

Přehledný referát

TEPELNÁ VODIVOST SKLA A METODY JEJÍHO STANOVENÍ

ANTONÍN BLAŽEK, JANA EDEROVÁ, JIŘÍ ENDRÝS, JOSEF KADA

Vysoká škola chemicko-technologická, Suchbátarova 5, 166 28 Praha

1. ÚVOD

Tepelná vodivost představuje jednu z nejdůležitějších termofyzikálních vlastností. Charakterizuje daný materiál z hlediska jeho propustnosti pro teplo v závislosti na teplotě a uplatňuje se tudíž velmi významně v nejrůznějších souvislostech. Pokud se týká skla, uplatňuje se přenos tepla velmi významně ve všech stádiích jeho výroby, při tavení, tvarování i kalení i při použití skleněného výrobku, jakmile je vystaven teplotním změnám.

S potřebnou znalostí hodnoty tepelné vodivosti skla se proto setkáváme při všech tepelně technických výpočtech, řešících sklářskou technologii. Jako příklad využití lze uvést výpočet konstrukcí tavicích agregátů, řešení matematických modelů tavicího procesu apod.

Vzhledem k tomu, že silikátová skla představují diatermický materiál, v němž vedení tepla i přenos tepla zářením mohou působit současně, je jejich chování z hlediska přenosu tepla značně komplikované a i pojem „tepelná vodivost“ má význam komplexnější než u látek neprůhledných. Z těchto důvodů často nepředstavují ani získané experimentální hodnoty tepelné vodivosti fyzikální konstantu v pravém smyslu slova. Posuzujeme-li sklo z hlediska tohoto přenosu, jeví se jeho chování anomální v tom, že při vysokých teplotách, v roztaveném stavu je jeho tepelná vodivost vysoká, srovnatelná s tepelnou vodivostí kovových materiálů, zatímco za normální teploty působí sklo jako tepelný izolátor. Například tepelná vodivost mosazi při teplotě 20 °C je zhruba 108,7 W m⁻¹ K⁻¹ a tepelná vodivost běžného bezbarvého obalového skla při teplotě 1300 °C je zhruba 130 W m⁻¹ K⁻¹. Toto chování skla lze vysvětlit kombinovaným působením obou mechanismů přenosu tepla, tj. mechanismu fononového i fotonového, k nimž přistupuje v natavené sklovině, např. ve sklářské vaně, ještě přenos tepla prouděním. Při teplotách nad 600 °C má přenos tepla zářením dominantní význam, zatímco při teplotách nižších má základní význam mechanismus fononový.

Z uvedených důvodů není definování pojmu tepelné vodivosti v souvislosti s použitou experimentální metodou jejího stanovení jednoznačné a v literatuře se setkáváme u publikovaných výsledků s několika druhy označení tepelné vodivosti skla

- k *pravá tepelná vodivost* odpovídá tepelné vodivosti řízené pouze mechanismem fononovým,
- k_r *radiační tepelná vodivost* odpovídá tepelné vodivosti řízené pouze mechanismem fotonovým,
- k_{ef} *efektivní tepelná vodivost* teoreticky odpovídá součtu pravé a radiační tepelné vodivosti,

- k_{ap} zjevná tepelná vodivost odpovídá součtu pravé tepelné vodivosti a určitého podílu vodivosti radiační,
 k_c koeficient celkového tepelného přenosu odpovídá vodivosti k_{ef} nebo k_{ap} , na níž se podílí navíc i přenos tepla prouděním
 a difuzivita (teplotní vodivost) je dána vztahem $\frac{k}{c_p \cdot \gamma}$, kde k je tepelná vodivost, c_p měrné teplo a γ měrná hmotnost.

Z uvedeného přehledu je zřejmé, že ne všechny publikované výsledky mají fyzikální význam, neboť jsou závislé nejen na vlastnostech skla a jeho teplotě, ale i na vnějších proměnných, jakými jsou experimentální podmínky dané použitou metodou stanovení.

Pravá tepelná vodivost má u většiny skel význam při relativně nízkých teplotách. Jde o přenos energie fonony, tj. kvanty energie tepelných kmitů v dielektriku. Na rozdíl od krystalických látek stoupá u látek amorfních tato vodivost s teplotou monotónně.

Radiační tepelná vodivost (nazývaná též fotonová vodivost) umožňuje vyjádřit jevy přenosu tepla zářením v polopropustném prostředí za určitých zvolených podmínek a zjednodušení. Z tohoto důvodu nepředstavuje hodnota k_r materiálovou konstantu ve fyzikálním slova smyslu srovnatelnou s hodnotou k a nemá tudíž obecnou platnost. Teoretické základy pro odvození vztahů, které definují tuto tepelnou vodivost, jsou uvedeny v pracích [1]–[5]. Na nich je založena nepřímá metoda jejího experimentálního stanovení. Pro přenos tepla ve sklářské vaně je fotonová vodivost ve srovnání s fononovou mnohem významnější a má vliv na výrazný růst tepelné vodivosti s teplotou při teplotách nad 600 °C. Současné působení obou transportních mechanismů, které existuje při vysokých teplotách, vede pak v závislosti na konkrétních experimentálních podmínkách ke stanovení hodnoty k_{ef} , která má jako materiálová konstanta rovněž omezenou platnost.

Cílem tohoto článku je podat ucelený pohled na problematiku experimentálních metod stanovení tepelné vodivosti skla, zejména za vysokých teplot, zhodnocení jejich možností, jakož i zhodnocení významu a použitelnosti hodnot publikovaných v této oblasti. Z toho důvodu obsahuje tento článek i některé výsledky experimentálního testu, provedeného Subkomisí A5 Mezinárodní sklářské komise při použití různých experimentálních metod a vybraných vzorků technologických skel.

2. TEORETICKÉ ZÁKLADY METOD MĚŘENÍ TEPELNÉ VODIVOSTI

Základem všech přímých metod měření tepelné vodivosti, eventuálně difuzivity, je znalost rozložení teploty ve vzorku. Obecně je toto rozdělení dáno rovnicí vedení tepla

$$c\gamma \frac{\delta T}{\delta \tau} = \text{div} (k \cdot \text{grad } T) + q_v, \quad (1)$$

kde c je měrné teplo,

γ měrná hmotnost,

k tepelná vodivost,

T teplota,

τ čas,

q_v výkon tepelného zdroje v objemové jednotce

Rovnice (1) platí obecně pro neizotropní prostředí a pro neustálený stav. V izotropním prostředí je $\text{div}(k \cdot \text{grad } T) = k \cdot \nabla^2 T$ a rovnice (1) přejde ve tvar

$$c \gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (2)$$

nebo

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c \gamma} \quad (2a)$$

kde a je difuzivita.

Je zřejmé, že řešením uvedených rovnic je možné získat vztahy pro výpočet termofyzikálních veličin k , a a c . Na druhé straně mohou tyto rovnice sloužit pro výpočet teplotního rozdělení, známe-li hodnoty uvedených termofyzikálních veličin. Přenos tepla zářením se přitom promítne ve členu q_v jako dodatečný zdroj tepla.

Vycházíme-li z uvedených rovnic (2) a (2a) je zřejmé, že přímé experimentální metody pro stanovení uvedených veličin můžeme zásadně rozdělit na bezzdrojové a zdrojové, podle toho, zda $q_v = 0$ nebo $q_v \neq 0$. Metody bezzdrojové přitom mohou existovat jako stacionární a nestacionární podle toho, jestli derivace $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ je nulová či nikoliv. Hodnotu tepelné vodivosti k je tedy možno měřit oběma metodami, avšak hodnotu difuzivity a pouze metodami nestacionárními. Metody zdrojové je možno dále dělit podle tvaru zdroje na bodové, liniové, plošné a objemové, podle časového působení zdroje na impulsní, konstantně působící a periodicky působící. Tvar vzorku přitom může být definován jako polonekonečný, nekonečný, koule, válec, deska atd.

Výběr metodiky pro měření tepelné vodivosti je závislý na řadě faktorů, jako jsou např.:

1. Přesnost měření — čím vyšší přesnost je požadována, tím je složitější i experimentální zařízení. Nejvyšší přesnost měření je dosažitelná u metod stacionárních.
2. Doba trvání měření — stacionární metody vyžadují značně dlouhou dobu než se dosáhne ustáleného stavu. Nehodí se tudíž pro rutinní sériová měření a tam, kde dlouhá doba zahřívání může ovlivnit složení vzorku.
3. Materiál a skupenství vzorku je rozhodující pro volbu měřicí metody.
4. Absolutní hodnota tepelné vodivosti má pro výběr metody zásadní význam. (Např. impulsních metod nelze použít pro látky s vysokou tepelnou vodivostí.)
5. Extrémní podmínky při měření často omezují výběr metodiky vzhledem k použitelnému konstrukčnímu materiálu. (Např. velmi vysoké teploty apod.)

