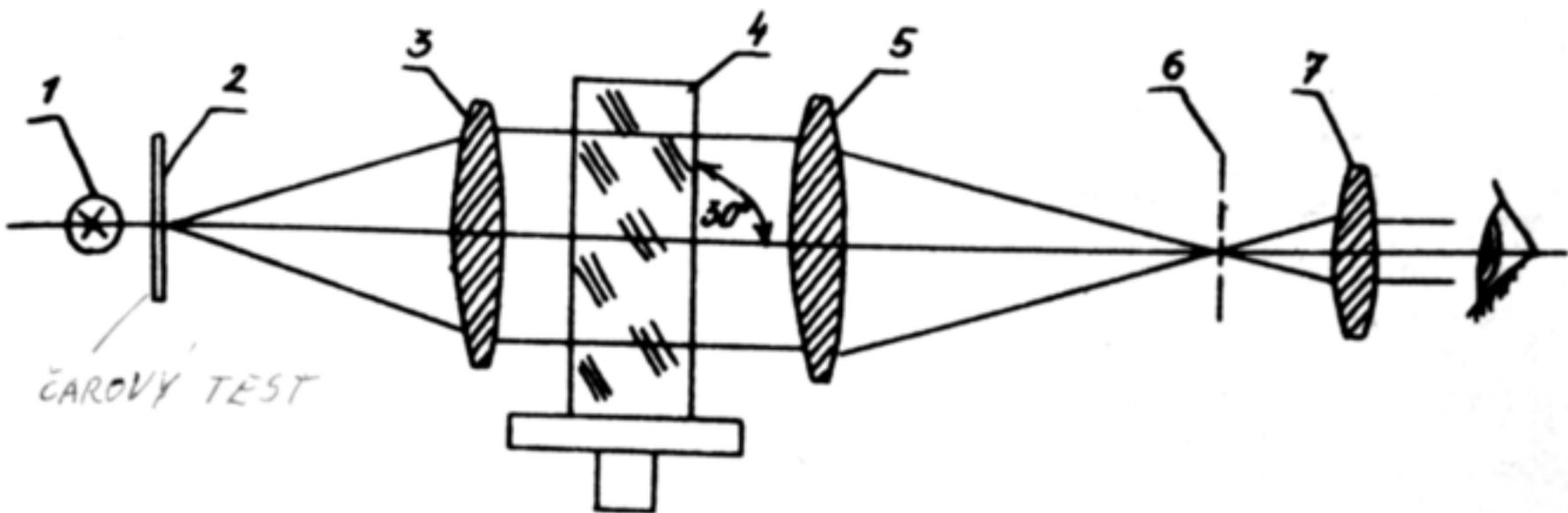
Obr.9.2
Schéma fotometru pro měření součinitele pohlcování světla

vu (4) kolimátoru. Měřený vzorek skla (5) je umístěn s přiloženými standardními deštičkami do rovnoběžného paprskového svazku, který je po průchodu vzorkem (5) soustředěn objektivem (6) do vstupního otvoru integrační koule. Příslušný světelny tok se měří fotoelektricky článkem (9), který je v obvodu měřicího přístroje (10).

b) Optická stejnorodost

Optickou stejnorodostí skla rozumíme stejnorodost skla z hlediska jeho indexu lomu. Plynulé změny indexu lomu skla od místa k místu řádově rovné nebo menší než 10^{-4} charakterizují stupeň stejnorodosti optického skla. Změny indexu lomu ve skle mohou být způsobeny homogenizací nebo ochlazením skla.

Nestálost indexu lomu se projevuje, stejně jako vnitřní napětí ve skle, změnou rozlišovací schopnosti optické soustavy, do které je zařazen vzorek zkoušeného skla. Schéma příslušného kontrolního přístroje je znázorněno na obr.9.3. Vzorek (4) měřeného skla ve tvaru planparallelní desky s vyloštěnými plochami se umístí v paralelním paprskovém svazku mezi objektivem (3) kolimátoru a objektivem (5) dalekohledu tak, aby vstupní plocha byla kolmá na osu paprskového svazku. V ohniskové rovině objektivu (3) je umístěn čárový test (2), osvětlený žárovkou (1). Obraz testu, vytvořený kolimátorem



Obr. 9.3 Schéma přístroje pro kontrolu stejnorodosti skla.

se pozoruje po průchodu příslušných zobrazovacích svazků vzorkem skla dalekohledem.

Nechť φ značí mezní úhel příslušný k testu, který je ještě při daném vzorku skla rozlišen. Potom ukazatelem optické stejnorodosti příslušného vzorku skla je poměr tohoto mezního úhlu φ a teoretického mezního úhlu φ_0 .

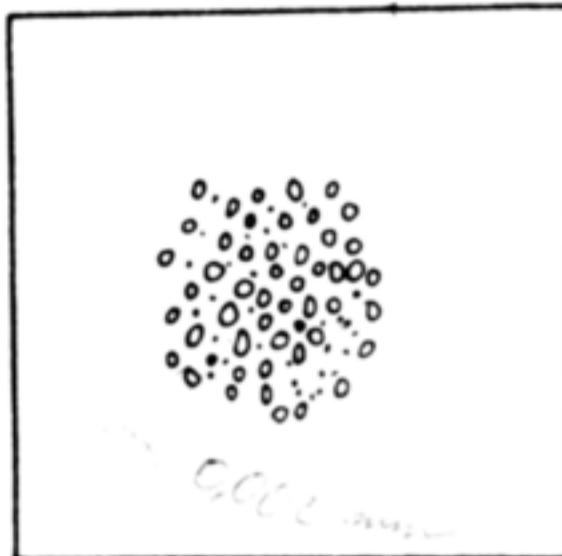
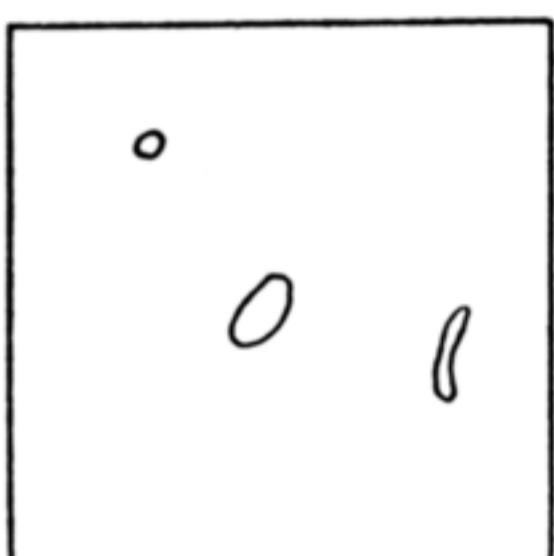
Podle tohoto poměru se optické sklo rozděluje do 7 kategorií stejnorodosti. Kategorie jsou určeny v souhlase s ČSN 71 0114 následující tabulkou 9.2. Optické sklo zařazené do 1. kategorie se kontroluje pomocí ohýbového obrazce bodu. Sklo se zařadí do 1. kategorie, jestli tento ohýbový obrazec bodu je tvořen jasnou centrální kruhovou ploškou, která je obklopena střídavě světlými a tmavými koncentrickými kroužky. Tento obrazec nesmí být přerušen, nesmí být nesouměrný ani nesmí mít svítících chvostů.

c) Bublinatost skla

Bubliny jsou tvořeny plynem uzavřeným ve skle. Tvar bublin může být kruhový, oválný nebo protáhlý, jak je to patrno z obrázku 9.4. Shluk velkého počtu bublin o průměru menším než 0,002 mm se nazývá závoj.

Tab. 9.2

Kategorie	$\frac{\varphi}{\%}$
1 a 2	1,0
3	do 1,1
4	do 1,2
5	do 1,4
6	do 1,7
7	do 2,0
8	vyšší než 2



Obr. 9.4 Tvar bublin a shluky bublin zvané závoj

služebnou soustavou s ostře omezenými okraji a působí velmi rušivě při visuálním pozorování nebo na fotografické desce.
Z toho důvodu musí být pro podobné součástky voleno sklo bez bublin. Jedná se převážně o záměrné ploténky, kolektivy apod.

Podle průměru bublin dělí se sklo podle ČSN 71 0114 na 9 kategorií, které jsou definovány tab. 9.3.

Mezi bubliny se počítají také kamínky. V případě protáhlého tvaru se rozumí průměrem aritmetický střed největšího a nejmenšího podélného rozměru bubliny nebo kamínku. Kategorie skla je určena průměrem největší přípustné bubliny. Podle množství bublin obsažených na 1 kg skla se dělí sklo na 6 tříd, které jsou definovány tab. 9.4.

Bubliny nacházející se ve skle nemají prakticky žádný vliv na jakost zobrazení nebo absorpci světla. Je možno říci, že způsobují rozptyl světla a že mají vliv na kontrast obrazu. Bubliny, které se nacházejí v takových součástkách, které neleží přímo v rovině obrazu, projevují se pouze jako určité stínové skvrny.

Bubliny ležící v rovině obrazu, jsou zobrazeny pří-

Tab. 9.3

Kategorie	Průměr bubliny v mm
1	do 0,002
2	0,002 - 0,05
3	0,05 - 0,1
4	0,1 - 0,2
5	0,2 - 0,3
6	0,3 - 0,5
7	0,5 - 0,7
8	0,7 - 1,0
9	1,0 - 2,0

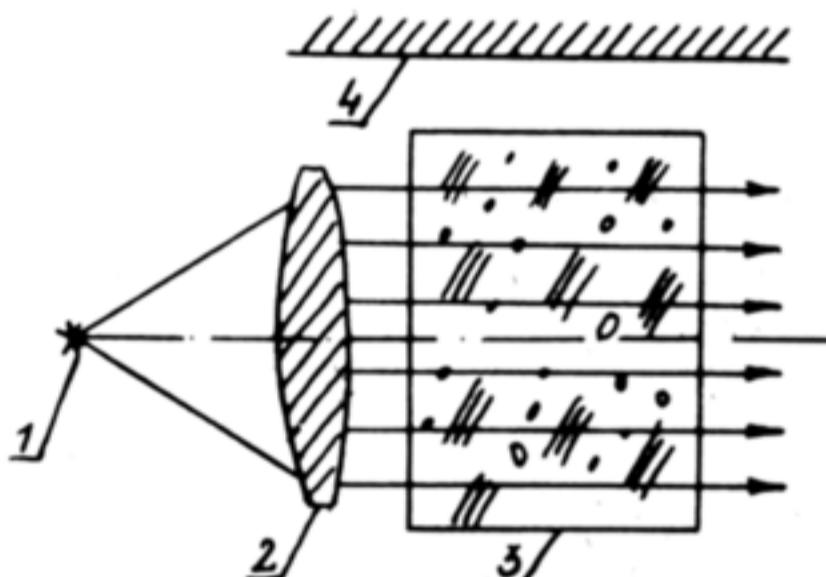
Tab. 9.4

Třída	Průměrný počet bublin v 1 kg skla
1	do 10
2	do 30
3	do 100
4	do 300
5	do 1000
6	do 3000

Největší bublinatostí se vyznačují těžká korunová skla
barnatá a těžká flintová skla.

Kontrola bublin je založena na schopnosti bublin rozptylovat světlo.

Jak je vyznačeno na obr.9.5, klade se zkoušený vzorek skla do rovnoběžného paprskového svazku vystupujícího z objektivu (2), v jehož ohnisku je umístěn bodový světelný zdroj (1). Bubliny se pozorují ve směru kolmém na osu tohoto paprskového svazku proti tmavému pozadí (které může být tvořeno buď tmavým suknem nebo může mít tvar čtyřhranné voštiny). Bubliny ve skle obsažené se jeví na tomto pozadí jako svítící body.



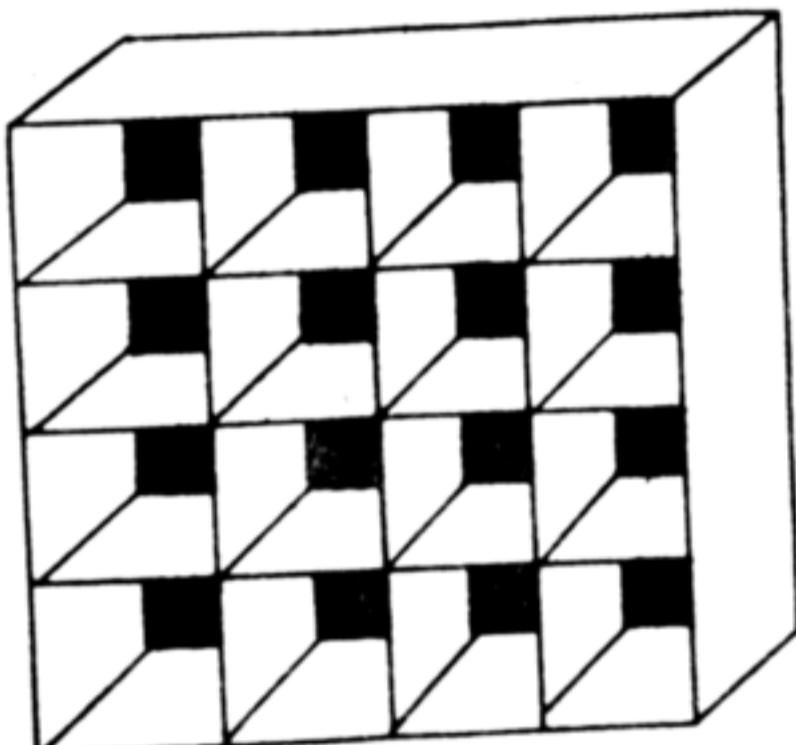
Směr pozorování.

Obr.9.5 Zařízení pro kontrolu bublinatosti

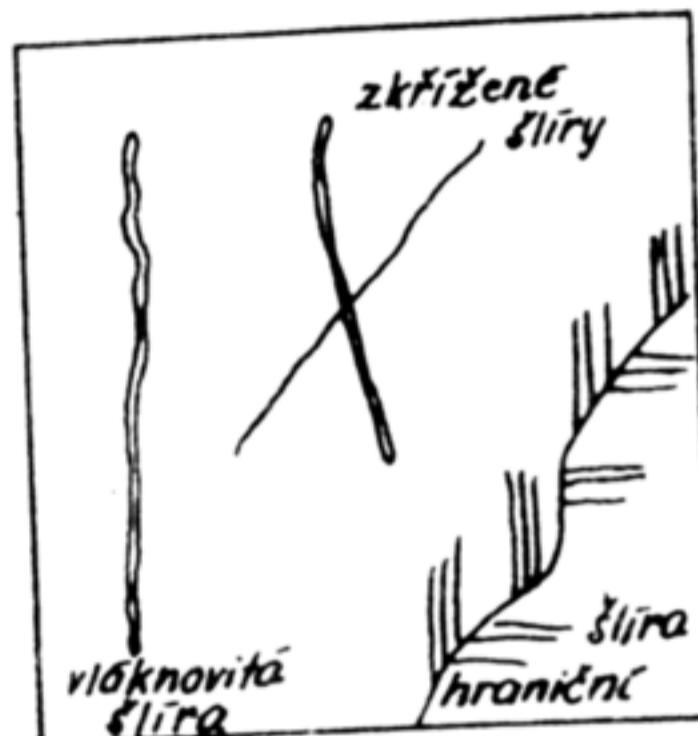
Velikost i počet bublin se určuje porovnáním s etalonovými deštičkami, které obsahují známý počet bublin o známé velikosti.

a) Šlírovitost

Mimo plynulých změn indexu lomu skla od místa k místu, mohou ve skle existovat taková místa, v nichž dochází k náhlé změně indexu lomu. Taková místa ve skle nazýváme šlírami. Šlír mohou mít tvar jednotlivých vláken, nebo tvar křížicích se vláken, nebo tvoří plošné útvary, které oddělují od sebe dvě části skla s různými optickými vlastnostmi.



Obr. 9.6 Voštinové pozadí



Obr. 9.7 Různé tvary šlir

Vzhled těchto šlir je patrný z obr. 9.7. Vzhledem k tomu, že index lomu šlir se liší od indexu lomu základní skloviny, jsou šliry obyčejně celkem zřetelně viditelné pouhým okem.

Nejrozšířenější jsou šliry tvaru vláken, jejichž index lomu bývá obyčejně o 2 až $5 \cdot 10^{-4}$ menší než index základní skloviny. Průměr těchto šlir se pohybuje řádově v desetinách milimetru a jejich délka bývá několik desítek milimetru.

Šliry ve skle jsou velmi nepříjemné, neboť způsobují zvětšení úhlových aberací a mění jas v ohybovém obrazci bodu.

Předpokládejme např., že šlira o průměru d se liší od základní skloviny v indexu lomu o Δn . Rovinná vlnoplocha, která dopadá na planparallelní desku, obsahující tuto šliru, se deformuje po průchodu deskou tak, že se prohne o hodnotu h , jak je to naznačeno na obr. 9.8. Pro toto prohnutí platí

$$h = \Delta n \cdot d .$$

(9.10)

Předpokládejme, že

$$\Delta n = 5 \cdot 10^{-4}$$

a že podle Lord Rayleighova kriteria musí být $h < \frac{\lambda}{4}$, aby nebyla deformace vlnoplochy okem pozorovatelná. Volíme-li vlnovou délku $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ mm, pak pro průměr šlíry d vychází z (9.10)

$$d = \frac{h}{\Delta n} = \frac{\lambda}{4 \Delta n} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = \\ = 0,25 \text{ mm}.$$

Bude-li však $\Delta n = 5 \cdot 10^{-3}$, bude již $d = 0,025$ mm. Z těchto příkladů je vidět, že průměr přípustné šlíry může být velmi malý, jak je velký rozdíl indexu lomu Δn .

Z hlediska geometrické optiky se vláknitá šlíra chová jako spojná nebo rozptylná válcová čočka, podle toho, jestli Δn šlíry kladné nebo záporné. Uvažíme-li, že Δn je velmi malé vzhledem k indexu lomu n základní skloviny, vychází pro lámavost této válcové čočky

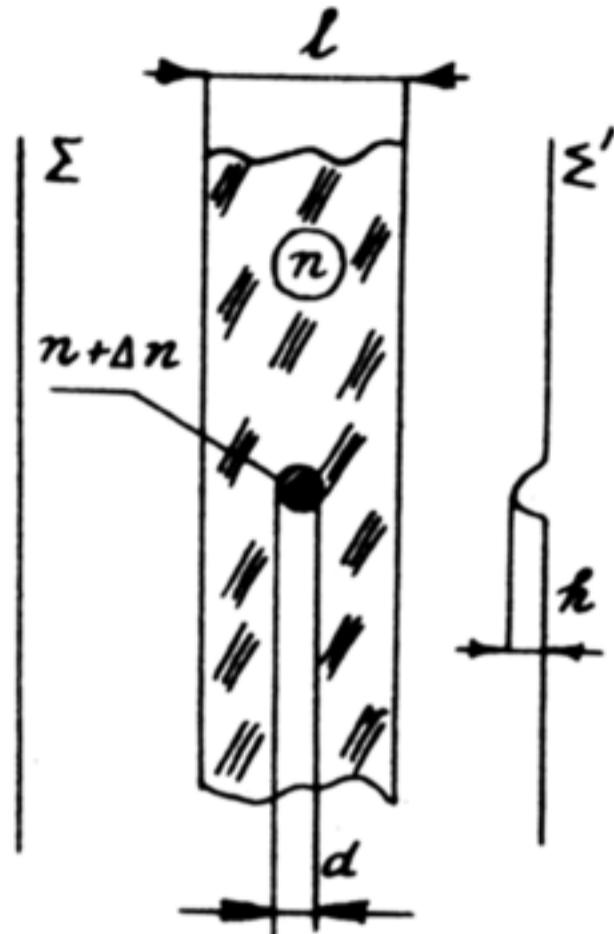
$$\varphi = \frac{1}{f} = \Delta n \cdot \frac{2}{r} = \Delta n \cdot \frac{4}{d} \quad (9.11)$$

kde r značí poloměr válcové šlíry. Odtud pak

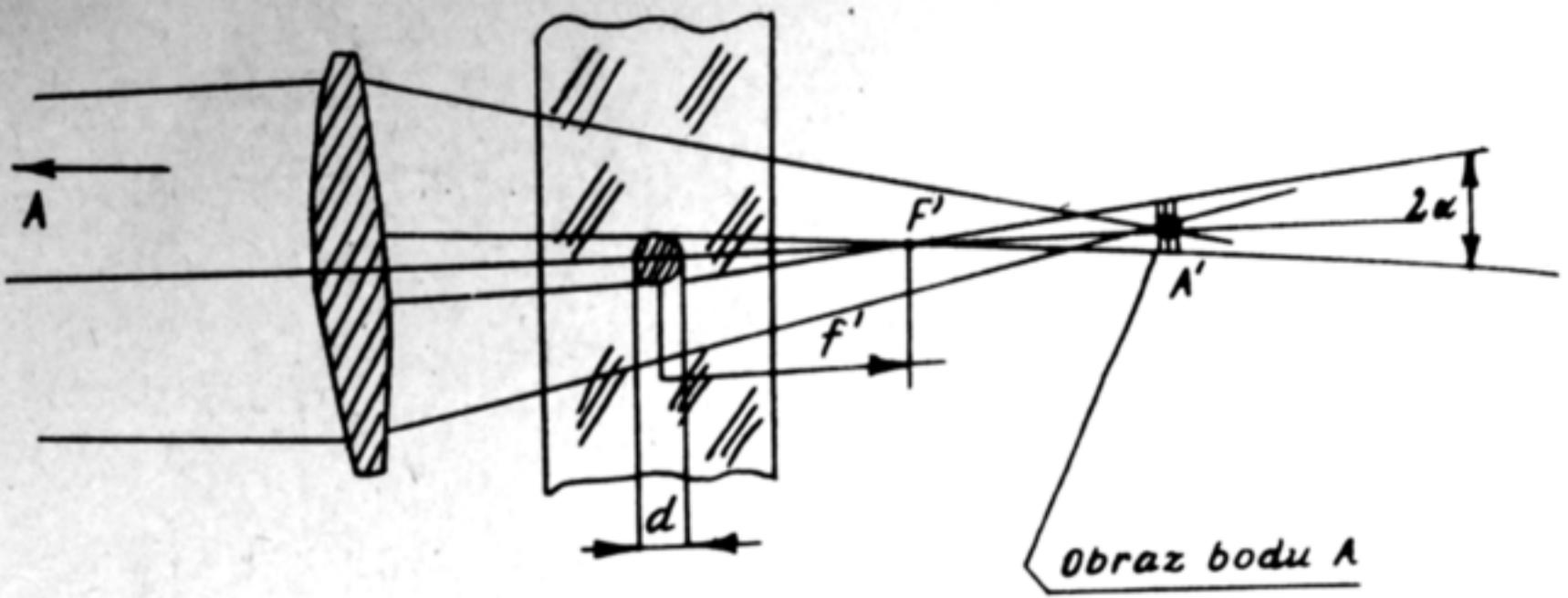
$$f' = \frac{d}{4 \Delta n} \quad (9.12)$$

Např. pro $d = 0,1$ mm a $\Delta n = 5 \cdot 10^{-4}$ vychází

$$f' = \frac{0,1}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 50 \text{ mm}.$$



Obr. 9.8
Deformace vlnoplochy vláknovou šlírou.



Obr. 9.9 Vznik rozšíření úhlových aberací obrazu bodu.

Nepřihlížíme-li k otvorové vadě uvažované válcové čočky tvořené šlírou, pak podle obr. 9.9 vychází pro rozšíření obrazu bodu A

$$\alpha = \frac{d}{2f'} = 2 \cdot \Delta n \quad (9.13)$$

V našem číselném příkladu vychází

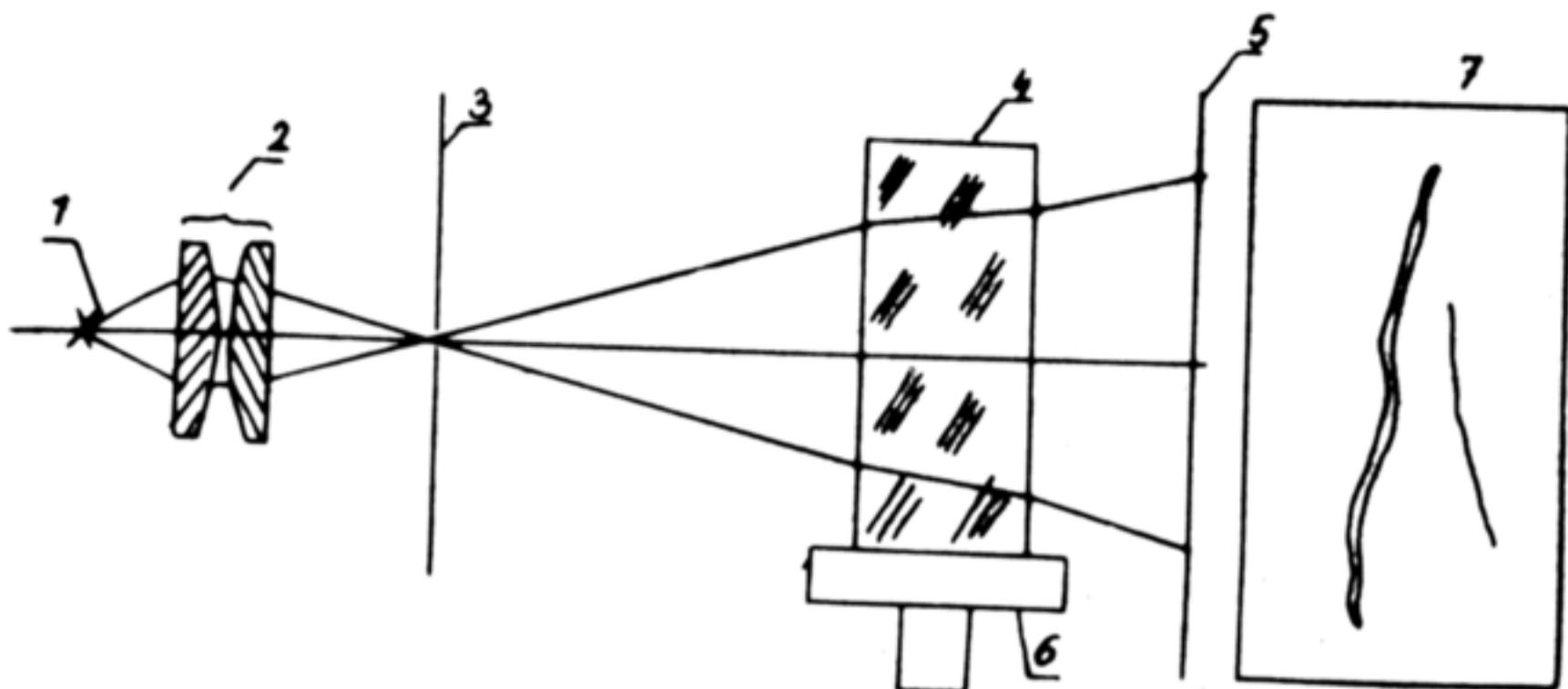
$$\alpha = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 10^{-3},$$

což odpovídá 3 minutám. Je tedy vidět, že toto rozšíření obrazu A' je již okem velmi dobře pozorovatelné.

Tím, že část světla se dostává mimo vlastní obraz a tím, že se poněkud pozmění ohýbový obraz bodu A', změní se i světelné poměry v ohýbovém obrazci. Podrobně tyto jevy studuje D.D. Maksutov ^{x)} ve své knize "Izgotovlenie i isledovanie astronomičeskoi optiki".

Z těchto důvodů je třeba optické sklo třídit podle šlírovitosti na kategorie a třídy. Celkem se podle šlírovitosti rozděluje optické sklo na 7 kategorií a 3 třídy. Kategorie skla je určena podmínkami kontroly a třídy počtem směrů, ve kterých se provádí prohlídka zkoušeného skla. Princip příslušného kontrolního zařízení je patrný z obr. 9.10.

^{x)} D.D. Maksutov: Izgotovlenie i isledovanie astronomičeskoi optiki, Moskva 1948



Obr. 9.10
Princip zařazení pro kontrolu šlírovitosti optického skla.

Světlo intenzivního světelného zdroje (1) (promítací žárovka s příkonem min. 250 W) je soustředěno kondensorem (2) na clonu s kruhovým otvorem umístěnou ve stínítku (3). Clona je vyměnná, takže je možno pracovat s otvorem o průměru 2 resp. 4 mm. Kontrolované sklo se klade na stoleček (6) tak, aby příslušný paprskový svazek procházel pokud možno celou plochou příslušného vzorku skla (4). Stín šlír se pozoruje lupou na stínítku (5), ((7) značí stínítko ve sklopené poloze).

Podmínky prohlídky a kriteria pro rozdelení skla podle šlírovitosti do jednotlivých tříd je uvedeno v tab. 9.5.

Rozdelení na třídy je určeno tab. 9.6.

Nutno poznamenat, že v případě plošných šlír je nutno vyřezávat čočky z bloků skla tak, aby optická osa byla kolmá na plošnou šlíru.

Tab. 9.5

Kateg. šlir.	Podmínky zkoušení			Přípustná viditelnost šlir u kategorie						
	Průměr otvoru clony v mm	Vzdáл. vzorku skla od stínít- ka v mm	Vzdáл. otvoru clony od stín. v mm	1	3	5	7	2	4	8
1			125							
2										
3		2	250							
4				750						
5										
6										
7	4		500							

Stínový obraz šlir se projevuje jen při prohlížení ve funkčním směru (přes stínítko). Slíry takto viditelné nezmí být delší než 1/4 průměru nebo strany polotovaru, nanejvýš věk 12 mm dlouhé a max. v počtu 10/l kg.

Stínové obrazy o jedinělých šlir jsou vzájemně vzdáleny 10 mm. Provádí-li se prohlídka za podmínek přísluš. následující kategorie (t.j. liché kat.), musí vzorek vyhovět viditelnosti šlir předepsané pro tuto kategorii.

Tab. 9.6

Třída šlírovitosti	Počet směrů prohlížení
1	3
2	2
3	1

e) Dvojlom

Sklo se chová jako dvojlomné prostředí pouze tehdy, je-li pod vlivem vnějších sil, např. pod vlivem tlaku nebo tahu. Vymizí-li tyto vnější síly, vymizí i dvojlom. Tyto síly mohou být tvorený vnitřním napětím, které vznikne ve skle při jeho prudkém ochlazení. Odstraní-li se vnitřní pnutí, odstraní se i dvojlom. Vnitřní pnutí je možno odstranit nahřátím skla. Nahřejte-li se sklo na nízkou teplotu, pak

vnitřní pnutí ve skle zůstává vzhledem k vysoké viskositě skla. Je proto nutno nahřát sklo na správně stanovenou teplotu. Tento proces se nazývá chlazení. Dvojdom skla se projeví tím, že paprsek probíhající takovým sklem se rozštěpí na dva paprsky, řádný a mimořádný, které jsou polarizovány v rovinách vzájemně kolmých a které se šíří tímto sklem různou rychlostí. Obyčejně rychlosť v_o řádného paprsku bývá ve skle menší než rychlosť paprsku mimořádného v_e a v souhlase s tím je index lomu n_o > n_e.

V důsledku toho řádný paprsek se opožduje vzhledem k mimořádnému. Příslušný dráhový rozdíl je úměrný tloušťce ℓ skla proběhnuté oběma paprsky. Proto dvojdom se měří dráhovým rozdílem δ řádného a mimořádného paprsku a vyjadřuje se v nanometrech na dráhu 1 cm.

Podle dvojdomu se rozděluje sklo na 5 kategorií, které jsou definovány tab. 9.7.

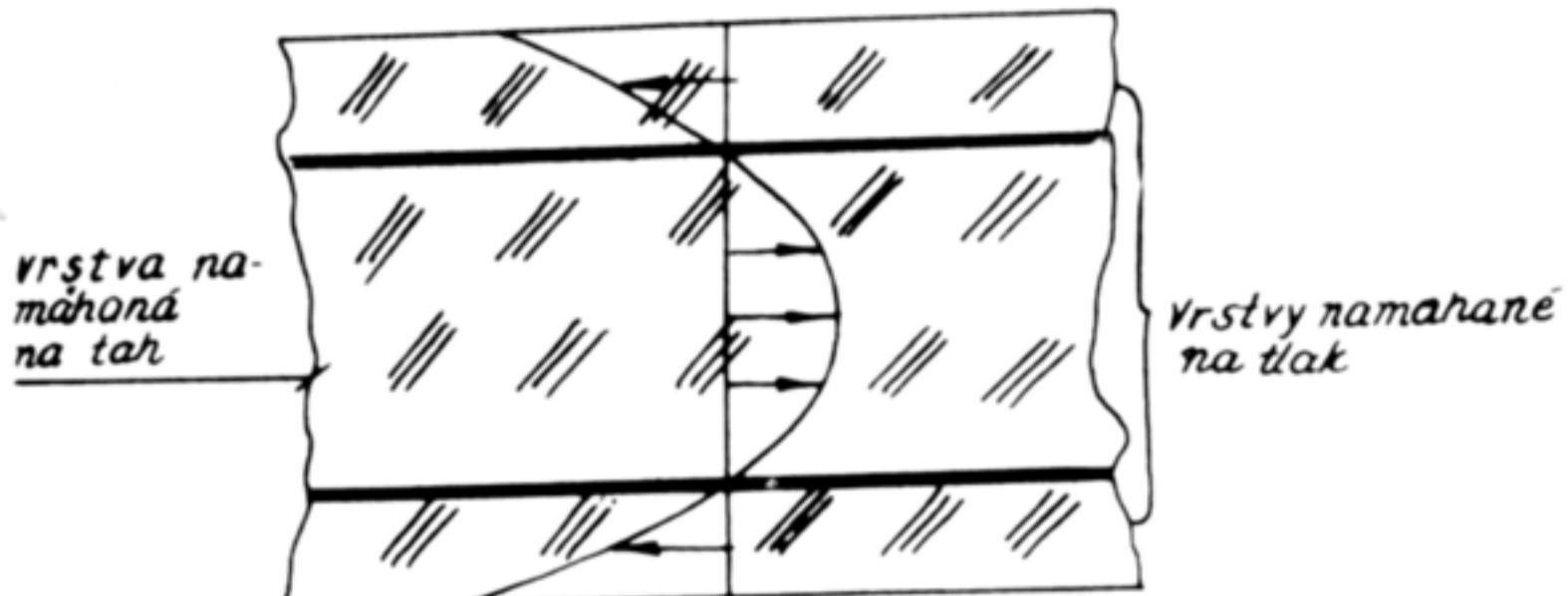
Tab. 9.7

Kategorie	Dráhový rozdíl paprsku řádného a mimořádného v nm na 1 cm
1	do 2
2	do 6
3	do 10
4	do 20
5	do 50

Všimněme si nyní metody, kterou se měří dvojdom skla. Dříve však je nutno si objasnit proces, který probíhá ve skle, když je sklo prudce ochlazeno.

Předpokládejme, že kousek skla je nahřát na teplotu měknutí skla nebo i výše a že je pak rychle ochlazován. Chladnutí skla bude probíhat tak, že se nejdříve ochladí vnější vrstvy, které také nejsou tuhouny. Ochlazování vnitřních vrstev skla a jejich smrštování probíhá tedy již pod ztuhlou povrchovou vrstvou. Přitom vnější vrstvy působí na vnitřní tahem a snaží se je natáhnout. Naopak vnitřní vrstvy se snaží při smrštování strhávat s sebou vnější vrstvy, které je

obklopují, takže vnější vrstvy jsou namáhaný na tlak. Z toho vyplývá, že v prudce ochlazovaném kousku skla vzniknou ve skle vnitřní pnutí (tlaky i tahy). Rozdelení těchto vnitřních pnutí ve skle závisí především na tvaru ochlazovaného skla, na jeho rozměrech (tloušťce), na režimu ochlazování a konečně na chemickém složení skla. Na obr. 9.11 je znázorněno rozdelení vnitřních pnutí v kousku tabulového skla.

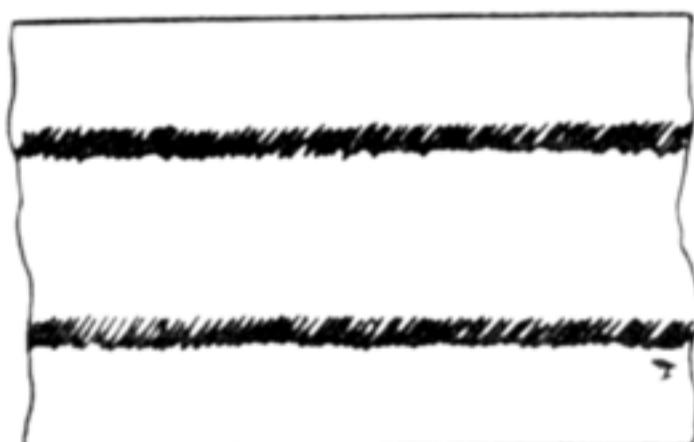


Obr. 9.11 Rozdelení vnitřního napětí v kousku tabulového skla.

Jak je z obrázku patrno, je sklo rozdeleno ve směru jeho tloušťky dvěma neutrálními vrstvami AA a BB na tři vrstvy. Obě vnější jsou namáhaný na tlak a vnitřní vrstva na tah. Neutrální vrstvy tvoří souhrnný míst, která nejsou namáhaná ani na tah ani na tlak.

Představme si nyní, že umístíme kousek skla bez vnitřního pnutí mezi zkřížené nikoly. Zorné pole příslušného zařízení bude temné. Předpokládejme

nyní, že v tomto kousku skla vyvoláme nějakým způsobem vnitřní pnutí, které bude rozdeleno podle obr. 9.11. Zorné pole se rozsvítí tak, že všechny tři vrstvy budou světlé, zatím co neutrální vrstvy zůstanou nadále tmavé, jak je to znázorněno na obr. 9.12. Je to způsobeno tím, že v místech s vnitřním napětím se paprsky



Obr. 9.12

Vzhled kousku skla s vnitřním napětím umístěného mezi zkříženými nikoly.

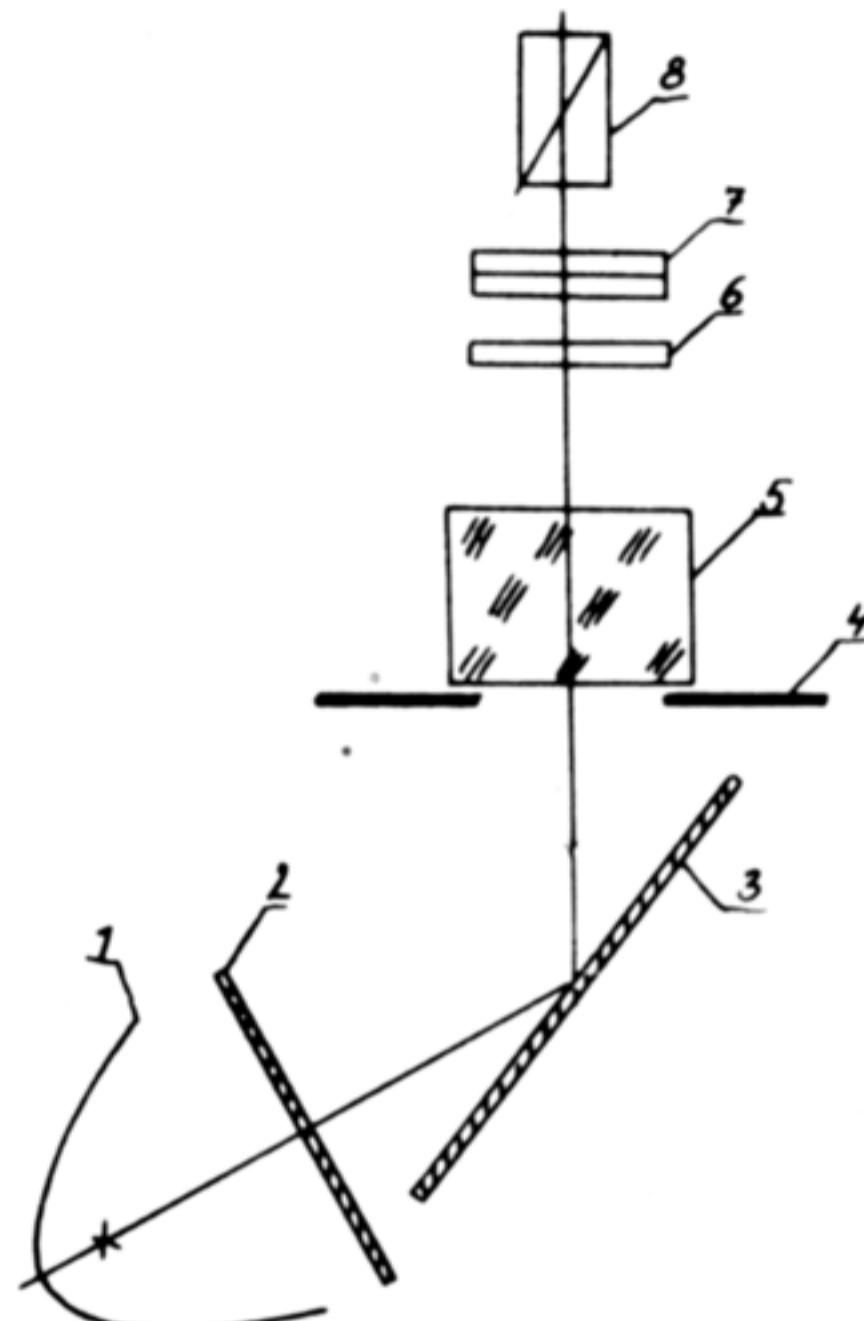
rozštěpí na řádný a mimořádný, které se šíří sklem různými rychlostmi podle velikosti pnutí. Protože v místech neutrálních čar nedochází k rozštěpení příslušných paprsků, zůstane příslušná místa temná. Tohoto jevu se pak využívá k měření dvojlamu skla.

Měření se provádí na polarimetru, jehož princip je patrný z obr. 9.13.

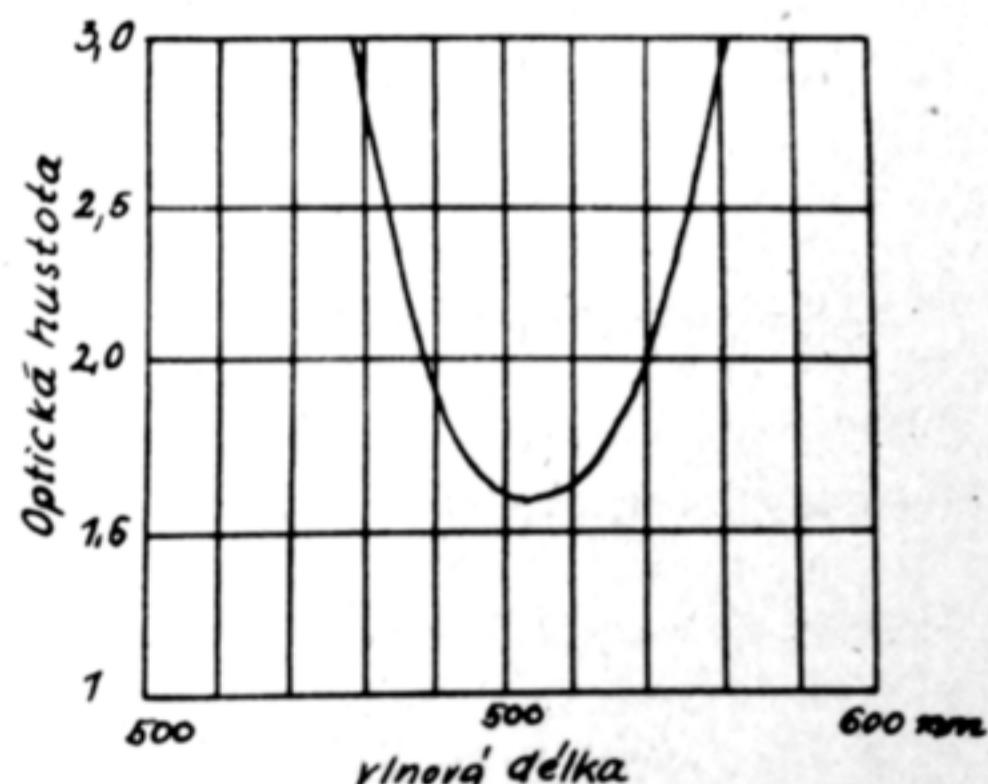
Rovnoběžný paprskový svazek, vystupující ze světelného zdroje (1), dopadá na zrcadlo (3) z černého skla, které je nastaveno tak, aby úhel dopadu paprskových svazků splňoval podmíinku maximální polarizace. Lineárně polarizovaný svazek prochází pak vzorkem zkoušeného skla (5),

který se umísťuje na stolečku (4) zeleným filtrem (6), čtvrtvlnovou destičkou (7) a analyzátorem, který je tvořen nikolem (8). Čtvrtvlnová destička je orientována tak, aby jeden z jejich hlavních směrů splýval s polarizační rovinou polarizátoru.

Spektrální propustnost zeleného filtru je určena křivkou znázorněnou na obr. 9.14.



Obr. 9.13
Princip polarimetru na měření dvojlamu skla.



Obr. 9.14
Spektrální propustnost filtru.

Tab.9.8

Kateg. dvoj- lomu	Rozměry vzorku	
	min. délka	tloušťka
1	70	1,25 tloušťky poloto- varu
2	50	
3 - 5	30	

Rozměry vzorků musí mít určité minimální hodnoty dané tabulkou 9.8.

Nikol přístroje je uložen otáčivě a je spojen s kruhovou stupnicí, dělenou po stupních.