Vzhledem k uvedeným faktorům se klasifikace metod měření tepelných vodivostí neprovádí podle hlediska metodického, ale podle hledisek jiných, např. podle teploty, skupenství, hodnot tepelných vodivostí apod.

Kvantitativní vyjádření přenosu tepla zářením, který má ve skle za vysokých teplot dominantní význam, je podstatně obtížnější než u přenosu tepla vedením. Pro případ šíření tepla pouze vedením je možno vyjádřit tepelný tok jednoduchou rovnicí analogickou 1. Fickovu zákonu.

$$Q = -k \cdot \text{grad } T, \quad (3)$$

kde hodnota k značí tepelnou vodivost. Její hodnotu lze z fyzikálního hlediska definovat podle Debeye vztahem

$$k = c \cdot v \cdot l/3, \quad (4)$$

kde c je měrné teplo vztažené na objem,

v průměrná rychlost fononů,

l tzv. střední volná dráha fononů.

Uvažujeme-li pouze přenos tepla zářením, je možno tepelný tok vyjádřit rovnicí analogickou rovnici (3)

$$Q_r = -k_r \cdot \text{grad } T, \quad (5)$$

kde k_r je radiační tepelná vodivost. Je však třeba poznamenat, že na rozdíl od pravé tepelné vodivosti k , která je fyzikální konstantou a je funkcí pouze stavových proměnných, závisí hodnota k_r nejen na těchto proměnných a daném materiálu (v našem případě skle), ale i na dalších proměnných, z nichž nejdůležitější je tloušťka vrstvy vzorku. Při odvození vztahu pro k_r se vychází z obecné rovnice pro přenos energie v semitransparentním prostředí

$$d i'_\lambda = \alpha_\lambda(s) [i'_{\lambda b}(s) - i'_\lambda(s)] dS, \quad (6)$$

kde i'_λ je spektrální intenzita záření v místě s ,

$i'_{\lambda b}$ spektrální intenzita záření černého tělesa,

$i'_{\lambda b}$ spektrální intenzita záření černého tělesa ve stejném místě s ,

α_λ absorpční koeficient,

S souřadnice.

Z rovnice (6) je zřejmé, že intenzita záření se skládá ze dvou částí. První člen na pravé straně rovnice představuje energii emitovanou, druhý člen pak absorbovaný podíl. Řešením této obecné rovnice bychom získali vztah pro intenzitu, a tím i pro zářivý tepelný tok ve skle. Pro tento výpočet je však třeba znát teplotní rozdělení v daném materiálu. Vzhledem k velké složitosti podmínek jsou zpracována různá aproximativní řešení rovnice pro přenos energie (6). Pro náš případ přenosu tepla ve sklovině je nejvhodnější tzv. difúzní aproximace, která předpokládá, že střední volná dráha záření je malá vzhledem k rozměrům vzorku a že teplotní spády v prostředí jsou malé, takže intenzita záření se mění se souřadnicí poměrně málo. Je zřejmé, že tato aproximace bude platná pouze uvnitř tlusté vrstvy skloviny s dostatečně velkým absorpčním koeficientem. Při zavedení této aproximace platí pro intenzitu záření ve směru x vztah

$$i'_\lambda = i'_{\lambda b} - \frac{\cos \beta}{\alpha_\lambda} \cdot \frac{d i'_{\lambda b}}{d x}. \quad (7)$$

Jak je patrné, intenzita záření je pak funkcí pouze absorpčního koeficientu, souřadnice a intenzity záření černého tělesa. Jednoduchou úpravou pak pro radiační tepelnou vodivost lze získat výraz

$$k_r = \frac{4}{3} n^2 \int_0^\infty \frac{d e_{\lambda b}}{d T} \cdot \frac{1}{\alpha_\lambda} \cdot d \lambda, \quad (8)$$

kde n je index lomu skloviny,

$e_{\lambda b} = \pi \cdot i'_{\lambda b}$ Planckova vyzařovací funkce

λ vlnová délka záření.

Za takto přesně definovaných podmínek, tj. pro velký objem skloviny s dostatečně velkou hodnotou absorpčního koeficientu, kdy platí analogie vyjádřená rovnicí (5), má hodnota k_r význam materiálové konstanty a hodí se zejména pro porovnání různých druhů skel z hlediska jejich tepelné propustnosti. Představuje ovšem jakousi limitní hodnotu (tzv. Roselandova vodivost).

Vycházíme-li z uvedených vztahů pro oba typy tepelných vodivostí (k a k_r), dalo by se soudit, že jejich součet odpovídá tzv. efektivní tepelné vodivosti

$$k_{\text{ef}} = k + k_r \quad (9)$$

a v analogii s rovnicí (3) uvažovat pro výpočet teplotního rozdělení ve vzorku skla rovnici:

$$Q = -k_{\text{ef}} \text{ grad } T = -(k + k_r) \text{ grad } T. \quad (10)$$

I když je efektivní tepelná vodivost v literatuře definována rovnicí (9), výsledky experimentálních metod stanovení efektivní tepelné vodivosti této definici většinou neodpovídají a představují pouze jakousi zjevnou čili „efektivní“ tepelnou vodivost, která je závislá na podmínkách měření, zejména tloušťce vzorku. Tato hodnota tudíž není fyzikální konstantou na rozdíl od pravé tepelné vodivosti k i radiační tepelné vodivosti k_r definované podle rovnice (8). U většiny přímých metod měření k_{ef} jde o relativně tenké vrstvy skloviny. Za takových podmínek, zejména u skel s nízkou absorpcí, je podíl k_r v naměřené hodnotě k_{ef} vždy menší, než by odpovídal hodnotě, odvozené z rovnice (8). Přestože při teplotách tavení skloviny je podíl pravé tepelné vodivosti, zejména u sklovin s nízkou absorpcí, zanedbatelný ve srovnání s tepelnou vodivostí radiační, uplatňuje se pravá tepelná vodivost značnou měrou v okrajových vrstvách a spoluručuje tvar teplotního profilu, který se v dané vrstvě skloviny vytvoří. Z uvedených důvodů hodnoty k_{ef} , získané různými experimentálními metodami, většinou neodpovídají součtu pravé a Roselandovy vodivosti podle rovnice (9), ale jsou menší a závislé zejména na tloušťce vrstvy skloviny v měřicí aparatuře a na jejich absorptivních vlastnostech. Efektivní tepelná vodivost, definovaná vztahem (9), může proto sloužit k určení totální veličiny (např. tepelného toku vzorkem), ale nemůže sama o sobě umožnit výpočet např. teplotního rozdělení v uvažovaném prostředí.

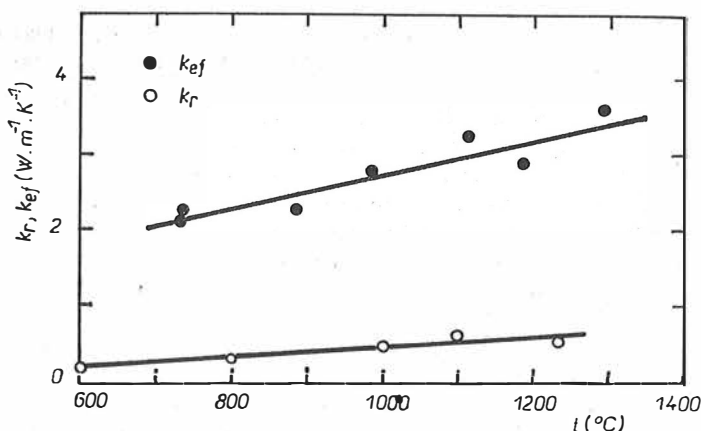
Proto Anderson a Viskanta [6], [7], kteří se zabývali studiem efektivní tepelné vodivosti semitransparentních materiálů, zavádějí pojem tzv. „lokální efektivní tepelné vodivosti“, která se liší různým podílem radiační složky v závislosti na souřadnici. Autoři rovněž zavádějí termín tzv. „efektivní radiační vodivosti“, neboli modifikované Roselandovy vodivosti, která je vždy nižší než limitní hodnota k_r podle vztahu (8). Teplotní profil ve vrstvě natavené skloviny a tím i naměřená hodnota efektivní tepelné vodivosti bude přitom závislá na okrajových podmínkách, to znamená na tom, zda sklovina je ve styku se stěnou či nikoliv. V případě styku se stěnou pak bude závislá i na emisivitě a reflektivitě materiálu této stěny.