Vlastní měření dvoj-lomu se pak provádí takto:

Analyzátor polarimetru se nastaví tak, aby jeho polarizační rovina byla kolmá na polarizační rovinu polarizátoru. Této poloze odpovídá na kruhové stupnici čtení 0° . Vzorek zkoušeného skla se umístí na stolečku přístroje tak, aby jeho boční stěny svíraly úhel 45° s polarizačními rovinami polarizátoru a analyzátoru.

Je-li zkoušené sklo dvojložné, pak se jeho okraje a střed budou jevit jasné, a budou odděleny od sebe dvěma tmavými pruhy.

Nyní se otáčí ve vhodném smyslu analyzátorem tak dlouho, až oba tmavé pruhy se přesunou do středu vzorku a splynou. Na kruhové stupnici se odečte poloha analyzátoru, tj. úhel H .

Je-li dráhový rozdíl, vyvolaný dvojložnem, od 100 do 540 nm, projeví se již vliv závislosti indexu lomu na vlnové délce, takže ve středu vzorku místo ztemnění se objeví zábarvení, což přirozeně ztěžuje správné nastavení analyzátoru. Zařadí-li se do paprskového chodu dříve popsáný zelený filtr, pak se tato obtíž odstraní.

Přesahuje-li dráhový rozdíl, vyvolaný dvojložnem, 540 nm, pak se na ploše skleněného vzorku objeví mimo dva neutrální proužky ještě řada barevných proužků. Jsou to proužky, které odpovídají místům s dráhovým rozdílem $N\lambda$. Kdyby index lomu nezávisel na vlnové délce, byly by také tyto proužky šedé nebo černé. Dráhový rozdíl, vyvolaný dvojložnem, je možno nyní rozdělit na dvě části: dráhový rozdíl rovný N -násobku vlnové délky λ odpovídající N barevným proužkům a dráhový rozdíl menší než λ , odpovídající poloze středních proužků.

Při měření se pak postupuje takto:

Do paprskového chodu se zařadí zelený filtr a určí se poloha \textcircled{H} analyzátoru, při které střední proužky se přesunou do středu vzorku a splynou.

Potom se zelený filtr vyřadí a analyzátor se nastaví na 0° . Při této poloze analyzátoru si zapamatujeme umístění neutrálních proužků. Znovu zařadíme zelený filtr a spočítáme proužky nacházející se mezi středem vzorku a neutrálním proužkem (nechť N značí jejich počet).

Pro fázový rozdíl vyjádřený ve stupních pak plyně

$$\delta = 360 N + 2 \textcircled{H} \cdot x \quad (9.14)$$

K dráhovému rozdílu Δ přejdeme pomocí úměry

$$\Delta : \lambda = \delta : 360 \quad (9.15)$$

Odtud pak pomocí (9.14) vychází

$$\Delta = \frac{\lambda \cdot \delta}{360} = \frac{\lambda \cdot (360 N + 2 \textcircled{H})}{360} .$$

Volíme-li $\lambda = 540 \text{ m}\mu$, pak pro dráhový rozdíl vyvolaný vrstvou zkoušeného skla o tloušťce 1 cm vychází

$$\Delta = \frac{540 \cdot (360 N + 2 \textcircled{H})}{360 \cdot l} = 3 \cdot \frac{180 N + \textcircled{H}}{l} \quad (9.16)$$

kde l je tloušťka měřeného vzorku skla. Z tohoto vztahu je tedy možno určit dráhový rozdíl Δ v nm pro každý z uvažovaných případů.

Nechť se např. u vzorku o tloušťce $l = 12 \text{ cm}$ naměřil úhel $\textcircled{H} = 18^\circ$ a $N = 0$. Potom z (9.16) vychází

$$\Delta = 3 \cdot \frac{180 \cdot 0 + 18^\circ}{12} = 4,5 \text{ nm} .$$

x) Úhel \textcircled{H} nutno násobit 2, neboť tento úhel charakterizuje elipticitu, která je rovna tangentě polovičního fázového posunu φ .

f) Chemická odolnost skla

Chemická stálost skla je charakterizována jeho odolností proti narušování vodou, roztoky kyselin, zásad a solí, vlhkostí, atmosférickými plyny nebo jinými chemickými látkami.

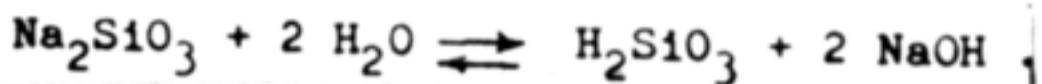
Chemická odolnost skla patří k nejdůležitějším vlastnostem skla, neboť na ní závisí technologie opracování i oblast využití příslušného skla.

Voda a slabé roztoky kyselin rozrušují optické sklo již v průběhu jeho opracování. Atmosférická vlhkost naruší povrch skla hotových součástí v přístrojích.

Chemická odolnost skla závisí jednak na chemickém složení skla, jednak na povaze látky působící na sklo a konečně na podmínkách, za kterých tato látka na sklo působí. Např. sklo, které je odolné proti působení vody a roztoku kyselin, může být velmi nestálé vzhledem k působení zásaditých roztoků, nebo roztoku solí.

Narušení povrchu skla se projevuje různým způsobem. Někdy se narušení projevuje vznikem tenkých vrstviček duhových barev, jindy jako kapenkovitý nálet nebo jako bělavé skvrny.

Těmto jevům se věnoval především akademik I.V. Grebenčíkov, který zjistil, že působením vody nebo atmosférické vlhkosti dochází na povrchu skla k hydrolyze, jejíž produkty vytváří na povrchu skla tenkou vrstvičku, jejíž hlavní složkou je kyselina křemičitá, hydroxydy nebo neropustné křemičitan. Tato hydrolyza probíhá podle rovnice



Působí-li na povrch skla voda ve formě kapaliny, pak rozpustné produkty této hydrolyzy přejdou do roztoku, zatím co kyselina křemičitá, jejíž rozpustnost ve vodě je malá, zůstává na povrchu skla jako teninká vrstvička.

Působí-li na povrch skla vlhká atmosféra, pak na povrchu skla zůstávají všechny produkty hydrolyzy, mezi nimiž probíhají další reakce, které proces narušování skla ještě zveličují.

V každém případě tato vrstvička tvorí přirozenou ochranu skla před dalším narušováním. Touto nabobtnalou vrstvičkou kyseliny křemičité musí difundovat voda, aby se dostala k dalším složkám skla. Naopak, také rozpuštěné alkálie musí prodifundovat touto vrstvičkou ze skla do vody. Proto množství produktů vznikajících hydrolyzou se zmenšuje s rostoucí tloušťkou ochranné vrstvičky. Označíme-li toto množství q , pak jeho závislost na čase t můžeme psát ve tvaru

$$q^2 = c \cdot t, \quad (10.1)$$

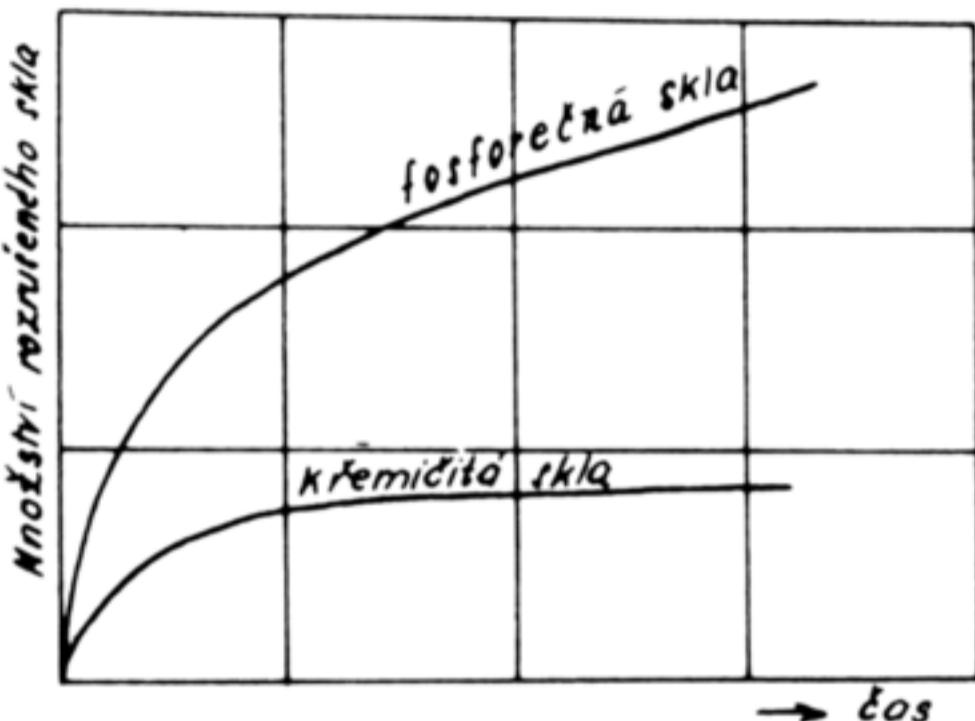
kde c značí konstantu.

Pokusně bylo potvrzeno, že tato parabolická závislost je prakticky dobře

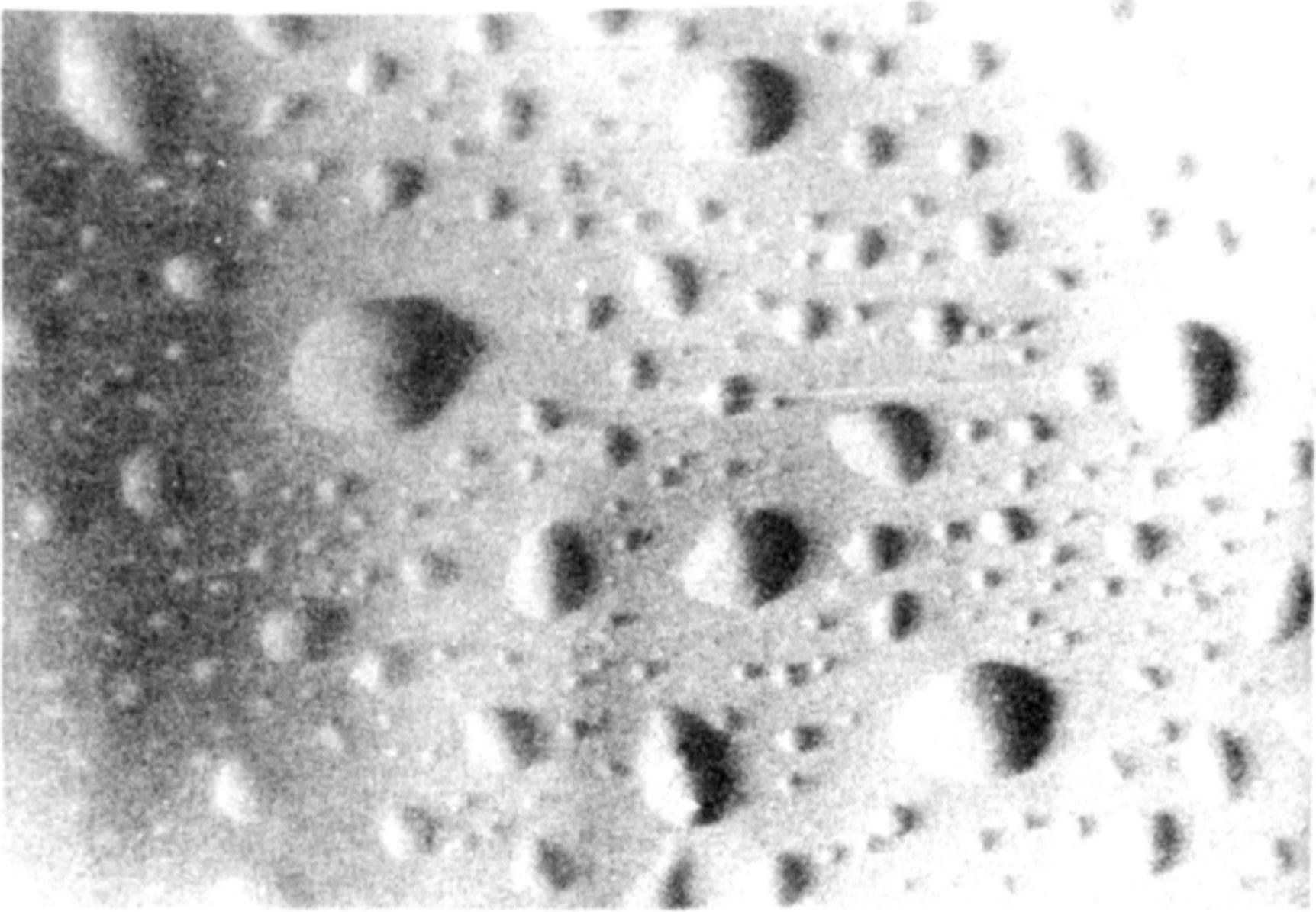
splněna u skel křemičitých a naopak není splněna u skel fosforečných, u nichž se při narušování povrchu nevytváří obdobná ochranná vrstvička, neboť tato skla neobsahují kysličník křemičitý (viz obr. 10.1).

Jak již bylo uvedeno, v případě, kdy na povrch skla působí atmosférická vlhkost, zůstávají na povrchu skla veškeré produkty hydrolyzy, působí vzájemně na sebe, čímž vznikají za spolupůsobení kysličníku uhličitého uhličitan, které se na povrchu skla usazují ve tvaru kapének. Protože jsou hygroskopické, váží na sebe vlhkost a vytvářejí drobné kapičky koncentrovaných roztoků zásad a uhličitanů. Tomuto jevu pak říkáme kapénkový nálet (obr. 10.2).

Při změně vlhkosti nebo teploty okolního vzduchu, může tento kapénkový nálet vysychat nebo se může znova objevit.



Obr. 10.1 Závislost množství produktů, vzniklých při narušování skla, na čase.



Obr. 10.2 Kapénkový nálet.

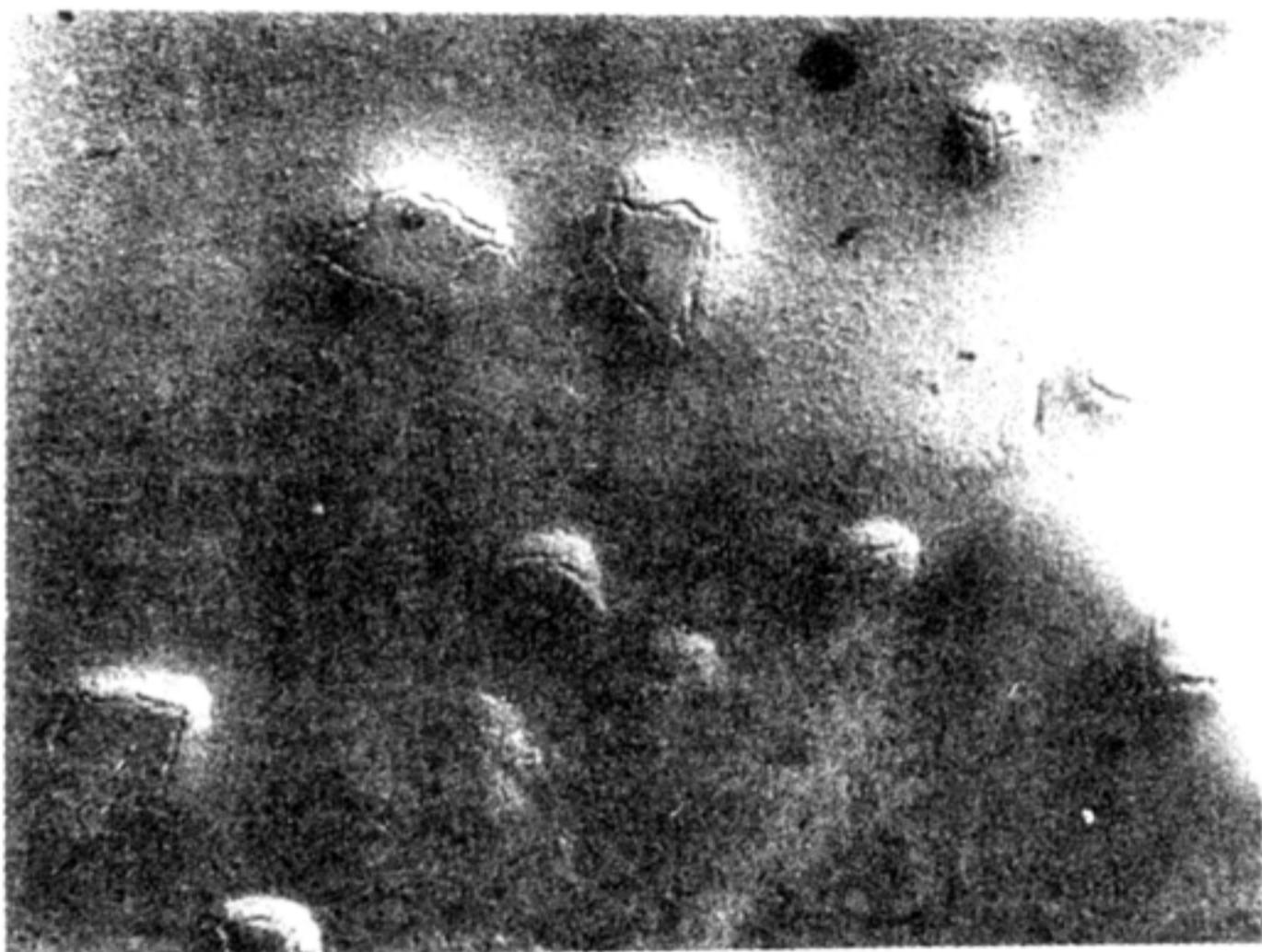
Jsou-li tyto kapénkovité útvary delší dobu ve styku s povrchem skla, pak příslušné koncentrované zásadité roztoky narušují povrch skla do poměrně velké hloubky (obr.10.3). V některých případech může proběhnout reakce mezi atmosférickou vlhkostí a alkalickými křemičitany i pod dříve zmíněnou křemičitou blankou. Protože produkty hydrolyzy mají větší objem, zbortí a roztrhají vrstvičku o tloušťce asi 0,1 mikronu, takže vznikají vyvýšeniny a trhlinky, jak je to velmi pěkně vidět na snímku (obr.10.4), který byl zhotoven elektronovým mikroskopem při zvětšení cca 20.000 - násobném.

Vodní roztoky kyselin působí na povrch skla obdobným způsobem, avšak koagulací kyseliny křemičité se tvoří intenzivněji křemičitá povrchová vrstvička.

Vliv zásaditých roztoků na povrch skla je odlišného charakteru, neboť se v tomto případě nevytváří na povrchu skla dříve zmíněná ochranná vrstvička.



Obr.10.3 Narušení povrchu skla.



Obr.10.4
Zborcení povrchové křemičité vrstvičky produkty hydrolyzy.

Bylo zjištěno, že chemická stabilita skel se zvýší i desatinásobně, když se na povrch skla působí kyselinami. Když se takto zpracované sklo vyhřeje na teplotu $400 - 450^{\circ}\text{C}$, pak

ochranná křemičitá vrstvička se ještě zhutní, čímž se podstatně zvýší chemická odolnost.

Odolnost proti vytváření náletů se určuje počtem dnů, za které se vytvoří slabý kapénkový nálet viditelný mikroskopem při zvětšení 80x. Vzorek skla se při tom udržuje v atmosféře o předepsané vlhkosti a teplotě. V soulaze s normou ČSN 71 0114 se rozděluje optické sklo podle odolnosti proti vytváření náletů na tři kategorie definované tab. 10.1.

Tab. 10.1

Kategorie	Doba, za kterou se vytvoří nálet
1	nad 90 dnů
2	30 - 90 dnů
3	méně než 30 dnů

Studium výskytu a vzniku náletů ukazuje, že

1. k vytváření náletů přispívá vysoký obsah kysličníků alkaličích kovů,
2. skla obsahující současně kysličník K_2O i Na_2O jsou odolnější vzhledem k náletům než skla, která obsahují pouze jeden z těchto dvou kysličníků,
3. skla obsahující více složek jsou odolnější než skla s menším počtem složek při stejném obsahu kysličníků alkaličích kovů.
4. Některé kysličníky, jako např. kysličník hlinitý a jiné, zvyšují odolnost skla k tvorění náletů.

Zvláštním druhem náletů jsou nálety tukové a biologické.

Tukové nálety jsou tvořeny malými kapénkami tuku, který se dostal na povrch skla z čisticích prostředků, z kovových součástí apod. Vlivem vzdušné vlhkosti se tukové kapénky zvětšují tak, že za určitý čas se tyto kapičky spojí v souvislý nálet. Tento nálet se odstraní organickými rozpustidly.

Biologický nálet je tvořen plísněmi a vodními řasami, jejich spory se vždy nacházejí ve vzduchu. Tyto nálety vznikají především na okrajích optických součástí, kde jsou tyto

ve styku s kovovými součástkami, papírovými podložkami, nebo součástkami z umělých hmot. Produkty plísni jsou kyselé a proto pod plísňemi je sklo vždy narušené. Příčinou vzniku těchto náletů je především velká vlhkost a vysoká teplota.

Vzniku těchto náletů lze předcházet tím, že se používá při montáži přístrojů dezinfikovaných součástí (pomocí fungicid) a dále pečlivým dodržováním čistoty při montáži.

g) Skvrnitost povrchu skla

Jak již bylo jednou uvedeno, působením vody, nebo slabých roztoků kyselin, přecházejí rozpustné soli, které jsou produktem hydrolýzy, s povrchu skla do roztoku. Je to jakási výměna bází. Alkalické olovnaté, barnaté, a jiné ionty vstupují do roztoku a vodíkové ionty zaujmají jejich místa. Tím vzniká na povrchu skla porosní vrstvička vodíkového skla. (jde o hydráty kyseliny křemičité, které vysušením přejdou v pórézní křemičitou průhlednou vrstvičku), jehož index lomu je vždy nižší než index lomu základního skla. Dosáhne-li tato vrstvička určité tloušťky, projeví se vznikem interferenčních barev. Stanovíme-li standardní koncentraci kyseliny, teplotu, barvu interferenční vrstvy a úhel, pod kterým se tato vrstva pozoruje, můžeme určit snadno odolnost skla proti působení kyselin z času, který je třeba, aby se vytvořila vrstvička dané interferenční barvy.

Odolnost čerstvě vyleštěného povrchu skla proti skvrnitosti se určí podle ČSN 71 0114 dobou, za kterou se vytvoří působením 0,1 n kyseliny octové při 80°C vrstvička o tloušťce $135 \text{ m}\mu$. Podle toho se skla dělí na pět tříd, definovaných tab. 10.2.

Problémy chemické odolnosti skla proti vytváření náletů a skvrnitosti byly podrobně prostudovány v Ústavu pro výzkum optiky a jemné mechaniky v Přerově RNDr S. Minářem, CSc^{x)}, který je též autorem snímků na obr. 10.2 až 10.4. Výsledky jeho prací jsou podrobně shrnutý v článcích časopisu Jemná mechanika a optika.

^{x)} Dr. S. Minář, Jemná mechanika a optika, 1, 1956, str. 17, 3, 1956, str. 87, 2, 1957, str. 46 a 3, 1957, str. 79.

Tab. 10.2

Třída	Doba, za kterou se vytvoří vrstvička o tloušťce 135 μ
1	nad 20 hodin
2	20 - 5 hodin
3	5 - 1 hodin
4	1 - 0,1 hodin
5	méně než 0,1 hodin

11. Tepelné vlastnosti skla

K tepelným vlastnostem skla patří:

- a) koeficient lineární tepelné roztaživosti
- b) závislost indexu lomu na teplotě
- c) teplota spékání.

a) Koeficient lineární tepelné roztaživosti nutno brát v úvahu při některých tepelných technologických opracování optických součástí, např. při spékání dvou součástí, jak je tomu v případě svařovaných bifokálních brýlových skel, nebo v případě určování správného uložení (vůle) optických součástí (čoček) do kovových objímek, nebo konečně při tmelení dvou optických součástí vyrobených z různých druhů skel apod.

Střední hodnota koeficientu lineární tepelné roztaživosti se určí ze vztahu

$$\Delta l = \alpha (t_2 - t_1)$$

$$\alpha = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad (11.1)$$

kde l je délka příslušného vzorku a Δl prodloužení vyvolané změnou teploty o $\Delta t {}^{\circ}\text{C}$.

Koeficient lineární tepelné roztaživosti nabývá pro optická skla hodnot $69 - 100 \times 10^{-7}$ v intervalu teplot od $20 - 120 {}^{\circ}\text{C}$ a $69 - 128 \cdot 10^{-7}$ v intervalu od $20 - 240 {}^{\circ}\text{C}$.

Koeficient lineární roztaživosti závisí na chemickém složení skla. V prvním přiblížení je možno koeficient vyjádřit následujícím vztahem

$$\alpha = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + \dots \quad (11.2)$$

kde P_1, P_2, P_3, \dots značí množství jednotlivých kysličníků vyjádřená ve váhových procentech a $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ empirické koeficienty těchto kysličníků. Jejich hodnoty jsou uvedeny pro některé kysličníky v tabulce 11.1. *)

Tab. 11.1

Kysličník	$\alpha \cdot 10^7$	Kysličník	$\alpha \cdot 10^7$
SiO_2	0,05	K_2O	3,90
B_2O_3	-0,66	TiO_2	1,37
Al_2O_3	0,17	ZnO	0,07
MgO	0,45	PbO	1,06
CaO	1,66	As_2O_3	0,67
BaO	1,73	P_2O_5	0,67
Na_2O	4,32	Sb_2O_3	1,20

Jak je vidět z této tabulky, největší vliv na koeficient lineární tepelné roztaživosti skla mají kysličníky alkalických kovů. Velmi příznivě působí naopak kysličník bority B_2O_3 , který koeficient snižuje. Např. pro sklo F 4 vychází podle tab. 5.1

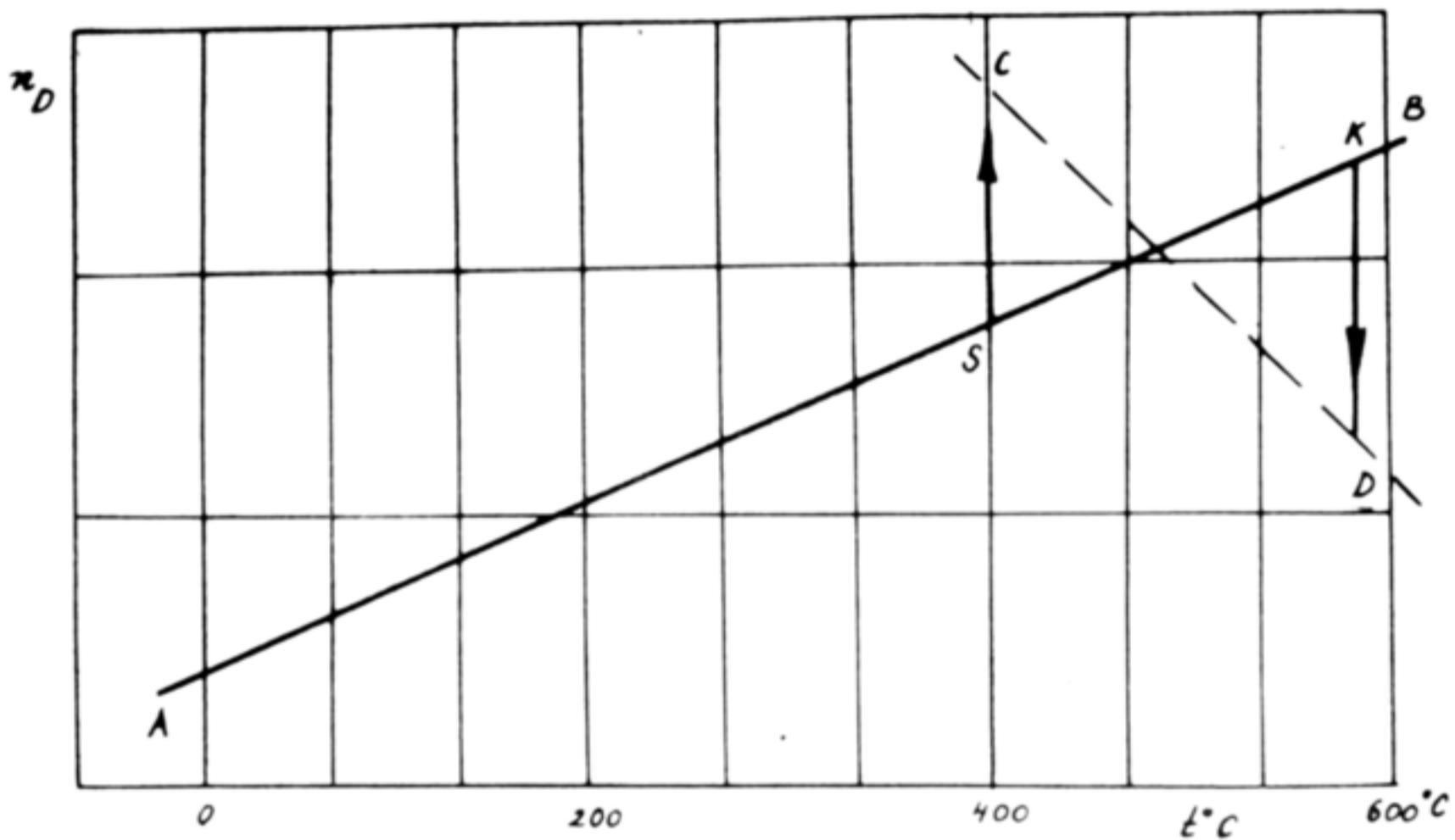
$$\begin{aligned} \alpha &= (46,9 \cdot 0,05 + 6,3 \cdot 3,90 + 46,5 \cdot 1,06 + 0,2 \cdot 0,67) \cdot 10^{-7} = \\ &= (2,35 + 24,57 + 49,29 + 0,13) \cdot 10^{-7} = \\ &= 76,34 \cdot 10^{-7}. \end{aligned}$$

*) I.I.Kitajgorodskij, Technologija stekla, Moskva 1951,
str.68.

b) Závislost indexu lomu skla na teplotě

Index lomu skla n s teplotou u většiny optických skel roste. V blízkosti teploty měknutí skla jsou změny indexu lomu svázány se strukturními změnami probíhajícími ve skle při těchto teplotách. Každé teplotě v této oblasti odpovídá určitá rovnovážná struktura, kterou se snaží dosáhnout sklotvor ná soustava příslušného skla. Rychlosť, se kterou dosáhne sklovina tento rovnovážný vztah, závisí na viskositě skla. Nabude-li sklo rovnovážného stavu, pak další udržování skla na příslušné teplotě nemá již vliv na změnu indexu lomu.

Akademik A.A. Lebeděv a A.I. Stožarov zjistili, že tento rovnovážný index lomu se s rostoucí teplotou zmenšuje lineárně, jak je to vyznačeno přímkou CD na obr. 11.1



Obr. 11.1 Závislost indexu lomu skla na teplotě.

Při těch teplotách, při kterých velká viskosita skla nedovolí, aby sklo dosáhlo rovnovážného stavu, nemá udržování skla na nízkých teplotách (pod teplotou měknutí) vliv na index lomu. Index lomu s rostoucí teplotou v této oblasti roste podle přímky AB . Je to přímka, která charakterizuje čistou tepelnou změnu indexu lomu (bez vlivu strukturních změn).

Zahřejeme-li kousek skla rychle na teplotu blízkou teplotě měknutí a udržujeme-li ho na této teplotě, pak jeho index lomu bude vzrůstat nebo klesat, podle toho, jak vysoká bude tato teplota. Je-li při této teplotě index lomu vzorku skla vyšší než je index odpovídající rovnovážnému stavu, pak při udržování skla na této teplotě bude index lomu klesat tak dlouho, až dosáhne hodnoty odpovídající rovnovážnému stavu (viz bod K na obr. 11.1).

Bude-li index lomu odpovídající teplotě, na které je vzorek skla udržován, nižší než je hodnota odpovídající rovnovážnému stavu (bod S na obr. 11.1), bude během času index růst a to tak dlouho, až dosáhne hodnoty odpovídající rovnovážnému stavu. Poloha rovnovážné přímky \overline{CD} indexu lomu je pro daný druh skla konstantní, zatím co poloha přímky \overline{AB} , vyjadřující teplotní závislost indexu lomu, je závislá na předchozí teplotní historii skla a na rychlosti zahřívání. Tato přímka se posouvá rovnoběžně k sobě.

Proto přímka \overline{CD} má velký význam pro chladící postup skla.

c) Teplota spékání

Dvě skla je možno spékat nahřejeme-li je na určitou teplotu zvanou teplotou spékání. Teplota spékání je teplota, při které se začnou spékat dva vzorky skla o rozměrech $20 \times 20 \times 10$ mm, které jsou položeny na sebe vyleštěnými plochami a které jsou nahřívány tak, aby teplota vzrůstala o 2°C za každou minutu. Nejnižší teplota spékání kolem 500°C přísluší těžkým flintovým sklům a nejvyšší kolem 710°C přísluší těžkým korunovým sklům.

12. Mechanické vlastnosti skla

K mechanickým vlastnostem skla patří především

- a) specifická váha
- b) pružnost
- c) pevnost
- d) tvrdost
- e) křehkost

a) Specifická váha má význam pro optického konstruktéra z hlediska váhy konstruovaných přístrojů.

Závisí především na chemickém složení skla. Největší specifickou váhu mají skla obsahující velké procento kysličníku olovnatého PbO. Jsou to těžká flintová skla, jejichž specifická váha dosahuje až hodnot 6 g/cm³.

Specifickou váhu skla můžeme podle jeho chemického složení určit s přesností dvou až tří jedniček druhého desetinného místa pomocí empirického vztahu

$$\frac{100}{\rho} = \frac{P_1}{d_1} + \frac{P_2}{d_2} + \frac{P_3}{d_3} + \dots, \quad (12.1)$$

kde P_1, P_2, P_3, \dots značí procentní obsah kysličníků tvořících jednotlivé složky skla a d_1, d_2, d_3, \dots koeficienty (specifické váhy) příslušné k těmto kysličníkům. Hodnoty těchto koeficientů jsou uvedeny v tab. 12.1. ^{x)}

Tab. 12.1

Kysličník	d	Kysličník	d
Na ₂ O	3,20	PbO	10,30
K ₂ O	3,20	B ₂ O ₃	2,90
MgO	3,25	Al ₂ O ₃	2,75
CaO	4,30	As ₂ O ₃	3,33
ZnO	5,94	Sb ₂ O ₃	3,00
BaO	7,20	SiO ₂	2,24

^{x)} I.I.Kitajgorodskij, Technologija stekla, Moskva 1951, str.60.

Příklad: Určeme specifickou váhu skla F 4 podle tab. 5.1.

$$\frac{100}{\rho} = \frac{46,9}{2,24} + \frac{6,3}{3,20} + \frac{46,5}{10,30} + \frac{0,2}{3,33} =$$

$$= 20,94 + 1,97 + 4,52 + 0,060 =$$

$$= 28,03$$

Tedy $\rho = \frac{100}{28,03} = 3,57 \text{ g/cm}^3$.

U optických skel nabývá specifická váha u jednotlivých druhů skel hodnot ve velmi širokém rozsahu od $2,36 \text{ do } 6 \text{ g/cm}^3$.

b) Pružnost skla

Napínáme-li tyčinkou skla o délce ℓ a průřezu S silou P, pak pro příslušné protažení $\Delta\ell$ tyčinky platí

$$\Delta\ell = \frac{P \cdot \ell}{E \cdot S}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell}, \quad \sigma = \frac{P}{S} \quad (12.2)$$

kde E značí modul pružnosti skla. Modul pružnosti E mění se s chemickým složením od 4.800 do 8.300 kg/mm^2 . U křemenného skla nabývá hodnoty 7.140 kg/mm^2 .

Kysličníky CaO a B_2O_3 (do 12 %) modul skla zvyšují. Tácké modul pružnosti je možno vyjádřit empirickými vztahy.

c) Pevnost skla

Pevnost skla se velmi liší a to podle toho, je-li sklo namáhané na tah nebo na tlak. Pevnost skla na tah závisí velmi na jakosti povrchu příslušné součásti. Malé, okem neviditelné trhlinky nebo škrábance, pevnost skla velmi snižují.

Pevnost skla na tah závisí na chemickém složení skla a pohybuje se v rozmezí od $3,5 - 8,5 \text{ kg/mm}^2$. Pevnost skla s obsahem CaO , B_2O_3 (do 15 %) a BaO roste, stejně jako s obsahem PbO a Al_2O_3 , avšak v menší míře.

Pevnost skla na tlak je 15 - 20-krát vyšší než pevnost skla v tahu a pohybuje se v rozmezí od 50 do 200 kg/mm^2 .

Pevnost F skla v tahu a pevnost f skla na tlak je možno určit s přesností 15 - 20% pomocí empirického vztahu

$$F = P_1 F_1 + P_2 F_2 + P_3 F_3 + \dots$$

resp.

(12.3)

$$f = P_1 f_1 + P_2 f_2 + P_3 f_3 + \dots ,$$

kde P_1, P_2, P_3, \dots značí procentuální obsah jednotlivých kysličníků a F_1, F_2, F_3, \dots , resp. f_1, f_2, f_3, \dots koeficienty charakterizující jednotlivé kysličníky ve skle. Jejich hodnoty jsou uvedeny v tab. 12.2.

Tab. 12.2

Kysličník	F	f	Kysličník	F	f
Na ₂ O	0,02	0,60	PbO	0,025	0,48
K ₂ O	0,01	0,05	Al ₂ O ₃	0,05	1,0
MgO	0,01	1,10	B ₂ O ₃	0,065	0,90
CaO	0,20	0,20	P ₂ O ₅	0,075	0,76
ZnO	0,15	0,60	As ₂ O ₃	0,03	-
BaO	0,05	0,62	SiO ₂	0,09	1,23

Např. pro sklo F 4 vychází

$$\begin{aligned} F &= 46,9 \cdot 0,09 + 6,3 \cdot 0,01 + 46,5 \cdot 0,025 + 0,2 \cdot 0,03 = \\ &= 4,22 + 0,063 + 1,163 + 0,006 = 5,452 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &= 46,9 \cdot 1,23 + 6,3 \cdot 0,05 + 46,5 \cdot 0,48 + 0,2 \cdot 0 \\ &= 57,69 + 0,32 + 22,32 = 80,33 \text{ kg/mm}^2 \end{aligned}$$

d) Tvrdost skla

Tvrdost skla ve velké míře ovlivňuje produktivitu různých metod opracování skla. Tvrdost skla je možno měřit různým způsobem. Avšak rozdělit skla podle Moosovy stupnice tvrdosti není možné, protože skoro všechna křemičitá skla ma-

jí tvrdost kolem 5 - 7, takže podle této stupnice by nebylo možno optická skla z hlediska tvrdosti od sebe odlišit.

Proto byly hledány takové metody, které dovolují z tohoto hlediska jednotlivé druhy skel differencovat.

Proto se užívá buď metody rycí nebo brousící. Princip první metody spočívá v tom, že do leštěného povrchu skla se vyryje diamantovou jehlou, mající předepsaný úhel špičky, vryp při určitém standardním zatížení jehly. Mírou tvrdosti je pak šířka vrypu vyjádřená v mikronech. Může se však také postupovat tak, že se jehla zatěžuje různými závažíčky tak, aby šířka vrypu byla vždy stejná, např. 10 mikronů. Potom mírou tvrdosti skla je velikost závažíčka.

Podle Kačalova se tvrdost určuje tzv. poměrnou brusnou tvrdostí. Je určena poměrem objemu skla sebroušeného za standardních podmínek ze vzorku skla značky BK 7 (K 8 vyrobeného v SSSR) a objemu skla sebroušeného za stejných podmínek ze vzorku daného skla. Hodnoty takto určených poměrných brusných tvrdostí se pohybují od 0,5 až do 1,0.

Také tvrdost skla závisí na jeho chemickém složení. K nejtvrdším sklům patří tavený křemen, a některá boritokřemičitá skla, která obsahují B_2O_3 do 10 - 12 %. Skla obsahující kysličníky alkalických kovů jsou měkčí. Nejměkčí skla jsou těžká flintová skla, která obsahuje velké procento PbO.

Ukazuje se, že existuje určitá závislost mezi chemickou odolností skla a pevností skla. Obyčejně skla velmi chemicky odolná bývají současně velmi mechanicky pevná.

e) Křehkost skla

Křehkými se nazývají takové materiály, které se rozruší, když se jen málo překročímez pevnosti. Křehkost skla podstatně omezuje jeho použití.

Křehkost skla se charakterizuje tzv. křehkostí na úder. Vzorek zkoušeného skla mává obyčejně tvar malé krychličky. Na plochu této krychličky se nechá několikrát dopadat z určité výšky h ocelová kulička o váze P. Je-li nutno, aby k rozrušení vzorku skla dopadla kulička několikrát z výšky

h, pak křehkost příslušného skla se určí takto. Nejdříve se určí celková práce S potřebná k rozrušení vzorku, připadající na jednotku jeho objemu. Platí

$$S = \frac{\sum P_h}{V}$$

(12.4)

kde $\sum P_h$ je součet prací vykonaných kuličkou při jednotlivých úderech a V objem vzorku zkoušeného skla.

Potom křehkost na úder je vyjádřena vztahem

$$D = \frac{\text{pevnost f při tlaku}}{\text{práce } S}$$

13. Filtrová optická skla

Z filtrového skla se zhotovují součástky, tzv. filtry, které mají vymezit propustnost určitého spektrálního oboru. Filtry se používají především v černobílé i barevné fotografii, jako ochrana před zářením o velkém jasu nebo teplotě, nebo konečně v různých optických přístrojích apod.

Filtrové sklo se vyrábí tak, že k základní sklovině se přidají tzv. barvící látky v poměrně malém množství (0,7 až 4 %). Zabarvení a intenzita zabarvení filtrového skla závisí na povaze barvící látky, na její koncentraci, na složení základní skloviny, a v určité míře na režimu výroby.

Barvící látky se mohou ve skle nacházet buď v molekulovém roztokovém stavu nebo v koloidním stavu. Podle toho dělíme barvící látky na:

- a) molekulární
- b) koloidní.

V prvním případě je světlo odpovídající spektrální oblasti pohlcováno ionty nebo molekulami barvící látky. V druhém případě je světlo příslušného spektrálního oboru pohlcováno koloidními částicemi barvící látky rozptýlenými ve sklovině a absorpcie závisí na velikosti a povaze těchto částic.

K molekulárním barvícím látkám patří kysličníky některých těžkých kovů, jako kobaltu, mědi, železa, chromu, titanu, niklu apod. Tyto kysličníky se zavádí do skloviny ve formě solí.

Jako koloidních barviv se používá nejčastěji částic selenidu kadmia ($CdSe$) a sírníku kadmia (CdS), nebo zlata, mědi a stříbra.

S ohledem na jednoduchost a krátkost znaku se filtrová skla označují dvěma až třemi písmeny a číslem.

První písmeno nebo dvě písmena vyznačují u zahraničních výrobců obyčejně celou skupinu filtrů, přičemž toto písmeno je počátečním písmenem barevného odstínu, ve kterém se jeví filtry této skupiny lidskému oku. Např. v SSSR označují modré filtrové sklo C C 2 (sinnoje stěklo), nebo filtrové sklo pro ultrafialovou oblast YOC (uviolevoe temnoje stěklo).

V NDR a NSR podobně modré filtrové sklo je označeno BG2 (blau Glas), stejně jako ve Francii je filtrové sklo označeno VB (verre bleu). Stejně je tomu i v Anglii, kde se toto sklo označuje OB (blue) nebo v USA, kde se označuje jediným písmenem B (blue). Jak je z těchto příkladů vidět, pak vždy jedno z uvedených dvou nebo tří písmen značí "sklo", např. C stěklo, G Glas, V verre. V anglii písmeno O je společné všem filtrovým sklům. Jedině USA označuje filtrové sklo jediným písmenem, které vyznačuje odstín barvy, ve které se příslušné filtry jeví oku.

Arabská číselice připojená k označení filtrového skla nemá zvláštní fyzikální význam a udává pouze pořadí, ve kterém byly jednotlivé typy dané skupiny vyvinuty.

Protože obdobné označování filtrových skel vyráběných v ČSSR by narazilo na potíže, neboť by nebylo možné se vyhnout písmenům s háčkem, což by při vývozu filtrového skla bylo velmi nevhodné, bylo pro označování filtrových skel vyráběných v ČSSR zvoleno názvosloví podložené fyzikálně, které je srozumitelné v mezinárodním měřítku. Princip označování spočívá v tom, že určitá skupina filtrových skel, která se jeví lidskému oku v určitém barevném odstínu, se označí velkým písmenem, odpovídajícím označení Frauenhoferovy spektrál-

ní čáry nacházející se v oblasti spektra odpovídající danému barevnému odstínu. Tabulka 13.1 obsahuje přehled Frauenhoferových čar použitých pro označení čs. optických filtrových skel.

Tab. 13.1

Záření	Hrubý vlnový rozsah v Å	Frauenhoferova čára		
		označení	vlnová délka v Å	prvek
ultrafial.	pod 4.000	(H)	3.970	Ca
fialové	4.000 - 4.300	(G)	4.308	Fe
modré	4.300 - 4.900	(F)	4.862	H
zelené	4.900 - 5.700	(E)	5.270	Fe
žluté	5.700 - 5.900	(D)	5.893	Na
oranžové	5.900 - 6.500	(C)	6.563	H
červené	6.500 - 7.500	(B)	6.870	O
infračerv.	nad 7.500	(A)	7.608	O

Ochranné, teplo pohlcující filtry (tzv. dethermální) byly vyjmuty ze skupiny modrých filtrů a byly označeny písmenem T. Neutrální šedá filtrová skla, která nemají prakticky barevný odstín, byla označena písmenem N.