Z uvedeného je tedy zřejmé, že při využití experimentálně určených hodnot efektivní tepelné vodivosti je vždy třeba brát v úvahu podmínky, za kterých byla tato hodnota stanovena, a zvážit, zda je možné ji pro konkrétní případ aplikovat. Obecně je situace příznivější u barevných sklovin s velkou absorpcí, kde je podíl přenosu tepla zářením relativně malý a vytvořený teplotní profil v dané vrstvě skla je prakticky lineární. U sklovin s malou absorpcí, avšak s vysokou hodnotou radiační tepelné vodivosti podle vztahu (8) je situace složitější. Teplotní profil vytvořený ve vrstvě skloviny není lineární a pro exaktní výpočty teplotních rozdělení je třeba vy-

cházet z obecné Fourierovy rovnice vedení tepla, v níž se příspěvek záření vyjádří přidavným členem, jako dodatečný zdroj tepla. Tento postup použili Anderson a Viskanta [6], [7].

Je tedy zřejmé, že publikované hodnoty efektivní tepelné vodivosti, naměřené některou z přímých metod stanovení, obsahují kromě složky pravé tepelné vodivosti (ta je obsažena vždy) i určitý podíl zářivé vodivosti, obecně a ne zcela správně označované k_r , s ohledem na to, že pod označením k_r rozumíme pouze limitní hodnotu podle vztahu (8). Pouze v případě, že by se teplotní spád měřil uvnitř vrstvy skloviny a ne na rozhraních, bylo by možno získat hodnotu k_{ef} velmi blízkou hodnotě $(k + k_r)$. V daném případě však zůstává problémem měření teploty v transparentním prostředí, které je závislé na absorptivitě měřicího čidla. Při měření teploty v místě rozhraní, tak jak se to u většiny přímých metod provádí, získáme zejména u vysoce propustných bezbarvých sklovin i při použití dostatečně silné vrstvy skloviny celkový teplotní spád větší, než odpovídá radiační tepelné vodivosti, vzhledem k teplotním skokům na rozhraních. U těchto sklovin bude proto výhodnější pro odhad teplotních spádů uvnitř dané vrstvy skloviny použít hodnot k_r , vypočtených podle vztahu (8), a zvláště se zabývat okrajovými vrstvami, v nichž dochází k interakci s pravou tepelnou vodivostí, která způsobuje vyrovnání teplotních skoků v blízkosti rozhraní a zakřivení teplotního profilu.

Opačným extrémem jsou skloviny silně absorptivní, u nichž je podíl přenosu tepla zářením velmi malý a kde naměřené hodnoty efektivní tepelné vodivosti jsou reálné a dobře aplikovatelné při výpočtu teplotních profilů. Naproti tomu naměřené hodnoty k_r , které jsou u těchto sklovin podstatně menší a nemají praktický význam pro výpočty teplotních profilů, mohou být využity pro stanovení pravých tepelných vodivostí těchto sklovin za vysokých teplot jednoduše odečtením od hodnoty efektivní tepelné vodivosti. Určení pravé tepelné vodivosti za vysokých teplot je jinak prakticky nemožné, neboť při použití přímých metod měření nelze eliminovat složku přenosu zářením. Tento způsob stanovení, který použili Blažek a kolektiv [8] u silně absorbujícího svařečského skla s celkovým obsahem Fe_2O_3 10,25 %, je patrný z obr. 1. Takto odvozená hodnota pravé tepelné vodivosti může být použita i u dal-



Obr. 1. Srovnání teplotních závislostí radiační a efektivní tepelné vodivosti pro brýlové svařečské sklo (chemické složení viz tab. č. 1, sklo č. 13).

ších skel při výpočtu teplotních profilů a je v poměrně dobré shodě s hodnotami, získanými extrapolací křivek závislosti $k = f(T)$, naměřených při podstatně nižších teplotách. V daném případě tedy hodnota k_{ef} představuje součet $k + k_r$.

Pokud jde o hodnoty radiační tepelné vodivosti k_r , spočívá jejich význam, vedle již uvedeného příkladu využití, zejména v možnosti srovnávání jednotlivých druhů sklovin z hlediska tepelné propustnosti a v hrubých rysech umožňuje i odhad teplotních spádů ve sklovině. Kromě toho je poměrně snadno experimentálně přístupná, na rozdíl od hodnot k_{ef} .

3. PŘEHLED METOD PRO MĚŘENÍ TEPELNÝCH VODIVOSTÍ SKLA ZA VYSOKÝCH TEPLOT

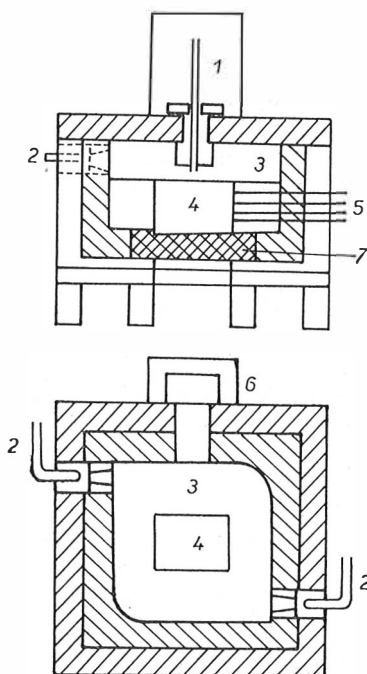
Základní hlediska pro rozdělení metod měření tepelných vodivostí byla uvedena v kapitole 2. Zde se omezíme zejména na metody použitelné za vysokých teplot. S odvoláním na dříve uvedená hlediska můžeme při hrubém dělení tyto metody rozdělit na přímé a nepřímé. Metody přímé pracují většinou za podmínek tepelně ustáleného stavu a dovolují určit tepelnou vodivost na základě vztahu (10) ze stanovení ustálené intenzity tepelného toku a vytvořeného teplotního spádu. Tyto metody označujeme jako stacionární, na rozdíl od metod nestacionárních, které nehodnotí měřené veličiny v teplotně ustáleném stavu a poskytují obvykle hodnoty teplotní vodivosti α . Metody nepřímé spočívají ve stanovení jiné fyzikální veličiny, ze které lze tepelnou vodivost odvodit.

3.1. Metody stacionární bezzdrojové

Patří mezi metody klasické a jsou v principu velmi jednoduché. Měří se v podstatě teplotní spád a tepelný tok na vzorku daného tvaru za ustáleného stavu. Výhodou těchto metod je možnost přesného měření teplotního rozdílu i tepelného toku, neboť obě veličiny mají ustálené hodnoty. Nevýhodou však je možnost vzniku parazitních tepelných toků, které vnášejí do měření systematické chyby. Jejich potlačení se provádí dodatečnými příhřevy, což někdy může vést k značné složitosti měřicí aparatury.

Nejčastěji používanou metodou tohoto typu je metoda desky s lineárním tokem. Tato metoda je s úspěchem využívána i při měření pravé tepelné vodivosti k až do dilatometrické transformační teploty a může být použita i jako metoda srovnávací [9], [10], [11].

Velmi zajímavou variantou této metody pro teploty až 1400 °C je metoda, podle Kruszewského [12], který měřil teplotní spády ve vrstvě skloviny tloušťky 210 mm ve speciální laboratorní plynové peci, jejíž konstrukce je patrna z obr. 2. Půdorys dutiny, v níž se sklovina natavuje, je 300 × 225 mm. Ohřev se provádí shora ve spalovací komoře 600 × 600 mm s výškou 150 mm. Vertikální teplotní spád ve vrstvě skloviny se měří termočlánekem zasunovaným shora do skloviny. Na bočních stěnách pece, co nejlépe tepelně izolovaných, jsou umístěny další čtyři termočlánky pro indikaci ustáleného stavu. Vzhledem k tomu, že při použití plynového ohřevu není možno měřit tepelný tok sklovinou přímo, je využívána srovnávací metoda, při níž se měření tepelného toku nahradilo měřením teplotního spádu na keramickém dnu



Obr. 2. Schéma zařízení pro měření k_c podle Kruszewského; 1 — vodící trubice měřicího termočlánku, 2 — hořák, 3 — spalovací komora, 4 — tavící dutina pro sklovinu, 5 — termočlánky, 6 — výpuště, 7 — keramické dno se známou hodnotou tepelné vodivosti.