Filtrová skla vyznačující se selektivní propustností v neviditelných spektrálních oblastech, tj. v oblasti ultrafialové a infračervené a označují tak, že se k příslušnému písmenu připojí malé písmeno "s". Tedy As značí selektivní filtrová skla pro infračervenou oblast a Hs selektivní filtrová skla pro ultrafialovou oblast. Přehled označení čs. filtrových skel je uveden v tab. 13.2.

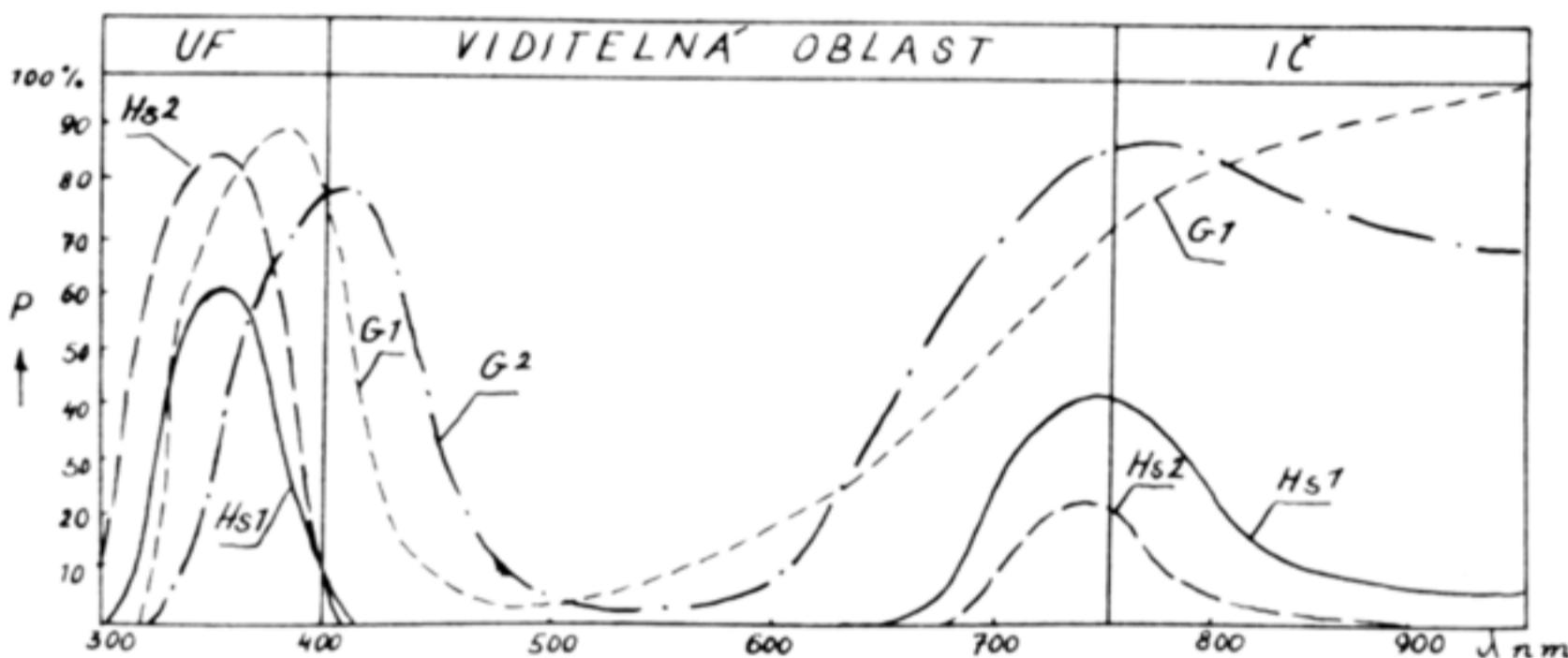
a) Selektivní filtry pro ultrafialovou oblast a filtry fialové

Tmavě fialové a červenofialové filtry skupiny Hs mají selektivní propustnost v blízké ultrafialové oblasti od 3.000 - 4.000 Å. Viditelnou oblast potlačují až na červené záření s maximem 7.500 Å.

Tab. 13.2

Označení	Barevný odstín
Hs	selektivní ultrafialové
G	fialové
F	modré
E	zelené
D	žluté
C	oranžové
B	červené
As	selektivní infračervené
T	teploto pohlcující
N	neutrální

K jejich vybarvení se používá kombinace kysličníků NiO a CoO s několikanásobnou převahou NiO.



Obr.13.1 Průběh spektrální propustnosti filtrů skupiny Hs a G ($d = 2 \text{ mm}$, u Hs 2 je $d = 1 \text{ mm}$).

Filtr Hs 1 a Hs 2 se používá ve spojení se rtuťovou lampou k vymezení spektrální čáry o vlnové délce $\lambda = 3650 \text{ Å}$.

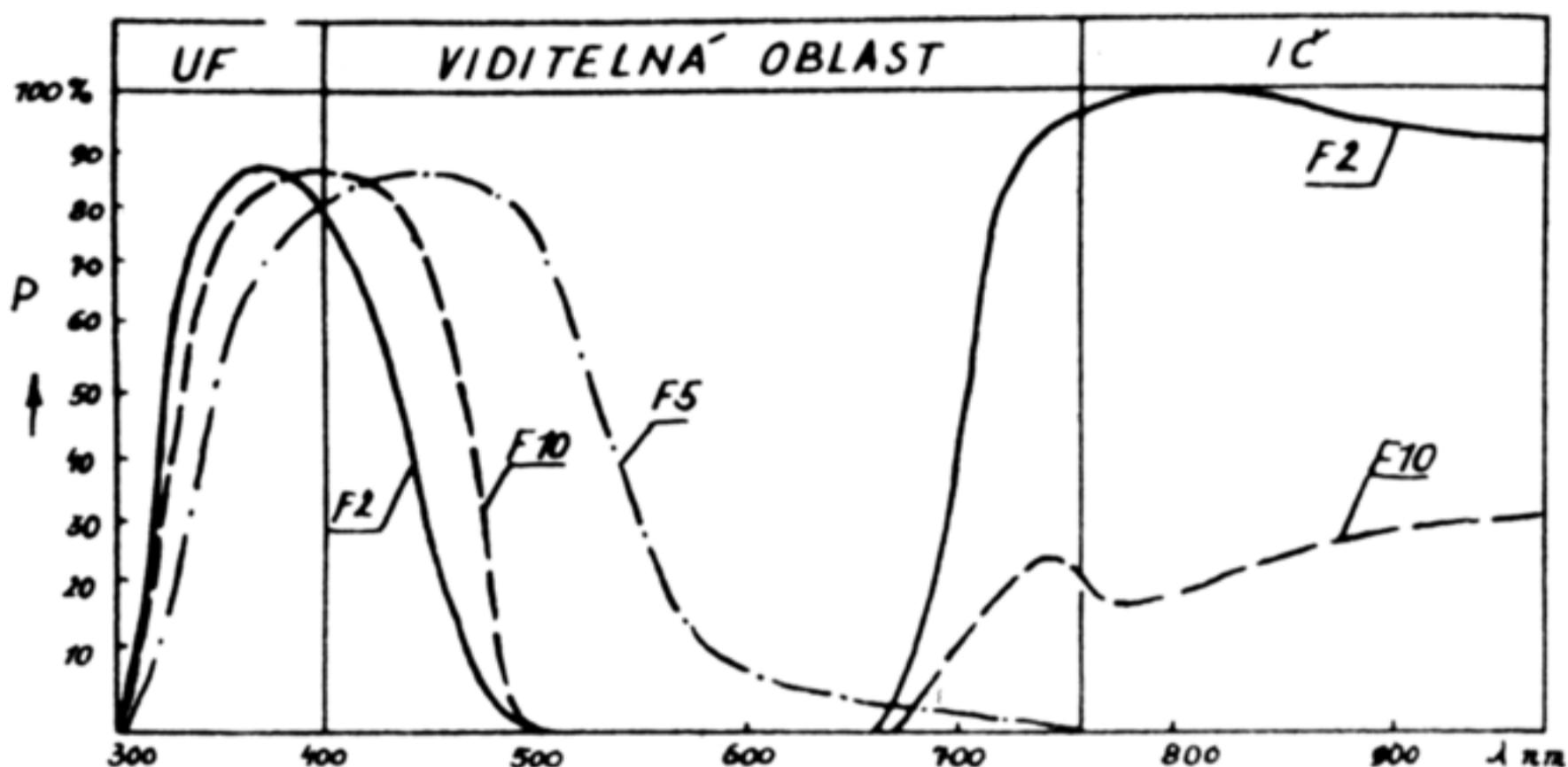
Filtr G 1 je tvořen základním olovnatým sklem obarveným přísadou KMnO_4 a filtr G 2 je tvořen bezkřemičitým olovnato-boritým sklem obarveným CoO.

Filtr G 1 v kombinaci s filtrem F 8 mění barevnou teplotu zdroje A (2850°K) na teplotu zdroje A (4800°K).

b) Filtry modré a fialově modré

Jsou to filtry skupiny F a jsou barveny kysličníkem CoO , CuO nebo jejich kombinací. Těchto filtrů se používá ve fotografii a kolorimetrii.

Křivky spektrální propustnosti některých filtrů této skupiny jsou uvedeny na obr. 13.2.



Obr.13.2 Průběh spektrální propustnosti některých filtrů skupiny F (pro $d = 2 \text{ mm}$).

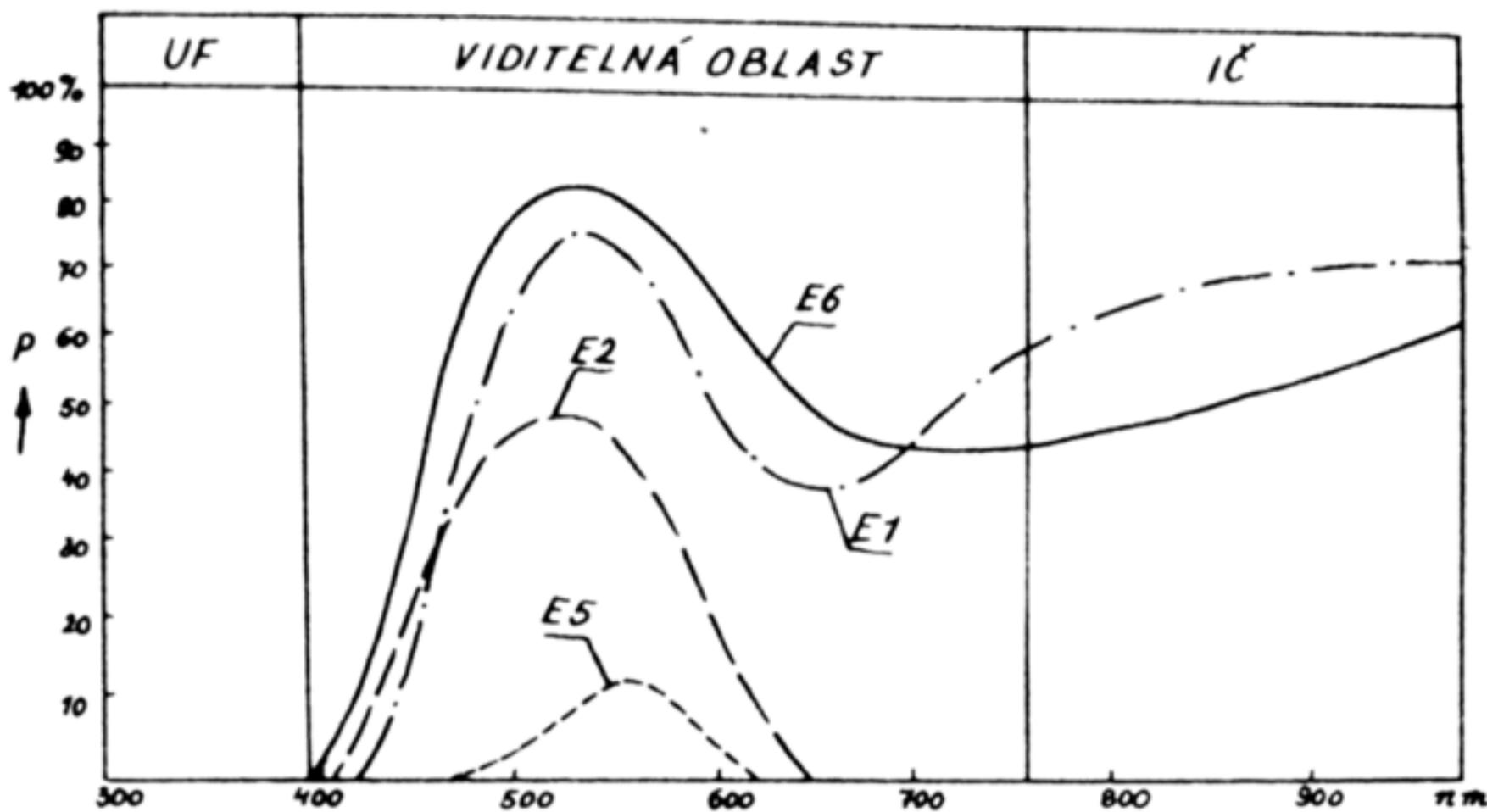
c) Filtry zelené a žlutozelené

Jsou to filtry skupiny E. Jsou vybarveny kombinací $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ a CuO . Filtr E 5 se používá pro práce v tmavé komoře při zpracování panchromatického materiálu. Ostatní filtry této skupiny se používají ve fotografii.

Spektrální propustnosti některých filtrů této skupiny jsou znázorněny na obr. 13.3.

d) Filtry zelenožluté a žluté

Tyto filtry patří do skupiny D. Zelenožluté filtry této skupiny jsou vybarvovány $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ nebo v kombinaci s Fe_2O_3 . Hloubka minima v okolí vlnové délky 6500 Å, tj. zelenější



Obr.13.3 Průběh spektrální propustnosti některých filtrů skupiny E (pro $d = 2$ mm a u E 5 a E 6 pro $d = 1$ mm)

odstín filtru je ovlivňována poměrem trojmocných a šestimocných iontů chromu. Minimum je tím výraznější, čím větší část chromu je v trojmocné formě. Malý přídavek As_2O_3 působí redukčně na šestimocné ionty chromu. Tím se toto minimum prohlubuje a filtr nabývá zelenějšího odstínu.

Žluté filtry skupiny D se vybarvují kombinací CdS a S.

Spektrální propustnost těchto filtrů je patrná z obr. 13.4. Jak je z tohoto obrátku patrno, jedná se o filtry se strmou absorpční hranou.

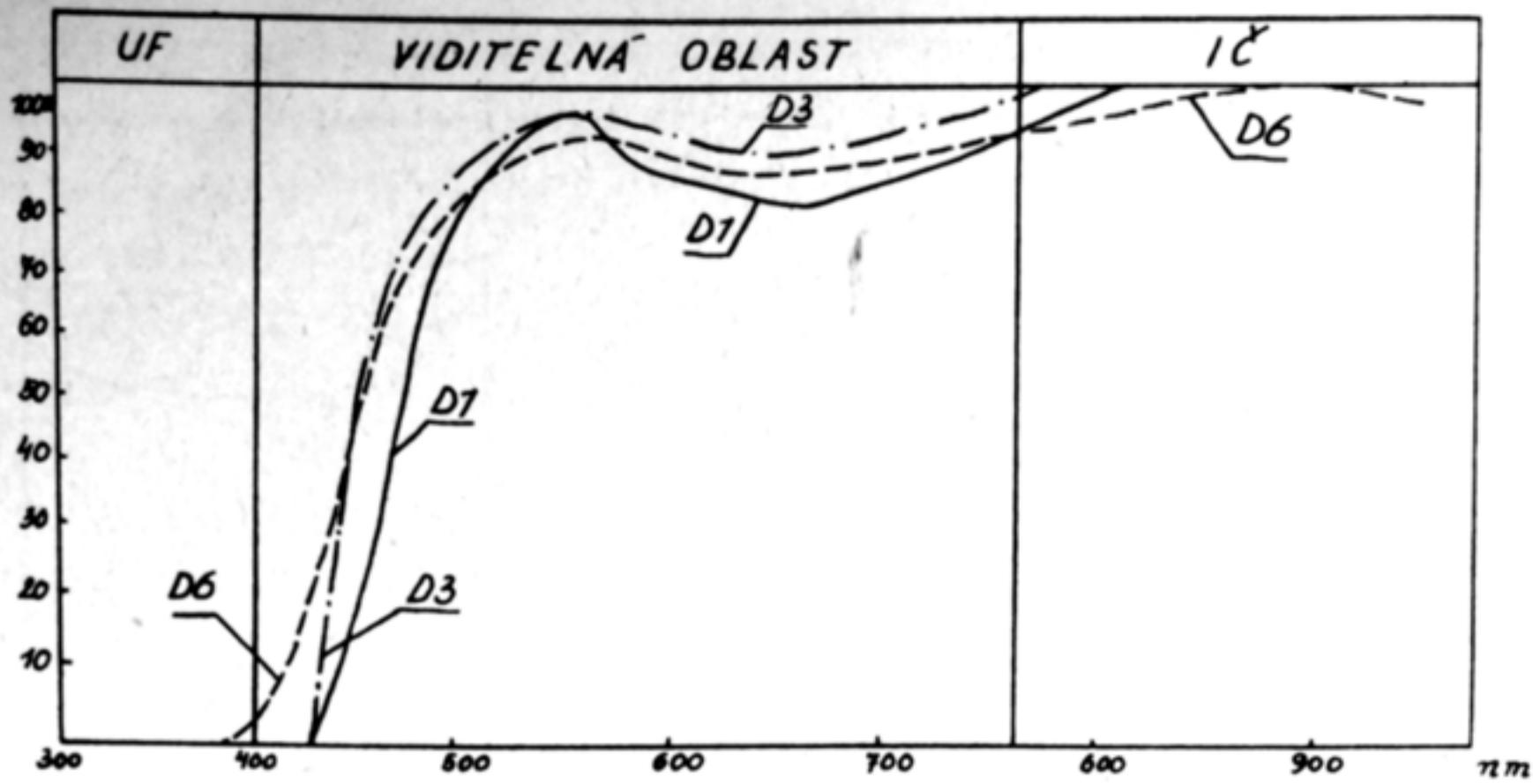
Zelenožluté a žluté filtry nacházejí opět největší použití ve fotografické praxi.

e) Filtry oranžové a červené

Podstatou zabarvení filtrů oranžových tvořících skupinu C jsou smíšené krystalky síroselenidu kademnatého, $CdSe - CdS$.

Při tom rostoucí podíl $CdSe$ posunuje absorpční hranu k delším vlnovým délkám, čímž filtry nabývají červeného odstínu.

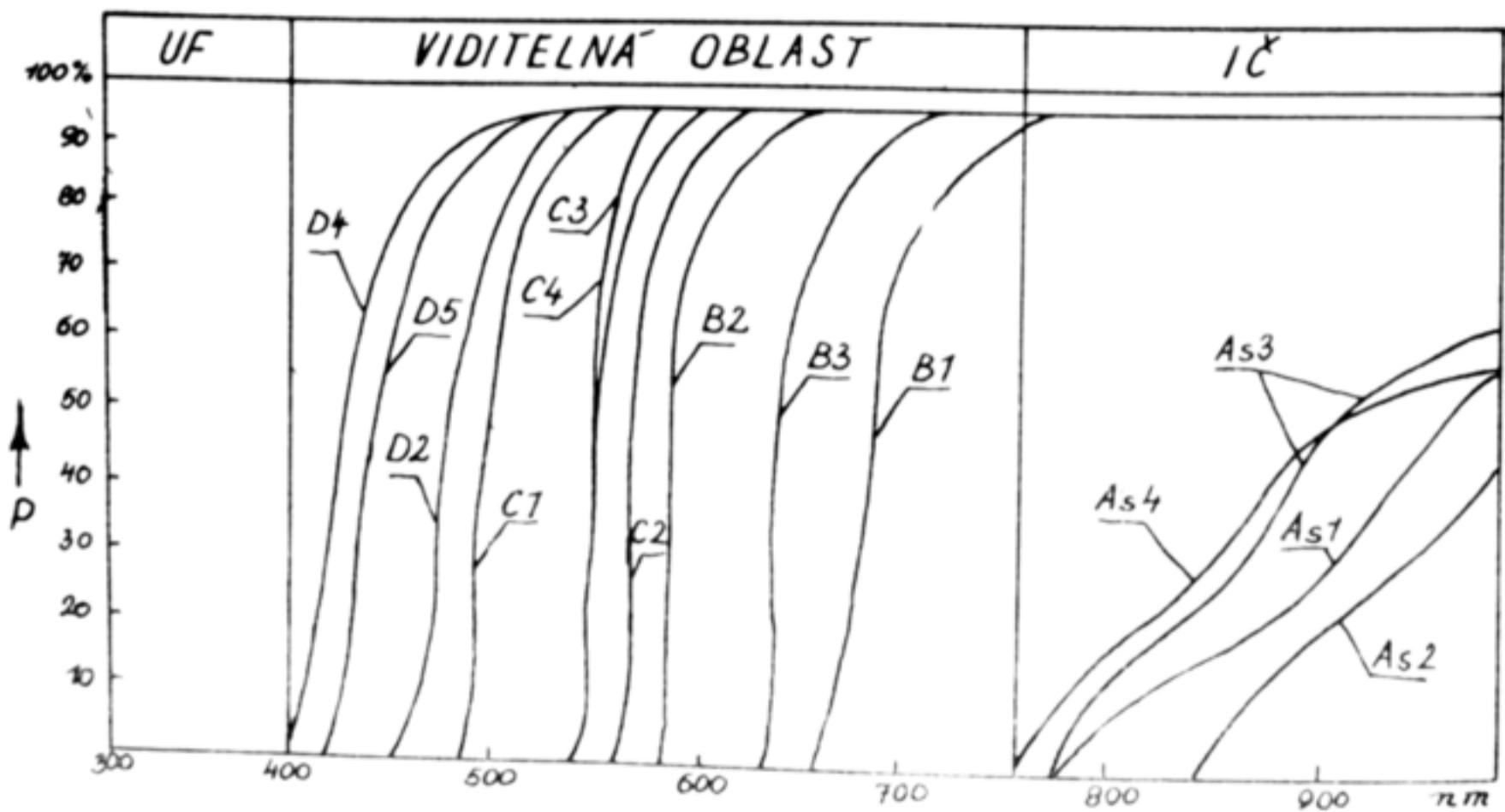
Základní zinečnatá skla těchto filtrů jsou volena tak, aby příslušné desky byly po odlití a vyválcování nažloutlé



Obr. 13.4 Průběh spektrální propustnosti filtrů skupiny D
($d = 1 \text{ mm}$)

až žluté. Výsledného odstínu se dosahuje tzv. nabíháním, které spočívá v dodatečném přesně řízeném tepelném zpracování vyrobených desek.

Červené filtry, vznikající rostoucím podílem CdSe, patří ke skupině B.



Obr. 13.5 Průběh spektrální propustnosti filtrů se strmou absorpční hranou a infrafiltrů skupin D, C, B a As
($d = 2 \text{ mm}$)

Obou druhů filtrů se používá opět ve fotografii a sice pro docílení nočních efektů nebo pro fotografování motivů s velkými dálkami, kdy se již využívá ke snímání teleobjektivů.

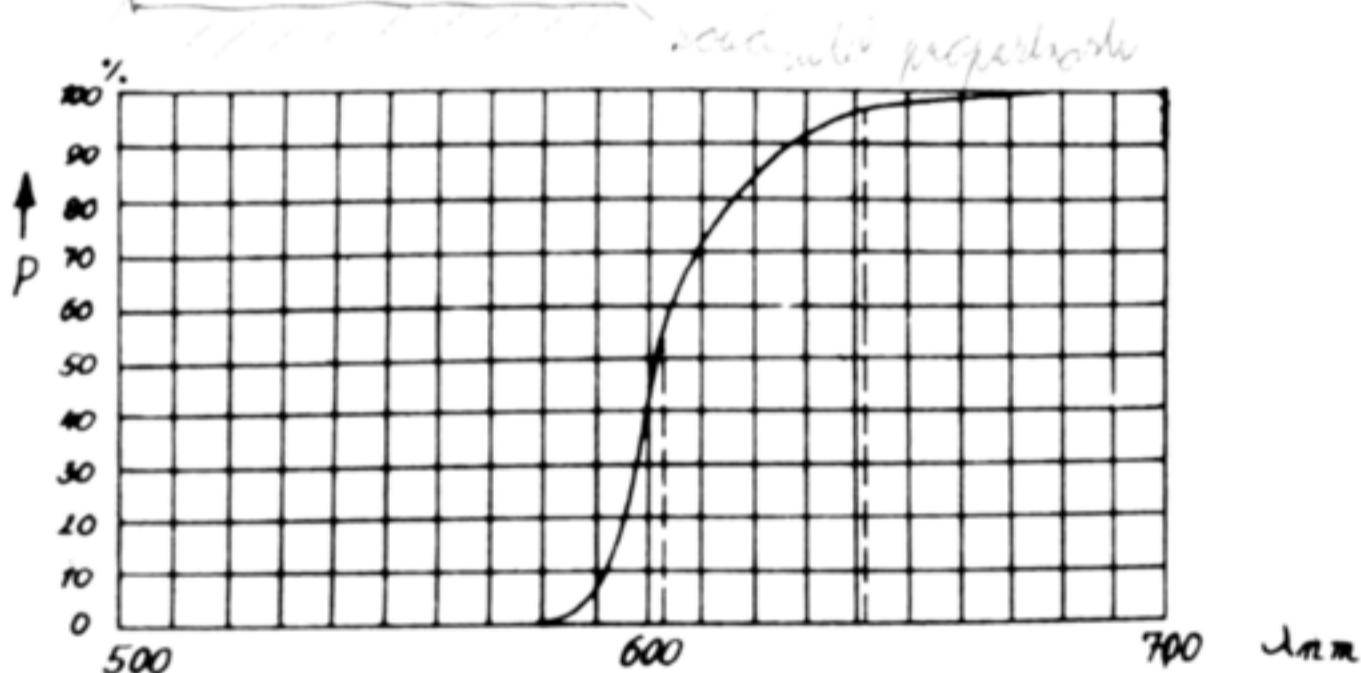
Průběh spektrální propustnosti těchto dvou skupin filtrů spolu s ostatními filtry vyznačujícími se strmými absorpčními hranami je vyznačen na obr. 13.5.

Filtry se strmou absorpční hranou se charakterizují následujícími hodnotami:

- a) vlnovou délkou, pro kterou filtr nabývá maximální propustnosti (λ_{\max}),
- b) vlnovou délkou určující hranici propustnosti (λ_{prah}). Rozumí se jí taková vlnová délka, při které je propustnost 2-krát menší než její maximální hodnota, jnebo jinými slovy, pro kterou je optická hustota o 0,3 vyšší než je její nejmenší hodnota,
- c) strmostí s, která je dána rozdílem hustot příslušných k vlnové délce $\lambda_{\text{prah}} - 20 \text{ nm}$ $\frac{\lambda}{\lambda_{\text{prah}}}$.

Uvažujme např. filtr B 2 a předpokládejme, že jeho spektrální propustnost je dána tab. 13.3 a grafem na obr. 13.6. Určeme k uvedeným hodnotám spektrálních propustností tohoto filtru odpovídající hodnoty optické hustoty pomocí vztahu

$$E_\lambda = - \log \tau_\lambda \quad (13.1)$$



Obr. 13.6 Průběh spektrální propustnosti filtru B 2

x) τ_λ značí součinitel propustnosti, pro který platí
 $\tau_\lambda = P_\lambda : 100$

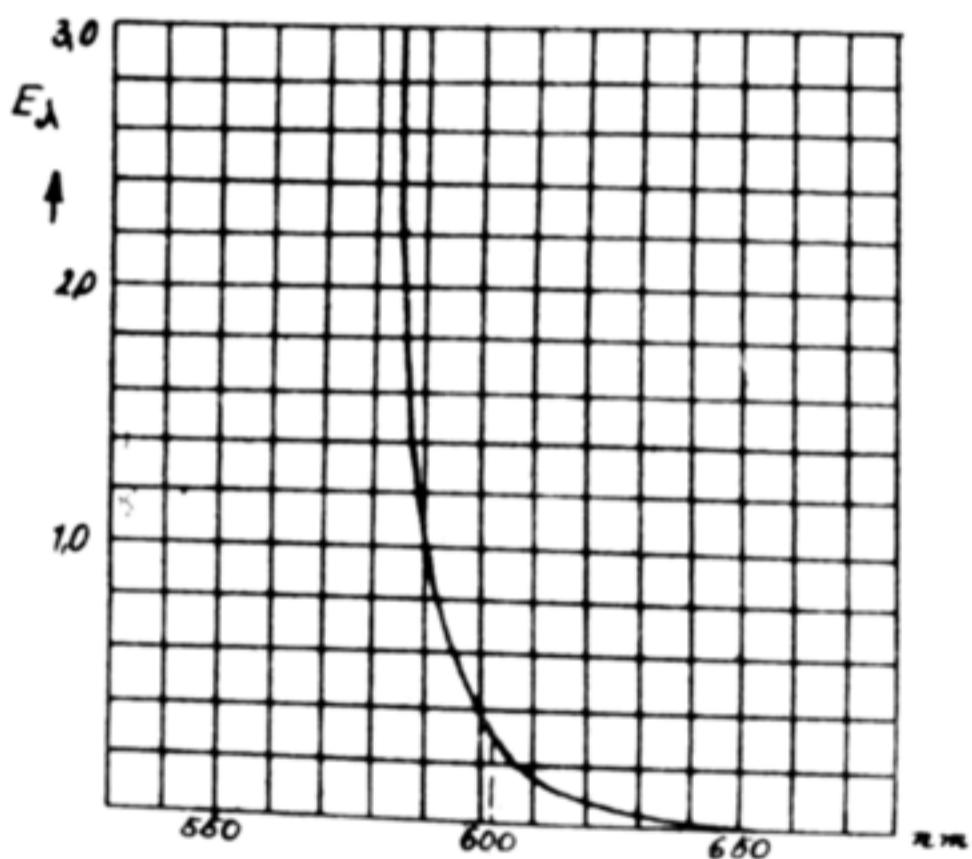
Tab. 13.3

λ nm	P %	E λ
580	0	
590	7	1,15
600	40	0,40
610	70	0,15
620	84	0,08
630	91	0,04
640	96	0,02
650	97	0,01

Tak např. pro $\lambda = 590 \text{ nm}$ vychází z (13.1) pro

$$E_{590} = - \log 0,07 = - (0,85 - 2) = 1,15 .$$

Podobně dostaneme hodnoty E_λ i pro ostatní vlnové délky . Tyto hodnoty jsou uvedeny ve třetím sloupci tab.13.3, graficky



je průběh optické hustoty znázorněn na obr. 13.7.

Z obr. 13.6 a 13.7 resp. z tab. 13.3 vyplývá, že pro uvažovaný filtr B 2 nabývají charakteristické veličiny hodnot:

- a) $\lambda_{\max} = 640 \text{ nm}$
 b) $\lambda_{\text{prah}} = 603 \text{ nm}$
 c) $s = E_{603-20} - E_{603} =$
 $= 4,5 - 0,37 = 4,13 \text{ eV}$

Obr. 13.7 Průběh optické hustoty filtru B 2

mou absorpční hranou a infrafiltry. Tab. 1 uvádí charakteristické hodnoty těchto filtrů.

Obdobně jsou charakterizovány i čs. filtry se strukturou Tabulka 13.4 x)

Přitom A značí vlnovou délku odpovídající počátku propustnosti, B vlnovou délku odpovídající propustnosti 2 %, C vlnovou délku, které odpovídá propustnost 40 % a konečně

x) Ing J.Kocík, Optická filtrová skla čs.výroby, Věda a výzkum v průmyslu sklářském, řada VII. 1961

strmost s rozdíl vlnových déltek, pro které vykazuje filtr propustnost 70 a 20 %.

Tab.13.4

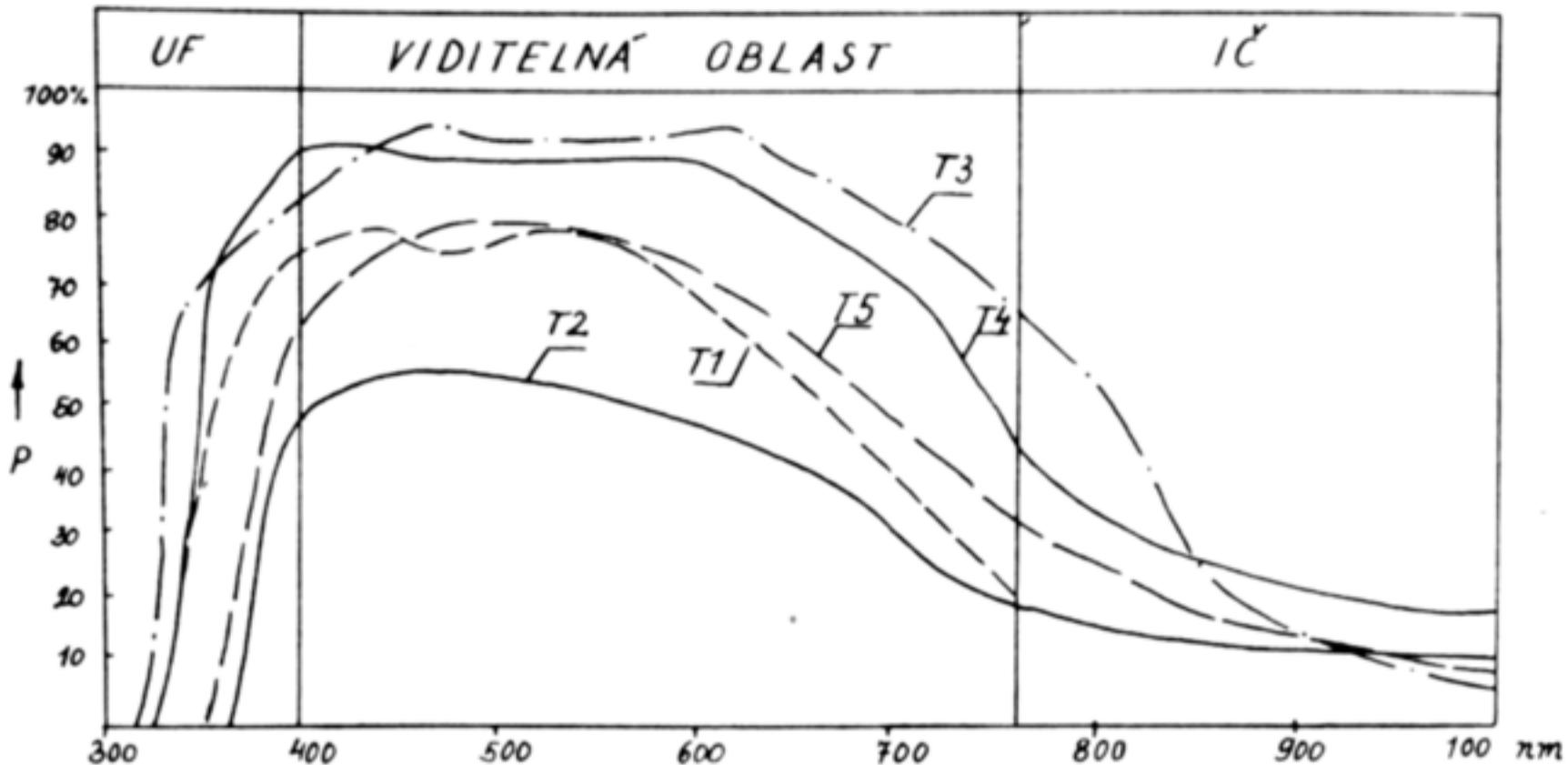
Označení	Barvny odstín	Vlnová délka v nm			Strmost
		A	B	C	
D 4	nažloutlý	390	400	415	20
D 5	světle žlutý	410	420	440	21
D 2	tmavě žlutý	455	470	490	18
C 1	oranžově žlutý	490	500	515	13
C 3	oranžový	530	540	555	8
C 4	načerv. oranžový	535	545	560	14
C 2	červenooranžový	550	555	580	20
B 2	světle červený	585	590	610	12
B 3	tmavě červený	635	640	665	16
B 1	velmi tmavě červený	675	680	700	15
As 4	infračervený	745	760	880	170
As 3	infračervený	750	770	880	150
As 1	infračervený	790	805	940	105
As 2	infračervený	845	860	985	135

f) Infračervené filtry

Jsou to filtry patřící do skupiny As. Jsou tak silně vybarveny, že se lidskému oku jeví jako černé. Pro vlnové délky menší než 7450 Å při tloušťce 2 mm mají prakticky nulovou propustnost. Vybarvují se 3 - 11 % MnO₂ a 2 - 4 % K₂Cr₂O₇. Jejich spektrální propustnost je graficky znázorněna na obr. 13.5. Používají se především pro infračervenou fotografiю.

g) Filtry absorbující teplo (determální filtry)

Úkolem těchto filtrů je zachytit (absorbovat) dlouhovlnné záření a propustit co nejméně záření ve viditelné oblasti. Žádané absorpcie se dociluje ionty dvojmocného železa, které se zavádí do skloviny jako ocelek (FeCO₃). K re-



Obr. 13.8 Průběh spektrální propustnosti determálních filtrů ($d = 2 \text{ mm}$, u T_1 a T_3 je $d = 3 \text{ mm}$).

dukci se používá Zn, Si a cukr. Spektrální propustnost těchto filtrů je patrná z obr. 13.8.

Tepelných filtrů se používá v diaprojektorech a kinopromítacích přístrojích k ochraně filmu před tepelnými účinky promítacích zdrojů.

h) Neutrální filtry

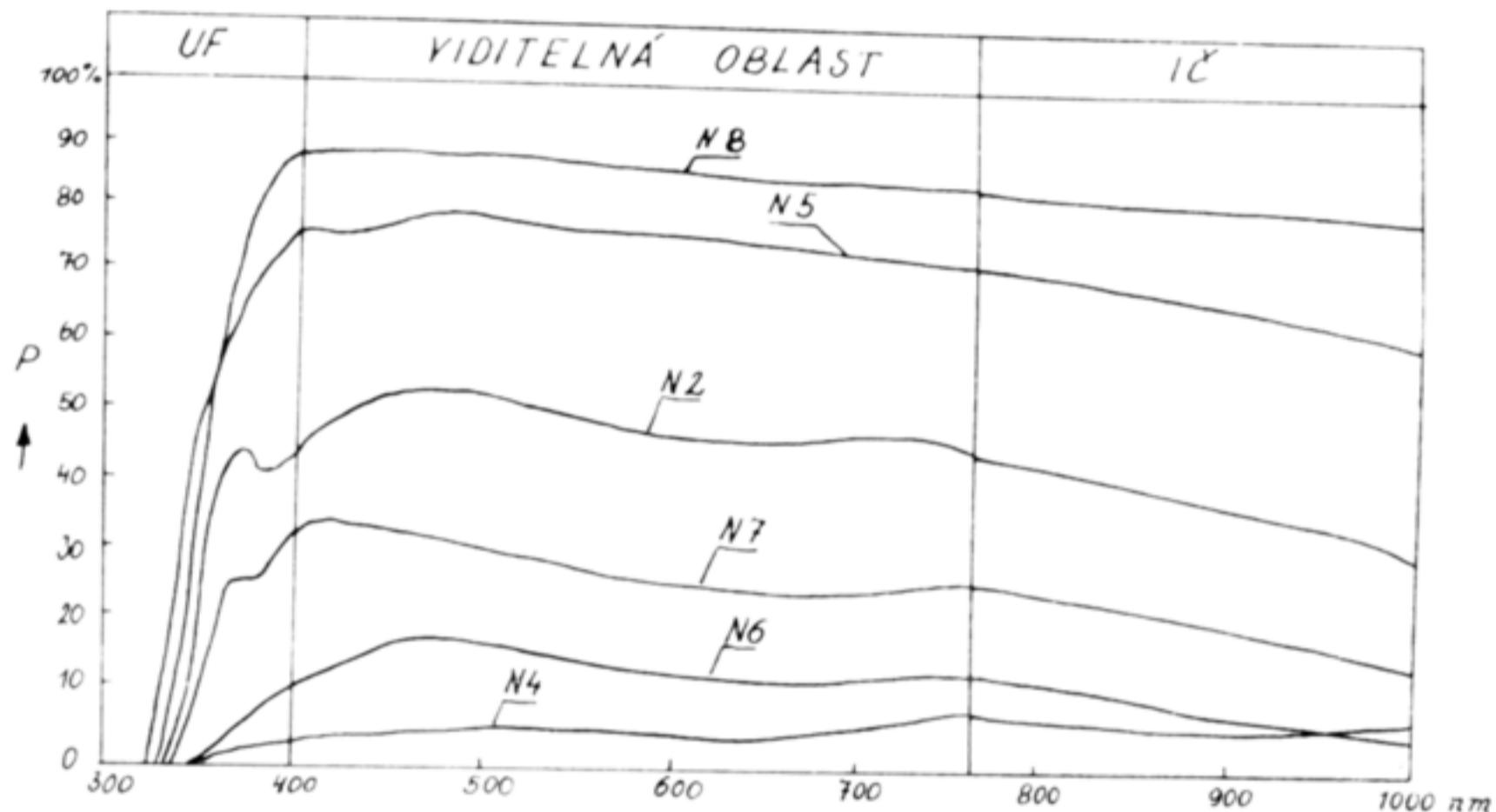
Jsou to filtry skupiny N. Mají prakticky v celém rozsahu viditelného spektra stejnou propustnost a proto se jeví oku jako šedé. Vybarvují se mletými okujemi a přísadou CoO . Základní sklo je voleno tak, aby při mírně redukční tavbě se ve sklovině udržel kysličník Fe_2O_3 . FeO v koloidní formě, čím se docílí šedého odstínu.

Křivky spektrální propustnosti některých neutrálních filtrů jsou uvedeny na obr. 13.9. Neutrální filtry se používají pro různá optická měření, neboť umožňují dosáhnout stejně redukce světelné intenzity v určitém měřítku. Např. neutrální filtry čs. výroby o tloušťce $d = 1 \text{ mm}$ propouští následující části denního světla.

Tab. 13.5

Filtr	Propuštěné světlo	Filtr	Propuštěné světlo
N 8	90 %	N 6	15 %
N 5	75 %	N 9	5 %
N 7	35 %	N 1	0,1 %

Neutrální filtrová sklo se často používá k výrobě sensitometrických klínů.



Obr. 13.9 Průběh spektrální propustnosti u některých neutrálních filtrů ($d = 1 \text{ mm}$).

ch) Matematicko-fyzikální vztahy

Všimněme si nyní podrobněji spektrální charakteristiky filtrových skel a některých matematicko-fyzikálních vztahů, kterými jsou vázány jednotlivé veličiny určující tuto spektrální charakteristiku.

Jak vyplývá z předchozích úvah, je spektrální charakteristika filtrových skel vyjádřena:

- a) součinitelem propustnosti τ_λ
- b) součinitelem pohlcování K_λ
- c) optickou hustotou neboli dekadickou extinkcí E_λ .

D
6

V souladu se vztahy uvedenými v odst. 9 je

$$\tau_\lambda = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (13.2)$$

kde ϕ_0 je dopadající a ϕ světelný tok propuštěný uvažovaným filtrem.

Podobně

$$K_\lambda = - \frac{\log \tau_\lambda}{d} \quad (13.3)$$

a

$$E_\lambda = K_\lambda \cdot d = - \log \tau_\lambda \quad (13.4)$$

kde d značí tloušťku filtru. Uvažujeme-li ztráty světla způsobené odrazem na obou plochách filtru, je součinitel pro-
pustnosti dán vztahem

$$\tilde{\tau}_\lambda = (1 - R)^2 \cdot 10^{-K_\lambda \cdot d} \quad (13.5)$$

kde

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2$$

značí odrazivost ploch při kolmém dopadu a n index lomu
filtrového skla.

Potom pro optickou hustotu filtru vychází

$$E_\lambda^* = - \log \tilde{\tau}_\lambda = E_\lambda + E_R = K_\lambda \cdot d + E_R \quad (13.6)$$

kde

$$E_R = - 2 \log (1 - R) \quad (13.7)$$

Chceme-li odstranit závislost tvaru křivky vystihující průběh spektrální propustnosti na tloušťce filtru, vyjadřujeme vlast-
nosti filtru v logaritmických extinkcích. Potom totiž platí

$$\log E_\lambda = \log K_\lambda + \log d \quad (13.8)$$

K rychlému přechodu od hustoty E_λ nebo od součinitele pohlcování K_λ k součiniteli propustnosti T_λ nebo obráceně slouží tabulka 13.6.

Tab.13.6

E	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	1,000	0,977	0,955	0,933	0,912	0,891	0,871	0,851	0,832	0,813
0,1	0,794	0,776	0,759	0,741	0,724	0,708	0,692	0,676	0,661	0,646
0,2	0,631	0,617	0,603	0,589	0,575	0,562	0,549	0,537	0,525	0,513
0,3	0,501	0,490	0,479	0,468	0,457	0,447	0,437	0,427	0,417	0,407
0,4	0,398	0,389	0,380	0,371	0,363	0,355	0,347	0,339	0,331	0,224
0,5	0,316	0,309	0,302	0,295	0,288	0,282	0,275	0,269	0,263	0,257
0,6	0,251	0,245	0,240	0,234	0,229	0,224	0,219	0,214	0,209	0,204
0,7	0,199	0,195	0,191	0,186	0,182	0,178	0,174	0,170	0,166	0,162
0,8	0,158	0,155	0,151	0,148	0,145	0,141	0,138	0,135	0,132	0,129
0,9	0,126	0,123	0,120	0,117	0,115	0,112	0,110	0,107	0,105	0,102
1,0	0,100	0,098	0,095	0,093	0,091	0,089	0,087	0,085	0,083	0,081

V prvním sloupci této tabulky jsou uvedeny hodnoty optické hustoty E_λ odstupňované po 0,1 a v prvním řádku hodnoty E_λ odstupňované po 0,01. V průsečících jednotlivých řádků a sloupců jsou pak uvedeny hodnoty součinitelu propustnosti T_λ . Tím je umožněno určit přímo součinitel propustnosti T_λ odpovídající hustotám E_λ od 0,01 do 1,09. Pro ostatní hodnoty optické hustoty se určí příslušné hodnoty T_λ tak, že se pro každou další celou jednotku zvýší počet nul za desetinnou tečkou.