(normálu) o známé hodnotě tepelné vodivosti. Tepelná vodivost k_c (tj. střední hodnota mezi t_1 až t_2) se pak počítá podle vztahu

$$k_c = \frac{k_1(T_2 - T_3)d}{(T_1 - T_2)d_1} = \frac{q}{T_1 - T_2}, \quad (11)$$

kde k_1 je tepelná vodivost keramického dna,

d — tloušťka vrstvy skloviny,

d_1 — tloušťka keramického dna,

T_1 — teplota na hladině,

T_2 — teplota na dně uvnitř,

T_3 — teplota na dně vně.

Autor provedl měření skel bezbarvých a barvených pomocí Fe_2O_3 , Cr_2O_3 a NiO . Teplotní spády u skel barevných jsou prakticky lineární a na základě toho byl^a odvozena i empirická rovnice pro výpočet hodnoty k_c těchto skel na základě obsahu barvicích kyslíčků. Teplotní profil u skloviny bezbarvé je tvaru S s většími spády na rozhraních než uvnitř skloviny, což odpovídá úvahám uvedeným v kapitole 2. Získané výsledky představují určité efektivní hodnoty, které jsou však částečně ovlivněny existující konvekcí ve sklovině.

Tato metoda byla rovněž použita v rámci experimentálního testu, který v rámci Mezinárodní sklářské komise zajišťovali autoři tohoto článku.

I když lze této metodě vytknout některé nedostatky, které mohou ovlivnit správnost výsledku (možná nepřesnost v hodnotě tepelné vodivosti keramického dna, možnost vzniku konvekce v roztavené sklovině), lze uvedenou metodu považovat za nejlepší pro měření efektivní tepelné vodivosti sklovin v roztaveném stavu zejména proto, že používá dostatečně silnou vrstvu skla. Experimentálně ovšem jde o metodu dosti náročnou.

Zajímavou modifikaci stacionární deskové metody, použité ovšem pouze do teploty 800 °C, použili Anderson a Viskanta [6], [7]. Autoři měřili teplotní rozdělení v poměrně tenkých destičkách (do tloušťky 12,7 mm) k ověření svých teoretických výpočtů efektivních tepelných vodivostí skelného SiO₂. Problematické měření teploty pomocí termočlánků je v daném případě nahrazeno měřením interferometrickým, které využívá teplotní závislosti indexu lomu. Tímto způsobem se podařilo velmi přesně změřit teplotní profily ve vzorcích za různých okrajových podmínek a výsledky porovnat s teoretickými výpočty.

Desková metoda s lineárním tepelným tokem, jak již bylo uvedeno, je vhodná především pro oblast nižších teplot, kdy sklo zůstává v pevném stavu, a byla rozpracována zejména v pracích [13], [14]. Pro oblast natavené skloviny se proto častěji používá metoda, při níž má sklo tvar dutého válce. Jde o tzv. válcovou metodu s radiálním tepelným tokem. Tato metoda byla použita pro měření s natavenou sklovinou několika autory [8], [15], [16], [17]. Princip metody je patrný z obr. 3. Sklo se při této metodě natavuje mezi dva sousedé válce, přičemž uvnitř vnitřního válce se nachází tepelný zdroj, který slouží k vytvoření definovaného tepelného toku. Vnější válec je opatřen topným vinutím, které slouží k natavení skla a vně je tepelně izolován. Natavený vzorek skla má tedy tvar dutého válce, jehož výška je několikrát vyšší než průměr, aby bylo dosaženo dostatečně velké izotermální zóny s radiálním tepelným tokem. V této zóně se pak měří teplota skloviny na vnější a vnitřní stěně skleněného válce. V případě, že je tepelný tok pouze radiální (tj. neexistují axiální tepelné toky), vypočteme tepelnou vodivost podle vztahu

$$k_{\text{et}} = \frac{Q_s}{2\pi l(T_2 - T_1)} \ln \frac{r_1}{r_2}, \quad (12)$$

kde T_2 a T_1 jsou teploty měřené na vnitřním a vnějším povrchu skleněného válce,

Q_s — příkon uvažované části vnitřního topného vinutí,

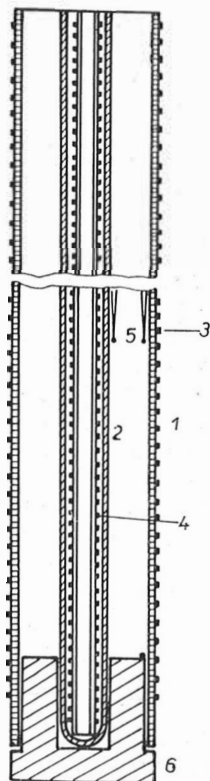
l — délka topení, kde měříme příkon,

r_1 — poloměr vnější,

r_2 — poloměr vnitřní.

Použití aplikace této metody na sklovinu se liší především v síle vrstvy skla, s níž se měření provádí, a v materiálu válců. Gutop [15] a Eckhardt [16] konstruovali měřicí část z Pt válců. Autoři prací [17], [8] použili válců keramických. Použitý materiál trubic ovlivňuje nejen cenu celého zařízení, ale i metodiku měření. Při použití PtRh slitin vychází aparatura velmi nákladná, u keramických trubic je vyprazdňování skloviny velmi náročné. Přitom je třeba vytvořit pro měření dostatečně dlouhou izotermální zónu, aby se omezily axiální tepelné toky a konvekce ve sklovině. Toho lze dosáhnout použitím dostatečně dlouhých trubic, nebo instalací dalších předávných ohřevů na koncích trubic. To vše ovlivňuje i použitý konstrukční materiál.

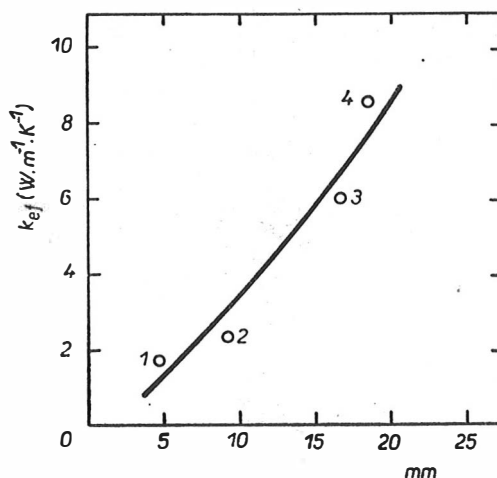
Rozhodující vliv na hodnotu experimentálně určené hodnoty k_{ef} má v závislosti na typu skloviny tloušťka vrstvy. Dosud publikované výsledky byly získány se vzorky o síle stěny od 4,5 do 20 mm. To je tloušťka poměrně malá, a proto je tato metoda vhodná především pro barevné, silněji absorbující skloviny. V práci [16] bylo proměřeno i silně absorbující sklo (s 2 % NiO) a získané výsledky lze považovat za pravou tepelnou vodivost. V případě skel bezbarvých bude naměřená hodnota



Obr. 3. Schéma zařízení pro měření k_{ef} metodou dutého válce s radiálním tepelným tokem; 1 — vnější trubice, 2 — vnitřní trubice, 3 — vnější topné vinutí, 4 — vnitřní topné vinutí, 5 — termočlánky pro měření teplotního spádu, 6 — keramické dno.

k_{ef} silně záviset na podílu přenosu tepla zářením, a tudíž na tloušťce vrstvy vzorku. To ukazuje názorně křivka na obr. 4, která vyjadřuje závislost hodnot k_{ef} získaných touto metodou na různé tlustých vrstvách, u skel přibližně stejného složení. Z toho vyplývá, že výsledkem měření je hodnota k_{ef} , která neodpovídá vztahu (9), u níž je podíl přenosu tepla zářením limitován experimentálními podmínkami.

Je třeba upozornit na to, že hodnoty k_{ef} , naměřené stacionárními metodami (válec, deska apod.), jsou závislé i na emisivitě a reflektivitě materiálu, který je ve styku se sklem. Všeobecně platí, že čím je nižší emisivita a vyšší reflektivita, tím nižší se



Obr. 4. Srovnání hodnot k_{ef} pro tabulové bezbarvé sklo měřených při různých tloušťkách vrstvy skla; 1 — podle práce [15], 2 — podle práce [16], 3 — podle práce [17], 4 — podle práce [8].

získají hodnoty k_{ef} , což plyne z počátečních podmínek intenzit ve vyjádření lokálního zářivého toku v rámci řešení rovnice šíření tepla. Rovněž tato závislost se projeví výrazněji u málo absorbujících sklovin.

3.2. Metody nestacionární bezdrojové

Na měření roztavené skloviny byly aplikovány nestacionární metody bezdrojové i zdrojové.