Např. hustotě $E_\lambda = 0,86$ odpovídá hodnota $T_\lambda = 0,138$, kterou nalezneme jako průsečík řádku označeného 0,8 a sloupu označeného 0,06.

Hustotě 1,86 odpovídá hodnota $T_\lambda = 0,0138$, kterou dostaneme z předchozí, když za desetinnou tečku přidáme jednu nulu.

Využití této tabulky je patrné z následujících příkladů:

1. Má se určit optická hustota E_λ a součinitel propustnosti T_λ filtru o tloušťce $d = 2,5$ mm, je-li souči-

součinitel pohlcování příslušného filtrového skla $K_\lambda = 0,372$
a E_R odpovídající tomuto sklu 0,038.

Pro optickou hustotu skla o tloušťce $d = 2,5$ bez ohledu
na ztráty způsobené odrazem vychází

$$E_\lambda = K_\lambda \cdot d = 0,372 \cdot 2,5 = 0,930 .$$

Vezmeme-li ohled na ztráty způsobené odrazem, dostaneme

$$E'_\lambda = K_\lambda \cdot d + E_R = 0,930 + 0,038 = 0,968 .$$

V tabulce 13.6 najdeme k hodnotě

$$E'_\lambda = 0,96 \text{ hodnotu } \tilde{\tau}'_\lambda = 0,110$$

a k hodnotě

$$E'_\lambda = 0,97 \text{ hodnotu } \tilde{\tau}'_\lambda = 0,107 .$$

Interpolací dostaneme pak pro

$$E'_\lambda = 0,968 \text{ hodnotu } \tilde{\tau}'_\lambda = 0,110 - 8 \cdot 0,003 = 0,108 .$$

(2). Má se určit součinitel pohlcování K_λ , je-li součinitel propustnosti filtru o tloušťce $d = 3$ mm roven $\tilde{\tau}_\lambda = 0,345$ a pro dané sklo je $E_R = 0,039$.

Nejdříve určíme optickou hustotu filtru E'_λ včetně ztrát způsobených odrazem.

Hodnota $\tilde{\tau}_\lambda = 0,345$ se nachází mezi hodnotami 0,339 a 0,347, kterým odpovídají optické hustoty 0,47 a 0,46.

Interpolací dostaneme k $\tilde{\tau}'_\lambda = 0,345$ hodnotu

$$E'_\lambda = 0,46 + 0,002 \cdot \frac{10}{8} = 0,463$$

Pro hustotu ve sklovině o tloušťce $d = 3$ mm pak vychází

$$E_\lambda = E'_\lambda - E_R = 0,463 - 0,039 = 0,424 .$$

Dělíme-li tuto hodnotu tloušťkou $d = 3$ mm, dostaneme součinitel pohlcování

$$K_\lambda = \frac{E_\lambda}{d} = \frac{0,424}{3} = 0,141$$

i) Určení propustnosti filtru dané tloušťky nebo určení tloušťky filtru odpovídající dané propustnosti

Nechť je dána optická hustota E_1 filtru o dané tloušťce $d_1 = 2 \text{ mm}$. Má se určit opt. hustota E_2 filtru z téhož skla o tloušťce d_2 .

Ze vztahu (13.4) plyně

$$E_1 = K_\lambda d_1$$

$$E_2 = K_\lambda d_2$$

čili

$$K_\lambda = \frac{E_1}{d_1} = \frac{E_2}{d_2} .$$

Odtud pak

$$\boxed{E_2 = \frac{d_2}{d_1} \cdot E_1} \quad (13.9)$$

Při výpočtu se postupuje takto:

a) Ze vztahu (13.9) se určí k dané hustotě E_1 a dané tloušťce d_2 hodnota hustoty E'_2 včetně ztrát způsobených odrazem.

b) Potom se určí k hodnotě E'_2 hodnota E_2 oproštěná o ztráty způsobené odrazem.

c) K této hodnotě se najde z tab. 13.6 hodnota τ_2 součiniteli propustnosti samotné skloviny o tloušťce d_2 .

j) Vyjádření barevnosti filtrových skel trichromatickými souřadnicemi

Průběh spektrální propustnosti neurčuje jednoznačně barevný vjem vyvolaný procházejícím světlem, neboť lidské oko není schopné toto záření rozložit. Projevuje se to např. tím, že filtrová skla s diametrálně odlišnými spektrálními propustnostmi vyvolávají v oku stejný barevný vjem a naopak skla s málo rozdílnými spektrálními propustnostmi mohou vyvolat značně odlišné barevné vjemy.

Proto odstranění tohoto nedostatku je účelné, např. v případě signalizačních skel je zcela nezbytné hodnotit filtrová skla i z hlediska jejich barevnosti.

Byla vypracována řada metod. Dnes se všeobecně užívá soustavy trichromatických souřadnic, která byla přijata Mezinárodní komisí pro osvětlování. Tato soustava vychází ze skutečnosti, že každé barevné světlo lze visuálně reprodukovat smíšením tří záření základních barev, červené, zelené a modré. Tato soustava byla vypracována na základě studia velké řady normálně vidících pozorovatelů. Podle této soustavy lze barevnost každého záření vyjádřit třemi souřadnicemi x , y , z .

Příslušná souřadná soustava je tvořena rovnostranným trojúhelníkem, jehož vrcholy tvoří zvolené základní vjemy, tj. červený, zelený a modrý vjem.

Každému záření určité barevnosti pak přísluší bod ležící uvnitř tohoto trojúhelníka. Souřadnice x , y , z určující barevnost tohoto záření jsou pak dány vzdálenostmi tohoto bodu od stran souřadného trojúhelníka.

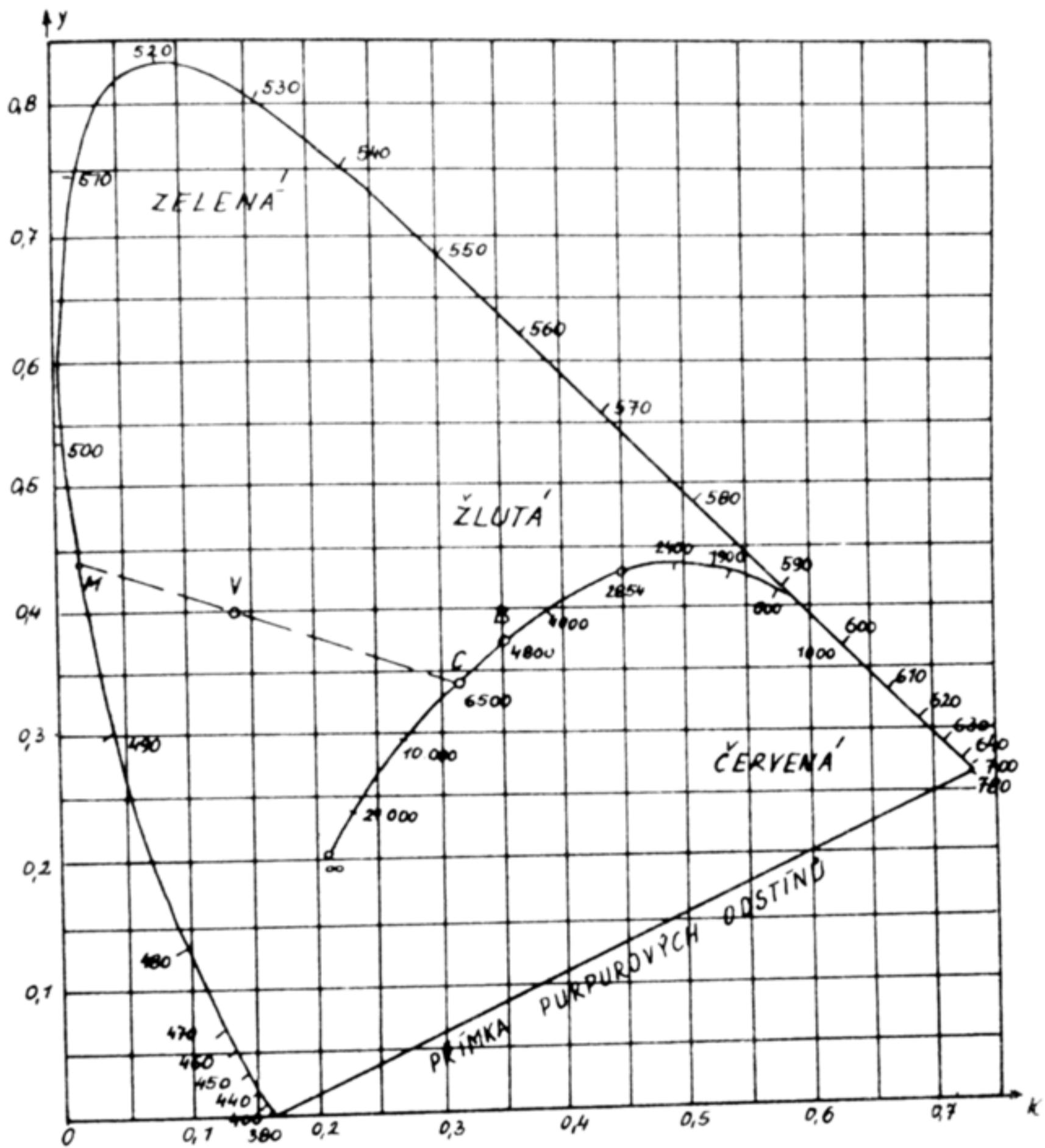
Pro jednoduchost se užívá v praxi místo rovnostranného trojúhelníka pravoúhlé soustavy x , y , neboť pro definici barevnosti plně postačují dvě souřadnice např. x a y . Podíl třetí, zelené se určí ze vztahu

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

(13.10)

Na obr. 13.10 je v soustavě x , y znázorněna křivka určující polohu čistých spektrálních barev vlnových délek 380 - 780 nm. V oblasti vymezené touto křivkou a čarou purpurových odstínů leží všechny, normálním lidským okem postřehnutelné barvy světla. Na tomto obrázku jsou též vyznačeny barvy světel odpovídajících černému tělesu v rozsahu teplot $T = 1000 - 24\,000^{\circ}\text{K}$ a polohy standardních osvětlovačů A (2854°K), B (4800°K) a C (6500°K), z nichž první odpovídá žárovce, druhý dennímu světlu a konečně třetí je tzv. bílý bod se souřadnicemi $x = 0,3101$, $y = 0,3163$.

Pro hodnocení skla barvou propouštěného světla se užívá obyčejně zdroje C. V SSSR se užívá zdroje B resp. A.



Obr. 13.10 Grafické vyjádření barevnosti podle mezinárodní komise pro osvětlování.

Předpokládejme, že nějaký, např. modrozelený filtr je znázorněn v tomto grafu bodem V. Spojíme-li tento bod s bodem vyznačujícím standardní zdroj C přímkou, pak její průsečík s křivkou spektrálně čistých barev určuje dominující vlnovou délku λ_0 , která v našem příkladu je asi 496 nm. Je to vlnová délka spektrálně čistého záření, které smíšeno s příslušným množstvím záření zdroje C vyvolává v oku tentýž

barevný vjem jako uvažovaný filtr při pozorování v denním světle. Poměr úseček \overline{CV} a \overline{CM} udává barevnou čistotu, tj. podíl spektrálně čistého záření ve směsi s bílým zářením světelného zdroje C. V našem případě je tato čistota rovna $38/63 = 0,60$.

Trichromatické souřadnice filtrů je možno určit měřením pomocí vhodných objektivních trichromatických kolorimetrů.

Přesněji je možno určit tyto souřadnice výpočtem pomocí vztahů

$$x = \frac{x}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{z}{X+Y+Z}, \quad (13.11)$$

kde

$$x = \frac{\sum \tilde{\tau}_\lambda \cdot P_\lambda X_\lambda \Delta_\lambda}{10^6}, \quad y = \frac{\sum \tilde{\tau}_\lambda \cdot P_\lambda Y_\lambda \Delta_\lambda}{10^6}, \quad z = \frac{\sum \tilde{\tau}_\lambda \cdot P_\lambda Z_\lambda \Delta_\lambda}{10^6} \quad (13.12)$$

kde $\tilde{\tau}_\lambda$ je součinitel propustnosti pro vlnovou délku λ , P_λ je energie záření o vlnové délce λ a X_λ , Y_λ a Z_λ jsou součinitelé základních vjemů standardního pozorovatele podle soustavy mezinárodní komise pro osvětlování. Přitom interval $\Delta\lambda$ se volí obyčejně 100 \AA . Hodnoty součinitelů propustnosti $\tilde{\tau}_\lambda$ se určí z křivky vyjadřující průběh spektrální propustnosti. Hodnoty součinitelů rozdělení energie ve spektru $P_\lambda \cdot X_\lambda$, $P_\lambda Y_\lambda$ a $P_\lambda Z_\lambda$ jsou pro danou teplotu zdroje sestaveny do tabulek x).

Přehled v ČSSR vyráběných filtrů v porovnání s filtry vyráběnými v NDR a SSSR a jejich nejdůležitější konstanty jsou v tabulce 13.7 a na obr. 13.11.

x) Kocík - Nebřenský, Barevná skla pro signalizaci v železniční dopravě a jejich hodnocení, Věda a výzkum v průmyslu sklářském, 1956, str. 43 - 85.

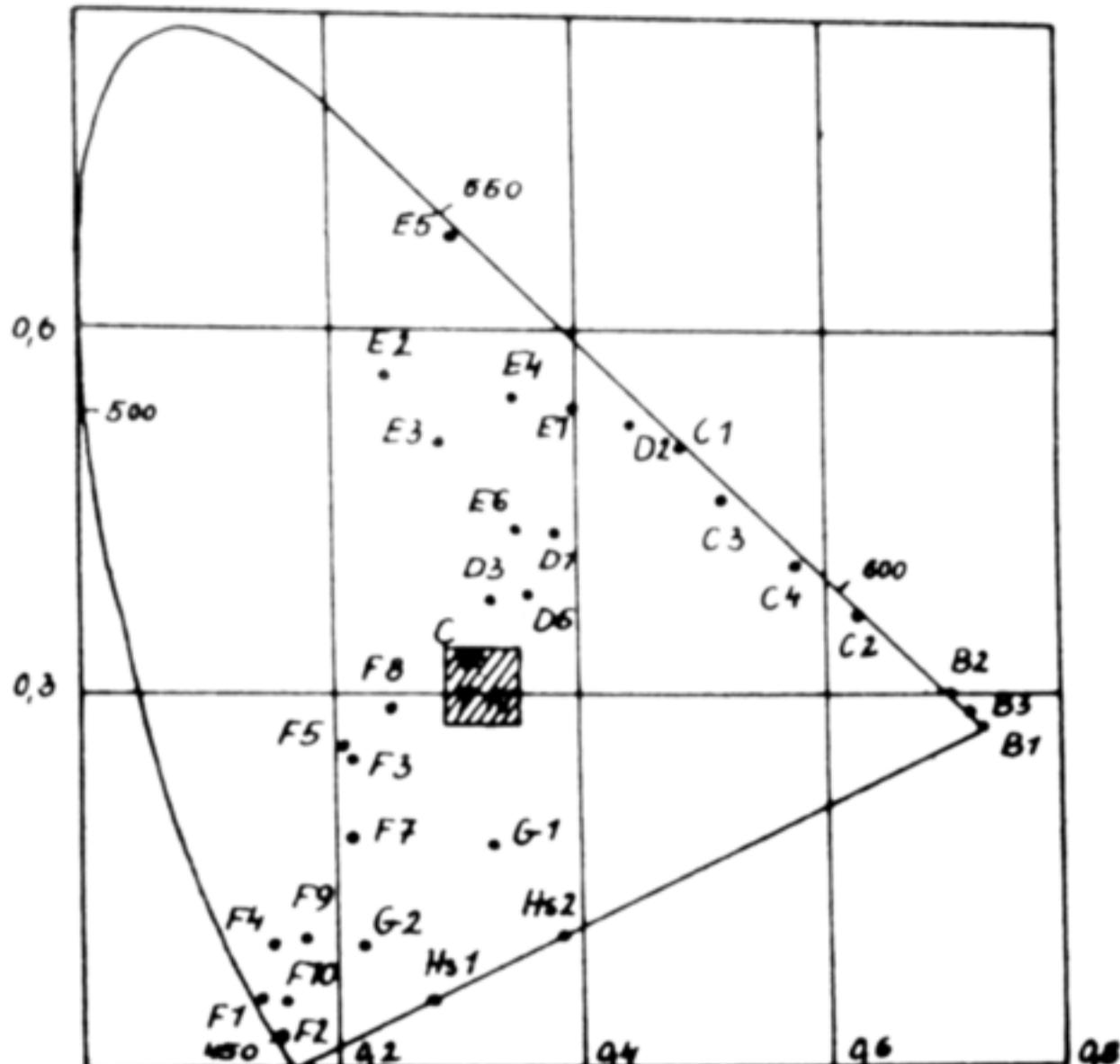
Tab. 13.7

Přehled kolorimetrických vlastností čs. filtrových skel

Poř. čís.	Označení			Barvený odstín	Barvící prvky	Světelný zdroj			C(T _b = 6500°K)		
	ČSSR	NDR	SSSR			x	y	p %	nm	č	d mm
1	Hs 1	UG 1	-	tm.fialový	Ni,Co	0,277	0,054	0,002	-558	0,99	2
2	2	2	UFS 3	tm.fialový	Ni,Co	0,387	0,101	0,002	-527	1,00	1
3	G 1	UG 3	PS 9	sv.fialový	Mn	0,310	0,179	7	-551	0,56	2
4	2	-	PS 3	modrofialový	Co	0,211	0,093	5	-567	0,72	2
5	F 1	BG 5	-	tmaře modrý	Cu, Co	0,148	0,042	1	461	0,97	2
6	2	1	SS 4	modrý	Co	0,154	0,029	2	455	0,98	2
7	3	7	SZS 3	tmaře modrý	Cu	0,204	0,254	38	484	0,45	1
8	4	12	SS 8	modrý	Co, Cu	0,149	0,055	4	463	0,94	2
9	5	23	SZS 8	středně modrý	Cu	0,200	0,256	45	484	0,47	2
10	6	28	-	čistě modrý	Cu, Co	0,145	0,091	7	471	0,87	2
11	7	-	SS 2	světle modrý	Co	0,201	0,172	20	472	0,58	2
12	8	BG 14	SZS 7	světle modrý	Cu	0,243	0,288	60	486	0,28	2
13	9	2	-	modrý	Co	0,166	0,010	0,2	437	1,00	2
14	10	25	SS 5	modrý	Cu, Co	0,153	0,031	2	456	0,98	2
15	E 1	VG 7	-	zelenožlutý	Cr, Cu	0,389	0,527	55	565	0,77	2
16	2	9	ZS 1	zelený	Cr, Cu	0,240	0,255	25	532	0,50	2
17	3	6	-	zelený	Cr, Cu	0,284	0,521	39	544	0,50	2
18	4	4	ŽZS 9	zelenožlutý	Cr, Cu	0,347	0,538	45	559	0,71	2
19	5	-	ŽZS17	tmaře zelený	Cr, Cu	0,292	0,681	5	549	0,95	1
20	6	VG 5	-	zelenožlutý	Cr, Cu	0,360	0,482	67	563	0,58	1
21	D 1	GG 10	ŽZS 6	sv.zelenožlutý	Cr, Fe	0,393	0,470	78	569	0,64	1
22	2	11	ŽS 17	tmaře žlutý	Cd, S	0,448	0,512	80	573	0,89	2
23	3	9	ŽZS 5	zelenožlutý	Cr	0,370	0,429	86	569	0,46	1
24	4	15	ŽS 11	velmi sv.žlutý	Cd, S	0,323	0,339	90	570	0,09	2
25	5	5	ŽS 12	světle žlutý	Cd, S	0,335	0,365	90	569	0,19	2
26	6	8	-	sv.zelenožlutý	Cr	0,357	0,409	86	569	0,37	1
27	C 1	OG 4	ŽS 18	oranž.žlutá	Cd,S,Se	0,480	0,502	73	576	0,96	2
28	2	3	KS 10	červ.oranžový	Cd,Se,S	0,634	0,358	23	603	0,99	2
29	3	5	OS 12	oranžový	Cd,S,Se	0,511	0,477	63	581	0,97	2
30	4	2	OS 14	načerv.oranž.	Cd,S,Se	0,581	0,410	41	592	0,98	2

Pokrač. tab. 13.7

Por. čís.	Označení			Barvený odstín	Barvící prvky	Světelný zdroj			C(T _b = 6500°K)		
	ČSSR	NDR	SSSR			x	y	p%	nm	č	d nm
31	B 1	RG 8	KS 19	v.tmavě červ.	Cd,Se,S	0,736	0,264	0,05	700	1,00	2
32	2	1	KS 11	sv.červený	Cd,Se,S	0,697	0,303	9	623	1,00	2
33	3	5	KS 17	tmavě červený	Cd,Se,S	0,732	0,268	0,5	668	1,00	2
34	As 1	UG 8	IKS 2	infra-červený	Mn, Cr	-	-	-	-	-	2
35	2	6	IKS 3	infra-červený	Mn, Cr	-	-	-	-	-	2
36	3	7	-	infra-červený	Mn, Cr	-	-	-	-	-	2
37	4	RG 7	IKS 1	infra-červený	Mn	-	-	-	-	-	2
38	T 1	BG 9	SZS 5	sv.modrozelený	Fe	0,288	0,316	71	491	0,08	3
39	2	16	-	modrozelený	Fe	0,285	0,319	59	492	0,09	2
40	3	17	SZS14	téměř bezbarvý	Fe	0,312	0,315	83	499	0,01	3
41	4	22	-	sv.modrozelený	Fe	0,299	0,316	81	491	0,04	2
42	5	15	SZS16	sv.modrozelený	Fe	0,298	0,318	75	492	0,04	2
43	N 1	NG 1	-	v.tmavě šedý	Fe, Co	0,312	0,318	46	576	0,01	0,1
44	2	5	NS 8	světle šedý	Fe, Co	0,308	0,319	52	508	0,01	1
45	3	7	-	modrošedý	Fe, Co	0,264	0,283	27	482	0,20	1
46	4	9	NS 11	tmavě šedý	Fe, Co	0,318	0,329	4	571	0,06	1
47	5	11	NS 7	v.světle šedý	Fe, Co	0,309	0,317	70	500	0,01	1
48	6	3	NS 10	tmavě šedý	Fe, Co	0,324	0,333	14	575	0,08	1
49	7	4	NS 9	středně šedý	Fe, Co	0,304	0,315	33	489	0,02	1
50	8	6	-	v.světle šedý	Mn,Fe,Cu	0,307	0,311	71	461	0,02	2



Obr.13.11 Grafické znázornění barevnosti čs. filtrových skel v trichromat. trojúhelníku.

14. Krystaly

Propustnost obyčejných optických skel jen málo přesahuje viditelnou oblast, neboť se prakticky pohybuje v rozmezí od 3.600 \AA do $2,2 \text{ mikronů}$. Z toho důvodu musí být použito k výrobě součástí, které mají pracovat v ultrafialové nebo infračervené oblasti, jiného materiálu. Snahy vyvinout vhodné sklo, které by bylo propustné i v těchto oblastech spektra, byly celkem nepatrné a proto pro tyto účely zůstaly k dispozici z hlediska vhodné disperze a propustnosti pouze některé krystaly.

Krystalů bylo používáno k výrobě čoček pro některé achromatické objektivy a islandského vápence k výrobě polarizačních zařízení.

V optické praxi se používalo mimo islandský vápenec, krystalického křemene, kamenné soli, sylvinu a kazivce. Hlavním nalezištěm krystalů kamenné soli a sylvinu je Stassfurt ležící asi 30 km na jih od Magdeburgu. Nalezení čistých a nerozrušených krystalů vhodné velikosti bylo však velmi obtížné. Z toho důvodu se začaly vyvíjet a vyrábět umělé krystaly v laboratořích. Byly vyvinuty metody pro umělou výrobu krystalů kamenné soli, sylvinu, kazivce, bromidu draselného, fluoridu litného, fluoridu sodného a chloridu stříbrného. V literatuře se často mluví nesprávně o výrobě syntetických krystalů.

Obecně se předpokládá, že přirozené krystaly, které se nachází v přírodě, vznikly z tekutého stavu při chladnutí zemské kůry nebo z vodních roztoků. V druhém případě obsahuje krystaly řadu nečistot, které snižují jejich použitelnost v optické výrobě a vyvolávají absorpční pásy v infračervené oblasti.

Proto také umělé krystaly se vyrábí buď z roztaveného materiálu nebo z vodních roztoků. Mimo krystaly, které se používají pro piezoelektrické účely, vyrábí se většina umělých krystalů z roztaveného materiálu.

Uměle vyrobené krystaly kamenné soli mají stejné vlastnosti jako přirozené krystaly, jsou bez trhlinek a vad a nemají vmešků, které jsou velmi obvyklé u přirozených krystalů. Mají stejnou štípatelnost jako přirozené krystaly a jsou odolnější vzhledem k atmosférické vlhkosti.

| Bromid draselný krystalizuje také v krychlové soustavě, je méně štípatelný než kamenná sůl.

| Fluorid lithný patří rovněž do skupiny krystalů krychlové soustavy. Je propustný v infračervené oblasti až do 5 mikronů. Je málo rozpustný ve vodě a je proto odolný proti atmosférické vlhkosti. Používá se jako náhrada za kazivec.

| Chlorid stříbrný krystalizuje v krychlové soustavě, je propustný pro infračervené záření až do 20 mikronů. Je nerozpustný ve vodě a je proto stálý vzhledem k atmosférické vlhkosti. Působením ultrafialového záření tmavne a musí se proto chránit před slunečním i denním světlem. Někdy se chrání pří-

služné součástky, vyrobené z chloridu stříbrného, vhodnou vrstvou nanesenou na jejich plochy.

Nevýhodou většiny těchto uměle vyrobených krystalů je jejich rozpustnost ve vodě a tedy malá odolnost vzhledem k atmosférické vlhkosti. Proto měření prováděná v infračervené oblasti vyžadují velké péče, správné zacházení s příslušnými přístroji, jejichž optické součásti musí být pomocí thermostatu udržovány na stálé teplotě apod.

Protože v celé řadě případů se musí pracovat v otevřené atmosféře, není možno použít termostatů a je proto nutné chránit příslušné optické součásti přístrojů vhodnými ochrannými filmy. Tyto filmy mají však řadu nedostatků, neboť působí jako interferenční vrstvy apod. Jediným východiskem z této situace bylo hledání nových materiálů s propustností v uvažovaných oblastech spektra.

Požadavky kladené na tyto nové materiály byly velké; žádá se, aby tyto materiály byly:

- a) propustné v dlouhovlnné infračervené oblasti. Protože propustnost krystalů závisí na charakteristických frekvencích příslušných mřížek, je nutné, aby tyto frekvence ležely v infračervené oblasti, tj. materiál musí mít velké ionty a malou mřížkovou energii;
- b) isotropní, neboť každá sebemenší část energie musí být v infračervené oblasti využita;
- c) nesmí být hygroskopické;
- d) musí být leštiteľné běžnými leštícími prostředky a metodami.

Všimneme-li si podmínky první a poslední, shledáme, že si vzájemně odporuji. Totiž obyčejnými metodami jsou leštiteľné pouze takové materiály, které mají určitou tvrdost. Avšak tvrdost materiálu je závislá na mřížkové energii, která musí přesáhnout určité minimum, aby byl materiál leštiteľný. Na druhé straně, materiál je průhledný pro dlouhovlnnou infračervenou oblast, je-li jeho mřížková energie malá.

Měřením bylo zjištěno pomocí Zeissova mikrotvrdoměru, že krytal je leštitevný, je-li jeho tvrdost rovna alespoň 15 kg/mm^2 . Aby se dosáhlo této tvrdosti, vyšlo se ze zkušenosti z metalurgie. Je známo, že tvrdost kovu je možno zvýšit přidáním nějaké vhodné složky. Potíž spočívá v případě optických materiálů v tom, že se přidáním složky k základnímu materiálu nesmí porušit homogenita, protože požadavky na optické vlastnosti hledaného materiálu jsou velmi přísné.

Požadovaná tvrdost byla dosažena dvěma způsoby:

a) přidáním malého množství neisomorfní složky k základní složce. Aby se dosáhlo požadované optické homogenity a aby se zabránilo nežádoucímu oddělování obou složek, je nutné, aby přídavná složka měla stejné optické vlastnosti jako základní materiál.

Tak např. roztavený chlorid thalný byl kombinován s 1 procentem bromidu stříbrného. Tím se zvýšila mikrotvrdost z 10 kg/mm^2 na 17 kg/mm^2 a získal se materiál na vstupní okénka, který byl snadno leštitevný;

b) kombinací velkých množství isomorfních látek, čímž vznikly tzv. směsné krystaly.

Např.

44% TlBr a 56% TlJ vytváří materiál známý jako KRS 5 ^{x)}. Podobně 60% TlCl a 40% TlBr dává materiál označovaný KRS 6 a 35% AgCl a 65% AgBr dává materiál KRS 13.

Některé vlastnosti těchto směsných krystalů jsou patrné z tab. 14.1.

Tab. 14.1

Materiál	Mikrotvrdost kg/mm^2	Special. váha g/cm^3	Koefficient tepelné roztažnosti mm/stup.	Rozpustnost gr/100 gr vody
KRS 5	30	7,2	$45 \cdot 10^{-6}$	0,02
KRS 6	35	-	$50 \cdot 10^{-6}$	0,1
KRS 13	17	-	$39 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$

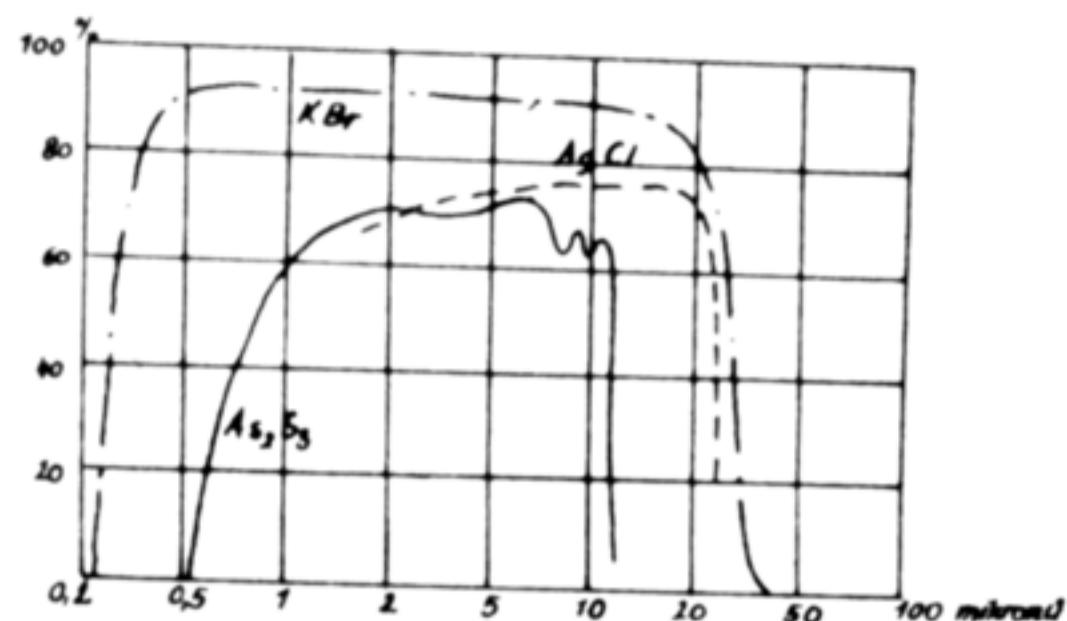
x) Označení je zkratkou metody "Kristalle aus dem Schmelz-Flus".

V praxi se nejvíce používá materiálu KRS 5, jehož index lomu $n_D = 2,63$.

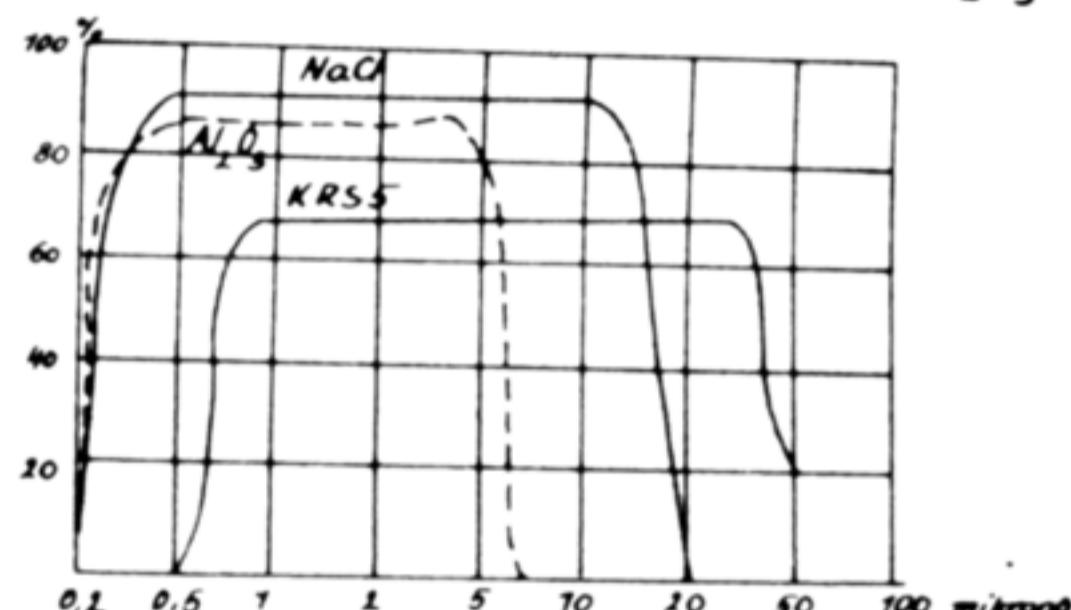
Tabulka 14.2 obsahuje přehled nejvíce v praxi používaných uměle vyráběných krystalů a některé jejich vlastnosti. Jejich spektrální propustnost je znázorněna graficky na obrázku 14.1 až 14.4.

Na obr.14.5 jsou uvedeny dispersní křivky některých krystalů a na obr.14.6 dispersní křivka směsných krystalů KRS 5.

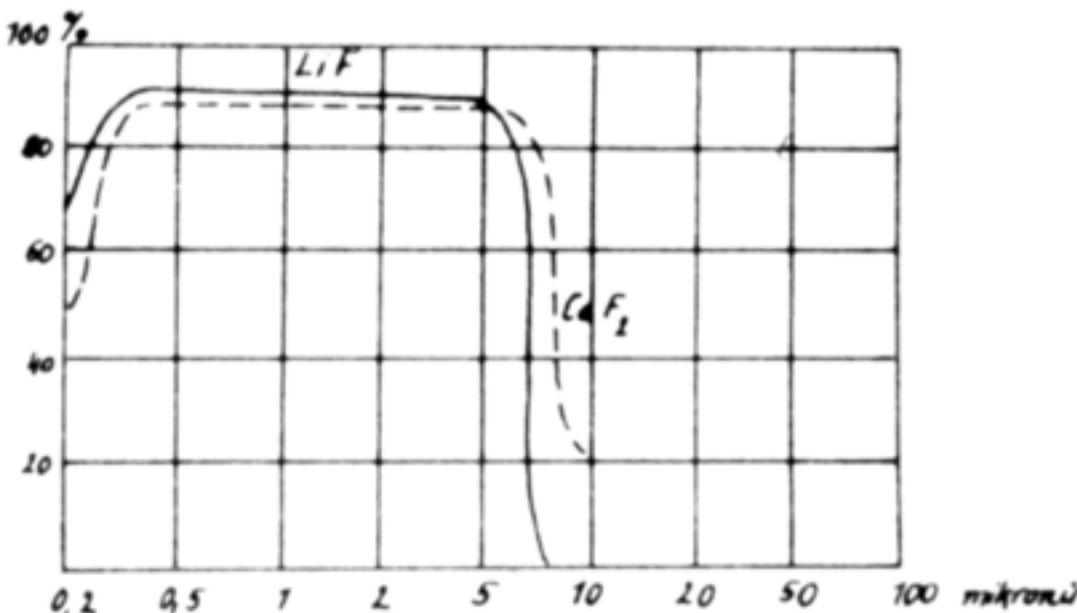
Některá bližší data jsou uvedena v různé literatuře^{x)}.



Obr.14.1
Spektrální propustnost KBr, AgCl a As₂S₃



Obr.14.2
Spektrální propustnost NaCl, Al₂O₃, KRS 5



Obr.14.3
Spektrální propustnost LiF a CaF₂

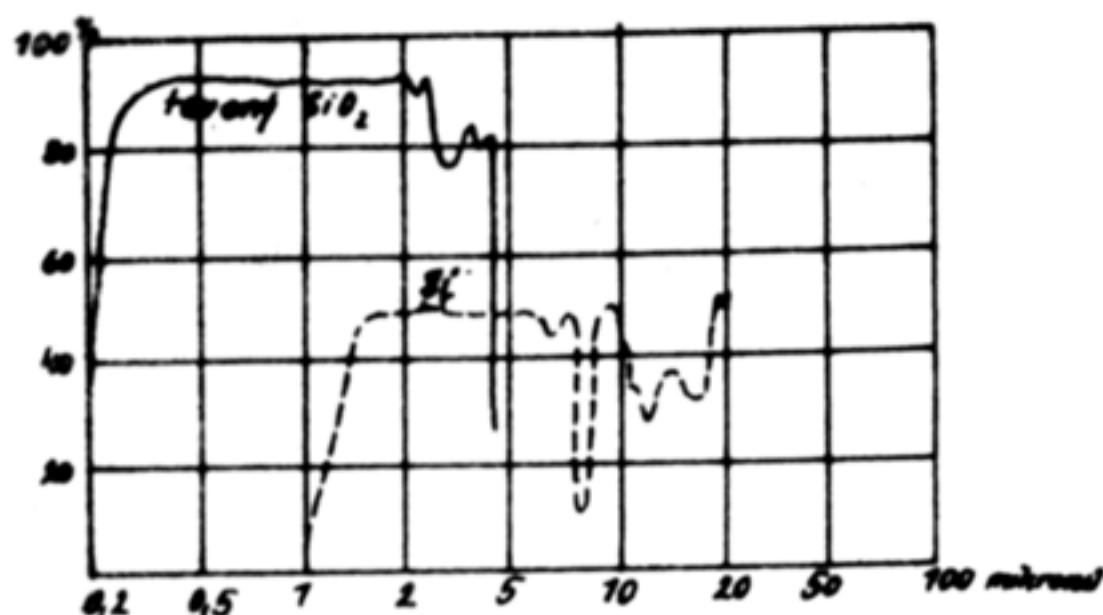
x) Havelka, Keprt, Hansa, Spektrální analýza I, str. 132
F. Twyman, Prism and lens making, London 1952, str.154

Tab. 14.2

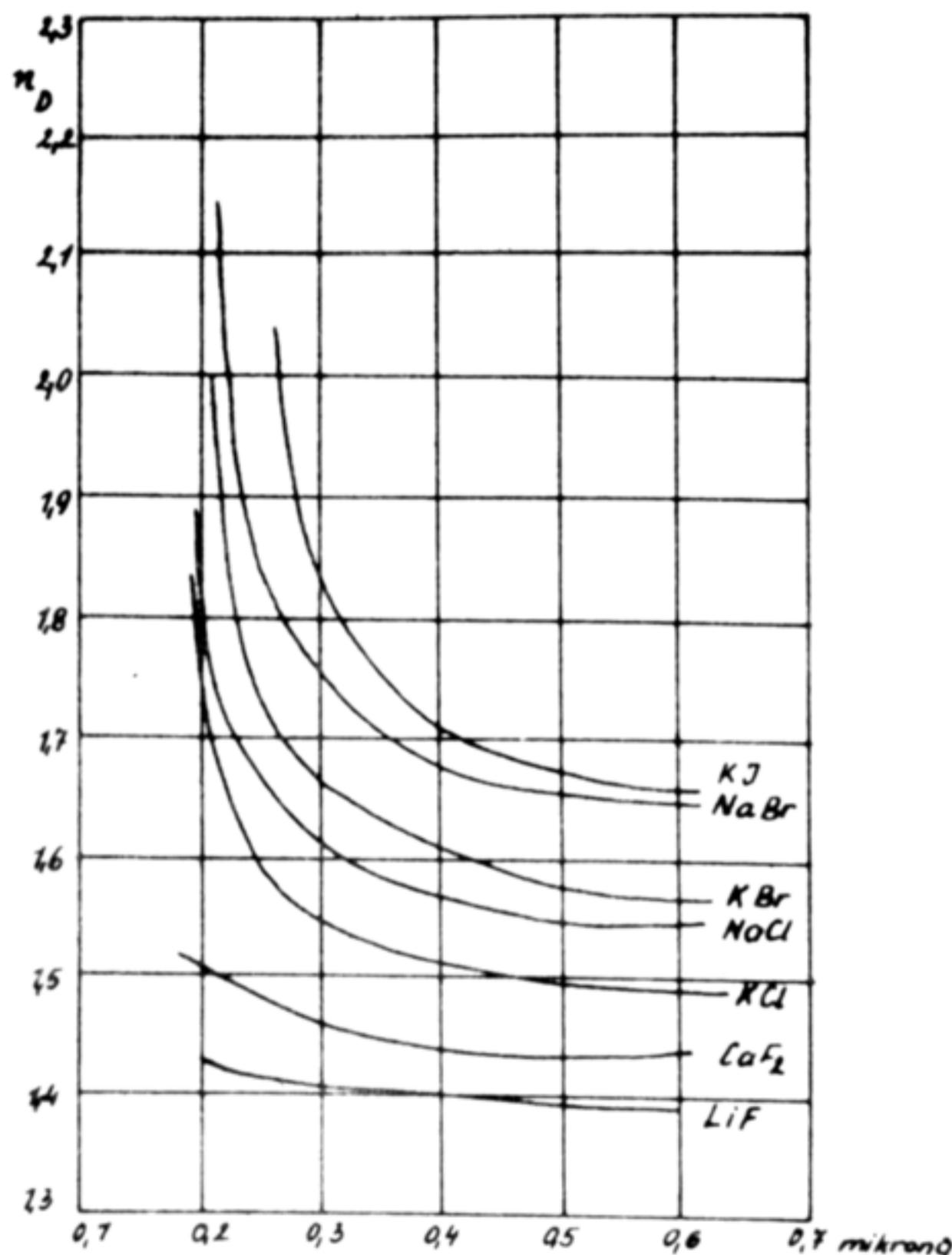
Materiál	Mez pro-pustnos-ti na dlohuo-vlnném konci	Index lomu n_D	Rozpust g/100 mltí se v vody	Rozpouš-ť se v	Některé vlastnosti materiálu
Sklo siri-níku ar-senitého	12 mikronů	2,59	0,000	alkalie	As_2S_3 , je to homo-geňní červené sklo, stálý, teplota měknutí $195^{\circ}C$, není korosivní, lze použít pro každý optický přístroj
Chlorid stříbrný	23 mikronů	2,07	0,000	NH_4OH $Na_2S_2O_3$ KCN	$AgCl$, bezbarvý, kryst. v krychlové soustavě, neštípatelný, tmavne na slunečním světle, koroduje kovy
Bromid draselný	27 mikronů	1,55	53,48 při $0^{\circ}C$	alkohol, glycerin	KBr, bezbarvý, kryst. v krychlové soustavě, hygroskopický, štípatelný, snadno škrabatelný
Chlorid sodný	15 mikronů	1,54	35,7 při $0^{\circ}C$	glycerin	NaCl, bezbarvý, krystaluje v krychl. soustavě, hygroskop. štípatelný, snadno škrabatelný
Safír	5,5 mikronů	1,77	0,000	-	Al_2O_3 , krystaluje v Be sterečné soustavě, neštípatelný, dobré tepelné vlastnosti
Lithium fluorid	5,0 mikronů	1,39	0,27 $18^{\circ}C$	kyseliny	LiF , bezbarvý, krystaluje v krychl. soustavě, štípatelný, snadno škrabatelný
Fluorid vápenatý	9,0 mikronů	1,43	0,002 $18^{\circ}C$	roztok salmiaku	CaF_2 , bezbarvý, krystaluje v krychl. soustavě, štípatelný, snadno škrabatelný

Pokrač. tab. 14.2

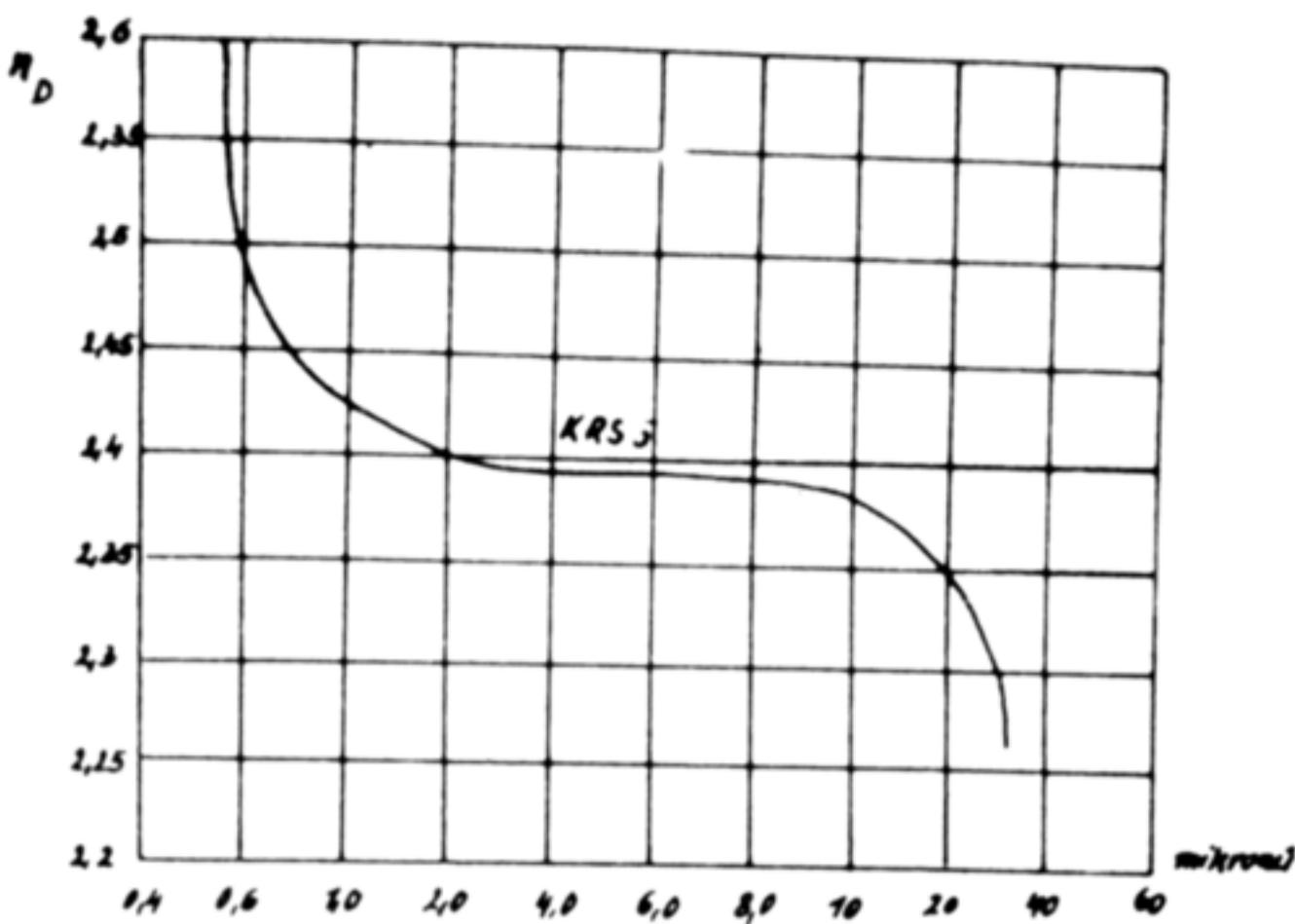
Materiál	Mez propustnosti na dlouhovlnném konci	Index lomu n_D	Rozpust g/100 ml vody	Rozpouští se v	Některé vlastnosti materiálu
KRS 5	38,0 mikronů	2,63	0,02 0°C	HNO_3 lučavka	KRS 5, červený, krystaluje v krychlové soustavě, neštípatelný, ne snadno leštětelný, velký koeficient tepelné roztaživosti
Tavený křemen	4 mikrony	1,43	0,000	HF	SiO_2 , dobré mech. i tepelné vlastnosti, isotropní
Křemík	20 mikronů	3,5	0,000	HF HNO_3	Si, kovově šedý, krystaluje v krychlové soustavě, vysoký bod tavení, propustnost klesá nad 300°C
Chlorid draselný	21 mikronů	1,49	34,7 20°C	alkalie eter glycerin	KCl, bezbarvý krystaluje v krychlové soustavě, hygroskop., štípatelný, snadno škrabatelný
Jodid draselný	31 mikronů	1,67	127,5 0°C	alkohol, čpavek	KJ, bezbarvý, krystaluje v krychlové soustavě, velmi hygroskopický, ne-snadno leštětelný, štípatelný, snadno škrabatelný, měkký
KRS 6	23 mikronů	2,35	0,1 0°C	-	KRS, bezbarvý, krystaluje v krychlové soustavě
Bromid cesia	40 mikronů	1,70	124,3 25°C	alkohol	Cs Br, bezbarvý, krystaluje v krychlové soustavě, hygroskopický, měkký, snadno škrabatelný
Sklo	3 mikrony	1,5 - 1,9	0,000	HF	homogenní, bezbarvé, snadno leštětelné



Obr.14.4
Spektrální propustnost taveného křemene a Si.