Bezdrojová metoda radiačních vln byla aplikována v práci [18]. Vzorek skla je umístěn v silimanitovém kelímku o průměru 165 mm a výšce 500 mm. Ohřev se provádí v silitové peci, jejíž teplota je regulována tak, aby její průběh byl v závislosti na čase sinusový okolo určité střední hodnoty. Přitom se teplota ve sklovině měří termočlánky, z nichž jeden je umístěn v ose kelímku ($r = 0$), další u stěny kelímku ($r = r_0$), jak je patrné z obr. 5. Oba termočlánky zaznamenávají sinusový průběh teploty, přičemž mezi oběma sinusovkami existuje určitý fázový posun Θ , který je závislý na hodnotě teplotní vodivosti. Pro výpočet teplotní vodivosti α byl na základě rovnic přenosu tepla ve válci s radiálním tepelným tokem odvozen vztah

$$\alpha = \frac{r_0^2 \cdot \omega}{z^2}, \quad (13)$$

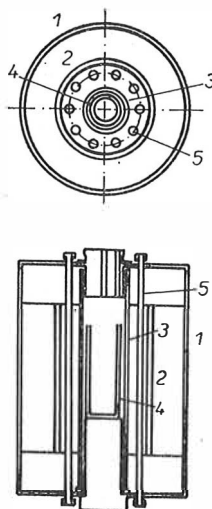
kde r_0 je poloměr kelímku (v místě měření teploty),

ω — úhlová rychlost teplotních kmitů,

z — je definováno rovnicí $\tan \Theta = \frac{\text{bei } z}{\text{bei } z}$, která je blíže vysvětlena v práci [18].

Teplotnou vodivost lze pak počítat na základě vztahu $\alpha = \frac{k}{c_p \cdot \gamma}$ takže by bylo možno tuto metodu označit i jako nepřímou.

Vedle již popsané měrné části umístěné v silitové peci se aparatura skládá z regulačního systému pro vytváření sinusových tepelných kmitů a z dalších pomocných zařízení pro odečítání fázového posunu. Tepelné kmity jsou používány ve dvou a čtyřhodinovém cyklu.



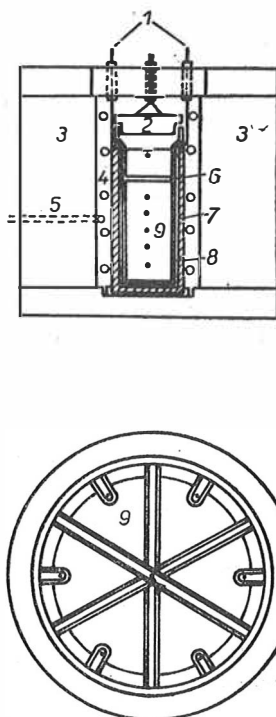
Obr. 5. Schéma zařízení pro měření teplotní vodivosti podle práce [18]; 1 — ocelový plášť, 2 — plášť ze zirkonové keramiky, 3 — korundové trubice, 4 — silitmanitový kelímek, 5 — silitové topné tyče.

Grove a Charnock [19] použili pro stanovení teplotní vodivosti skloviny modifikovanou Angströmovu metodu (která v klasické formě byla použita pro sklo v pevném stavu), přičemž jejich experimentální zařízení je jednodušší než právě popsané. Vzorek skla je nataven obdobně jako u předcházející metody ve vysokém válcovém kelímku v silitové peci, avšak její teplota je při měření udržována konstantní. Teplotní kmity jsou realizovány pomocí přídavného topného tělesa, umístěného nad kelímkem tak, že se v hodinových intervalech střídají periody s topením a bez topení. Teplota je měřena sedmi termočládky umístěnými v ose kelímku ve vzdálenostech 50 mm (obr. 6). Tvar teplotních vln byl prakticky sinusový a amplituda kmitů klesala od hladiny ke dnu kelímku. Výpočet teplotní vodivosti je založen na amplitudě teplotních kmitů podle vztahu:

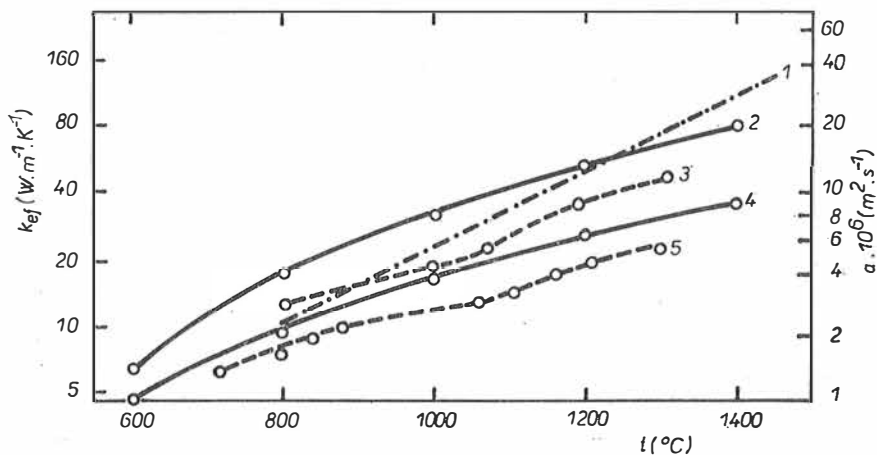
$$\alpha = \frac{(x_2 - x_1)^2}{\tau' \ln \frac{T_1^{\max} - T_1^{\min}}{T_2^{\max} - T_2^{\min}}}, \quad (14)$$

kde τ' je časová konstanta teplotního indikátoru,
 x_1, x_2 — body měření teploty.

Z výsledků získaných oběma popsanými metodami plyne, že získané hodnoty představují pouze jakési „efektivní“ teplotní vodivosti závislé na podmínkách měření, tj. na síle vrstvy a na okrajových podmínkách. Kromě toho se může nepříznivě projevit i vliv konvekce, která v daném uspořádání existuje a může být zdrojem chyb.



Obr. 6. Schéma zařízení pro měření teplotní vodivosti podle práce [19]; 1 — termočlánky, 2 — topná deska, 3 — pecní izolace, 4 — topné vinutí, 5 — kontrolní termočlánek, 6 — korundové trubice s termočlánkem, 7 — vnější keramický kelímek, 8 — vnitřní keramický kelímek, 9 — systém měrných termočlánků.

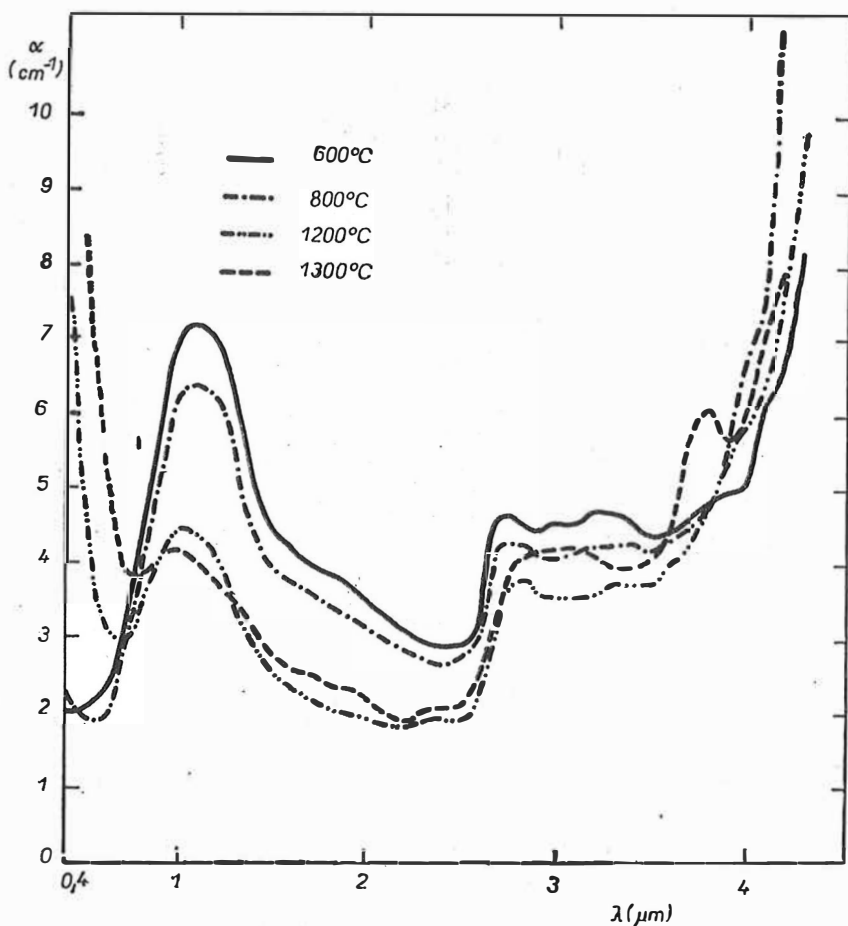


Obr. 7. Srovnání hodnot k_{ef} a teplotních vodivostí (a) podle práce [18] pro skla s různým obsahem Fe_2O_3 ; 1 — 0,033 % Fe_2O_3 , 2 — 0,27 % Fe_2O_3 , 3 — 0,27 % Fe_2O_3 , 4 — 0,57 % Fe_2O_4 , 5 — 0,57 % Fe_2O_3 (podle [19]).
— — — teplotní vodivost, — — — tepelná vodivost k_{ef} , — — — teplotní vodivost.

Autoři práce [19] proměřili dva vzorky skel s obsahem 0,27 a 0,57 % Fe_2O_3 , vypočetli z naměřených hodnot difuzivity i hodnoty k_{ef} (při použití zvolených hodnot c_p a γ) a tyto hodnoty porovnali s hodnotami k_r , k nimž byla připočtena odhadnutá hodnota pravé tepelné vodivosti ($k = 2,09 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Ze srovnání obou hodnot k_{ef} plyne (obr. 7), že hodnoty vypočtené ze vztahu $k_{\text{ef}} = k + k_r$ jsou v celém rozsahu teplot vyšší, přičemž u skla s nižší absorptivitou (0,27 % Fe_2O_3) jsou rozdíly až 100 %. To odpovídá našim úvahám uvedeným v kapitole 2.

3.3. Metody s tepelným zdrojem

Sem lze zařadit metody s konstantně působícím liniovým zdrojem (tzv. metoda žhavého drátu) a metody s impulsně působícím zdrojem. Obě byly použity v různých modifikacích, zejména pro oblast nižších teplot [20], [21], [22] pro oblast nataveného skla však zatím neposkytly uspokojivé výsledky, a proto je zde nepopisujeme.



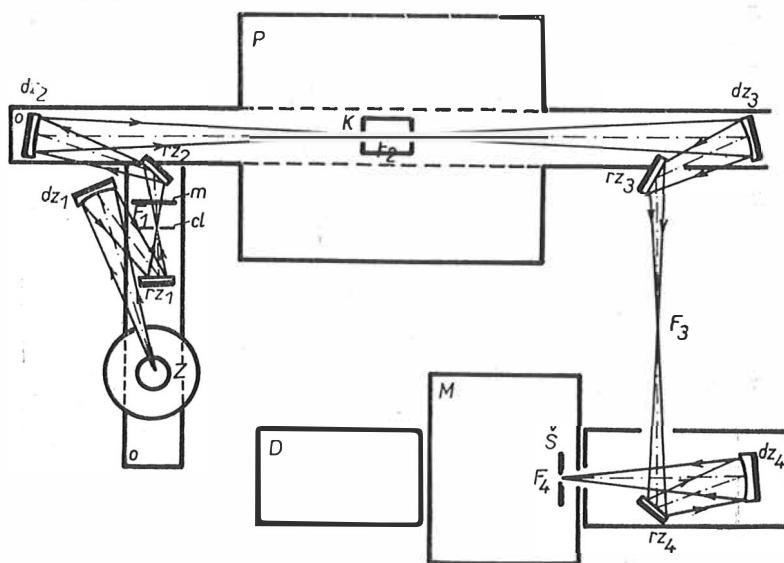
Obr. 8. Závislost absorpčního koeficientu α na vlnové délce λ pro modelové sklo barvené železem. Obsah Fe_2O_3 je 1 %, resp. FeO 0,34 %.

3.4. Metody nepřímé

Do této skupiny je možno zařadit obě již popsané metody nestacionární, které vedou přímo k určení difusivity, ze které je možno výpočtem určit hodnotu k_{ef} . Velmi důležitou nepřímou metodou, která byla s úspěchem aplikována při měření na sklovině až do teplot 1400 °C, je metoda spočívající v experimentálním určení světelné propustnosti skla v závislosti na vlnové délce a teplotě a ve výpočtu hodnoty k_r podle vztahu (8). Význam výrazu k_r byl vysvětlen již v kapitole 2, zde se omezíme pouze na metodickou stránku. Ta vychází ze skutečnosti, že většina běžných silikátových skel je propustná pro záření až do vlnových délek 4,5 μm. Od této vlnové délky se začne projevovat vliv vlastních vibrací SiO₂ a propustnost velmi prudce klesá. Největší propustnost je v blízké infračervené oblasti od 0,4 do 2,75 μm. Nad touto vlnovou délkou je propustnost několikrát menší v důsledku absorpční hrany volných OH skupin. Typická křivka závislosti absorpčního koeficientu na vlnové délce záření je uvedena na obr. 8. Pro přenos tepla zářením vzhledem k průběhu Planckovy vyzařovací funkce při tavicích teplotách je nejdůležitější oblast vlnových délek 0,4 až 4,5 μm. Přitom v oblasti 0,4 až 2,5 μm se projevuje svými absorpčními pásy většina barvicích kyslíčků. Uvedená metoda tedy spočívá v experimentálním stanovení absorpčního koeficientu α na základě Lambertova zákona:

$$\alpha = -\ln \cdot \frac{I/I_0}{d}, \quad (15)$$

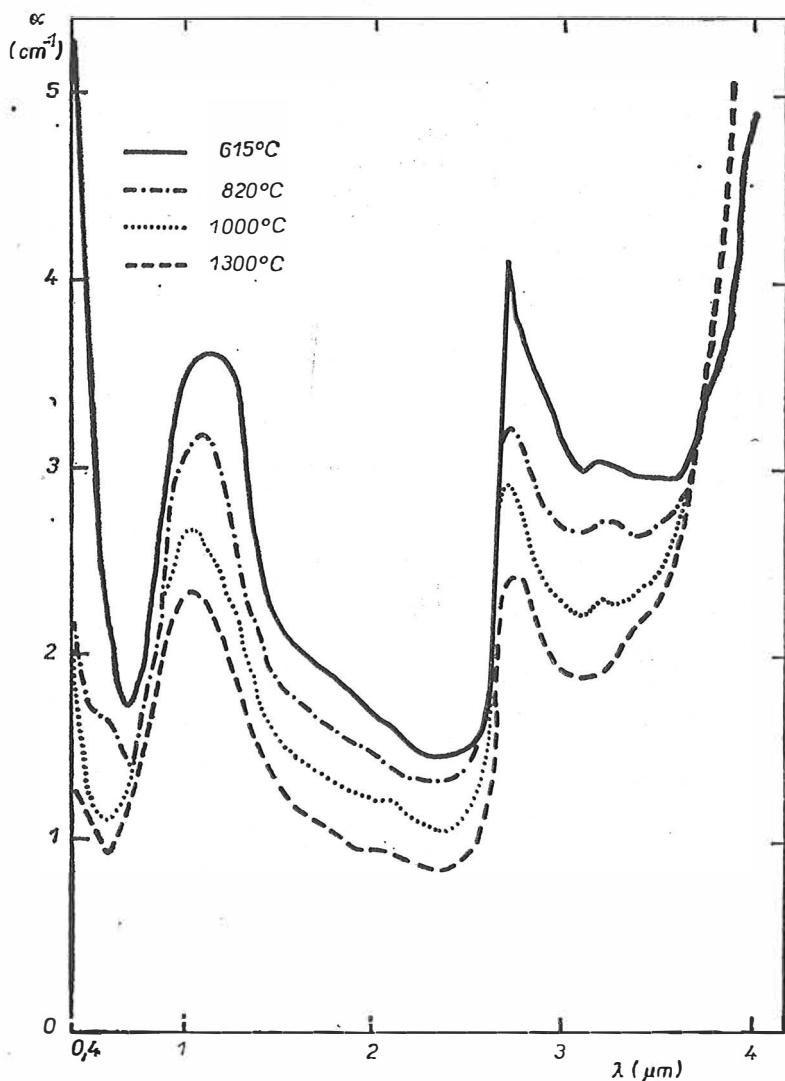
a v jeho aplikaci na rovnici (8).



Obr. 9. Schéma experimentálního zařízení pro měření absorpčních koeficientů α ; Z — zdroj světla (W-lampa), rz₁ ... rz₄ — rovinná zrcadla, dz₁ ... dz₄ — dutá zrcadla, F₁ ... F₄ — ohniška, cl — clona, m — modulátor, o — optická lavice, P — pec, K — kyveta, M — monochromátor, š — štěrbina, D — detektor.