Obr.14.5 Dispersní křivky některých krytalů.



Obr. 14.6 Dispersní křivka materiálu KRS 5.

15. Organická skla

V posledních patnácti letech začíná získávat význam výroba některých čoček z organického skla.

V současné době existují dvě obchodně běžná organická skla a sice polymethylmetakrylát a polystyren. První z těchto dvou skel odpovídá optickými vlastnostmi korunovému sklu a druhé flintovému sklu.

Organické sklo má poměrně velký koeficient tepelné roztaživoosti a malou odolnost ploch proti mechanickému namáhání. Z toho důvodu je nutné brát při konstrukci přístrojů tyto vlastnosti v úvahu. Nutno dodat, že byla vyvinuta řada metod sloužících ke ztvárnění ploch součástí zhotovených z organického skla.

Mnoho úsilí bylo věnováno zvýšení bodu měknutí organických skel, který se pohybuje kolem 120°C .

Výhodou organických skel je jejich velká propustnost, která je větší než u normálního optického skla. Organická

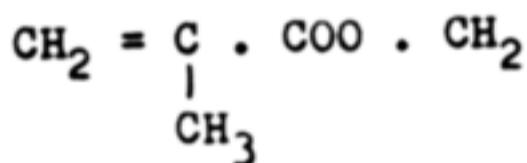
sklo bývají propustná až do dlouhovlnné oblasti infračervené a do krátkovlnné oblasti ultrafialové. Protože organické sklo je tvořeno velmi čistými chemickými látkami, je snadná jeho reproducovatelnost s přesností indexu lomu na $\pm 0,0001$.

Organické sklo má mnohem vyšší pevnost v tlaku než normální optické sklo a mimoto má velmi malou specifickou váhu a často se proto užívá tam, kde je možno právě využít těchto jeho vlastností.

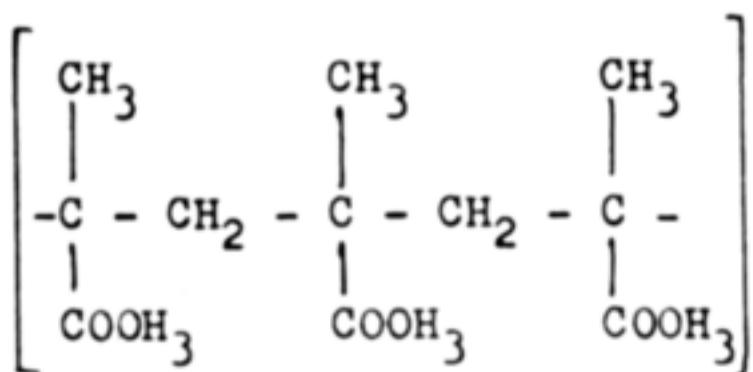
Organické sklo se zpracovává v optické výrobě několika způsoby:

- a) lisováním za tepla
- b) litím do opticky vyleštěných forem
- c) broušením a leštěním, jako každé normální sklo.

V ČSSR se vyrábí první druh z obou uvedených druhů organických skel, tj. polymethylmetakrylát. Výchozí suroviny tvoří aceton, kyanovodík, methanol a kyselina sírová, z nichž vzniká methylmetakrylát, tj. organická sloučenina s nenasycenou vazbou, určená vzorcem



Je to velmi pohyblivá kapalina, která účinkem různých iniciátorů, zejména benzoylperoxydu, polymerizuje za tepla na tvrdou a čirou hmotu

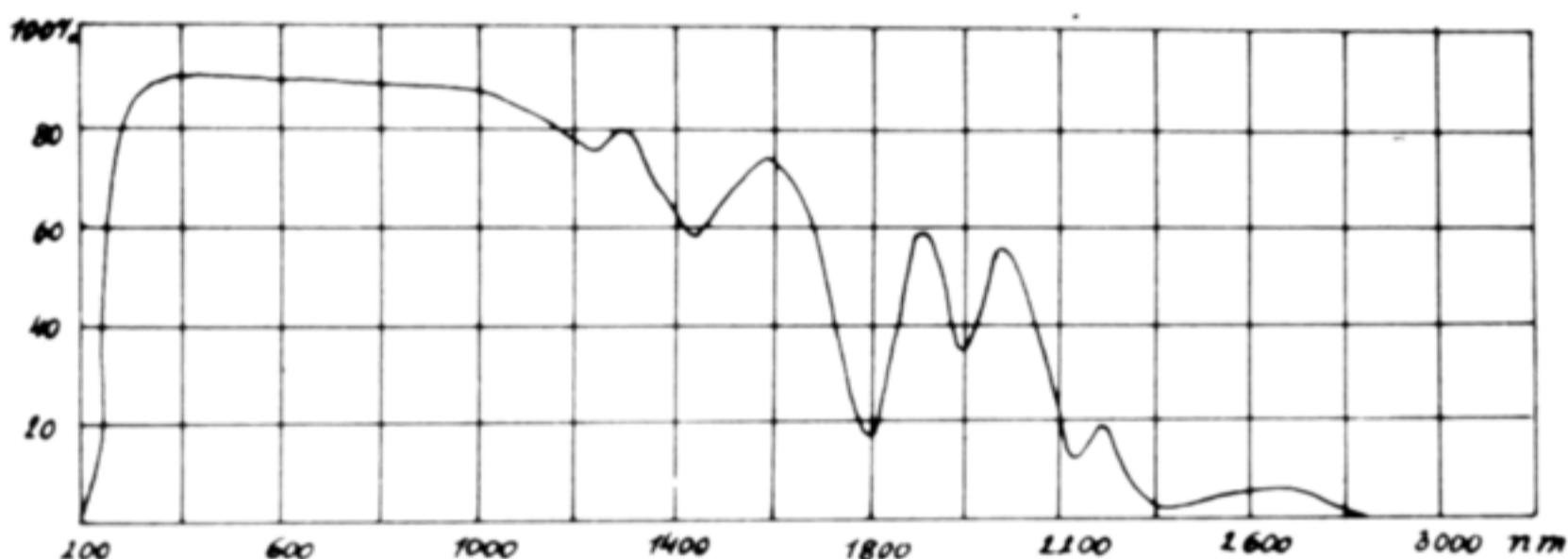


tj. polymethylmetakrylát. Tento polymer zmékčený vhodným přidavkem dibutylftalátu tvoří organické sklo, které se prodává pod obchodní značkou UMAPLEX.

Některé vlastnosti mechanické, tepelné a optické jsou uvedeny v přehledné tabulce 15.1. Spektrální propustnost je graficky vystižena obr. 15.1.

Tab. 15.1

Vlastnost	Hodnota	Vlastnost	Hodnota
Spec. váha g/cm ³	1,18	Index lomu n_D	1,41
Pevnost v tahu kg/cm ²	500-700	Propustnost viditelných paprsků	91%
Pevnost v ohybu kg/cm ²	900-1200	Propustnost ultrafialových paprsků	50-60 %
Koefficient tepelné roztaživosti mm/mm stup.	$9 \cdot 10^{-5}$		



Obr. 15.1 Průběh spektrální propustnosti UMAPLEXU.

Organické sklo má mnoho výhod. Předně má velkou pevnost a malou specifickou váhu. Dá se snadno zpracovávat lisováním nebo litím na výlisky s lesklými plochami, které není třeba dále opracovávat. Tato skutečnost umožňuje snadnou výrobu čoček s asferickými plochami.

Během války se organické sklo používalo na výrobu triedrů, zaměřovačů, promítacích a zvětšovacích přístrojů a všude tam, kde bylo výhodné použít asferických ploch.

Po válce se začalo užívat organické sklo k výrobě soustav o velkém průměru, např. objektivů Schmidtovy komor pro televizní účely.

V tabulce 15.2 jsou uvedeny indexy lomu pro některé vlnové délky.

Tab.15.2

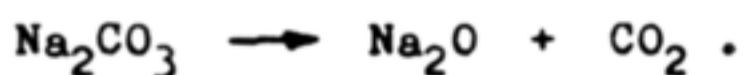
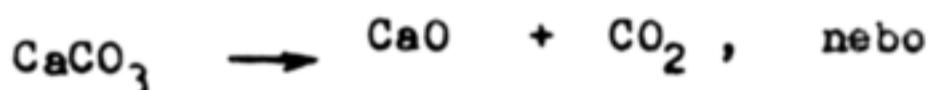
$\lambda \text{ Å}^\circ$	n_D
6708	1,5030
5893	1,5057
5460	1,5081
4350	1,5171
4050	1,5214
6563(C)	1,5035
4861(F)	1,5123

$$V_D = 57,5$$

VÝROBA OPTICKÉHO SKLA

16. Vstupní suroviny

Směs surovin používaných k výrobě optického skla se nazývá kmene. Ve většině případů jsou tvořeny tyto suroviny rozličnými solemi, které se při vysoké teplotě, při které se sklo taví, rozkládají na sklotvorné kysličníky nebo plynově tvorné látky. Např.



Jen ve velmi řídkých případech je vstupní surovina tvořena přímo čistým sklotvorným kysličníkem, jak je tomu např. v případě PbO nebo SiO₂.

Podle úlohy, které hrají jednotlivé suroviny obsažené v kmene v procesu tavby skla, je možno suroviny rozdělit na:

- a) hlavní,
- b) pomocné.

Hlavní suroviny tvoří ty složky kmene, které přivádí do skloviny podstatné složky charakteristické pro typ skla.

Pomocné suroviny dávají sklu požadované zabarvení, zlepšují jakost skla, urychlují tavbu nebo dávají sklu neprůhlednost (opalescenci apod.).

Při výrobě optického skla se používají prakticky tytéž suroviny jako při výrobě obyčejného skla. Avšak požadavky na jakost surovin pro výrobu optického skla jsou velmi vysoké. K sestavení kmene se používají nejlepší materiály z technicky čistých materiálů a v některých případech chemicky čisté materiály. Na jakost optického skla se velmi nepříznivě projevují příměsi železa, titanu a jiných barvících složek. Vyvolávají zabarvení skla a snižují jeho průhlednost.

Obsah železa se obyčejně v používaných surovinách připouští v procentu menším než 0,001 až 0,002. U písků se žádá pod 0,013 % Fe_2O_3 . Sloučeniny chromu nejsou přípustny vůbec. Velmi přísně je omezen obsah chloridů a síníků. K nepřijemným příměsím patří kysličník titaničitý, který zabarvuje sklo.

Věsimme si nyní některých nejvíce používaných surovin.

Křemenný písek

Slouží k zavedení SiO_2 do skloviny. Jeho jakost je charakterizována chemickým složením a zrnitostí. Je žádáno, aby písek měl vysoký obsah SiO_2 , minimální obsah příměsí a stabilitu zrnitosti. Písek má obsahovat alespoň 99% SiO_2 , obsah Fe_2O_3 nesmí být větší než 0,013 % a obsah TiO_2 musí být menší než 0,05 %. Přítomnost kysličníků chromu je v písku nepřípustná.

Mimo uvedené příměsi obsahuje někdy písek Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O ve formě živců, sody, kysličníků, kaolinu a jiných minerálů. Takový písek se pro optické sklo nehodí.

90 % zrn písku musí mít velikost 0,15 až 0,4 mm. Velmi jemný písek se hodí pouze pro některá optická skla (např. flintová). Příliš hrubý písek ztěžuje tavbu, tj. protavení kmene a je příčinou vzniku kamínků. Zrna mají mít členitý povrch, aby byl co největší a přišel do maximálního styku s ostatními složkami kmene.

K výrobě skel, které mají mít zvlášť vysokou propustnost se používá místo písku mletého křemene, který má daleko menší obsah železa.

Vlastnosti některých ostatních důležitějších surovin jsou uvedeny v tabulce 16.1.

Veškeré suroviny používané k výrobě skla není již třeba ve sklárně zvlášť zpracovávat mimo přesívání na sítech, neboť suroviny přicházejí ve většině případu do sklárny jako hotové výrobky chemického průmyslu.

Suroviny se ve sklárnách uchovávají v uzavřených sudech nebo bunkrech, které jsou zhotoveny buď ze dřeva, cínového nebo hliníkového plechu.

Tab. 16.1

Kysličník zaváděný do skla	Surový materiál	Výroba nebo zdroj surovin	Vnější vzhled
B_2O_3	Kyselina boritá H_3BO_3	Vyrábí se z minerálů obsahujících bor	Je to krystalická látka mající vzhled matných, lesknoucích se šupinek nebo malých kryštaalků bílé barvy
	Borax $Na_2B_4O_7$	V přírodě se vyskytuje jako minerál $Na_2B_4O_7 \cdot 10 H_2O$, nebo se vyrábí uměle	Je to bílý krystalický prášek
Al_2O_3	Kysličník hlinitý Al_2O_3	Pro výrobu skla se vyrábí uměle	Bílý prášek
	Hydrát hlinitý $Al(OH)_3$	Vyrábí se uměle	Bílý prášek
	Kaolin $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Je velmi rozšířen v přírodě	Při menším obsahu Fe_2O_3 je kaolin bílý
Na_2O	Soda Na_2CO_3	Vyrábí se uměle	Bílý prášek, tvořený malými krystalky
K_2O	Potaš K_2CO_3	Vyrábí se uměle	- " -
	Dusičnan draselný KNO_3	Vyrábí se uměle	Bílý krystalický prášek
CaO	Vápenec a křída $CaCO_3$	Rozšířen v přírodě	Vápenec je žlutobílý, křída též bílá
MgO	Kysličník hořečnatý MgO	Vyrábí se uměle	Bílý prášek, tvořený malými krystalky
	Uhličitan hořečnatý $MgCO_3$	Vyrábí se uměle	Bílý prášek
BaO	Uhličitan barnatý $BaCO_3$	Vyrábí se uměle	Bílý krystalický prášek
	Dusičnan barnatý $Ba(NO_3)_2$	Vyrábí se uměle	- " -
ZnO	Zinková běloba ZnO	Vyrábí se uměle	Bílý prášek
PbO	Sufík Pb_3O_4	Vyrábí se uměle	Červený prášek

17. Kmen

Kmenem se nazývá dobré promíchaná, mechanicky stejnorodá směs surovin předem odvážených podle předepsaného složení.
Kmen musí být připraven velmi pečlivě, neboť na pečlivosti přípravy kmene závisí jakost taveného skla. Nestejnorodost kmene vede k vytváření kaménků, šlír, bublin apod. Proto kontrola stejnorodosti kmene se provádí na vzorcích odebraných z několika různých míst kmene. Kontrola se provádí běžně určením složek rozpustných ve vodě a kyselině solné. Přesná kontrola se provádí moderními analytickými metodami.

Velký význam při přípravě kmene má rozměr částic surových materiálů a jejich vlhkost. Velmi jemné frakce některých surovin tvoří hrudky a mimoto v jemně zrnitých surovinách, zvláště v písku, se zadržuje velmi mnoho vzduchu, který je při tavbě skla příčinou tvoření bublinek. Suroviny se přesívají přes síta, jejichž oka mají předepsanou velikost.

Velmi důležité je promíchávání surovin. Suché materiály se nesnadno promíchávají a mají však snahu se opět rychle oddělit. Proto je nutné, aby promíchávaná směs surovin měla určitou vlhkost (kolem 50 %). Vlhkost kmene přispívá k reaktivnosti jeho jednotlivých složek. Optimální vlhkost písku se pohybuje mezi 2 - 5 %.

Při výrobě optického skla hraje prvořadou úlohu otázka reprodukovatelnosti optických konstant jedné a též značky skla od várky k várce. Reprodukovatelnost těchto optických vlastností lze zajistit pouze velmi přesným navažováním jednotlivých surovin. Např. odchylka v obsahu PbO o 0,6 % způsobí u středních flintových skel změnu v indexu lomu o 0,005, což je hodnota ležící ještě právě na hranici přípustných odchylek.

K vážení surovin se používá vah, které při zatížení 150 - 200 kg zajišťují citlivost 0,02 kg = 20 g. Suroviny, jejichž obsah ve skle je menší než 1 %. se navažují na citlivějších technických vahách.

K promísení surovin se používá míchadel různé konstrukce. V podstatě jsou to válcovité bubny, které se otáčejí kolem vodorovné osy. Pro dobré promíchání surovin má význam

i počet obrátek bubnu. Mísidla musí být konstruována tak, aby během mísení se nezvětšil obsah příměsi železa a aby se míchadlo dalo snadno a dokonale očistit od jednotlivých kmenů. Bývají proto vyloženy hliníkovým plechem.

Optické sklo se taví v pánevích, do kterých se mimo kmene přidávají i střepy skla téže značky. Střepy usnadňují protavení kmene, chrání dno pánev před korosí taveného kmene, snižují náklady na vstupní materiály a slouží též ke konečné úpravě optických konstant taveného skla. Nakládání střepů do pánev se střídá s nakládáním kmene.

18. Pece a pánev pro tavení optického skla

a) Pece

Výroba optického skla byla založena na základě osvojení výroby obyčejného skla, od které se prakticky neliší, má však některé své zvláštnosti. Rozdíl spočívá především v tom, že optický průmysl požaduje velkou řadu různých druhů skel, ovšem v poměrně malých množstvích. Mimoto je třeba u jednotlivých druhů skel dodržet řadu požadavek, zejména stejnorodost skla.

Z nejdůležitějších druhů průmyslových pecí používaných k tavení skla nejlépe se osvědčují při výrobě optického skla peci jednopánevové.

První tavby optického skla se prováděly v nevelikých tyglech. Avšak rychlý rozvoj jiných oblastí výroby skla vedl k vývoji pánev, které nahradily tyto tygły. Přednosti pánevových pecí je možno shrnout takto:

(a) Umožňují dosažení dostatečně vysokých teplot 1450 až 1500°C , které jsou potřebné, aby dobře proběhla reskce, při které se tvorí sklo a aby dobré proběhla homogenizace skloviny.

(b) Mají dobré regulovatelný charakter plamene, který lze přizpůsobit druhu taveného skla.

(c) Umožňují snadnou regulaci teplot s dostatečnou přesností $10 - 15^{\circ}\text{C}$.

Optické sklo se taví obyčejně v jedno- nebo jen zřídka v dvoupánevových pecích. Jsou to pece plamenné a vyhřívají se buď plynem nebo naftou.

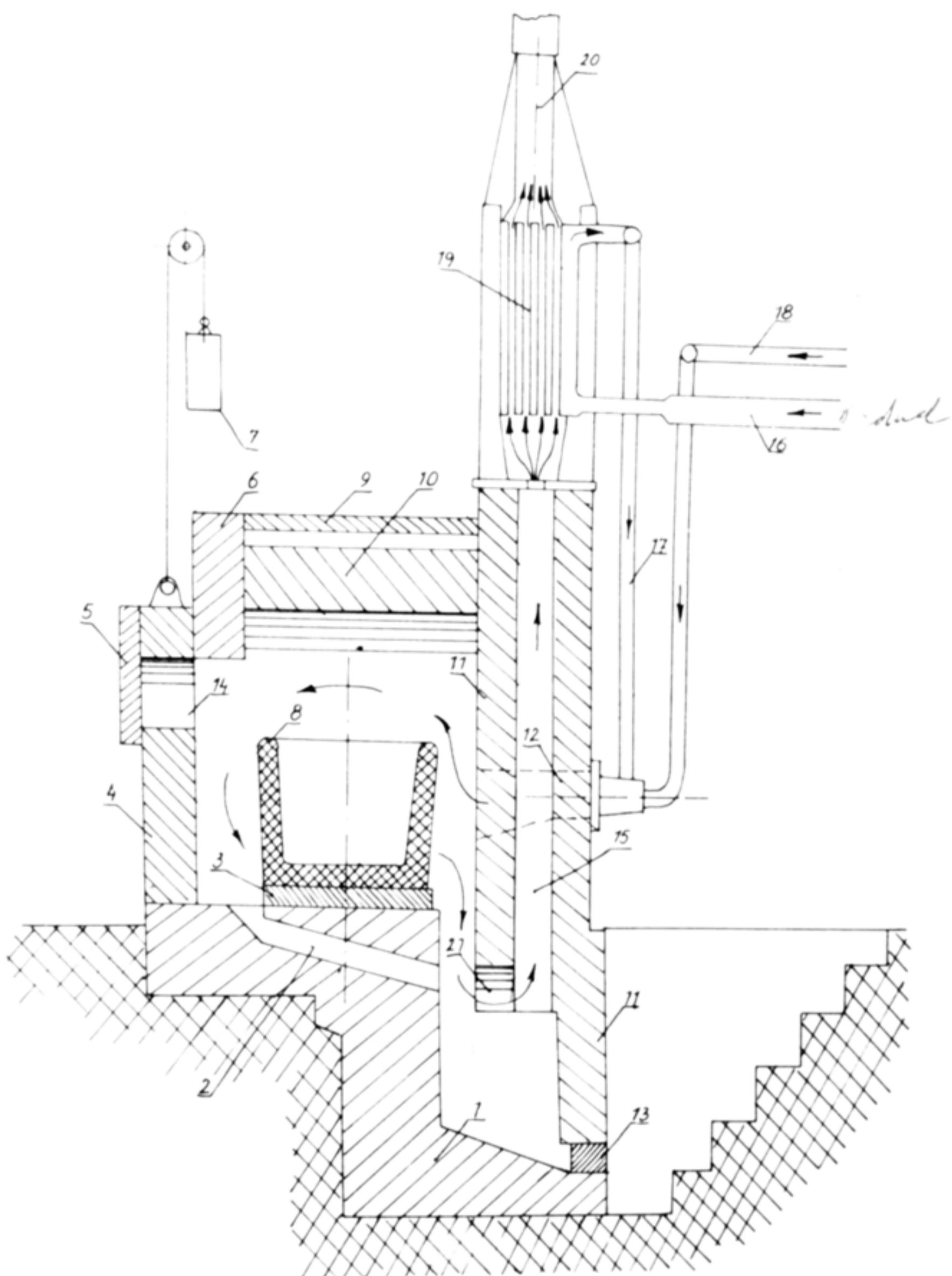
Dosažení vysokých teplot 1450 - 1500°C závisí na použitém palivu a rekuperativním nebo regenerativním způsobu vytápění.

Předehřívání vzduchu i plynu se provádí v regenerátoech, vzduchu pouze v rekuperátoech. Rekuperátory jsou tvořeny kovovými nebo keramickými výměníky tepla, ve kterých je teplo plynu, odcházejících z pece a proudících kanály rekuperátoru, předáváno prostřednictvím stěn kanálů do vzduchu, který proudí opačným směrem kolem kanálů.

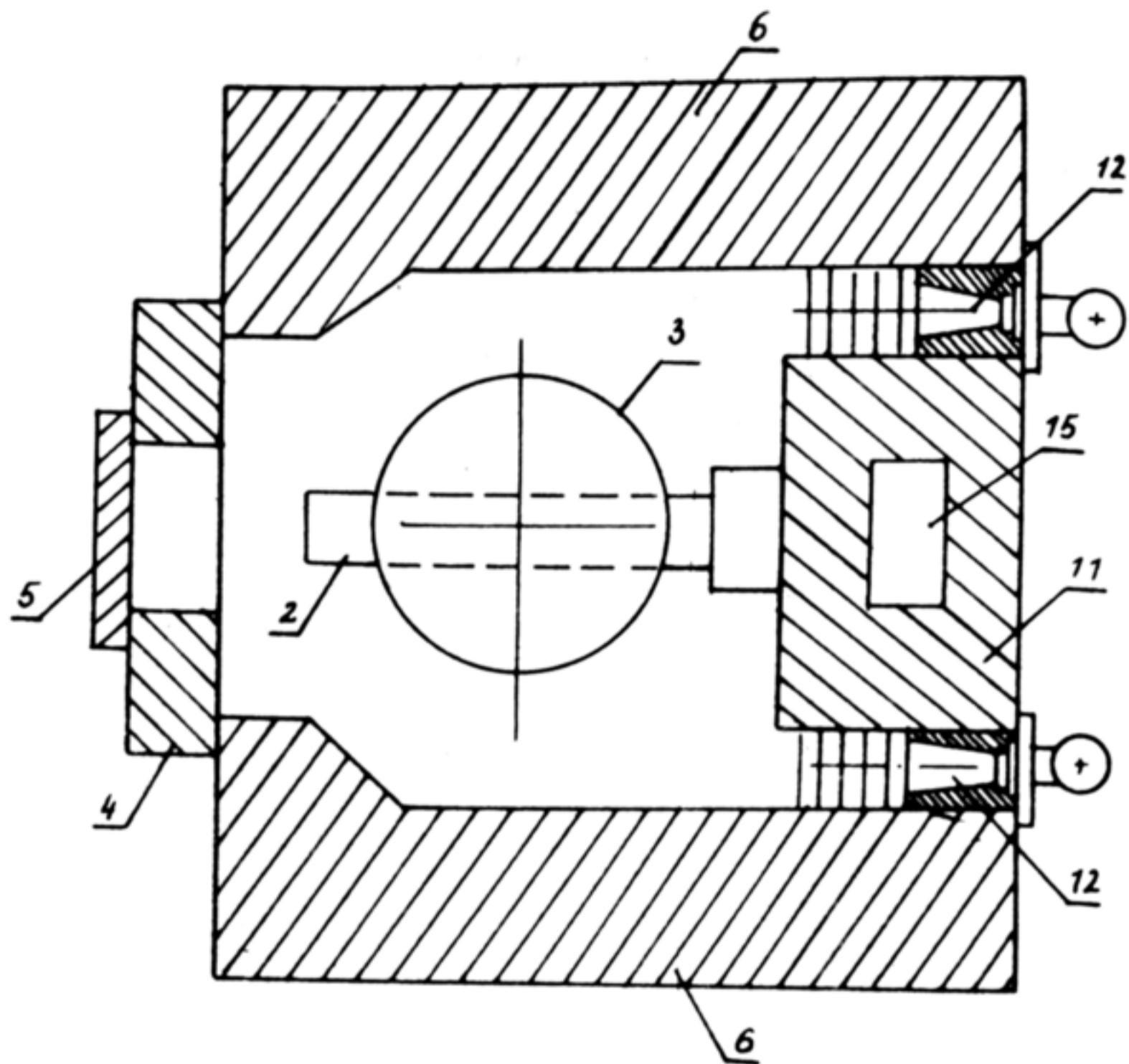
Regenerátory jsou tvořeny šamotovou mřížkovou vyzdívkou, která se periodicky nahřívá teplými plyny odcházejícími z pece a po obrácení chodu se v nich předehřívá vzduch i plyn proudící do hořáků pece.

Na obr.18.1 je znázorněno schéma rekuperativní jednopánevové tavící pece pro výrobu optického skla používané v ČSSR. Na základním zdivu (1) jsou postaveny čelní a boční stěny (6) a zadní stěna (11) ze žáruvzdorného materiálu. V zadní stěně je umístěn kanál (15), kterým se odvádějí spaliny k rekuperátoru (19). Čelní stěna (6) má velký otvor uzavřený zvedacími vraty (4). Tato vrata slouží k zavážení a vyvážení pánevního skla. Jsou opatřena otvorem (14), který slouží k nakládání kmene do pánevního skla a k zavedení míchadla. Podle potřeby se uzavírá deskou (5). Pánev (8) je postavena na žáruvzdorném základu (3), který je vyvýšen nad podlahu pece, aby se pánev překypělým sklem nepřilepila na podlahu. Proto se pánev podsypává směsi písku a uhlí. Plyn se přivádí potrubím (18) k hořákům (12), které jsou dobře znázorněny v příčném řezu na obr. 18.2. Horké plyny ohřívají pánev (8) a otvorem (21) vstupují do kanálu (15), kterým jsou přiváděny k rekuperátoru (19), zhotoveného ze žáruvzdorné oceli. Zde se předehřívá vzduch, který se přivádí od ventilátoru potrubím (16). Z rekuperátoru jsou spaliny odváděny do komína (20).

Překypí-li v pánevní sklo, odtéká kanálem (2) do nástěny (1), odkud se podle potřeby po otevření otvoru (13) může vypustit nebo vytáhnout železným hákem.



Obr. 18.1
Schéma rekuperativní pece na tavení optického skla.

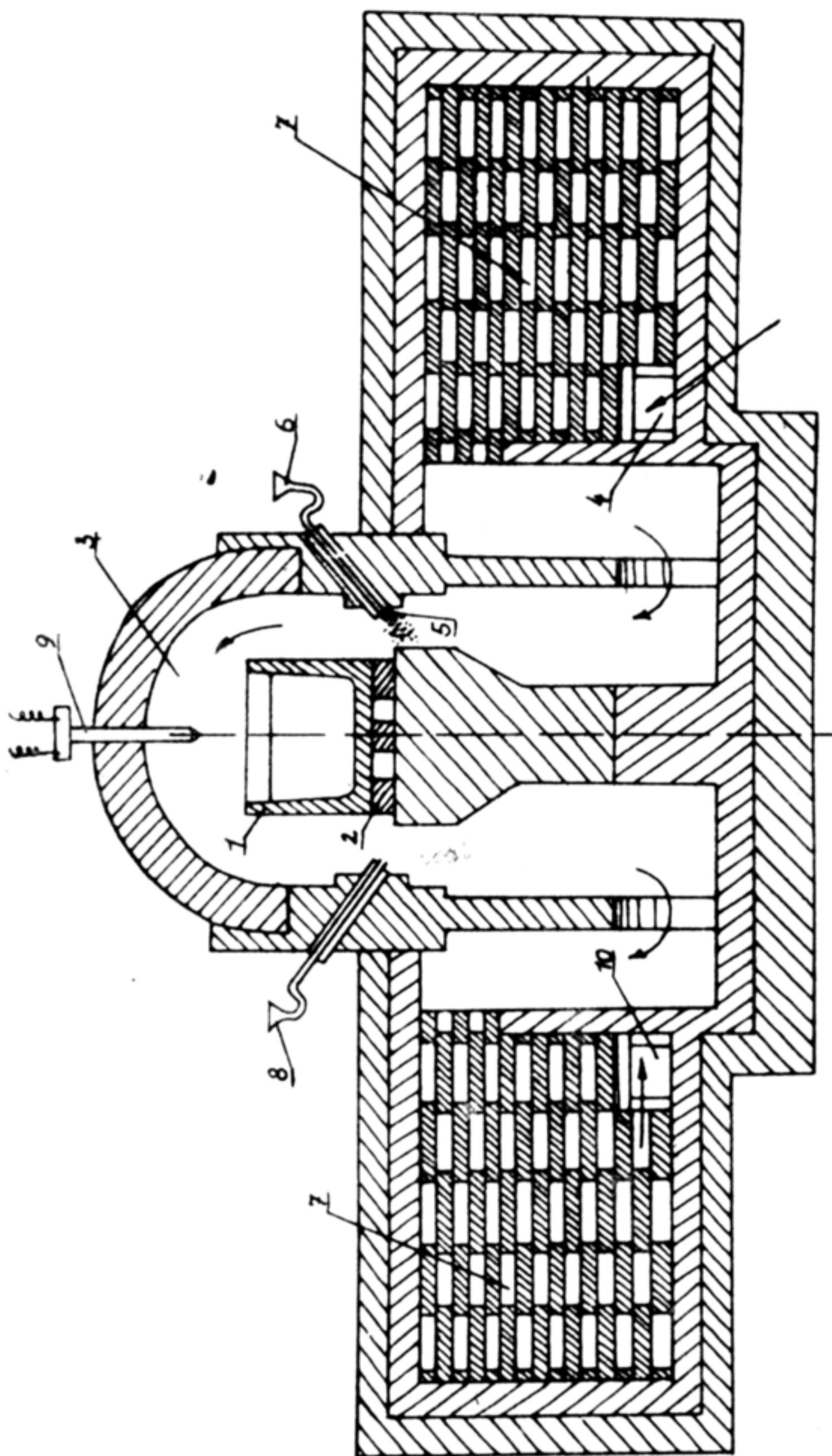


Obr. 18.2
Příčný řez rekuperativní peci znázorněně na obr. 18.1.

Na obr.18.3 je schematicky znázorněna jednovanová pec vyhřívaná naftou, používaná v SSSR.

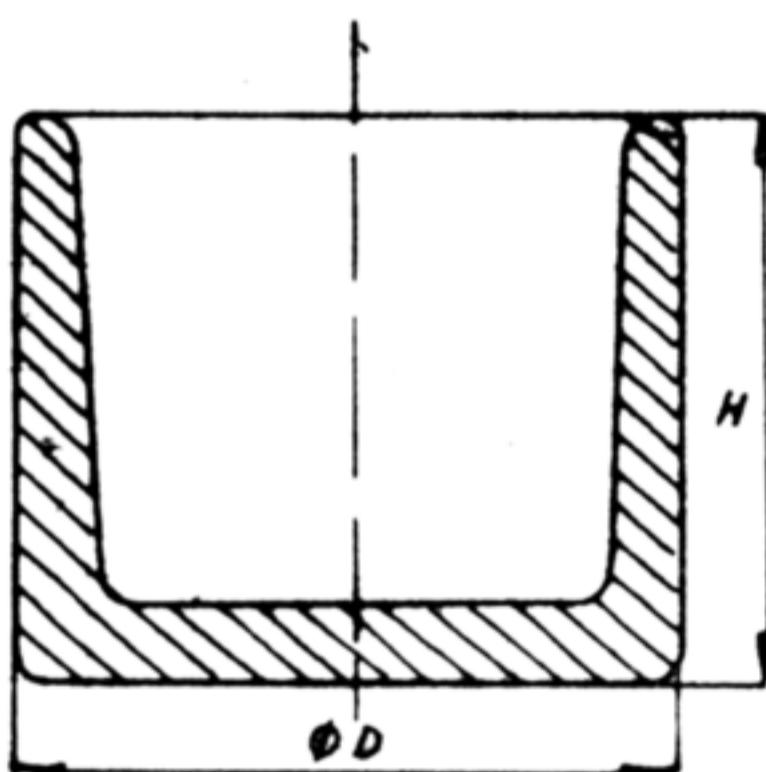
Vlastní pánev je postavena na roštu (2) v pracovní komoře (3). Přívod vzduchu a paliva probíhá následujícím způsobem. Vzduch je přiváděn do pece např. pravým regenerátorem, kde se ohřeje a vstoupí do prostoru (5), kam se vstřikuje v kapénkovitém stavu nafta. Hořící látky a produkty hoření omývají pánev (1) a nahřívají ji, načež odcházejí kanály druhého (levého) regenerátoru (7), který předehřívají. Za dobu 20 - 30 minut se celý proces obrátí. Vzduch se přivádí do pece levým regenerátorem a produkty hoření odcházejí pravým. Za tuto dobu se regenerátor vyhřeje celkem na $1250 - 1350^{\circ}\text{C}$. Tato teplota stačí k nahřátí vzduchu proudícího do pece na teplotu $900 - 950^{\circ}\text{C}$. Teplota v peci se udržuje na potřebné hodnotě automaticky a její kontrola se provádí termočlánkem.

Obr. 18.3 Naftová pec



b) Pánev

Pánev na tavení optického skla hraje jednu z nejdůležitějších úloh, neboť může být jedním z hlavních zdrojů vzniku nestejnorodosti tohoto skla. Proto jsou kladený na pánev vysoké požadavky z hlediska hustoty a odolnosti stěn páneve vzhledem ke korosivním účinkům skloviny. Optické sklo je možno tavit v pánevích libovolného obsahu. Čím však je pánev menší, tím je menší relativní výtěžek dobrého využívajícího skla a tím menší je jakost skla z hlediska jeho stejnorodosti, absorpcie světla a bublinatosti. Při tavení skla v malých pánevích působí nepříznivě volná plocha skloviny a styčná plocha skloviny s pánevou. Čím je menší pánevem tím je nepříznivější poměr množství skloviny ke styčné ploše skloviny s pánevou. Objem pánev se pohybuje proto od 170 l do 600 l a váha utaveného skla od 0,5 t do 2 t. Pánev je tvaru válcovitého, jak je patrné z obr. 18.4.



Obr. 18.4. Řez vanou na tavení optického skla.

Poměr průměru D a výšky H bývá okolo 1,25. Materiál, ze kterého se pánev zhodují musí splňovat řadu velmi přísných požadavků:

- a) musí být žáruvzdorný až do teploty 1500°C i více;
- b) musí odolávat korosi skloviny;
- c) musí dobře snášet prudké změny teploty;
- d) musí mít velkou mechanickou pevnost.

Nejdůležitější je požadavek na stálost materiálu páneve

vzhledem k silným korosivním účinkům některých skel. Vlivem korose se jednak zhoršuje chemické složení skloviny a jednak některá skla mohou prokorodovat pánev a vytéci. Výsledkem vzájemného působení skloviny a materiálu páneve jsou šliry, bublinky i kaménky. Z toho důvodu se stalo hledání vhodného materiálu pro výrobu pánev na tavení optického skla jedním z nejdůležitějších úkolů technologie výroby optického skla.

V současné době se používá k výrobě pánví velmi pečlivě vybraných vysoce žáruvzdorných hlín. Tato hlína se musí vyznačovat velkou plastičností, které je třeba k formování pánve a minimálním obsahem Fe_2O_3 (menším než 0,7 až 1,2 %). Protože se hlína při vypalování značně smrští, je nutné, aby se zabránilo roztržení nebo praskání pánve, přidat k této hlíně ostřivo. Ostřivem bývá tatáž hlína předem vypálená při vysoké teplotě kolem $1200^{\circ}C$. Pro tento účel se používá též rozmletých kousků již použité pánve.

Potřeba pánví na výrobu optického skla je poměrně veliká. Protože u klasické výroby na každou várku skla je třeba jedna pánev, nutno počítat pro jednu pec měsíčně přibližně 25 pánví. Protože skladování velkého počtu pánví si vyžádá velkého prostoru, je nutné upravit technologii výroby pánví tak, aby jejich sušení bylo co nejkratší. Sušení plasticky formovaných pánví si vyžádá i doby 7 - 10 měsíců.

Formování pánví se provádí třemi způsoby:

- a) plastickým formováním,
- b) litím do forem,
- c) dusáním (pěchováním).

Při plastickém formování se míchá masa na výrobu pánví s vodou na plastické "těsto", které se po odležení formuje ručně nebo lisováním.

Při zhrotovování pánví litím, se šamotová masa ztekutí případou ztekucovadla a leje se do tlustostenné formy vyrobene ze sádry; také její jádro je ze sádry. Voda masy se vsaje do formy a z hmoty se vytvoří pánev.

Při formování pánví oběma uvedenými způsoby se pánve velmi smrští až o 4 - 6 %, což vede k dlouhodobému sušení. Lité pánve, které po vyformování obsahují méně vody, lze sušit značně kratčejí.

V SSSR byla vypracována efektivnější metoda výroby pánví dusáním. Masa pánve obsahuje vysoké procento šamotu (až 85 %) a 5-9 % vody. Pěchování pánví se provádí buď elektromechanickými nebo pneumatickými zařízeními. Tento způsob zhrotovování pánví vede k vyšší mechanické odolnosti, zmenšení

pórovitosti a urychluje sušení. Vysušování pánví se provádí do vzdušně suchého stavu, načež se pánve vypalují.

Sušení a vypalování pánví se musí provádět velmi opatrně, neboť při těchto operacích mohou vznikat trhliny, nebo se pánev může úplně zničit. V poslední době se používá k sušení pánví klimatizovaných sušáren, čímž se sušení značně zkracuje.

Sušení pánví se provádí tak, že se pánev vyhřívá z vnitřní strany infračárovkami, takže vlhkost může unikat vnějšími stěnami. Dále se pánev suší vyhříváním pomocí střídavého elektrického proudu, který prochází stěnami pánev, ke kterým se přivádí vhodnými elektrodami. Tím bylo umožněno zkrácení sušení pánve na pouhý měsíc.

Velký význam má stav vnitřní stěny pánev. Tato plocha má být velmi hutná a hladká. Aby se snížila rozpustnost vnitřní plochy, nanáší se na ni speciální, tenká vrstva hutné, ve skle málo rozpustné ochranné látky.

Vypalování pánví se provádí ve dvou etapách. První vypalování se provádí ve speciálních plynových nebo elektrických pecích pracujících periodicky. To znamená, že se teplota postupně zvyšuje podle určitého režimu do $900-1000^{\circ}\text{C}$. Zvlášť opatrně nutno zahřívat pánev při teplotě kolem 100°C , kdy se voda v mase proměňuje v páru a dále kolem teploty $500-700^{\circ}\text{C}$, kdy se zase rozrušuje kaolinit, který tvoří základní část materiálu pánev. Při použití elektrických pecí, u kterých je možno velmi přesně reguloval režim v peci, se zkrátí vypálení na 2 dny. V ostatních pecích trvá vypálení 4 dny.

Druhá etapa vypalování se provádí přímo v tavící peci, ve které se pak taví sklo, tedy těsně před tavením. Vypalování se provádí při teplotě cca 1450°C , tj. při teplotě nejméně tak vysoké, jaká je maximální teplota při tavení příslušného typu skla.

19. Vlastnosti skloviny

V průběhu tavení, chlazení a tepelného zpracování skla má velký význam viskosita skloviny.

Viskosita γ charakterizuje vnitřní tření skloviny a je dána vztahem

$$F = \gamma \cdot \frac{S \cdot v}{l} \quad (19.1)$$

kde F značí sílu, která posouvá vrstvu o ploše S ležící ve vzdálenosti l rychlostí v , jak je to naznačeno na obr. 19.1. V soustavě

cm - gram - sekunda je jedničkou viskosity poise.

Při viskositě 1 poise je $F = 1$ dynu, $S = 1 \text{ cm}^2$, $l = 1 \text{ cm}$ a $v = 1 \text{ cm/sec.}$

Pro názornost uvádíme, že např. viskosita vaseliny při 20°C je rovna 1 poise a viskosita vody 0,01 poise.



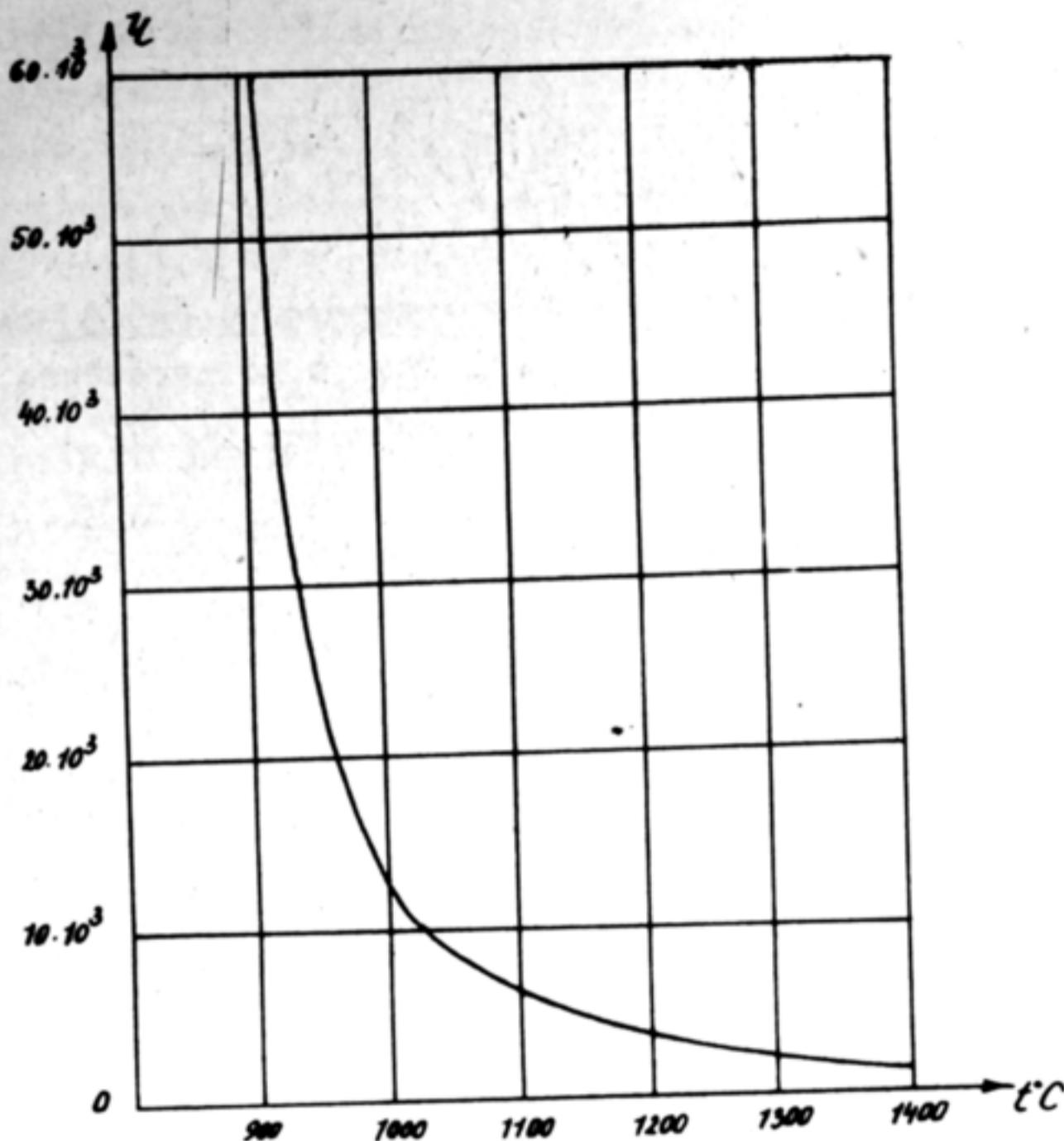
Viskosita skloviny

je funkcí chemického složení a teploty. Závislost

Obr.19.1 K definici viskosity.

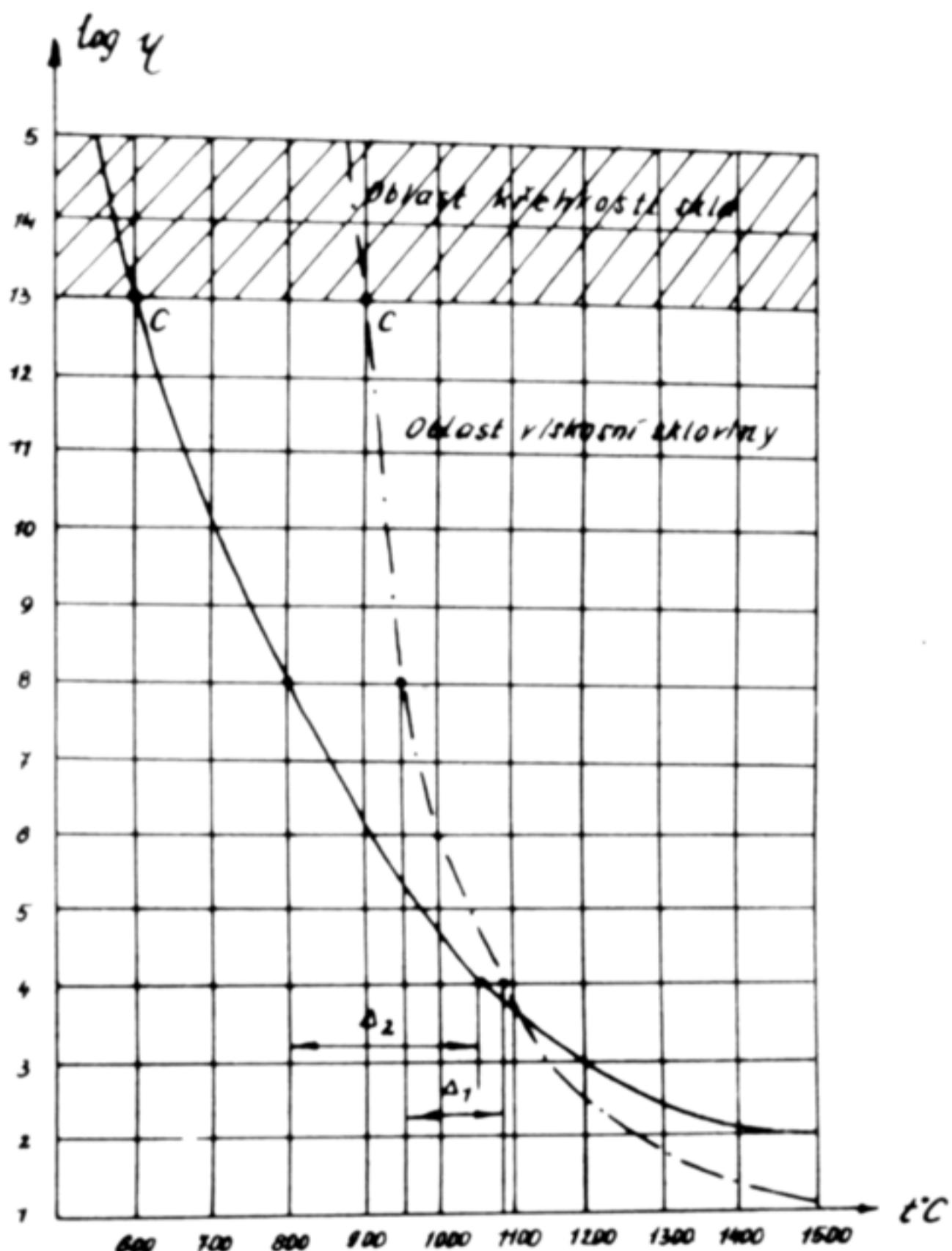
viskosity γ skloviny na teplotě je obecně dána křivkou na obr.19.2, která je charakteristickou pro všechna skla. Z tohoto grafu je patrno, že na počátku ochlazování, tj. při teplotě asi do 1100°C , narůstá viskosita skloviny velmi pomalu, zatím co při nižších teplotách než 1100°C začíná narůstat prudce tak, že v intervalu teplot od 1000 do 900°C se zvyšuje viskosita na dvojnásobek při poklesu teploty.

Na obr. 19.3 jsou znázorněny křivky závislosti viskosity na teplotě pro dvě různá optická skla. Vzhledem k tomu, že viskosita skla při laboratorní teplotě nabývá prakticky nekonečných hodnot, jsou pro osu pořadnic nanášeny logaritmické viskosity γ . Jak již bylo uvedeno, jsou tyto křivky velmi důležité pro režim tavby, zpracování nebo chlazení skla. Tak např. čerpení skla se provádí při viskositě $\gamma = 10^2$ poise, výroba součástí ručními metodami při $\gamma = 10^3$ poise, lisování skloviny při $\gamma = 10^5 - 10^7$ poise, spékání skla při $\gamma = 10^9$ poise. Viskosita kolem 10^{13} poise (body C) je rozhodující pro



Obr. 19.2
Závislost viskosity skla na teplotě.

chlazení skla. Při této viskositě přechází sklovina do křehkého skla. V intervalu viskosit od 10^4 do 10^{-8} poise lze sklovinu tvarovat. Porovnáním křivek (1) a (2) je vidět, že interval tvarování skloviny Δ je pro uvedené druhy skel velmi odlišný. Tato skutečnost je velmi důležitá pro konstrukci forem používaných pro lisování skla.



Obr.19.3

Závislost viskozity na teplotě pro dvě různá optická skla.

20. Krystaly skla (odskelnění)

Za teplot, při kterých se sklovina tavi, je sklovina stabilní z hlediska rovnováhy mezi kapalným a krystalickým stavem. Kdyby tomu tak nebylo, nemohlo by dojít k roztažení všech krystalických složek kmene. Při ochlazování skloviny přechází tato za normálních podmínek a rychlosti ochlazování do skelného stavu, ve kterém je z hlediska termodynamického formou bohatší na vnitřní energii než je příslušná forma kry-

talická. Aby nedošlo ke krystalizaci skloviny během ochlazování brání především vysoká viskositá skloviny.

Teplota, při které existuje rovnováha mezi primárně krystalující fází a sklovinou, se nazývá teplota liquidus. Nad touto teplotou nemůže sklovina krystalizovat. To znamená, že pokud se sklovina zpracovává při teplotě nad teplotou liquidus, nedojde k odskelnění ani po dlouhé době. Pod teplotou liquidus je krystalická fáze stabilní v koexistenci se sklovinou. Za nižších teplot, než je teplota eutektická, je stabilní pouze fáze krystalická. Při ochlazování skel se však nikdy nevytvoří rovnovážný stav. Kapalná fáze, tj. sklovina, je pod teplotou liquidus přesycena primární krystalizační fází, která se ze skloviny nevyloučila v intervalu nebezpečných teplot.

Při určitých podmínkách se mění skelný stav, který je výsledkem přechlazení, na stálejší krystalický stav. Při pokojových teplotách probíhá odskelnění nekonečně pomalu, takže sklo může existovat v nepozměněném stavu prakticky neomezenou dobu.

V některých případech může docházet ke krystalizaci skla, hlavně při teplotách 100 - 150°C pod teplotou liquidus. Nejsnadněji vznikají krystaly na hranici dvou různých fází, např. podél šlír, na povrchu kaménků nebo plynných bublin apod.

Odskelnění skla patří k jedné z příčin způsobujících zmetkovitost skla.

Velmi podrobně pojednává o této vadě skla prof. Dr inž. Fanderlik M. x)

21. Základy teorie tavení optického skla

Tavení skla je nejdůležitějším procesem při výrobě optického skla. Mnohé vady u taveného skla jsou způsobeny nedodržením nebo narušením režimu tavení.

x) Prof. inž. Dr M. Fanderlik, Vady skla, Praha 1963, str. 62.

Je to složitý proces zahrnující komplex různých fyzikálních, fyzikálněchemických a chemických jevů. Výsledkem tavení je převedení tuhého kmene na sklovinu stejnorodou z hlediska jejího chemického složení.

Tavení skla je možno v principu rozdělit na pět základních etap:

- (a) tvoření silikátů,
- (b) tvoření skloviny,
- (c) čerlení,
- (d) homogenizaci,
- (e) chlazení.

Každá z těchto etap má své zvláštnosti a probíhá za určitých podmínek, které závisí na režimu tavby a na konstrukci tavící pece. Mezi jednotlivými etapami existuje úzká souvislost a některé etapy, jako např. čerlení a homogenizace, probíhají v provozních poměrech prakticky současně.

Na rychlosť tavení skla mají vliv mnohé technologické faktory, jako chemický i granulometrický stav kmene, teplota pece, způsob míchání skloviny a konstrukce vlastní tavící pece.

Věsimme si nyní blíže jednotlivých etap tavení optického skla.

a) Tvoření silikátů

V této etapě probíhá v kmene řada fyzikálních a chemických jevů. Ukončují se reakce, které probíhají ještě v tuhém stavu. Při nahřívání kmene prodělává např. křemenný písek řadu polymorfních změn. Je známo, že křemen existuje v 8 modifikacích, z nichž jedna je amorfní a 7 krystalických α - a β -křemen, α -, β - a γ -trimidit a α - a β -cristobalit. Při jednotlivých teplotách přechází modifikace, které jsou stálé při nižších teplotách, v druhé modifikace stále jší při vyšších teplotách.

Podobné změny a chemické děje probíhají také u ostatních složek kmene.

V průběhu této etapy přechází kmen ve spékající se masu, složenou ze zbytků křemene a křemičitanu. Tato etapa se u většiny skel končí při teplotách $800 - 900^{\circ}\text{C}$.

b) Tvoření skloviny

Při dalším zvyšování teploty se tvoří sklovina. Spečená masa se roztavuje, křemen a křemičitany se vzájemně rozpouštějí a vzniká sklovina, která již neobsahuje částice kmene, které by vzájemně neproreagovaly. Díky difusním procesům, které probíhají v etapě vzniku skloviny, se částečně vyrovnává koncentrace různých křemičitanů ve sklovině. Sklovina však přesto zůstává ve značné míře nestejnorodou, obsahuje velký počet šlír a bublin, které jsou tvořeny různými plyny. Popsané procesy probíhající v této etapě obyčejně končí při teplotě 1200°C .

c) Čeření skla

Čeřením skla rozumíme vypuzování bublinek, které zbyly ve sklovině po tavení a odstraňování plynů rozpuštěných ve sklovině. Současně s těmito procesy probíhá homogenizace skloviny. Tyto pochody jsou ve vzájemné, úzké souvislosti. Bublinky, které ze skla vystupují, přijímají difusí část plynů rozpuštěných ve sklovině a mechanickým pohybem, které bublinky ve sklovině způsobují, vyvolávají homogenizaci skloviny.

Zvláštní charakteristikou čeření je uvolňování plynů ze skloviny za vysokých teplot, např. z čeriv. Tímto uvolňováním se mohou tvořit nové bublinky a mimoto také vzniklé plyny difundují do již existujících bublinek a podporují jejich růst a vystupování z taveniny.

Bublinky obsahují v převážné většině CO_2 , který vzniká rozkladem sody a vápence, SO_3 a O_2 , které vznikají ze síranů a některých čeriv a konečně vodní páru z vody obsažené ve kmene. Vedle plynů v bublinkách obsahují skloviny i větší množství plynů ve stavu rozpuštěném. Tyto plyny mohou být ve sklovině buď ve stavu roztoku nebo jsou chemicky vázány.

Podle starších představ princip čeření spočívá v tom, že větší bubliny při svém vzestupu taveninou strhují svým pohy-

bem menší bublinky, s nimiž se na své cestě setkávají, nebo se spojují s jinými malými bublinkami ve větší bublinky, takže nakonec zbývá v páni sklovina prostá malých i velkých bublin.

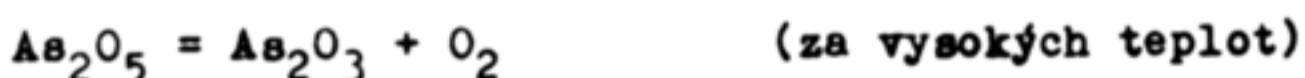
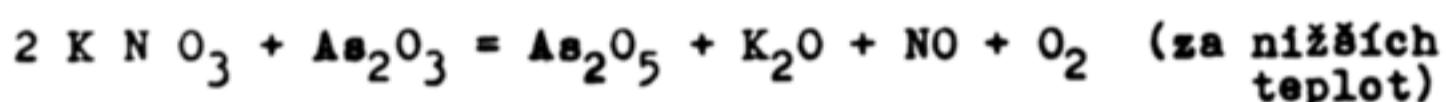
Tento názor není dnes již udržitelný, neboť princip čeření podle současných představ spočívá v tom, že bublinky při svém vzniku přijímají plyn ze skloviny, který vniká do bublinek difusí. | 66

Čeření je možno urychlit dvojím způsobem, chemicky a fyzikálně. Chemické metody spočívají v tom, že se ke sklovině přidají chemické přísady, které se rozpadají v teplotním intervalu, který leží výše než je teplota vlastního hrubého tavení. Účinek těchto čeriv si představujeme tak, že v určitém okamžiku, ve kterém již suroviny z velké části uvolnily své plyny, náhle stoupne rozkladný tlak čeriv. Pod tímto účinkem budou vznikají nové bublinky nebo především difunduje takto vznikající plyn z taveniny do ještě přítomných bublinek, které tím rostou a rychle vystupují z taveniny. 2

Jako čeriv se používá nejvíce:

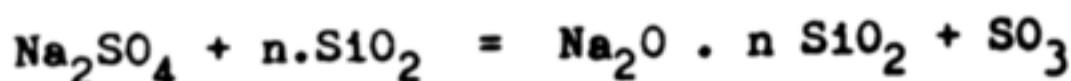
- a) kysličníku arsenitného nebo antimonitného spolu s ledkem.
Přitom vzniká kyslík;
- b) síranu sodného, který dává vznik SO_3 a dále O_2 .

V prvním případě probíhají následující reakce

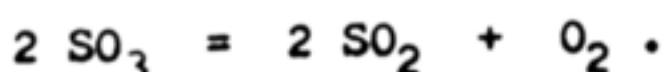


Místo kysličníku arsenitného se používá i kysličníku antimonitého.

V druhém případě nastává rozklad síranu sodného při $1200^{\circ}C$ a je nejživější při teplotě $1350^{\circ}C - 1450^{\circ}C$. Přitom probíhají tyto reakce



Kysličník sírový se pak dále rozpadá podle reakce



Chemický účinek čeriv se podporuje fyzikálními metodami.

K fyzikálním metodám patří především:

- snižení viskosity skloviny,
- ovlivnění proudění skloviny (mechanickým mícháním nebo průchodem plynu - tzv. "foukáním"),
- použití vakua aj.

Závěrem je nutno ještě připomenout, že vzestup bublinek sklovinou přispívá ve značné míře k homogenizaci skla. Bublinky tlačí na vrstvovité šlíry, které natahují v tenké blány.

Podrobnější údaje o čeření skla jsou uvedeny v publikaci Státního výzkumného ústavu sklářského v Hradci Králové.^{x)}

d) Homogenizace

Homogenizaci skloviny je možno rozdělit na

- a) samovolnou,
- b) umělou.

Jak již bylo uvedeno v případě čeření, vzestup bublinek sklovinou vyvolává mechanický pohyb, který vede k samovolné homogenizaci skloviny. Samovolná homogenizace je však vyvolávána též difusí a konvekčními proudy ve sklovině. Umělou homogenizaci je možno rozdělit na:

- a) homogenizaci způsobenou vháněním plynu a uvolňováním plynu a par z čeriv;
- b) strojní homogenizaci spočívající v mechanickém míchání;
- c) fyzikální homogenizaci.

K nejúčinnějším homogenizacím patří mechanické míchání.

Samovolná homogenizace byla popsána v souvislosti s čeřením. Je však nutno si ještě věmnout homogenizace způsobené konvekčním prouděním. Konvekčním prouděním rozumíme pohyb skloviny, způsobený rozdílem její specifické váhy v různých místech pánve, který nastává při nestejných teplotách různých míst. Konvekční proudění nastává při změnách teploty v peci. Např. při snižování teploty se ochladí nejdříve sklovina na hladině a u bočních stěn pánve, kde její specifická váha vzroste, sklovina klesá ke dnu a vytlačuje teplejší sklovину o menší specifické váze směrem ke hladině.

^{x)} Čeření skla, Informativní přehled 1958, číslo 2 - 3.

Samovolná homogenizace se děje též difusí. Difuse probíhá směrem od vyšší koncentrace k nižší. Hnací difusní síla je závislá na koncentračním gradientu, tj. změně koncentrace připadající na jednotkovou dráhu.

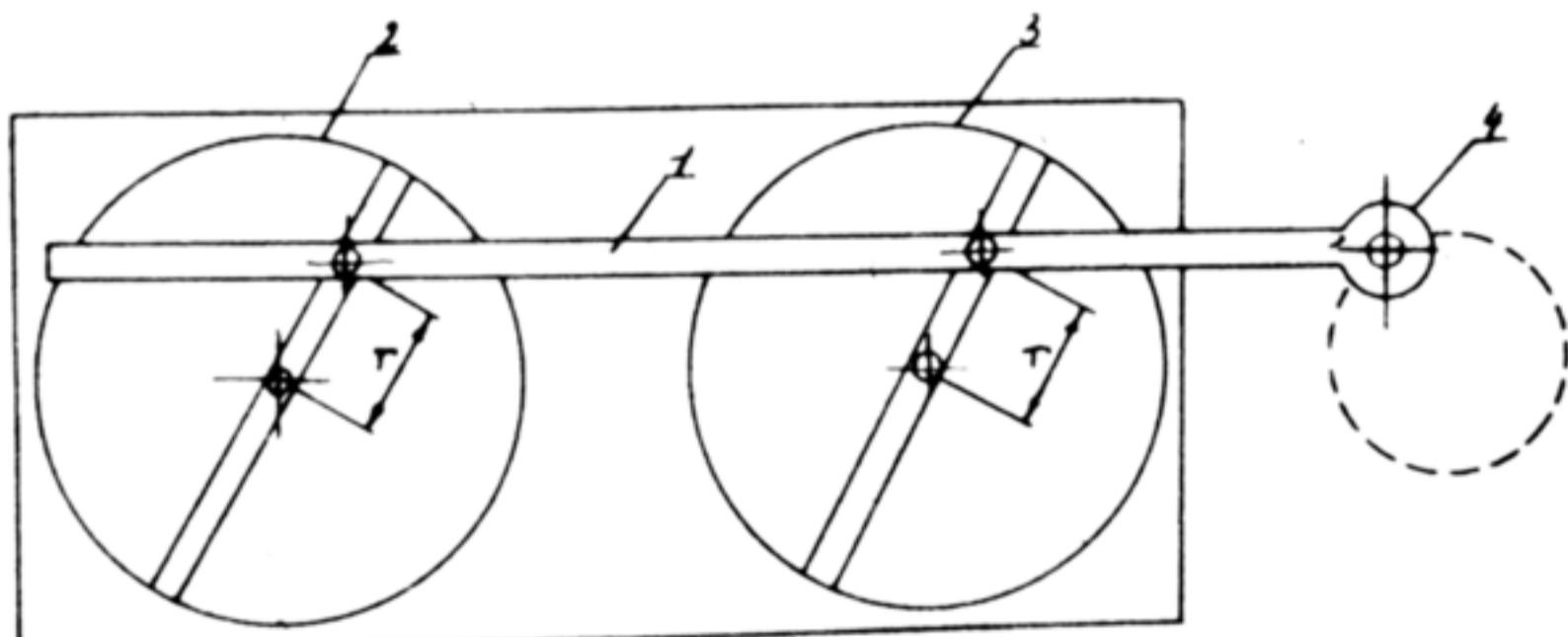
Z umělých homogenizací byla popsána v souvislosti s čeréním homogenizace vyvolaná čeřidly. Všimněme si proto homogenizace strojní.

Homogenizace strojní se provádí v současné době tyčovými a vrtulovými míchadly.

1 Tyčová míchadla

Homogenizaci tyčovými míchadly zavedl již v minulém století švýcarský hodinář Pierre Guinand, který položil základy k výrobě optického skla.

Dobrá homogenizace závisí především na způsobu, kterým se pohybuje tyčové míchadlo ve sklovině. Toto míchadlo může vykonávat pohyb po kružnici, cykloidě a současně i ve směru vertikálním. Z toho důvodu vznikla řada různých konstrukcí míchacích zařízení. Všimněme si alespoň dvou z nich.



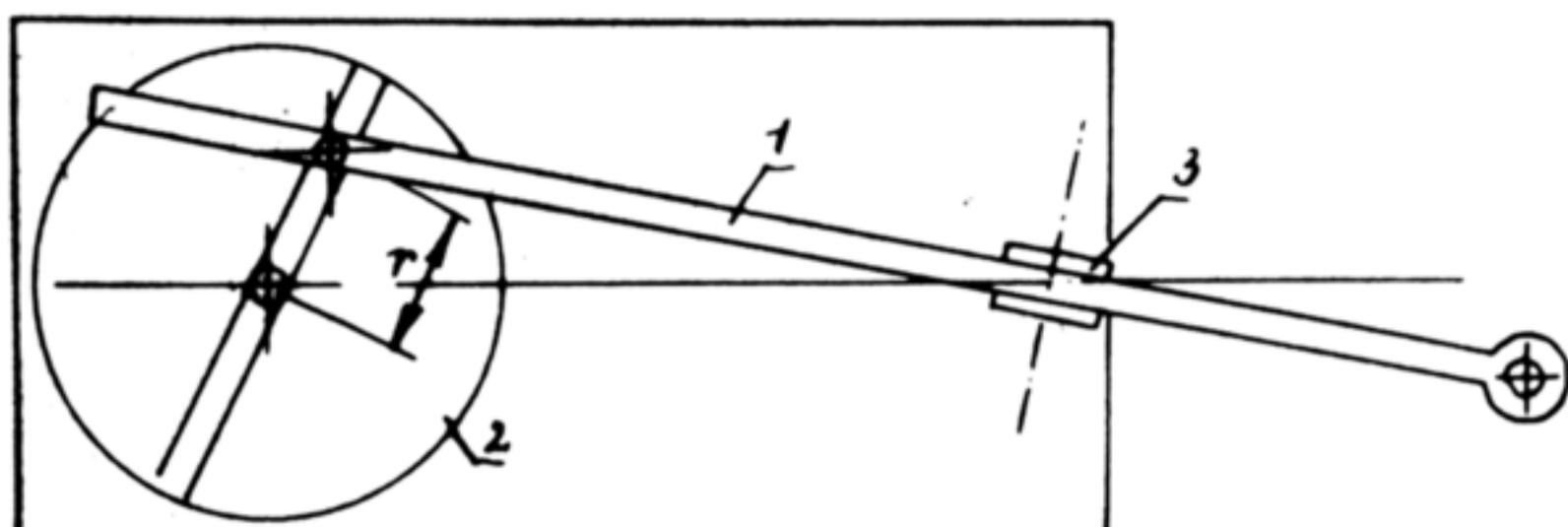
Obr. 21.1

Schéma míchacího zařízení s kruhovým pohybem míchací tyče.

V prvním případě je míchací rameno (1) unášeno dvěma koutouči (2) a (3) míchacího zařízení rotujícími kolem svislých os, jak je to patrno z obr. 21.1. Míchací rameno je tvořeno trubicí, která je chlazena vodou. Konec tyče je zakončen upínací hlavou, mající tvar dvouzávitové spirály. V této hlavě je třením upevněn šamotový kolík, který je v otvoru udržován

vztlakem skloviny. Proto musí mít šamotový kolík vhodný průměr, aby vztlak byl dostačující pro pevné držení kolíku. Kolík vykonává v tomto případě kruhovou dráhu.

Jiný typ míchacího stroje je schematicky znázorněn na obr. 21.2.



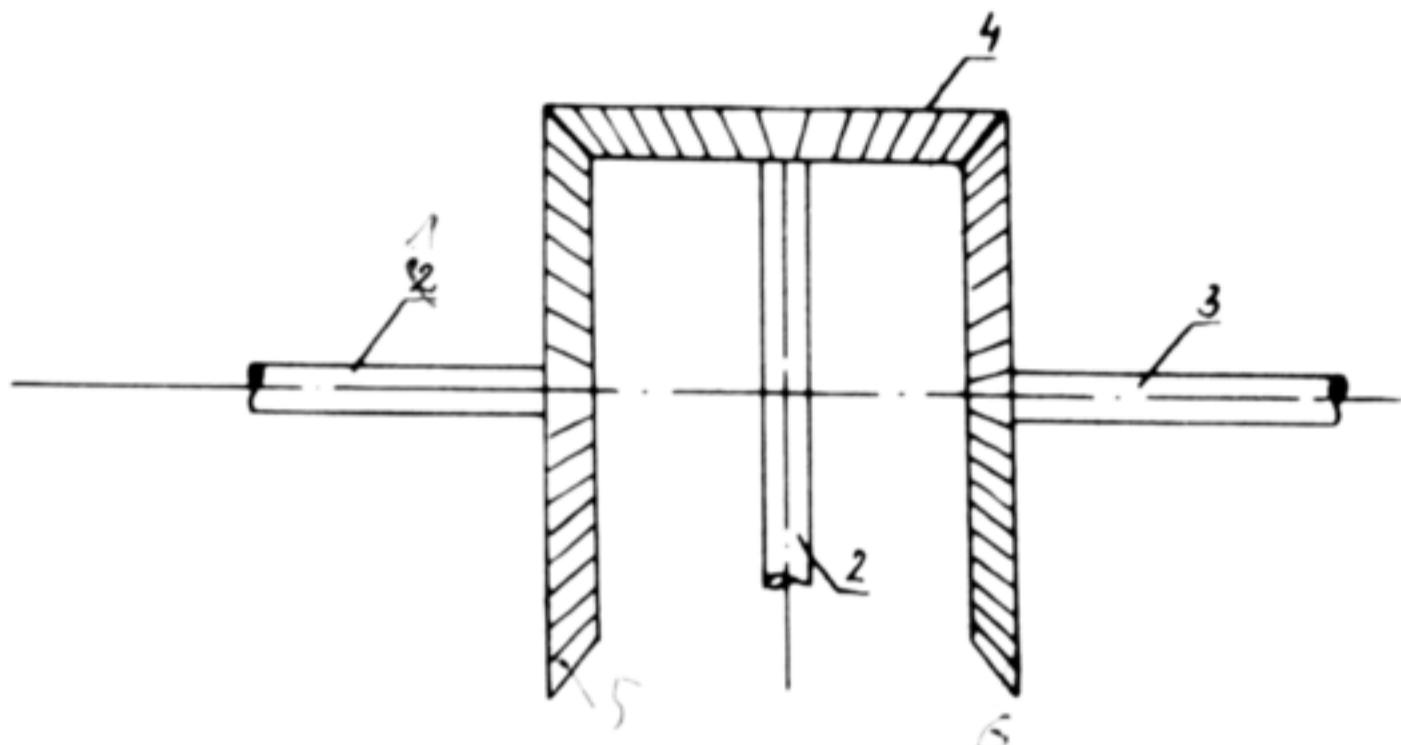
Obr. 21.2 Schéma míchacího stroje s cykloidním pohybem kolíku.

Míchací rameno (1) chlazené vodou, je uváděno do pohybu kotoučem (2), otočným kolem svislé osy. Přední část míchací tyče je podepřena kladičkou (3), otočnou kolem vodorovné i svislé osy, která se může pohybovat též ve směru svislém. Vlastní šamotový kolík je upevněn na chlazené tyče obdobným způsobem jako v předchozím případě.

Poloměr r na kotoučích se dá měnit v obou případech posouváním příslušného čepu.

Některé míchací stroje, zejména stroje používané u fy Schott, používají tzv. dynamometru, kterým se určuje odpor skloviny v závislosti na její viskositě, který klade míchacímu kolíku.

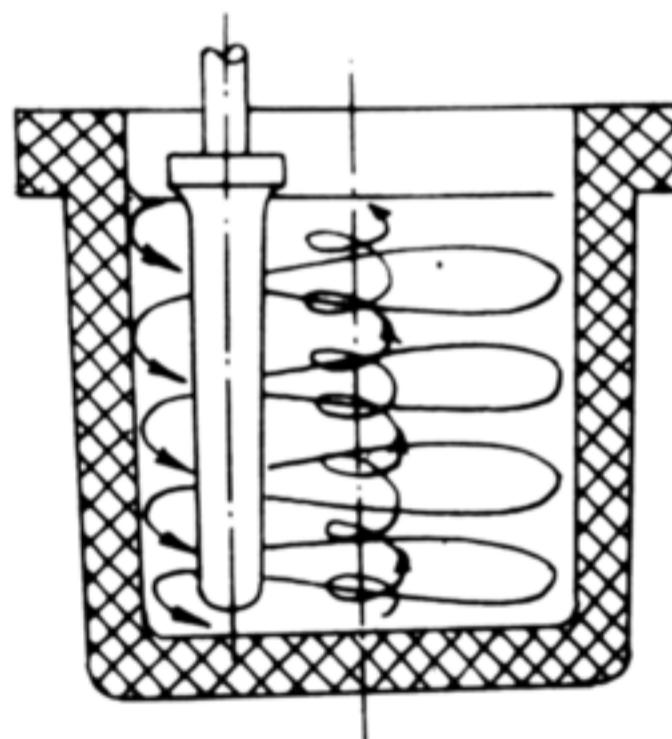
Dynamometr (obr. 21.3) je v principu tvořen diferenciálem, který je vřazen mezi motor a hřídel pohánějící příslušné kotouče míchacího stroje. Hřídel (1) je spojen s motorem a hřídel (3) s kotoučem míchacího stroje. Není-li kladen hřídeli (3) žádný odpor, tvoří satelit (4) pevné spojení mezi oběma kuželovými koly (5) a (6) a obíhá spolu s těmito koly kolem osy společně oběma hřídelům (1) a (3).



Obr. 21.3 Princip dynamometru.

Je-li kladen hřídeli (3) určitý odpor, snaží se satelit (4) odvalovat po kole (6). To znamená, že se na hřídeli (2) objeví otáčivý moment. Otáčení satelitu (4) kolem osy (2) je bráněno protimomentem vyvolaným závažím. To znamená, že kolo (4) se pouze pootočí o určitý úhel, který je mírou příslušného odporu, tj. viskosity skloviny.

Podle Kitajgorodského probíhá kinematika míchání následujícím způsobem (obr. 21.4): Částečky, které se nacházejí u hladiny mezi míchacím kolíkem a stěnou pánev, klesají ke dnu pánev po šroubovicích o velmi malém stoupání. Na dnu pánev konají spirálový pohyb k jejímu středu a odtud šroubovitým pohybem stoupají středem pánev opět k hladině. Odtud se opět dostávají složitou spirálovou dráhou k okraji pánev. Potom se pohyb opakuje.



Obr. 21.4 Kinematika mícháního procesu

Při míchání se má dosáhnout co nejrychlejšího pohybu. Překročí-li se však určitá rychlosť míchání, vzniká na hladině skloviny příliš vysoká vlna, která nabírá vzduch a zamíchává jej opět do skloviny. Rychlosť míchání je velmi důležitá a bylo věnováno mnoho prací, které se snažily najít nevhodněj-

ší míchací rychlosti v závislosti na rozměrech kolíku, pánve a viskositě skloviny.^{x)}

Míchací postup lze rozdělit na tři fáze.

(1) V první fázi se má dosáhnout dokonalého rozmíchání skloviny. Dosahuje se toho kruhovým nebo cykloidním pohybem kolíku spojeným se současným zvedáním a snižováním kolíku.

Kruhový pohyb je převážně používán u skel málo korosivních, řídkých s malým indexem lomu.

Cykloidní pohyb je důležitý ve spojení se současným svislým pohybem u těžkých flintových skel nebo u těžkých flintových barnatých skel. Svislý pohyb kolíku má dosáhnout promíchání skla s větším indexem lomu (t.j. těžších skel), které se nachází u dna pánve, s vrchními vrstvami, které jsou chudší na těžké složky kmene (olovo resp. baryum) a mají proto menší index lomu.

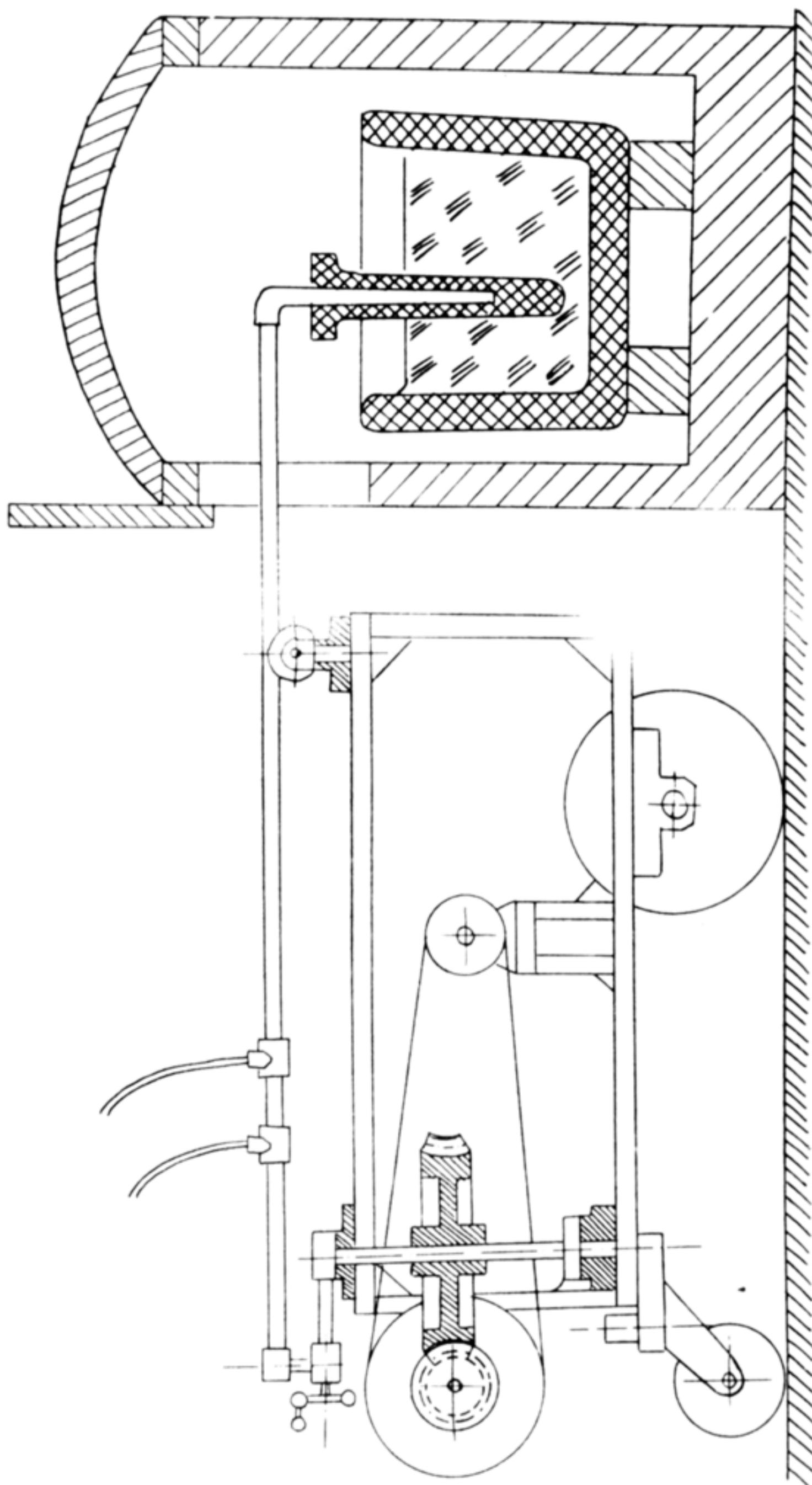
(2) V druhé fázi se mají vymíchat ze skloviny šlíry. Protože některé šlíry jsou těžší, působí na ně odstředivě síla, takže se dostávají k okraji pánve, zatím co ve středu pánve se soustředují šlíry lehčí.

(3) Ve třetí fázi se snažíme udržet šlíry při snižování teploty a vzrůstu viskosity skloviny na těch místech, kam byly mícháním přemístěny v druhé fázi. V této fázi pokračuje míchání při postupném snižování otáček míchacího zařízení až pokud to vzrůstající viskosity skloviny připouští.

Při míchání má kolík dodržovat určitou vzdálenost od dna a stěn pánve, která má být podle Wrighta 5 cm, zatím co Dralle doporučuje vzdálenost 12 - 18 cm.

Jako míchacích kolíků se nejdříve používaly železné tyče chlazené vodou. Ty se však neosvědčily, protože příliš ochlazovaly sklovинu. Nyní se používá k míchání kolíků šamotových. Mají obyčejně kuželový tvar a jsou na dolním konci kulovité zaobleny. Jejich průměr nesmí být příliš malý a to nejen z hlediska pevnosti, nýbrž také z důvodů dostatečného vztlaku,, kterým je kolík přidržován v otvoru míchací tyče.

x) H.Chance, Optical glass in war, Journal of the institution of civil engineers, No 2, 1946 - 47, str. 305 - 307.



Obr. 21.5 Konstrukční schéma míchacího zařízení a jeho aplikace v peci

V ČSSR se používají dva typy kolíků.

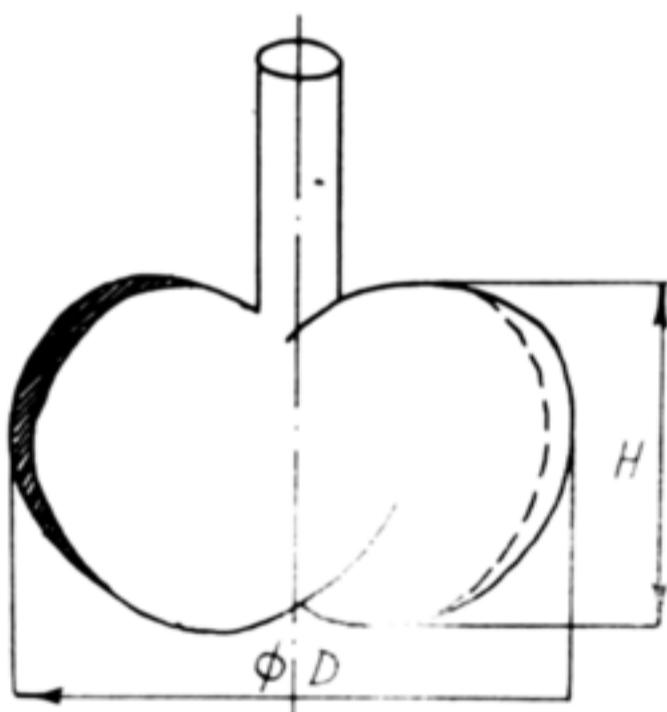
- a) Plné, které se vyrábí méně.
- b) Duté, které se zhotovují litím, jejichž stěna bývá asi 15 mm.

Konstrukční provedení míchacího zařízení druhého typu s cykloidním pohybem míchacího kolíku a jeho použití v peci je znázorněno na obr. 21.5.