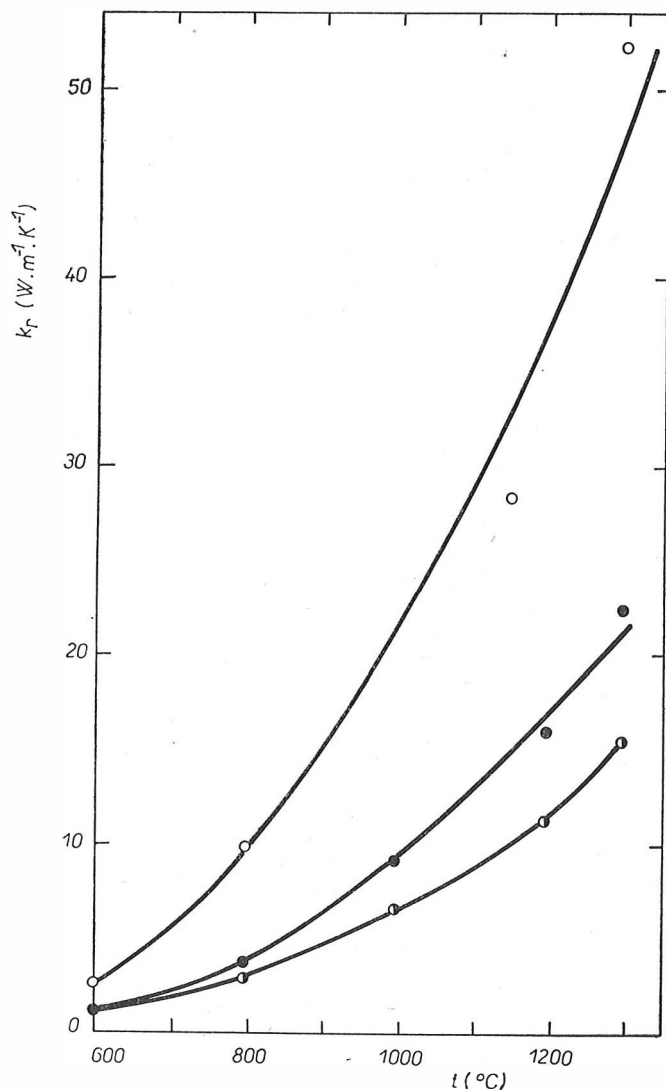
Měření světelné propustnosti za vysokých teplot se provádí pomocí různě upravených IČ spektrofotometrů s horizontálně nebo vertikálně směřovaným měrným paprskem světla, do jehož optické dráhy se vkládá zkoumaný vzorek skla. Natavení skla se přitom uskutečňuje většinou ve speciálních kelímcích nebo kyvetách opatřených okénky ze safíru, nebo z jiného materiálu propustného pro záření.

Typické uspořádání měření podle práce [23] je patrné z obr. 9. Poprvé byla tato metoda použita [24] v takovém uspořádání, že sklovina byla natavena v platinovém kelímku a světelný paprsek, který přicházel seshora, se odrazil od vyleštěného plati-



Obr. 10. Závislost absorpčního koeficientu α na vlnové délce λ pro skla typu Amber o obsahu 0,252 % Fe_2O_3 resp. 0,11 % FeO .

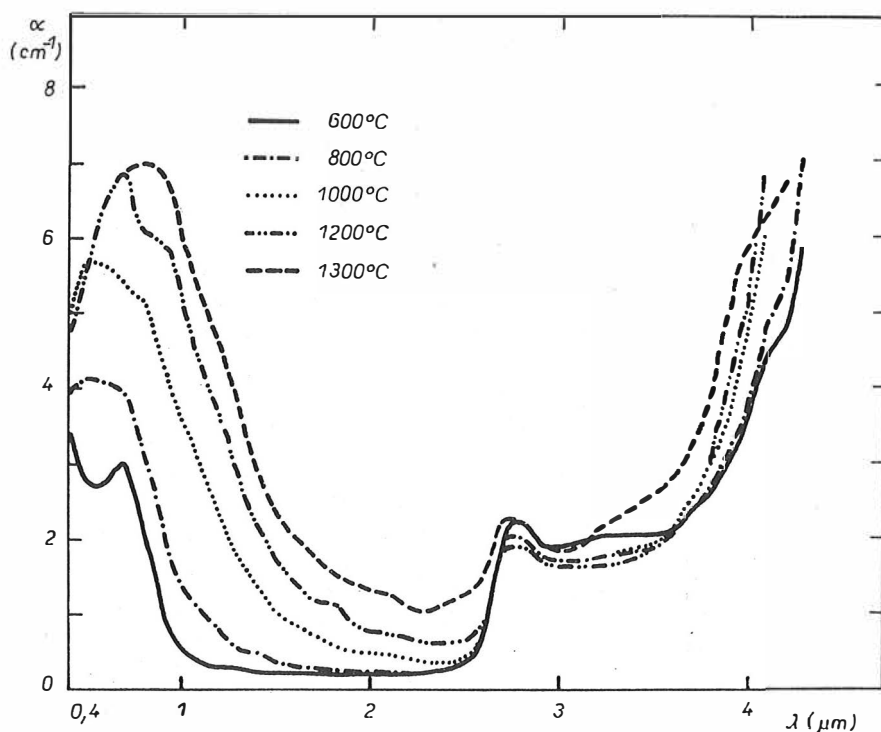
nového zrcátka ponořeného do kelímku se sklovinou a byl veden do monochromátoru. Vzhledem k tomu, že reflektivita tohoto zrcátka se během měření může měnit, použili pak další autoři [25], [26], [27], [28], [29] kelímky nebo kyvety propustné pro IČ záření. Ve všech případech však je třeba znát co nejpřesněji sílu vrstvy měřené skloviny, což vyžaduje podle způsobu uspořádání zavedení korekcí na roztažnost skloviny, roztažnost materiálu kyvety apod. Selektivita měření, která spočívá v oddělení měrného paprsku od vlivu záření pece v níž je vzorek umístěn, se dosahuje



Obr. 11. Teplotní závislost radiální tepelné vodivosti k_r pro skla typu Amber s různými obsahy FeO
○ — 0,019 % FeO; ● — 0,112 % FeO; ● — 0,175 % FeO.

používáním modulovaných měrných paprsků a vhodně upravených detekčních systémů. U některých sklovin byla pozorována koroze materiálu kyvety (safir), což ovšem může výsledky měření značně ovlivnit [30].

I když má radiační tepelná vodivost k_r vypočtená podle vztahu (8), jak bylo vysvětleno v kapitole 2, omezenou platnost, neboť představuje určitou limitní hodnotu přenosu tepla zářením, má veliký význam především v tom, že umožňuje hodnotit vliv zejména barvicích kyslíčků na hodnotu tepelné vodivosti, a tím



Obr. 12. Závislost absorpčního koeficientu α na vlnové délce λ pro skla barvená chromem o obsahu 0,3 % Cr_2O_3 .

posuzovat chování různých typů skel při tavení ve sklářské vaně. Barvicí kyslíčkové používání ve sklářské technologii se projevují svými absorpčními pásy zejména v oblasti vlnových délek 0,3 až 2,7 μm , která je za vysokých teplot pro přenos tepla zářením nejdůležitější. Např. u Fe^{2+} je to vlnová délka 1,1 μm , u Co^{2+} je to 0,6 a 1,4 μm , u Cr^{3+} je to 0,65 μm a Cr^{6+} je to vlnová délka 0,36 μm a u Mn^{3+} 0,65 μm .

Přitom u iontů, které mohou existovat ve více oxidačních stupních, se ustavuje rovnováha ovlivněná celkovým složením skla a podmínkami tavení. Tato rovnováha ovlivní i výsledné absorpční chování skla. Jako příklad průběhu absorpčních koeficientů v závislosti na teplotě uvádíme křivky pro sklovinu Amber (obr. 10), u nichž je patrný absorpční pás Fe^{2+} , který s teplotou klesá. Vliv obsahu Fe^{2+} na hodnotu tepelné vodivosti je zřejmý z obr. 11. Vzhledem k tomu, že Fe^{3+} se ve sledované oblasti vlnových délek neprojevuje absorpčním pásem, je hodnota k_r závislá pouze

na obsahu Fe^{2+} . Jinak je tomu např. u chrómu a manganu, které se projevují absorpčními pásy v obou oxidačních stupních. Na obr. 12 jsou absorpční koeficienty modelového skla, které obsahovalo 0,3 % Cr_2O_3 . Vzrůst hodnoty α s teplotou v oblasti kratších vlnových délek je způsoben posunem rovnováhy ve prospěch Cr^{6+} . Tento mechanismus pak vede ve svých důsledcích k poklesu radiační tepelné vodivosti při vysokých teplotách. U skel komplikovanějších, např. u zelené skloviny obsahující $\text{Fe}-\text{Cr}$, jsou pak redox podmínky pro ustavení rovnováhy valenčních stupňů mnohem komplikovanější a vedou k velkému rozptylu a nereprodukovatelnosti naměřených hodnot.