(i) Vrtulové míchadlo

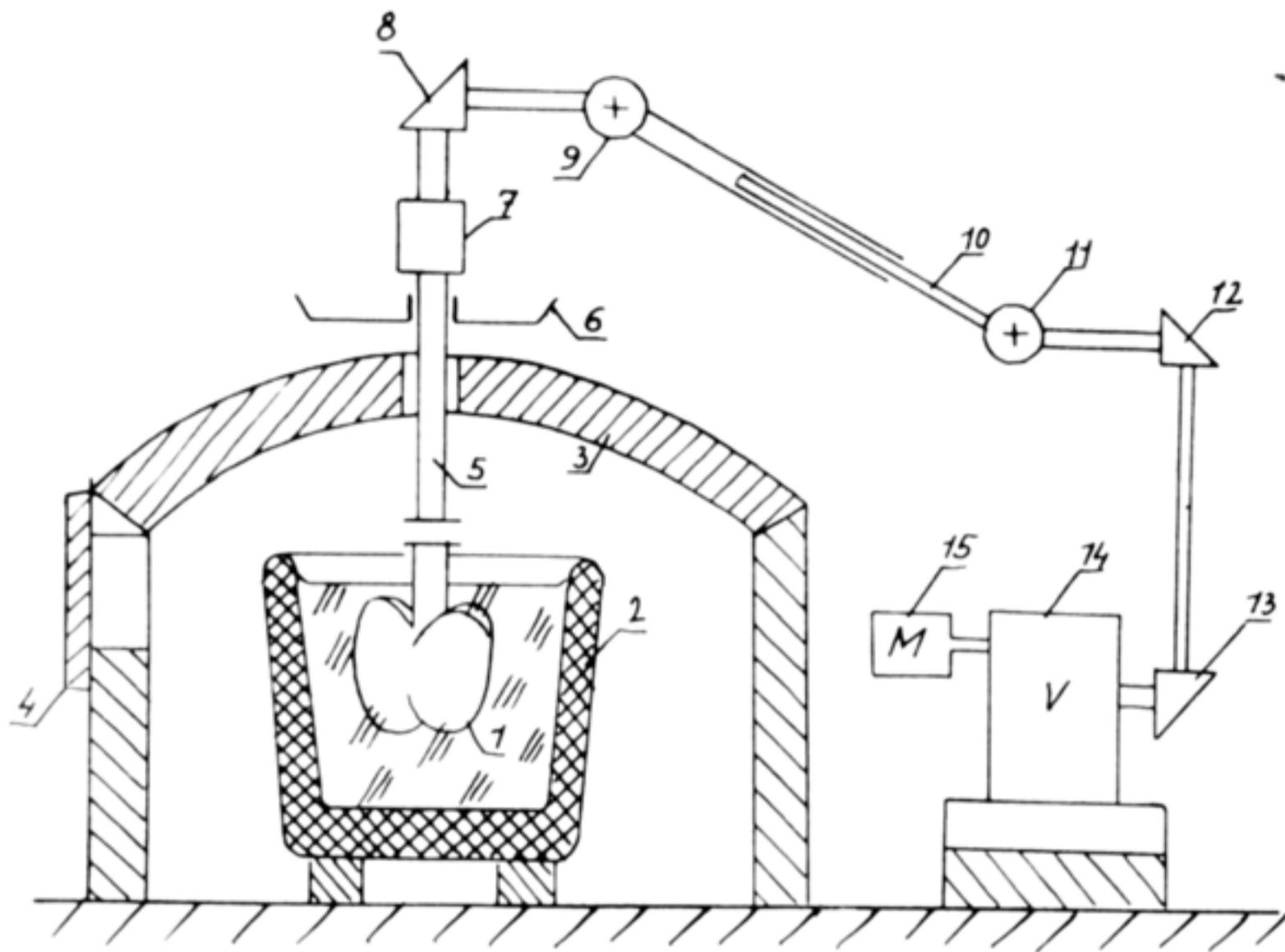
V tomto případě je míchadlo tvořeno šamotovou vrtulí, která se otáčí kolem svislé osy. Zavádí se proto do pece otvorem v její klenbě. Vrtule se uvádí do otáčivého pohybu motorem

a sice tak, že mezi motorem a vrtulí je zařazen variator otáček. Vlastní vrtule (obr. 21.6) je dvoulopatková. Lopatky jsou skloněny vzhledem k rovině kolmě na její osu pod úhlem 45° . Výška H lopatek bývá rovna přibližně $1/3$ výšky skloviny v páni, rozpětí D lopatek bývá asi rovno $1/2$ průměru páni. Vrtule se zhotovují obyčejně litím do form. Obr. 21.7 znázorňuje vrtuli zavedenou do pece včetně celého pohonného zařízení.



Obr. 21.6 Vrtulové míchadlo

Pohon se provádí motorem (15) prostřednictvím variátoru otáček (14) a kuželových převodů (13), (12) a (8). Aby zařízení bylo možno snadno seřídit, je mezi převod (8) a (12) zařazena teleskopická tyč (10) zakončená dvěma Kardanovými kloubami (9) a (11). V hlavě míchadla (7) je uložena kovová, vodou chlazená tyč (5), na kterou se upevňuje šamotová vrtule. Tato hlava je uložena na dvou svislých vodících tyčích, takže je možno snadno celé zařízení správně výškově seřídit. Pod hlavou je kovová nádobka a vodou, která slouží jednak jako ochrana hlavy před teplem pece, jednak k zachycení vody, která by případně unikala z hlavy.

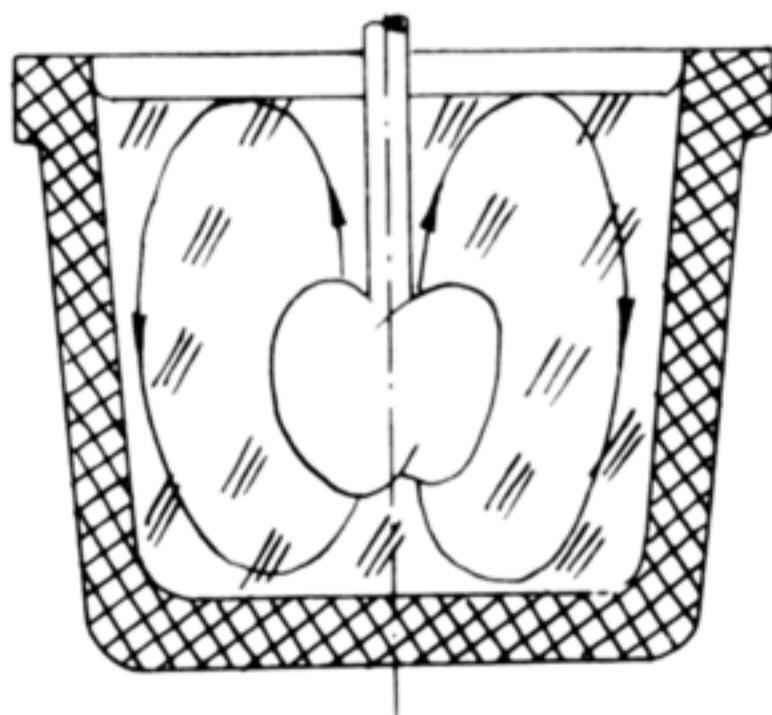


Obr. 21.7

Vrtulové míchadlo zavedené do pece včetně pohonného zařízení.

Vrtulové míchadlo způsobuje pohyb skloviny středem pánev od dna k hlavě a podél stěn od hladiny zpět ke dnu, jak je to schematicky naznačeno na obr.

21.8. Tím se dosáhne homogenity prakticky v celé páni, na rozdíl od míchání kolíkem, kde jsou šlíry přesouvány mícháním ke stěnám pánev. Protože v případě vrtulového míchadla nastává mohutnější proudění skloviny, vyvolává se i větší korozní úravnění materiálu a je proto nutno používat v tomto případě kvalitnějších keramických materiálů. Na druhé straně míchání ještě neprotaveného skla způsobuje urychlení příslušných reakcí a rychlejší rozpouštění neroztavených zrn písku. Rychlej-



Obr. 21.8

Schéma kinetiky skloviny s použitím vrtulového míchadla.

ší pohyb skloviny směrem k hladině urychluje čerlení. V důsledku toho se celý proces zkrátí asi o 1/3 doby v porovnání s mícháním kolíkem.

S mícháním vrtulovým míchadlem se začíná ještě v neprotaveném skel, tj. asi 0,5 - 1 hod. po poslední skládce. Rychlosť otáčení se postupně zvyšuje až na 60 otáček/min., aby se odstranily všechny nestejnorodosti a bubliny. Snižování teploty je možno provést až po vyčeření. Přitom se současně snižují obrátky míchadla tak, aby odpor, který klade sklovina míchadlu, byl konstantní nebo mírně klesal.

Odpor, který klade sklovina míchadlu, lze vypočítat pomocí Newtonova zákona v závislosti na počtu otáček ^x). Tím je dán pak předpis, jak je nutno řídit počet obrátek s rostoucí viskositou skloviny.

Je možno říci, že vrtulové míchání patří v současné době k nejúčinnějším mechanickým homogenizacím.

V poslední době se provádí výzkum s využitím ultrazvuku k homogenizaci skla. Využívá se přitom sil, které vznikají při působení střídavého magnetického pole na vodič, kterým protéká proud. Tato metoda ovšem předpokládá, že sklovina je vodivá.

Elektrické tavení optického skla v platině

Během posledního desetiletí se přechází u určitých silně korosivních speciálních optických skel k tavení v platinových pánevích. Tato skla, která silně korodují keramický žáruvzdorný materiál, nelze prakticky tavit v keramických pánevích a proto se používá buď platinových vložek do keramické pánevní, nebo keramické pánevné potažené zevnitř tenkou vrstvičkou platiny. Totoho způsobu se v poslední době využívá i k tavení málo korosivních skel, aby se dosáhlo maximální výtěžnosti kvalitního skla (dosahuje se tak výtěžnosti 80 i více %). U skel vyráběných ve velkém množství (např. BK 7) se provádí v cizině tavení v platinové vaničce.

^{x)} Inž.V.Susser, J.Fanderlik, Homogenizace skla v pánevích, Informativní přehled Stát.výzkumného ústavu sklářského, Hradec Králové, 1960, číslo 1, str.17.

Kromě toho bylo v ČSSR zavedeno elektrické indukční tavení speciálních optických skel v platinovém kelímku. Platinový kelímek (25 - 50 litrů) je masivní, indukčně elektricky vyhřívaný. Při tomto způsobu tavení se dosahuje vysoké kvality skla a tavba probíhá za nižších teplot (až o 100°C) než v normální plynové tavící peci.

e) Chlazení skla při klasickém způsobu výroby

Chlazení skla se provádí na dvě etapy, bezprostředně v peci a mimo ni. Ochlazování v peci se započne v okamžiku, kdy vzorky skla vzaté z taveniny ukazují, že ze skloviny vymizely úplně nebo skoro úplně bublinky. V tomto okamžiku se započne s postupným snižováním přívodu paliva až do jeho úplného zastavení a otevření větracích otvorů při podlaze pece.

V souhlasu s poklesem teploty v peci se snižují otočky míchadla, aby se předešlo zamíchávání bublin z povrchu skloviny znova do skla. Jakmile viskozita ochlazované skloviny dosáhne určité hodnoty, mechanické míchání se zastaví a příslušné míchadlo se vyjmé ze skloviny.

Potom se otevřou dveře pece, odstraní se míchací zařízení a pánev se vyjmé pomocí příslušného jeřábového zařízení z pece. Tím začíná chlazení mimo pec. Tento způsob chlazení bude popsán podrobně později.

Na tomto místě je snad třeba ještě dodat, že vlastní chlazení, tj. odstraňování vnitřních pnutí, probíhá v intervalu viskozity od 10^{15} do 10^{13} poise. V tomto intervalu může vznikat ve skle vnitřní pnutí a může se i odstranit a proto se musí ochlazení provádět přísně podle předem stanoveného chladícího postupu.

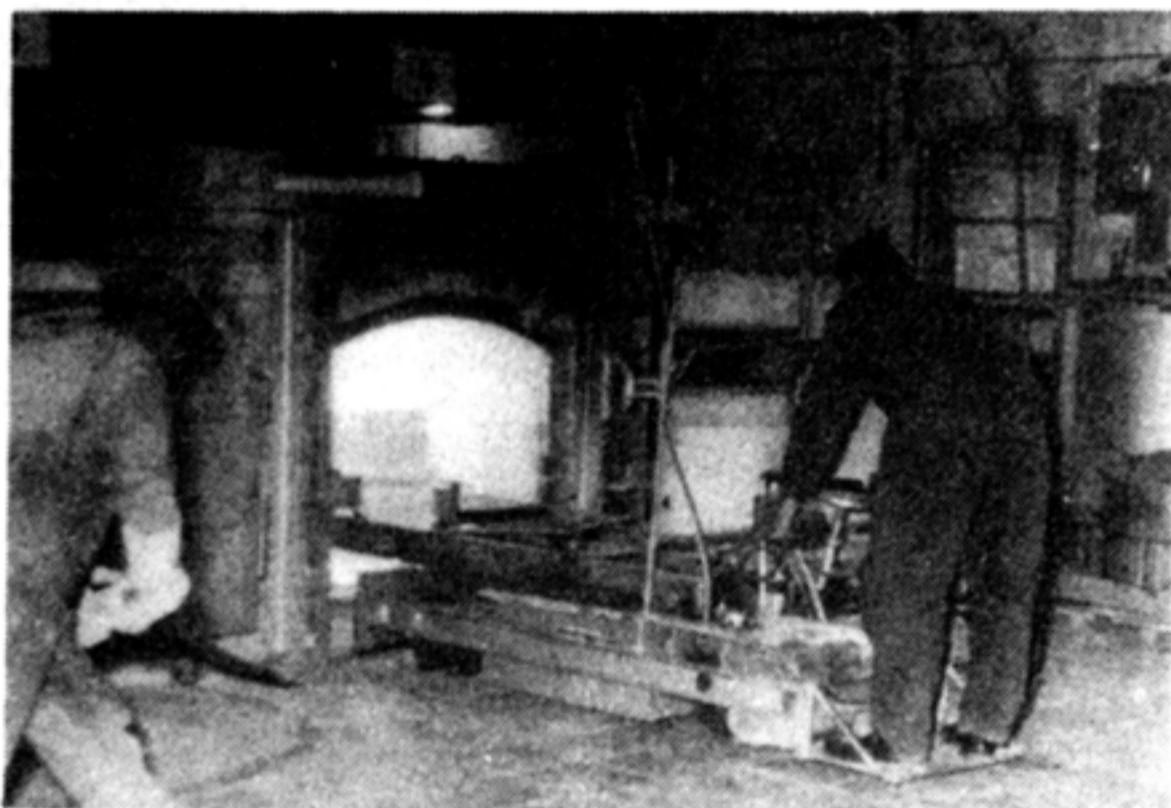
O problémech chlazení skla velmi podrobně pojednává F. Schill *) ze Státního výzkumného ústavu sklářského v Hradci Králové.

Tím jsme podrobně pojednali o všech pěti etapách, na které je možno celý proces skla rozdělit. Všimněmě si proto nyní vlastní technologie tavení optického skla.

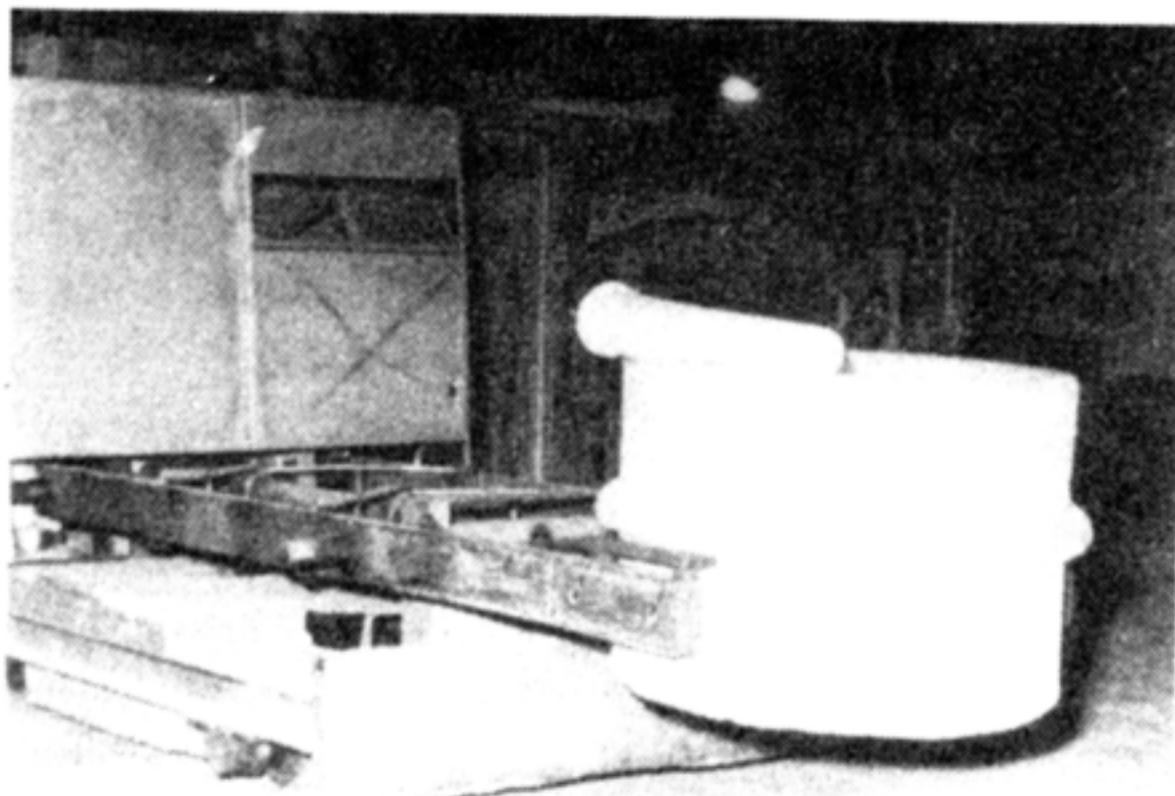
*) F. Schill, Chlazení skla, Informativní přehled, Stát.výzkumný ústav sklářský, Hradec Králové, 1958, čís. 1.

22. Technologie tavení optického skla

Tavící pec se vyhřeje na teplotu kolem 900°C . Při této teplotě se také vypaluje ve zvláštní vypalovací peci příslušná pánev. Vypálená a na tuto teplotu vyhřátá pánev se zavede pomocí vhodného jeřábového zařízení, znázorněném na obr.22.1 a 22.2 do pece a uloží se v příslušné komoře. Toto jeřábové zařízení je opatřeno rameny, které pevně obejmou pánev. Těmito rameny je možno snadno pohybovat páneví ve vodorovné a svislé rovině a otáčet kolem vodorovné osy.



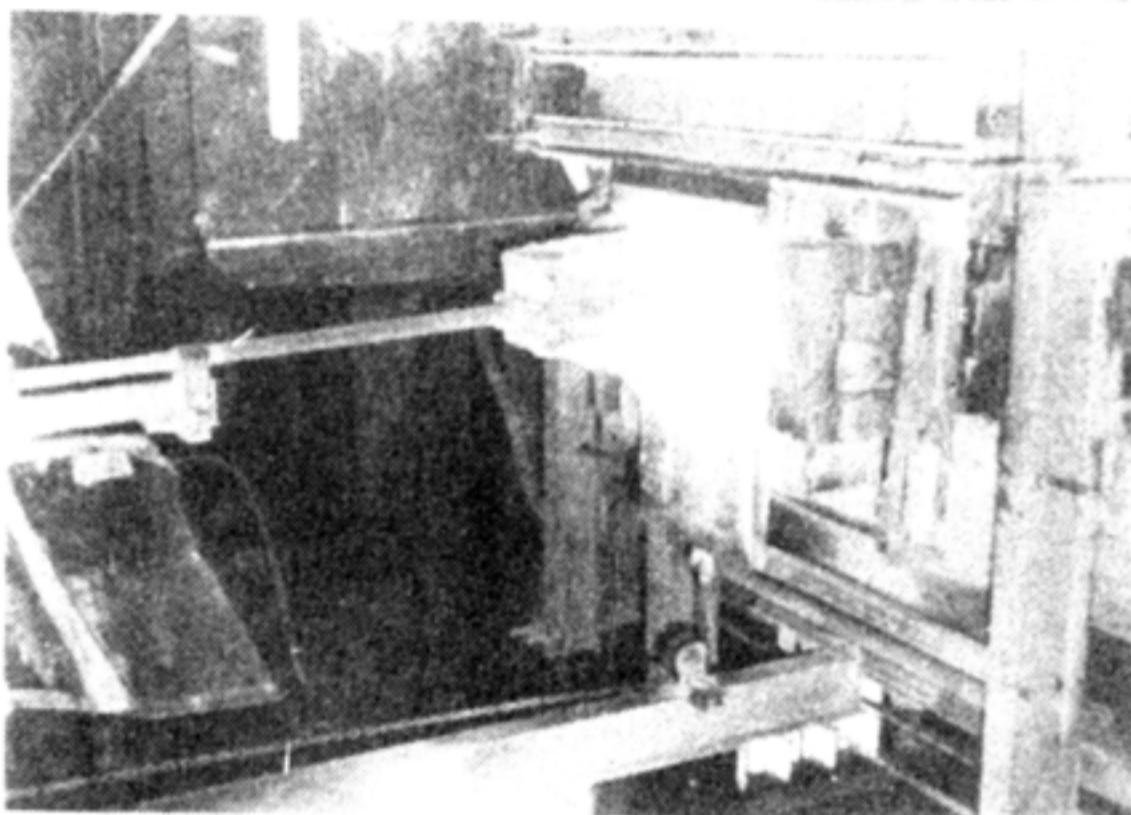
Obr.22.1 Zařízení sloužící k zavážení a vyvážení pánevního kamna z pece.



Obr.22.2 Pánev vyvážená z vypalovací pece.

Potom se spustí uzavírací dveře otvoru pece a případné štěrbiny se utěsní šamotem. Potom se počne zvyšovat pomalu teplota v peci tak, aby během asi 5 - 10 hodin dosáhla 1400 až 1450°C . V této etapě se zhutňuje materiál pánve a spečením se vytváří hutný povrch stěn pánve odolávající korosivním účinkům jednotlivých složek kmene.

↓ Teprve nyní se započne s nakládáním do pánve (obr.22.3).



Obr. 22.3 Nakládání kmene do pánve.

Nejdříve se do pánve naloží skleněné střepy do výše několika centimetrů, aby kmen, který se začne nakládat na roztažené střepy, nepřišel do přímého styku se dnem pánve.

Vzhledem k tomu, že objem kmene je asi 2-3krát větší než je objem utavené skloviny, přidává se kmen do pánve celkem 3-4krát v intervalu 1,5 - 2 hodin. Kmen se nakládá do pánve železnou lopatou o obsahu asi 40 kg. Úplné zaplnění pánve trvá celkem podle velikosti 3,5 až 10 hodin.

Naplněná pánev se neprohřívá rovnoměrně. Kmen se prohřívá nejvíce tam, kde se přímo stýká s horkými plyny pece. Proto tavení kmene začíná na hladině. Roztažený kmen pak protéká do nižších vrstev a částečně proniká do spečené hmoty kmene. Nejdříve se taví lehkotavitelné složky kmene. Přitom vrchnější vrstvy kmene se ochuzují o taviva a proto se postupně dostávají na povrch, kde se v roztaženém kmeni rozpouštějí.

Vzhledem k malé vodivosti kmene, který je ve stavu prázdkovitém, je teplota jednotlivých vrstev kmene různá, takže příslušné reakce probíhají v mase kmene nerovnoměrně a sice na povrchu rychleji než ve středu. V této etapě se tvoří křemičitany a postupně se přeměňuje kmen na sklovinu.

Když teplota dosáhla nejvyšší hodnoty, probíhá čeření a homogenizace skloviny. Studie provedené Morrejevem a Kačalonom ukázaly, že je možné a výhodné míchat kmen ihned po zasypaní pánve. Zajistí se tím větší stejnorodost skloviny a urychlí se průběh sklotvorných reakcí. Do jisté míry se zlepší kvalita skla, neboť při tomto způsobu míchání se podstatně zkrátí doba, po kterou je sklovinna ve styku se stěnou pánve.

Když vzorky skla ukazují ^{x)}, že jsou skoro úplně odstraněny bublinky, může se přistoupit k chlazení skla. Teplota v peci se začne snižovat omezením přívodu paliva až do jeho úplného zastavení. Současně s tím se začne snižovat rychlosť míchání. Když viskosita skloviny dosáhne určité hodnoty, míchání se zastaví a míchadlo se rychle vyjmé ze skloviny. Provádí se to obyčejně v okamžiku, kdy viskosita skloviny nedovolí již míchání s rychlostí větší než 3 - 4 otočky za minutu. Většině druhů skla odpovídá tomuto okamžiku teplota 850-1000°C. Tato etapa ochlazování si obyčejně vyžadá 5 - 10 hodin.

Nutno poznamenat, že před započetím s mícháním, má se z pánve odstranit horní vrstva 1 - 2 cm skloviny, která je nejvíce šlírovitá a nestejnorodá.

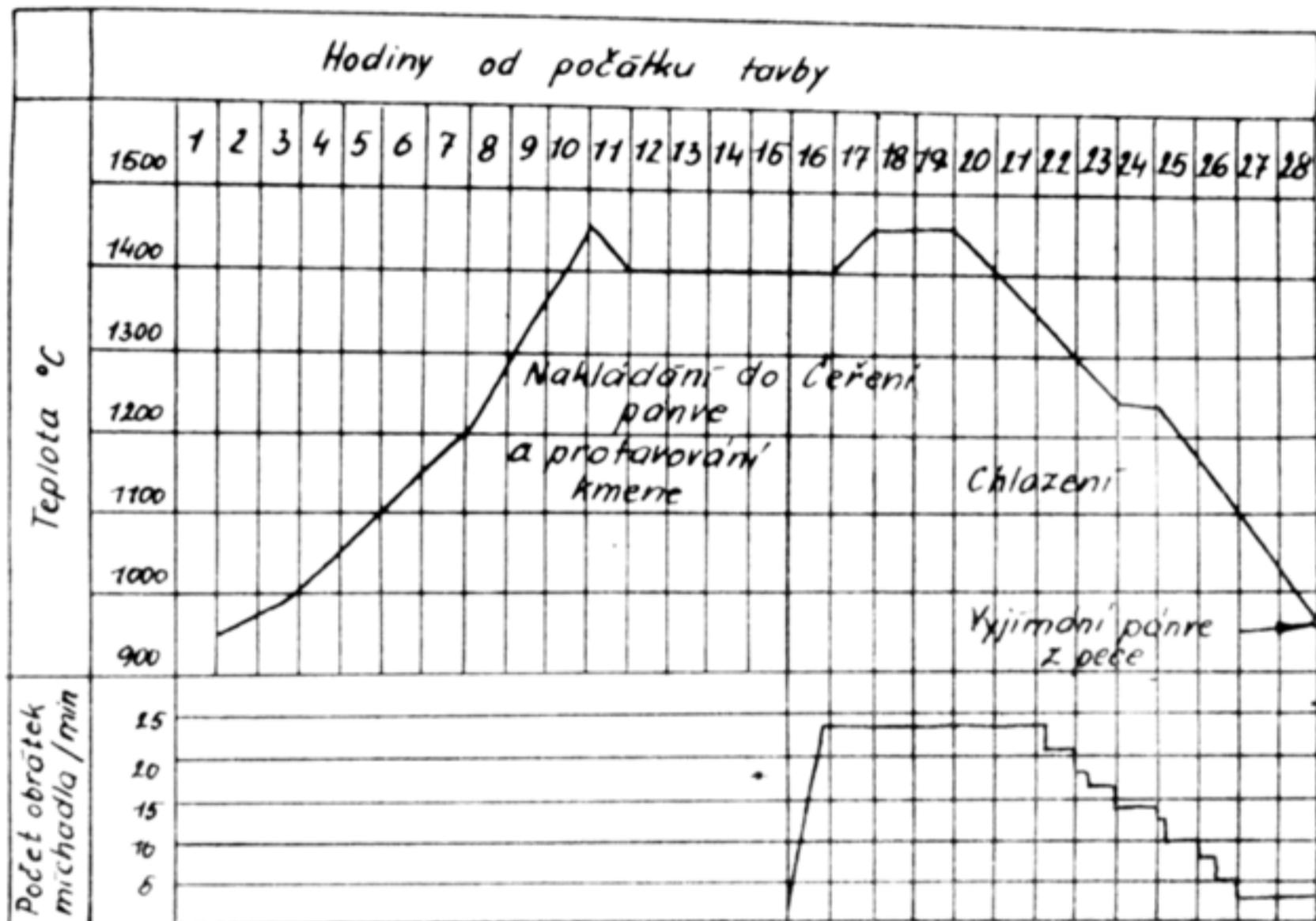
Nyní se otevřou dveře pece a pánev se sklovinou se vyjmé a umístí v prostoru, kde bude probíhat další etapa chlazení mimo pec.

Režim tavby optického skla je určen řadou parametrů, které se mohou měnit od jednoho druhu skla k druhému ve velmi širokých mezích. Je však nutné, aby režim tavby každého jednotlivého typu skla byl dobré osvojen, aby mohl být při následujících tavbách téhož druhu skla reprodukován s naprostou přesností ve všech detailech.

x) Ve vzorku jsou pouze dve nebo tři střední bublinky.

K faktorům určujícím režim tavby patří především:

- a) objem pánev,
- b) doba jejího vypalování,
- c) množství nakládek kmene a perioda nakládání do pánev,
- d) teplota, při které probíhá protavení a čerlení,
- e) rychlosť míchání,
- f) délka jednotlivých etap tavení,
- g) teplota, při které se pánev vyjímá z pece.



Obr. 22.4 Grafické znázornění postupu tavby korunového skla.

Tyto parametry se mění od jednoho druhu skla ke druhému. Na obr. 22.4 je graficky znázorněn průběh teploty a celého režimu tavení v případě tavení korunového skla. Na grafu jsou vyznačeny jednotlivé etapy tavby. Pro nakládání do pánev a protavování kmene je charakteristické nepřetržité zvyšování teploty od $900 - 1000^{\circ}\text{C}$ do 1400°C . Při čerlení skla je charakteristické další zvýšení teploty o 50 až 100°C při maximálním počtu otáček míchadla. Chlazení se provádí při postupném snižování teploty na $900-1200^{\circ}\text{C}$. Současně se snižováním teploty

se postupně zmenšuje rychlosť míchání a někdy i průměr kruhu, po kterém obíhá míchadlo.

Křivka tepelného režimu tavby a maximální tavící teplota se určí pro každý druh skla podle jeho složení a schopnosti příslušné skloviny reagovat s materiélem pánve.

U většiny skel trvá celá tavba počínaje vložením pánve do pece a konče jejím vyjmutím 25 - 35 hodin. Z toho 3,5 - 10 hodin připadá na nakládání do pánve kmene.

Nejrychleji se taví flintová a těžká flintová skla, cca 25 - 30 hodin, nejdéle těžký barnatá korunová skla, cca 40 až 50 hodin.

Během tavby každého druhu optického skla se musí provádět kontrola jeho optických vlastností. Kontrola se provádí na vyloštěných zkušebních vzorcích tvaru lámavého hranolu. Zhotovení těchto vzorků si vyžadá poměrně dlouhé doby.

V této situaci se velmi osvědčila Obreimova metoda měření indexu lomu, kterou lze srovnávacím způsobem provést měření indexu lomu na zcela nepravidelném kousku skla. Tím bylo umožněno měření indexu lomu ještě v průběhu tavby skla.

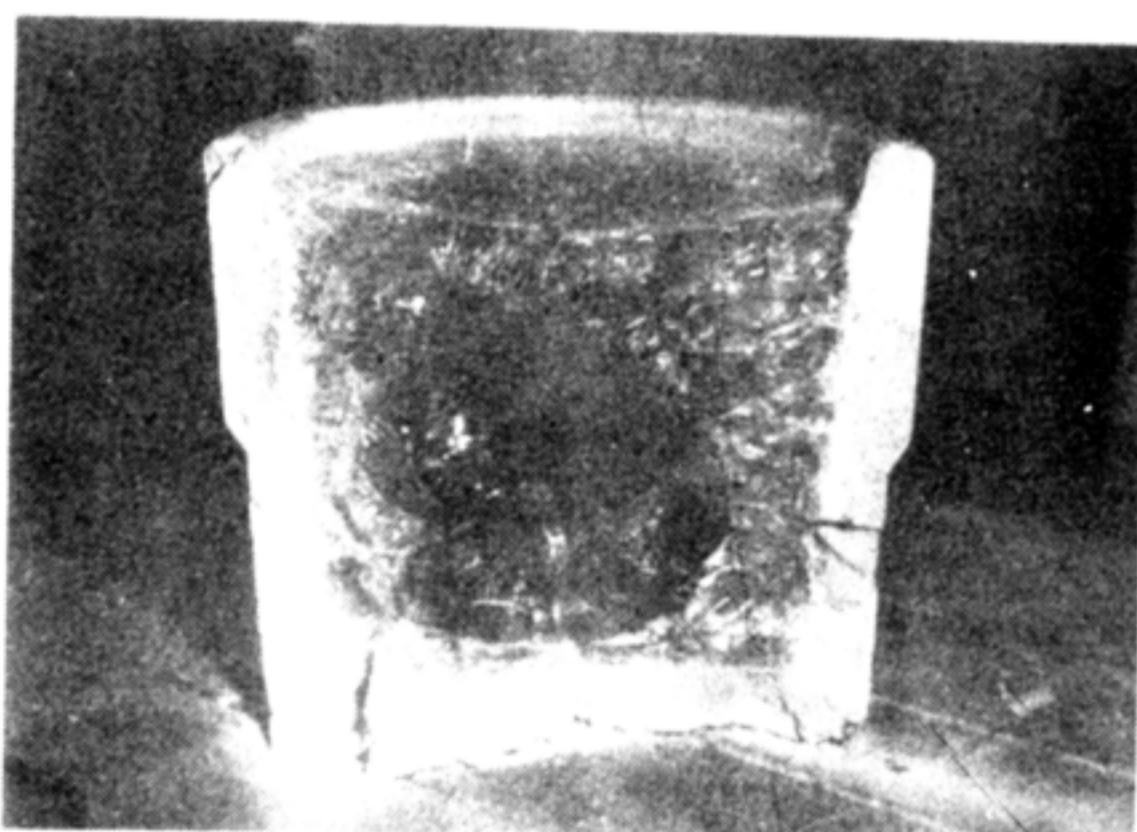
Provádění měření indexu lomu v průběhu tavení skla vyplývá z následujících skutečností. V průběhu tavby skla se běhou vzorky skloviny, které se nechají na vzduchu vychladnout. Potom se určí index lomu vzorku v porovnání s odpovídajícím etalonem. Zjistí-li se měřením, že index lomu vzorku je nižší než index lomu etalonu, přidají se ke sklovině takové střepy téhož druhu skla, jejichž index lomu je vyšší. Obráceným způsobem se postupuje v opačném případě. Korekci indexu lomu taveného skla na správnou hodnotu můžeme provést též přidáním vhodné složky kmene, která má vliv na požadovanou změnu v žádaném smyslu.

Hodnoty, potřebné pro korekci skla na správnou hodnotu se určí výpočtem během 15 - 20 minut. Tím se umožnilo ještě před skončením tavby opravit index lomu, což má velký národní hospodářský význam, neboť zmetkovitost se tímto způsobem snížila z 40 - 50% na pouhá 2 - 3%.

23. Chlazení skla mimo pec

Jak již bylo uvedeno, při klasickém způsobu výroby optického skla se sklo, utavené v páni po homogenizaci mícháním, ochladí na takovou teplotu, při které se dá ještě míchadlo vyjmout, ale při níž je viskositá skloviny již tak velká, že zamezí silnějšímu proudění skloviny a tím dostatečnému zhoršení stejnorodosti skla.

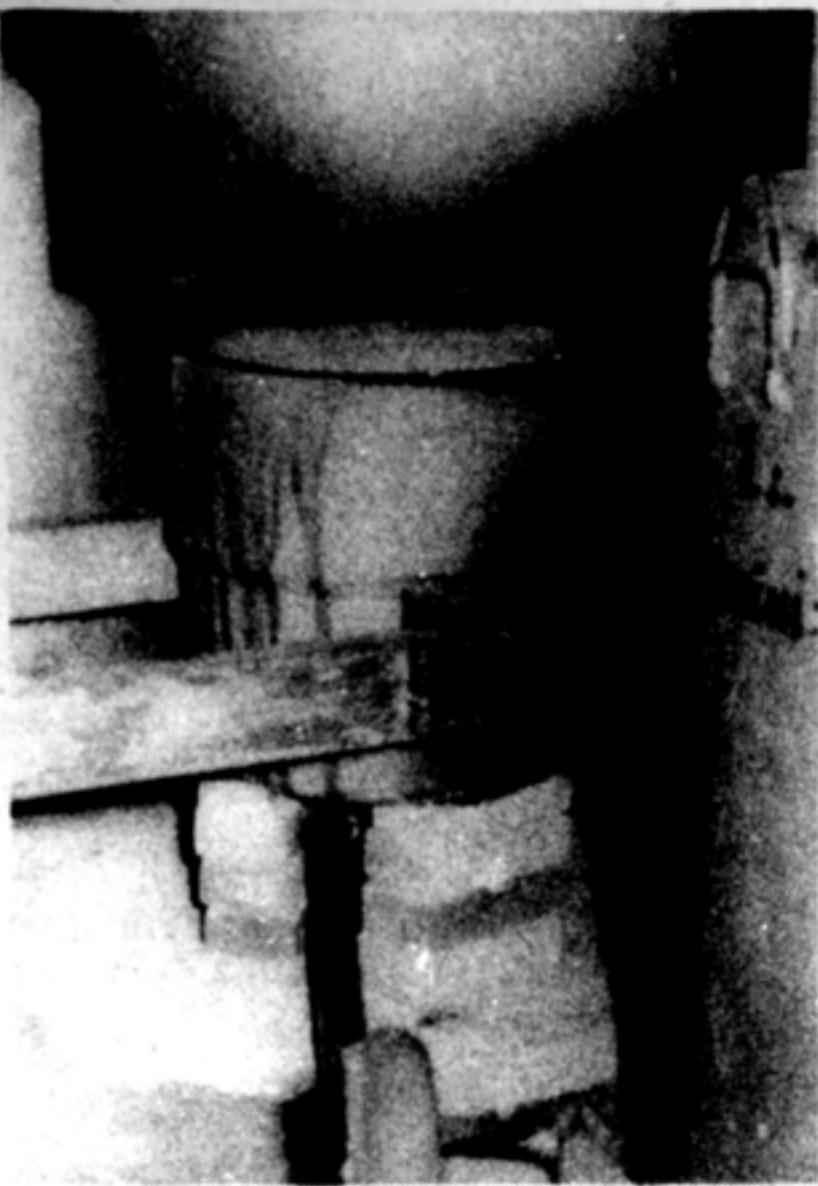
Takto ochlazená pánev se vyváží z pece a chladí dále volně pod izolujícím chladícím zvonem. Při tomto chlazení vzniknou přechodná vnitřní napětí takové velikosti, že sklo praskne přibližně na dvě poloviny, jak je to vidět na obr. 23.1. Přitom každá z obou polovin je rozpuknuta ještě na určitý počet větších i menších kusů.



Obr.23.1
Správně prasklá pánev svislou prasklinou.

Snahou při výrobě je vést ochlazování pod izolačním poklopem tak, aby jednak nedocházelo k silnějšímu konvekčnímu proudění, které by zhoršovalo stejnorodost skla dosaženou při míchání a jednak, aby po rozpuknutí vznikly pokud možno velké kusy, které zajišťují větší výtěžnost a možnost tvarování velkých bloků.

První požadavek se zajišťuje tím, že první fáze chlazení vyvezené pánce se provádí tak, aby se snížil teplotní gradient



Obr. 23.2

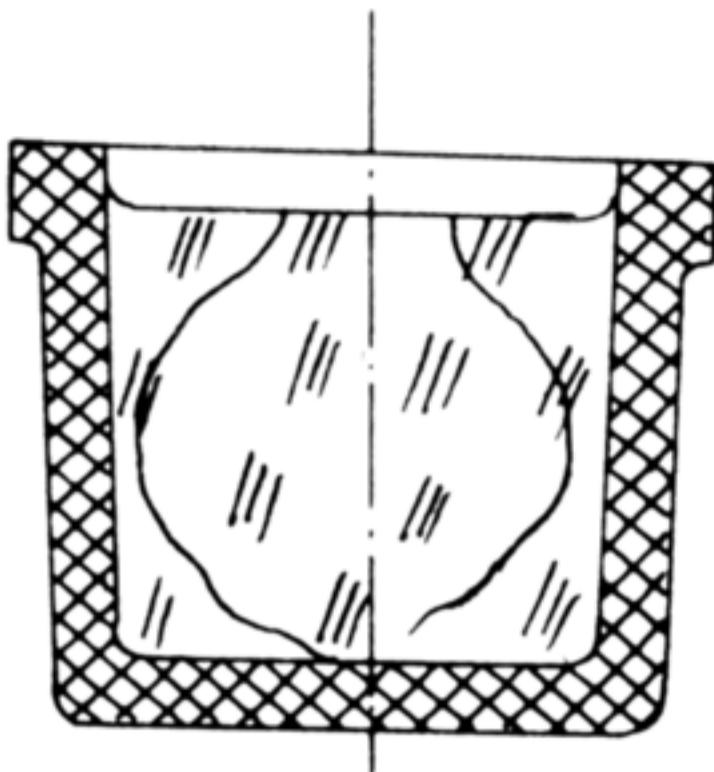
Zakryvání pánve izolačním poklopem a úprava pro přívod vzduchu na ochlazování dna.

povrch skla se stříkne tenký proud vody. Sklo praskne svislou prasklinou přibližně ve středu pánve na dvě poloviny.

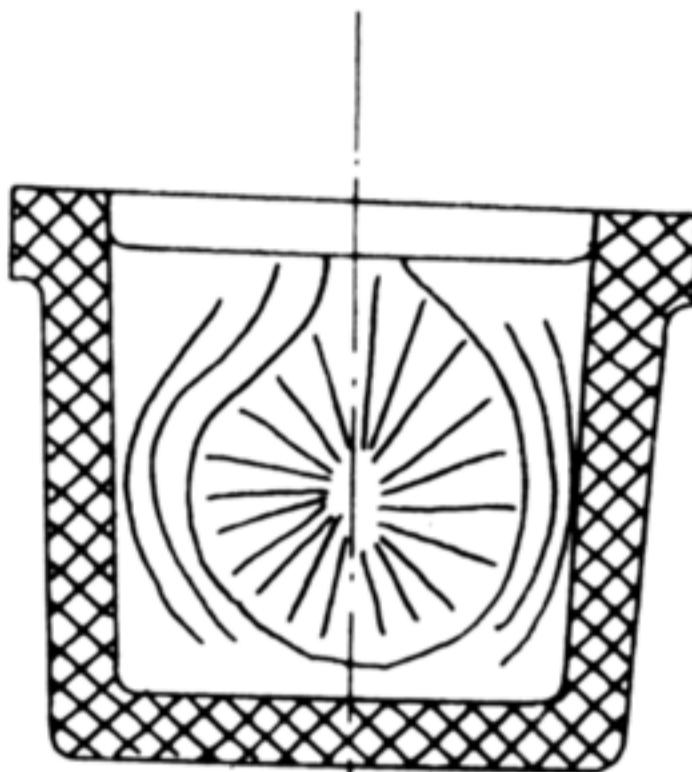
Při tomto způsobu výroby vzniká u některých druhů skel vada, která je příčinou úplného zničení obsahu pánve, i když bylo utavené sklo jakostní a dokonale stejnorodé. Je to obávaný vznik tzv. "cibule". Projevuje se to tím, že sklo v pánvi nepraskne na dvě poloviny; střed skla zůstává v jednom kuse ve tvaru velké cibule nebo nepravidelné koule. Nejčastěji se tvoří tvar cibule a proto odtud název praskání na cibuli. Ta to cibule váží často přes 100 kg. V okolí velkého cibulovitého tvaru je sklo rozpraskáno na jakési slupky, jak je vidět na obr. 23.4. Cibulovitý tvar skla nelze rozdělit na menší kusy, např. pomocí kladiva, jak se to běžně provádí při běžném praskání. Jakmile se pokusíme takovou cibuli rozštípnout, rozpukne se téměř explozivně na jehlancovité úlomky, které směřují svým vrcholem do středu cibule, jak je to schematicky znázorněno na obr. 23.2.

mezi chladnější horní částí pánve a teplejším sklem u dna pánve. Dosa huje se toho tím, že se vršek pánve částečně zakryje izolačním poklopem, kdežto dolní část se nechá volná a případně se ještě dno pánve ochlazuje intenzivně foukáním zespodu studeného vzduchu na dno pánve, jak je to vidět na obr. 23.2.

Aby sklo prasklo správně na dvě poloviny, se někdy ve výrobě pomáhá tím, že při vhodné teplotě, která závisí na druhu skla, na velikosti pánve a některých jiných podmínkách, se nadzvedne na okamžik izolační poklop a na



Obr.23.3
Schéma počátku vzniku
cibule



Obr.23.4
Konečné stadium vadného
praskání skla na cibuli

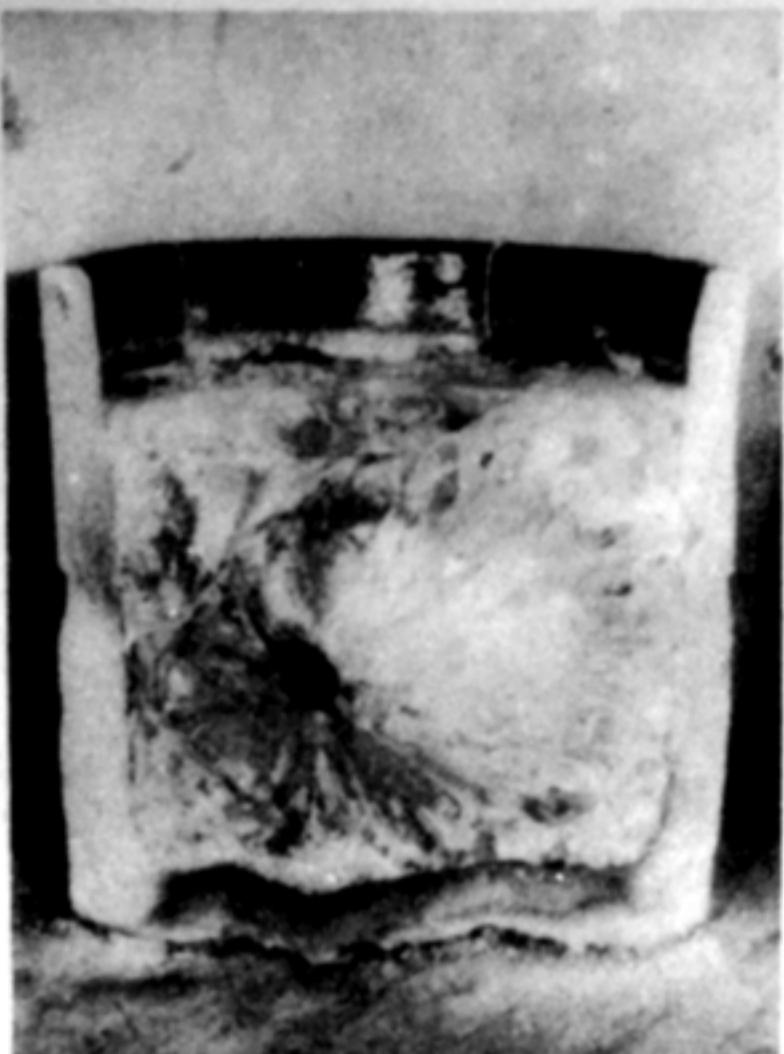
Na fotografiích 23.5 až 23.7 je vidět vzhled pánve
prasklé na cibuli a výsledky explozivního praskání cibule.



Obr.23.5 Snímek špatně vychlazené pánve

Přes četná studia, prováděná u různých výrobců skla, nelze za-
tím zcela jednoznačně stanovit podmínky vzniku této závady ani
jejich matematický rozbor. Podrobně o této vadě pojednává
prof. Dr inž. Fanderlik ^{x)} ze Státního výzkumného ústavu sklař-
ského v Hradci Králové.

x) Prof. Dr inž. Fanderlik M., Vady skla, str. 188, Praha 1963



Obr.23.6 Explozivně prasklá cibule



Obr.23.7

Jehlancovité úlomky
vzniklé při explozivním
prasknutí cibule

24. Jemné chlazení skla

Je známo, že příliš rychlým ochlazováním skla v tzv. chladícím intervalu, kdy viskositu skla je $10^{13} - 10^{15}$ poise, vzniká ve skle trvalé pnutí, které zhoršuje jakost skla, používaného pro optické účely.

Vznik vnitřního pnutí se vysvětluje teplotním gradientem napříč stěnou nebo blokem, který vzniká během ochlazování.

Každý teplotní rozdíl, který panuje napříč stěnou předmětu nebo bloku, má za následek vznik pnutí určité velikosti odpovídající Hookovu zákonu. Ochlazujeme-li sklo, vzniká na jeho povrchu pnutí tahové ve směru rovnoběžném s povrchem a pnutí tlakové, uvnitř bloku. Pokud se s ochlazováním započalo při dosti nízkých teplotách, kdy viskositu skla je větší než 10^{15} poise, trvá stav pnutí v příslušném skle tak dlouho, pokud v něm panuje teplotní gradient. Když se teploty mezi povrchem a středem bloku vyrovnají, vnitřní pnutí zmizí. To znamená, že v tomto případě se jedná o pnutí přechodné.

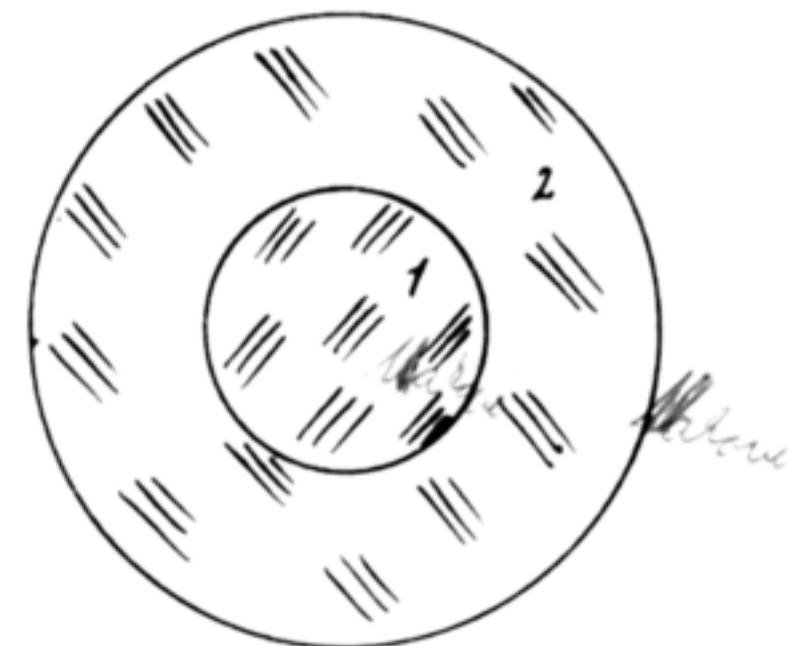
Jiná situace nastane, když s ochlazováním skla započneme v okamžiku, kdy jeho viskositá je menší než 10^{15} poise. Teplotní gradient napříč blokem by měl i v tomto případě za následek vznik vnitřního pnutí. Protože viskositá skla je tak malá, že se již sklo chová jako plastická hmota, vnitřní pnutí se časťečně nebo úplně vyrovná.

Zůstane-li rychlosť ochlazování konstantní, zůstane sklo během ochlazování bez pnutí, ale teplotní gradient zůstává. Když při pokojové teplotě ochlazování ustane, objeví se v ochlazovaném skle vnitřní pnutí odpovídající vyrovnávání se teplot mezi středem a povrchem bloku. Po úplném vyrovnání zůstane na povrchu skla trvalé pnutí tlakové a ve středu pnutí tahové. Můžeme si to snadno vysvětlit na předmětu tvaru koule, jak je to naznačeno na obr. 24.1.

Při započetí chladnutí byla vnější vrstva (2) na nižší teplotě než jádro (1). V důsledku toho bude jádro chladnout později a bude se pak snažit odtrhnout od vnější vrstvy. Proto na ni působí tlakem a vnější vrstva, která se těmto silám brání, působí na vnitřní vrstvu tahem. Tomuto pnutí říkáme trvalé pnutí.

Ve skutečnosti nikdy neexistuje takový viskozitně plastický stav skla, který by při nějaké teplotě přešel skokem do stavu elasticky tuhého. Přechod je pozvolný, pohyblivost skla se zmenšuje postupně, při čemž současně klesá možnost vyrovnání pnutí vnitřním viskozitním tokem (pohybem). To znamená, že při určité rychlosti ochlazování se nevyrovná veškeré pnutí P , které odpovídá teplotnímu gradientu, nýbrž jen jeho jakási část x , takže ve skle zůstává pnutí $P - x$. Když se teplotní gradient odstraní, mělo by se pnutí změnit o hodnotu $-P$. To znamená, že ve skle pak zůstává trvalé pnutí o hodnotě

$$(P - x) - P = -x.$$



Obr.24.1 Vysvětlení vzniku vnitřního pnutí ve skle

(24.1)

Trvalé pnutí ve skle se tedy rovná té části vnitřního pnutí, která se při ochlazování za existence teplotního gradientu vyrovná vnitřním viskozním tokem, ale má opačné znaménko.

Toto trvalé pnutí ve skle je možno odstranit pouze tzv. jemným chlazením. Toto chlazení se provádí obyčejně v elektrických, válcovitých pecích s periodickým procesem, nebo v tunelových - pásových pecích.

V těchto pecích se chlazený blok skla vyhřeje na takovou teplotu, při níž nenastane, v době potřebné k chlazení, deformace bloku vlastní vahou, při níž však se může ve vhodné době, ve které je tato teplota konstantní, úplně vyrovnat vnitřní pnutí. To znamená, že se sklo uvádí do stavu bez vnitřního pnutí při konstantní teplotě, tedy bez teplotního gradientu. Při další fázi chlazení se blok ochladí z této tzv. chladící teploty, na teplotu pokojovou, ale pouze takovou rychlosťí, při které se nemůže ve výrobku vytvořit nové trvalé pnutí větší hodnoty než je přípustná.

Chladící teploty u většiny druhů optických skel se pohybují od 370 do 700°C. Celý chladící proces je možno rozdělit na 4 etapy:

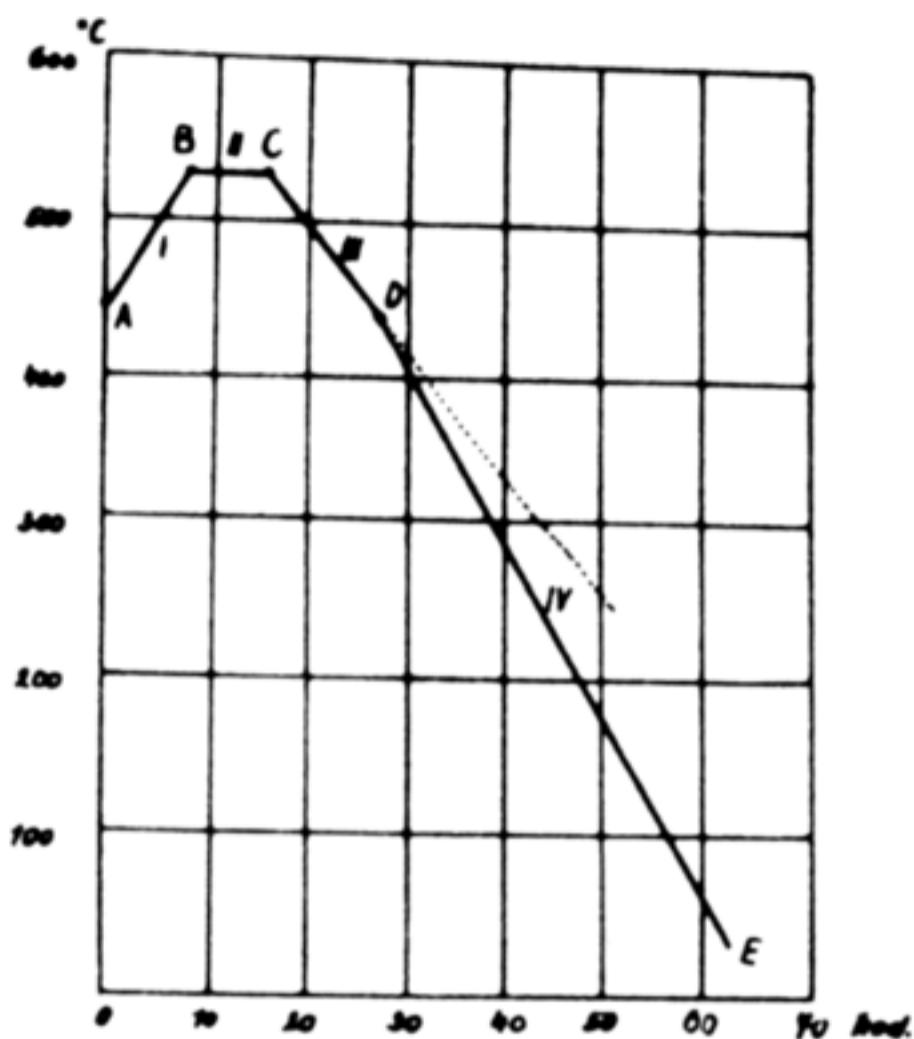
- a) v první etapě se sklo vyhřeje na chladící teplotu.
- b) v druhé etapě se sklo udržuje na konstantní teplotě s přesností 2 - 3°C.
- c) v třetí etapě se začne přecházet k pokojové teplotě, ovšem pouze v tzv. chladícím intervalu, ve kterém může ještě sklo získat nové vnitřní napětí.
- d) ve čtvrté etapě se přechází již rychle na pokojovou teplotu bez nebezpečí, že by v chlazeném bloku mohlo vzniknout vnitřní napětí. Rychlosť je zde omezena pouze tím, aby přechodným pnutím sklo neprasklo.

Celý průběh jemného chlazení je patrný z grafu na obr. 24.2 a trvá podle velikosti chlazeného bloku a druhu skla až 70 hodin. V třetí etapě se sejde z chladící teploty na teplotu, které odpovídá viskositě asi 10^{15} poise. Pod touto teplotou, jak již bylo uvedeno dříve, trvalá vnitřní napětí ve skle nevznikají.

Jemné chlazení optického skla se v některých případech provádí dvakrát. Např. při výrobě výlisků se sklo chladí před jejich lisováním a po vylisování výlisků se tyto podrobují ještě jednou jemnému chlazení.

V tunelových pecích je proces chlazení spojitý, na rozdíl od procesu chlazení v pecích s periodickým režimem. Tunelová pec má proto v určitých svých částech různou teplotu odpovídající hladícímu postupu a chlazené bloky skla procházejí těmito teplotami určitou dobu. Na začátku tunelu se kladou na vhodné vozíčky bloky skla, které se mají chladit a na konci pece vystupují vychlazené kusy skla na pokojovou teplotu.

Přesnější jemné chlazení lze provést v pecích s periodickým režimem, protože se u těchto pecí snadněji udrží předepsaný režim teplot.



Obr.24.2
Grafické znázornění průběhu chlazení určitého druhu skla

25. Výroba polotovarů z utaveného optického skla

Závody na výrobu optického skla dodávají toto sklo ve tvaru pravoúhlých bloků, deštiček, nebo ve tvaru výlisků, které mají tvar budoucí součásti, např. čočky nebo hranolu, a které se opracovávají již jen jemnými brusnými a leštícími materiály.

Utavené sklo se zpracovává na tyto polotovary třemi různými způsoby:

- a) Tak zvaným klassickým způsobem, kdy se utavená sklovina ochlazuje současně s příslušnou páneví, která se po vychlazení skla rozbití spolu se sklovinou na větší nebo menší kusy, které se pak zpracovávají dále tvarováním na bloky skla, jak bude ještě podrobně uvedeno dále.
- b) Litím do železných forem, které slouží k výrobě velkých bloků skla, které se pak rozřezávají na menší bloky.
- c) Válcováním skloviny na válcovacím stroji do tvaru tlustých desek, které se opět rozřezávají na menší polotovary.
- d) Při tavení skla v platinových pánevích se zpracuje sklo přímým tažením hranolového pásu, který se pak uřezává.

a) Klasický způsob výroby skleněných polotovarů se používá již od prvních začátků tavení optického skla. Příslušné polotovary mají největší stejnorodost a jakost.

Při výrobě polotovarů tímto způsobem se postupuje takto: Pánev po vyjmutí z pece se chladí pod zvonem tak, jak bylo uvedeno v odst. 23. Vychlazená sklovina i s páneví se rozbití kladivem nebo sochorem na větší nebo menší kusy. Z jednotlivých částí pánevy se vybírají vzorky, na kterých se měřením kontrolují optické konstanty utaveného skla. Větší kusy skla se rozbití kladivkem na menší kousky požadované velikosti a potom se předávají na třídění. Zde se pečlivě prohlížeji, odloukají se ty části, které obsahují zjevné vadu, jako šíry, velké bubliny, kaménky apod. Při této kontrole se případně upravují broušením ostré hrany, aby se zabránilo vzniku dalších vad při dalším tepelném tvarování skla.

Tvarování vybraných kusů skla se provádí v šamotových nebo kovových formách při teplotě 600 - 1000°C. Kovové formy jsou řešeny tak, aby se jejich velikost mohla měnit (obr. 25.1). Stěny forem jsou opatřeny vrstvou kaolinového prášku nebo kysličníku hořčíku. Sklo se vkládá s formami do pecí, které pracují s periodickým režimem. V periodických elektrických nebo plynových pecích se tvarují pouze větší bloky skla.

V tunelových pecích s plynulým režimem se tvarují kusy skla velikosti od 0,5 do 10 kg.

Sklo se s formou vyhřívá na teplotu měknutí, při které sklo sedá vlastní vahou a vyplní samo celý prostor formy. V některých případech se zaplnění formy provádí pod lisem.

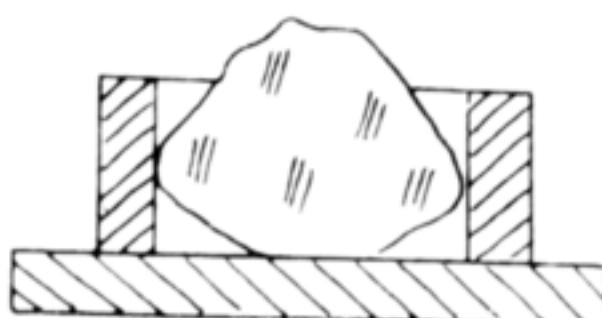
Sklo po vyhřátí na teplotu měknutí zůstává na této teplotě 1,5 až 3 hodiny.

Po vytvarování bloků se tyto umístují ve speciálních chladících pecích.

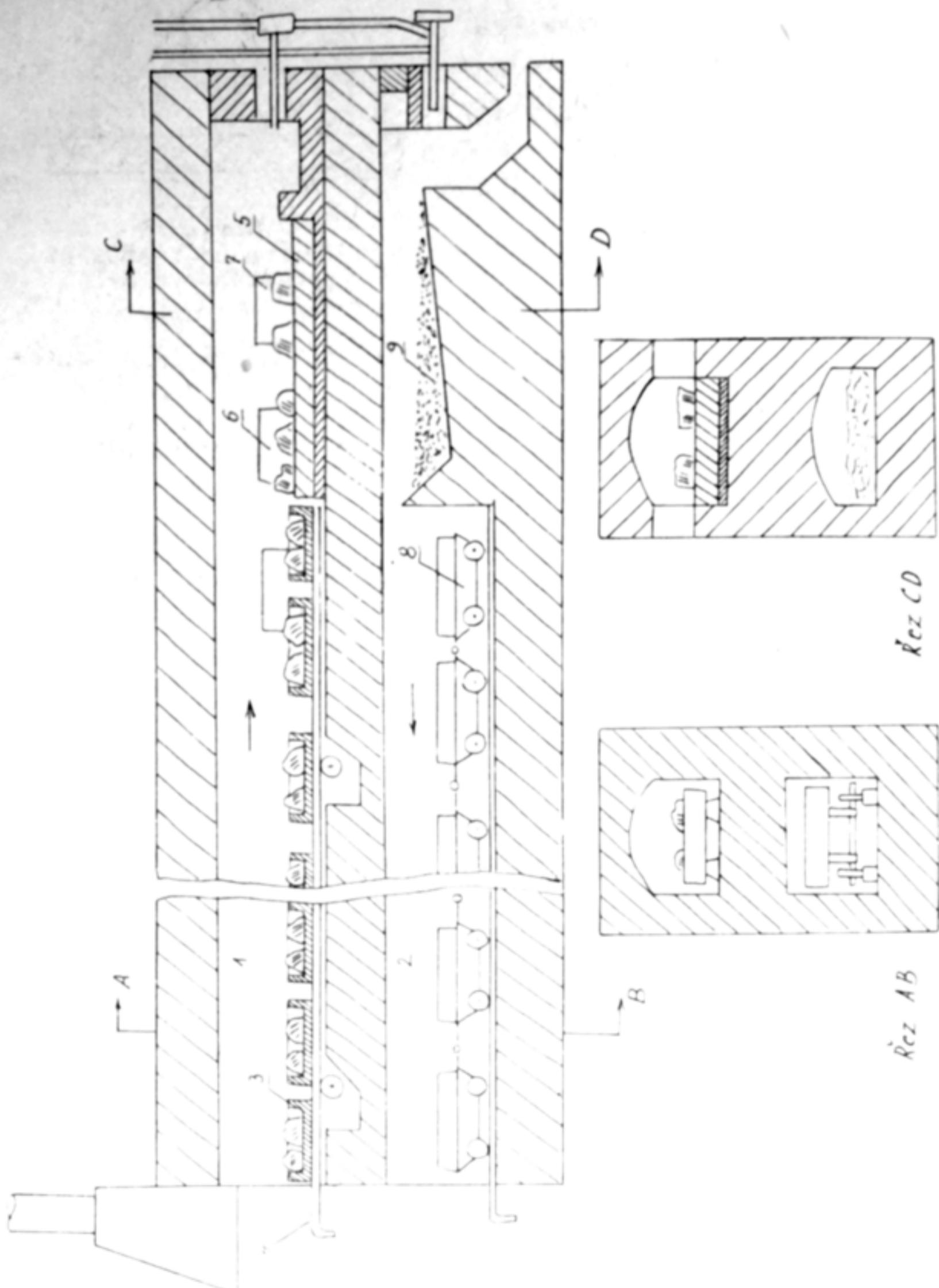
V druhém případě se používá k tvarování pecí o délce 8 - 10 m, které jsou vytápěny buď kapalným topivem nebo plyinem. Je to v podstatě dvoukanálová pec, jak je to patrno z obr. 25.2. V horním kanále (1) se tvarované sklo nahřívá a v dolním (2) se chladi. Kousky skla roztríděné podle váhy se ukládají na podložky (3), které jsou umístěny na pohybli-vém pásu (4). Pohyb podložek se sklem se provádí buď ručně nebo mechanicky.

Na konci pásu je sklo nahřáto tak, že je měkké a schopné tvarování. Rozmáklé sklo se přesouvá na šamotovou desku (5) až k pracovnímu okénku (6). Dělník stojící u tohoto okénka dřežnými lopatkami kousku skla vhodný tvar a přenese jej na litinovou desku a nasune na něj rám příslušné lisovací formy, jak je naznačeno na obr. 25.3. Pomocí lisu se zaplní forma sklem tak, jak je to vyznačeno na obr. 25.4. Přebytek skla přeteče pod rámem formy. Je nutné, aby objem skla byl o něco větší než objem formy. Jestliže však objem skla příliš převyšuje objem formy, pak dochází poměrně k velkým ztrátám skloviny. Proto se formy konstruují podle obr. 25.5. Vytvarované sklo vraci dělník zpět do pece okénkem (7) na podložku vezenou vozíčkem (8). Šamot, potřebný k vysypávání formy se předehřívá v komoře (9).

Vytvarované blokové sklo se po vychlazení brousí a leší na dvou protilehlých stěnách. V těch případech, kdy



Obr. 25.1
Kovová forma na tvarování optického skla



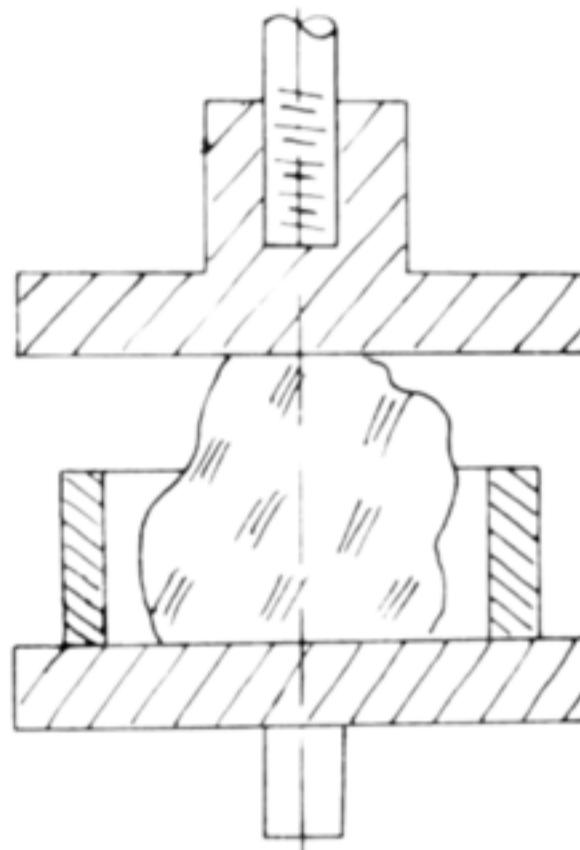
Obr. 25.2
Dvoukanálová tvarovací pec

podle normy nebo přejímacích podmínek se musí provéď kontrola bloku ve třech směrech, brousí a leští se všech šest stěn bloku.

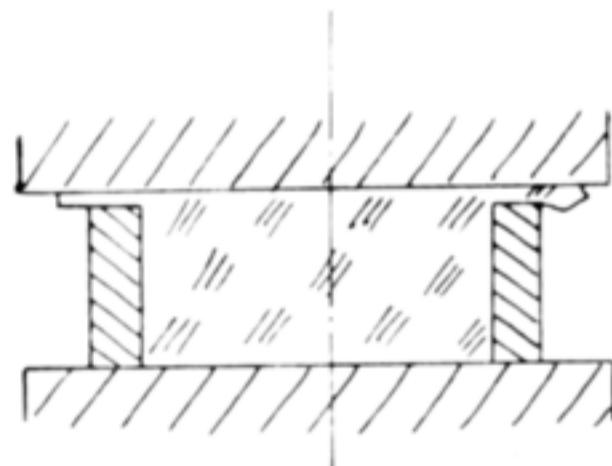
Pro výrobu výlisků se používá následujícího pracovního postupu. Ze surových kusů skla nepravidelného tvaru se lisují desky potřebné tloušťky. Nejdříve se surový kus skla předehřeje v tunelové peci, potom se přenese do tvarovací peci, kde se udržuje na stálé teplotě odpovídající příslušnému druhu skla, načež se z nich lisují desky. Tyto desky se po hrubém vychlazení dělí nařezáním a lámáním na hranolky, jejichž váha je o něco vyšší než váha konečného výlisku. Správné váha se dosáhne obroušením rohů a hran.

Takto upravené hranolky se znova vyhřejí na teplotu měknutí, pomocí ocelových lopatek se upraví do vhodného tvaru, načež se přenesou do formy upevněné na lisu, kde se vylisuje potřebný polotovar. Potom se výlisek hrubě chladi a po kontrole jakosti a čistoty skla se přejde ke konečnému jemnému chlazení.

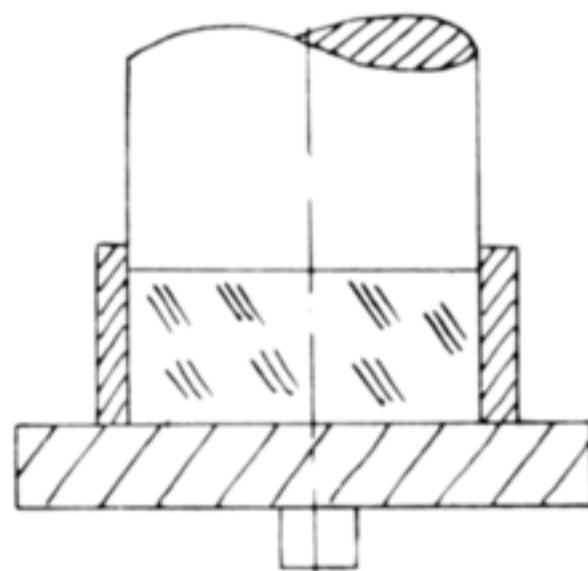
Vlastní lisovací formy mohou být upraveny pro vnější nebo vnitřní lisování. V prvním případě je lisovací forma velmi jednoduchá. Upravený rozměklý polotovar (1) (viz obr.25.6)



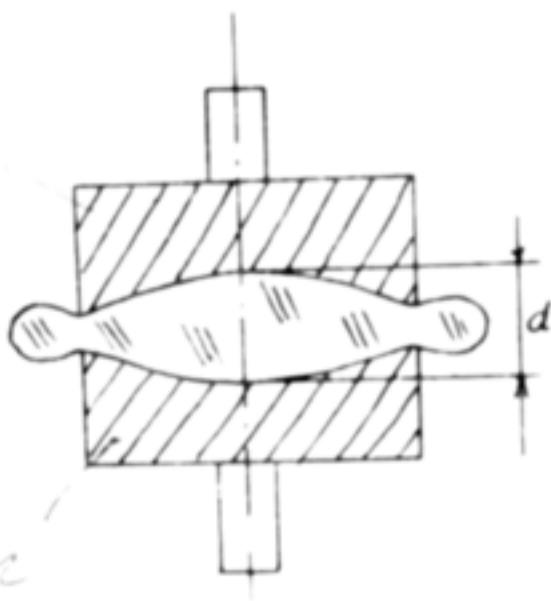
Obr.25.3
Příprava měkkého kousku skla
pro tvarování pod lisem



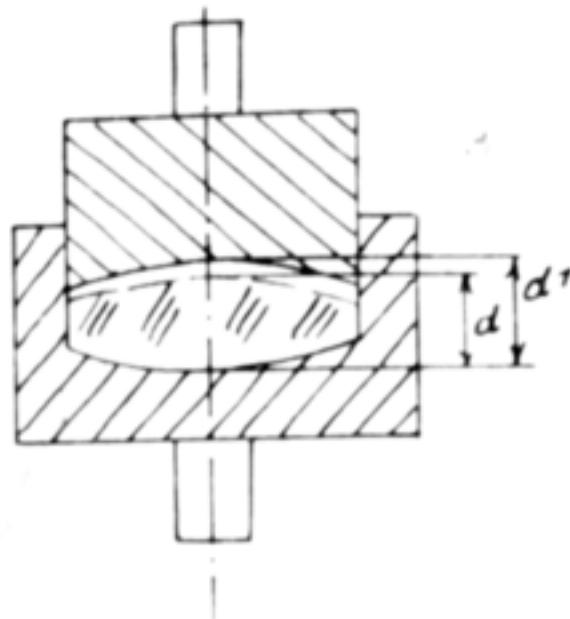
Obr.25.4
Zaplnění formy pod lisem



Obr.25.5 Úprava formy
s odstraněnými přetoky skla



Obr. 25.6 Tvar formy používané pro vnější lisování



Obr. 25.7 Tvar formy pro vnitřní lisování

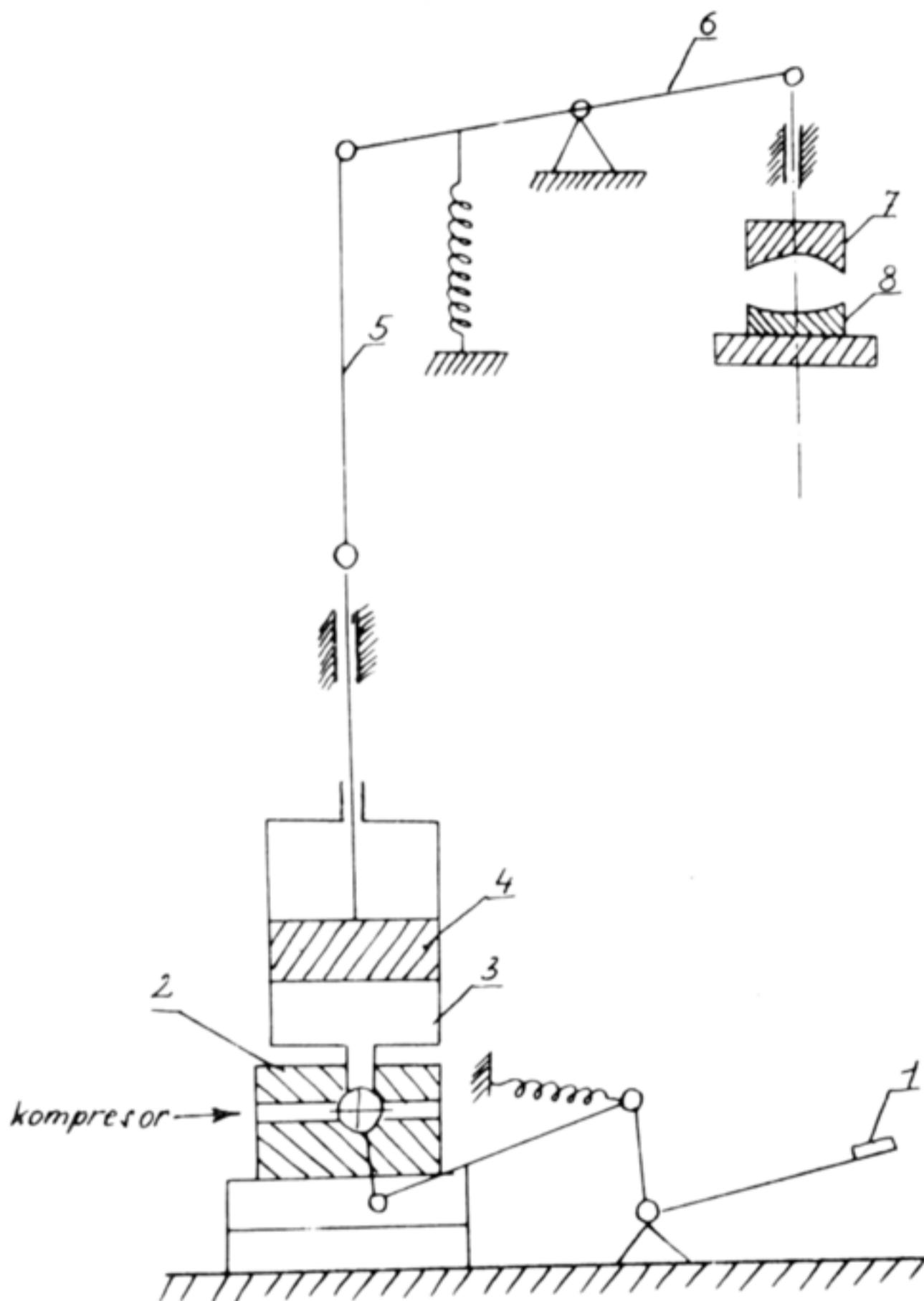
se klade na matrice (2) a tvaruje se patricí (3). Pohyb patrice je omezen zvláštním dorazem, který zajišťuje dodržení předepsané tloušťky d výlisku. Přebytek skla přeteče jako přetok (4), který se musí buď odštípat nebo obrousit.

② V druhém případě, vnitřního lisování, zasahuje patrice (3) do matrice (2) tak, jak je to naznačeno na obr. 25.7. V tomto případě se nevytváří pretoky. Odchylky ve váze hranolku, připreveného k lisování se projevují změnou tloušťky výlisku z hodnoty d na hodnotu d_1 .

V obou případech se matrice předehřívá plamenem. Nedostatkem obou způsobů lisování je opalování matrice, která se musí po 5.000 až 10.000 výliscích vyměnit.

Lisy používané k výrobě výlisků bývají velmi lehké konstrukce a jsou umisťovány těsně vedle pece, v níž se předehřívají příslušné polotovary. Na obr. 25.8 je znázorněno schéma takového lisu. Při sešlápnutí pedálu (1) se otevře ventil (2), kterým se přivádí stlačený vzduch do válce (3) pod píst (4). Píst se pohybuje směrem nahoru a natáčí přitom dvouzvratnou páku (6), která posouvá patrici (7) proti matrice (8).

Snahou je zlepšit lisování čoček a hranolů tak, aby nebylo třeba opracovávat funkční plochy, které by mely být po vylisování lesklé a opticky dokonalé. Zatím tento problém



Obr. 25.8 Schéma lisu
na výrobu skleněných výlisků tvaru čoček nebo hranolů

nebyl rozřešen a lesklé plochy se lisují pouze u asférických
osvětlovacích soustav.

b) Lití skla do kovových forem

Snaha po dosažení lepších výnosů a umožnění získání roz-
měrově větších kusů čistého optického skla vedla některé vý-
robce optického skla k hledání nových výrobních metod.

Bylo zavedeno lití na stůl a válcování, nebo lití mezi válce po způsobu výroby zrcadlového skla. Výhodou těchto metod je možnost několikerého použití pánve. Tato výhoda je ovšem kompenzována nebezpečím znehodnocení větší části skla šlírovitými partiemi skla od stěn pánve, které jsou při lití strhávány spolu s čistým sklem.

Později se začalo zkoušet lití skla prorážením dna pánve, které umožnilo vyklouznutí čistého jádra skloviny do formy. Tento proces je poměrně zdlouhavý, neboť vyžaduje opětného nahřívání pánve a je spojen vždy s nebezpečím znečištění skla zbytky materiálu z pánve. Podařilo se však úspěšně aplikovat tento způsob při tavení v platinových pánvích.

Praktického užití doznala metoda lití optického skla, která byla vypracována v Schottových závodech v Jeně.

Tato metoda byla vyvinuta z původního způsobu lití velkých kotoučů pro astronomické dalekohledy. Až do r. 1929 byla používána pouze pro výrobu ojedinělých kusů skla a teprve během druhé světové války, kdy spotřeba optického skla značně vzrostla, byla tato metoda propředávána pro výrobu normálního optického skla.

Princip metody spočívá ve vylití čistého jádra strojně homogenizované skloviny do kovové formy. Pánev se po vyvzení z peci nechá po určité době volně chladnout, aby se dosáhlo takových rozdílů viskozity v páni, aby šlírovité části skla u stěn a u dna nedoby dostateně ztuhly. Tím se umožní při naklonění pánve vylití čistého, vymíchaného jádra ze středu páne. Forma s vylitým sklem se musí od páne oddělit dříve, než do ní mohou vniknout viskoznější vrstvy skla od stěn páne. Odlité velké bloky skla se jemně chladí v elektrických chladících pecích a po vychlazení se lámou speciálními lisy na menší bloky. Potom se tyto menší bloky brousí a leští a kontrolují z hlediska kvality skla. Šlírovité a bublinaté části bloků se odrezávají.

Na obrázcích 25.9 a 25.10 je vidět počátek lití, kdy pánev není ještě vytočena ze svislé polohy o celý potřebný úhel natočení, který bývá asi 135°C . Na obr. 25.10 je již zachycen konec lití. Na vlastní páni a na proudu skla mezi páni



Obr.25.9 Začátek lití skla do formy



Obr.25.10 Konečná fáze lití skla do formy

a formou je zřetelně vidět viskozní vrstvy skla od stěn pánve.

Aby se sklo po vylití neleplilo na stěny formy, jsou stěny opatřeny ochrannou vrstvou kysličníku, případně uhlíčitanu hořečnatého nebo kaolínu. Vlastní forma se před litím vyhřívá asi na 400°C . Tím se zabrání vzniku bublin tzv. "foukáním" studené formy.

Chladící pec se skládá z elektricky vytápěného základu, na který se umisťuje forma s vylitým sklem, a z kovového zvonu s izolovanými stěnami a stropem, kterým se pokryje forma i vytápěný základ pece. Nutným požadavkem správného chlazení bloku skla je rovnoměrné rozdělení teplot v chladícím poklopu tak, aby ve skle nevznikl teplotní gradient, který by mohl být příčinou špatného vychlazení, nebo dokonce prasknutí bloku. Pec musí být vybavena regulací příkonu, při čemž chladící postup se řídí podle termočlánku, který je umístěn na povrchu chlazeného bloku skla. Před litím stačí vyhřát pec na teplotu 100 až 150°C , nebož žhavý blok skla, zavedený do pece, má do-

statečně velké množství tepla, které stačí k vyhřátí chladící pece na potřebnou teplotu.

Lití skla do forem je podrobně popsáno s. Z. Škráňkem ^{x)} ze Státního výzkumného ústavu sklářského v Hradci Králové.

c) Válcování skla

Tento způsob je shodný, jak již bylo uvedeno, s válcováním zrcadlového skla. Sklovina se vylévá z pánve vyvzené z pece na velký litinový stůl, rozměrů cca 10 x 6 m, kde se kovovým válcem rozválcuje na velkou desku určité tloušťky. Odlitá deska skla se v pecích opět chladi. Protože její povrch je vrásčitý a velmi nerovný, musí se deska brousit a leštít. Z takto opracované desky se pak vyřezávají polotovary pro zhotovování optických součástí nebo pro zhotovování výlisků.

Při válcování poměrně velmi tekuté skloviny se šlíry, pokud nebyla sklovina zcela homogenní, roznesou po celé ploše desky. Obyčejně nejsou při kontrole desky na průhled patrný, neboť jsou to šlíry ploché, rovnoběžné s plochami desky. Jsou pouze zjistitelné při prohlídce ve směru rovnoběžném s plochami desky.

Takto získané sklo se hodí k výrobě čoček nebo součástí, kterými prochází světlo pouze jedním směrem, jak je tomu např. v případě čoček masově vyráběných laciných přístrojů. Válcováním se vyrábí vysoko kvalitní barevná optická skla pro filtry.

d) Tavení skla vysokofrekventní indukcí

Závěrem nutno se zmínit o pokrokových metodách tavení skla. Tento zajímavý způsob byl vypracován ve Francii. Sklo se taví v platinové pánvi vysokofrekventní indukcí. Utavené sklo se zpracovává vypouštěním homogenního skla dnem pánve do formy. Vypouštění skla otvorem ve dně pánve má velkou výhodu pro lití, neboť homogenita skla nemůže být porušena tím, že by sklovina se smíchala s vrstvami od hladiny.

x) Škráňk Z., Zkušenosti s litím optického skla, Věda a výzkum v průmyslu sklářském, Řada V, 1958, str. 47.

seznam použité literatury

1. Ardamackij A.L., Izgotovlenie optičeskich detailej, Moskva, 1955
2. Bardin A.N., Technologija optičeskoč stekla, Moskva, 1955
3. Dévé Ch., Le travail des verres d'optique de precision, Paris, 1949
4. Fanderlik M., Vady skla, Praha, 1963
5. Havelka B., Keprt E., Hansa M., Spektrální analýsa I., str. 132, Praha, 1957
6. Chance H., Optical glass in war, Journal of the institution of civil engineers, No 2, 305 - 307, 1946/47
7. Kitajgorodskij I.I., Technologija stekla, Moskva, 1951
8. Kocík J., Nebřenský J., Speciální optická skla, Věda a výzkum v prům. sklářském, řada III - 1957
9. Kocík J., Optická filtrová skla čs.výroby, Věda a výzkum v průmyslu sklářském, řada VII - 1961
10. Kocík J., Nebřenský J., Barevná skla pro signalizaci v železniční dopravě a jejich hodnocení, Věda a výzkum v průmyslu sklářském, řada I - 1956
11. Legun Z., Technologija szkla optycznego, Warszawa, 1955
12. Maksutov D.D., Izgotovlenie i isledovanie astronomičeskoi optiki, Moskva, 1948
13. Minář S., Jemná mechanika a optika, 1/1956 str. 17, 3/1956 str. 87, 2/1957 str. 46 a 3/1957 str. 79
14. Schill F., Chlazení skla, Informační přehled, Výzkumný ústav sklářský, Hradec Králové
15. Süsser V., Fanderlik I., Homogenizace skla v pánevích, Informační přehled, Výzkumný ústav sklářský, Hradec Králové
16. Škránek Z., Zkušenosti s litím optického skla, Věda a výzkum v prům. sklářském, řada V - 1958
17. Twyman F., Prism and lens making, London, 1951
18. Čeření skla, Informační přehled, Výzkumný ústav sklářský, Hradec Králové, 1958.

O b s a h

	Strana
1. Úvod	3
2. Historie skla.....	4
3. Skelný stav	7
4. Některé názory na skelný stav.....	12
a) Názory S. Tammana	12
b) Názory A.A.Lebeděva.....	13
c) Názory Zachariasesenovy.....	14
d) Názory A.A.Appena.....	16
e) Závěr.....	17
5. Skla používaná v optické výrobě.....	18
6. Bezbarvá optická skla.....	22
a) Index lomu.....	22
b) Střední disperse.....	23
c) Částečná disperse.....	23
d) Relativní částečné disperse.....	23
e) Abbeovo číslo.....	24
7. Rozdělení optických skel podle jejich optických vlastností.....	27
8. Speciální optická skla.....	31
9. Vliv složení skla na jeho optické konstanty...	33
10. Ukazatelé jakosti skla.....	37
a) Součinitel pohlcování světla.....	38
b) Optická stejnorodost.....	42
c) Bublinatost skla.....	43
d) Šlírovitost.....	46
e) Dvojlam.....	50
f) Chemická odolnost skla.....	56
g) Skvrnitost povrchu skla.....	61
11. Tepelné vlastnosti skla.....	62
a) Koeficient lineární tepelné roztaživosti...	62
b) Závislost indexu lomu skla na teplotě.....	64

	Strana
c) Teplota spékání.....	65
12. Mechanické vlastnosti skla.....	66
a) Specifická váha	66
b) Pružnost skla.....	67
c) Pevnost skla.....	67
d) Tvrdost skla.....	68
e) Křehkost skla.....	69
13. Filtrové optická skla.....	70
a) Selektivní filtry pro ultrafialovou oblast a filtry fialové.....	72
b) Filtry modré a fialově modré.....	74
c) Filtry zelené a žlutozelené.....	74
d) Filtry zelenožluté a žluté.....	74
e) Filtry oranžové a červené.....	75
f) Filtry infračervené.....	79
g) Filtry absorbující teplo (determální filtry).....	79
h) Neutrální filtry.....	80
ch) Matematicko-fyzikální vztahy.....	81
i) Určení propustnosti filtru dané tloušťky nebo určení tloušťky filtru odpovídající dané propustnosti.....	85
j) Vyjádření barevnosti filtrových skel trichromatickými souřadnicemi.....	85
14. Krystaly.....	91
15. Organická skla.....	99

Výroba optického skla

16. Vstupní suroviny.....	103
17. Kmen.....	106
18. Pece a pánve pro tavení optického skla.....	107
a) Pece.....	107
b) Pánve.....	112
19. Vlastnosti skloviny.....	114
20. Krystalizace skla (odskeelnění).....	117

21. Základy teorie tavení optického skla.....	118
a) Tvoření silikátů.....	119
b) Tvoření skloviny.....	120
c) Čeření skla.....	120
d) Homogenizace.....	122
- Tyčová míchadla.....	123
- Vrtulová míchadla.....	128
e) Chlazení skla.....	131
22. Technologie tavení optického skla.....	132
23. Chlazení skla mimo pec.....	137
24. Jemné chlazení skla.....	140
25. Výroba polotovarů z utaveného optického skla.	143
a) Klasický způsob výroby.....	144
b) Lití skla do kovových forem.....	149
c) Válcování skla.....	152
d) Tavení skla vysokofrekventní indukcí.....	152
26. Použitá literatura.....	153

- - -

Název	Základy technologie optické výroby I. část
Autor	Prof. dr. Engelbert Keprt
Stran / VA	156 / 11,07
Obrázků	—
Náklad	230 výtisků
Vydavatel	Universita Palackého v Olomouci
Určeno	pro posluchače přírodovědecké fakulty UP
Vedoucí katedry	Prof. dr. Engelbert Keprt
Povoleno	Rektorátem University Palackého v Olomouci dne 28. 2. 1964 — D - 05*40074
Vydání	první 1964
Nakladatel	Státní pedagogické nakladatelství, n. p., Praha 1
Číslo publikace	1005 - 4198
Tiskárna	Knihtisk, n. p., provoz 6, Praha 1
Druh tisku	offset

17 - 419 - 64

Kčs 8,—

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou
v redakci nakladatelství