Z uvedeného vlivu barvicích kyslíčků lze možno odvodit některé zákonitosti a v některých případech empirické vztahy, na základě kterých je možno počítat hodnoty k_r z obsahu příslušných barvicích kyslíčků [30], [31]. Toho lze použít např. u skloviny typu Amber.

Závěrem hodnocení experimentálních metod stanovení tepelné vodivosti lze konstatovat, že neexistuje univerzální metoda, která by poskytla obecně využitelné výsledky. Při srovnání hodnot tepelných vodivostí k_{ef} získaných některou z metod přímých s hodnotami radiačních tepelných vodivostí k_r , nelze obecně dojít ke shodě výsledků, neboť podstata obou hodnot je rozdílná. Zejména u bezbarvých silně propustných sklovin i při použití dostatečně silné vrstvy skloviny, získáme celkový teplotní spád vždy větší, než odpovídá radiační tepelné vodivosti, vzhledem k teplotním skokům na rozhraních. U takových sklovin lze proto pro odhad teplotních spádů uvnitř skloviny použít spíše vypočtených hodnot k_r a počítat s vlivem pravé tepelné vodivosti v okrajových vrstvách, který vede k vyrovnání.

Je tedy zřejmé, že je třeba podrobit analýze hodnoty tepelných vodivostí získané některou z experimentálních metod, před jejich další aplikací v matematickém neb fyzikálním modelu.

4. POROVNÁNÍ HODNOT TEPELNÝCH VODIVOSTÍ VYBRANÝCH TYPŮ SKEL

V následující tabulce uvádíme pro vybrané druhy skel přehled hodnot tepelných vodivostí získaných některými, v kapitole 2 diskutovanými, experimentálními metodami.

Sklo č.	Druh tepelné vodivosti	Metodika měření	Tepelná vodivost Wm ⁻¹ K ⁻¹	Teplota °C	Odkaz	Složení skla %					
1*)	k	Metoda stacionární, s radiálním tokem tepla — horký drát	1,13	30	32	Float 72,7 SiO ₂ ; 0,82 Al ₂ O ₃ ; 0,047 Fe ₂ O ₃ ; 8,1 CaO; 3,74 MgO; 14,04 Na ₂ O; 0,41 K ₂ O; 0,30 SO ₃					
			1,20	100							
			1,28	200							
			1,37	300							
			1,46	400							
				1,50	500						
	k _{ef}	Metoda dutého válce s radiálním tepelným tokem. Síla stěny: 18,9 mm	5,72	760	33	dtto					
			6,82	890							
			9,21	1030							
			11,51	1140							
			16,04	1265							
				19,72	1335						
	k _r	Měření světelné propustnosti	4,405	600	33	dtto					
			16,350	800							
			41,798	1000							
110,250			1200								
137,02			1300								
2*)	k	Metoda stacionární s radiálním tokem tepla — horký drát	0,8	20	32	Amber 70,6 SiO ₂ ; 2,9 Al ₂ O ₃ ; 14,18 Na ₂ O; 0,64 K ₂ O; 8,21 CaO; 2,76 MgO; 0,296 Fe ₂ O ₃ ; 0,13 SiO ₂ (0,22 FeO)					
			1,21	100							
			1,36	200							
			1,50	300							
			1,65	400							
			1,80	500							
			2	k _{ef}			Metoda dutého válce s radiálním tepelným tokem. Síla stěny: 24,25 mm	4,50	730	33	dtto
5,80	795										
8,24	1015										
12,145	1160										
16,514	1239										
18,818	1263										
	k _r	Měření světelné propustnosti			0,833	600		33	dtto		
			2,589	800							
			5,715	1000							
			11,877	1200							
			14,655	1300							
			3	k _r	Měření světelné propustnosti	2,181	600			33	Amber 73,8 SiO ₂ ; 1,23 Al ₂ O ₃ ; 0,168 Fe ₂ O ₃ ; 7,9 CaO; 3,12 MgO; 13,0 Na ₂ O
						3,751	800				
9,127	1000										
15,78	1200										
2,32	1300										
4	k _r	Měření světelné propustnosti	2,592	600	33	Amber 76,50 SiO ₂ ; 5,25 CaO; 14,0 Na ₂ O; 3,90 K ₂ O; 0,044 Fe ₂ O ₃					
			9,797	800							
			28,35	1150							
			52,75	1280							

Sklo č.	Druh tepelné vodi- vosti	Metodika měření	Tepelná vodivost $Wm^{-1} K^{-1}$	Teplota $^{\circ}C$	Odkaz	Složení skla %
5	k	Desková metoda s lineárním tokem tepla — srovnávací	1,13 1,21 1,42 1,67 2,00	100 200 300 400 500	34	Pyrex
6	k_{ef}	Metoda dutého válece s radiálním tokem tepla. Síla stěny: 9 mm	1,04 1,21 1,54 1,71 2,21 2,72	200 400 600 800 1000 1200	16	Bílé okenní sklo
7	k_r	Měření světelné propustnosti	3,73 11,01 27,59 50,66 67,41	600 800 1000 1200 1300	33	Simax 80,5 SiO ₂ ; 1,95 Al ₂ O ₃ ; 3,45 Na ₂ O; 0,55 K ₂ O; 0,03 CaO; 0,02 MgO; 13,0 B ₂ O ₃ ; 0,1 Fe ₂ O ₃
8	k_r	Měření světelné propustnosti	2,34 9,29 24,20 47,31 56,10	600 800 1000 1200 1300	33	Sklo pro obrazovky 67,9 SiO ₂ ; 4,75 Al ₂ O ₃ ; 8,10 Na ₂ O; 6,55 K ₂ O; 0,50 Li ₂ O; 0,1 CaO; 10,65 BaO; 0,21 SrO; 0,073 Fe ₂ O ₃ ; 0,018 NiO; 0,35 Sb ₂ O ₃
9	k_r	Měření světelné propustnosti	0,46 1,13 2,26 4,19 5,15	600 800 1000 1200 1300	33	Sklo barvené kobaltkem 72,2 SiO ₂ ; 11,4 Na ₂ O; 7,0 K ₂ O; 7,5 CaO; 0,4 B ₂ O ₃ ; 0,75 CoO; 0,4 Sb ₂ O ₃
10	k_r	Měření světelné propustnosti	3,87 19,37 24,82 16,37 13,69	600 800 1000 1200 1300	33	Sklo barvené manganem 60,0 SiO ₂ ; 7,0 Al ₂ O ₃ ; 19,5 Na ₂ O; 6,5 CaO; 3,5 MgO; 2,8 MnO ₂ ; 0,70 F
11	k_{ef}	Měření světelné propustnosti	0,131 0,283 0,549 1,11	600 800 1000 1200	33	Modelové sklo barvené niklem 69,79 SiO ₂ ; 0,4 K ₂ O; 9,6 CaO; 0,21 NiO
12	k_r	Měření světelné propustnosti	8,06 18,59 22,72 20,44 23,65	600 800 1000 1200 1300	33	Zelené lahvové sklo 70,88 SiO ₂ ; 1,77 Al ₂ O ₃ ; 13,57 Na ₂ O; 0,69 K ₂ O; 9,04 CaO; 2,89 MgO; 0,24 Fe ₂ O ₃ ; 0,13 Cr ₂ O ₃ ; 0,25 SO ₃

Sklo č.	Druh tepel- né vodi- vosti	Metodika měření	Tepelná vodivost $Wm^{-1} K^{-1}$	Teplota $^{\circ}C$	Odkaz	Složení skla %
	k_{et}	Metoda dutého válece s radiálním tepelným tokem Síla stěny: 23,75 mm	2,95 3,78 4,61 7,48 11,17 14,90 17,41 22,06	512,8 660,1 769,0 920,8 1061,5 1145,9 1237,4 1358,6	33	dtto
13	k_r	Měření světelné propustnosti	0,139 0,288 0,475 0,566 0,526	600 800 1000 1100 1230	33	Svářečské brýlové sklo 66,9 SiO ₂ ; 3,35 Al ₂ O ₃ ; 16,3 Na ₂ O; 0,05 K ₂ O; 3,65 CaO; 0,08 MgO; 8,85 Fe ₂ O ₃ ; 0,10 MnO ₂ ; 0,02 NiO; 0,06 CoO; 0,01 CuO
14	k_{et}	Metoda dutého válece s radiálním tepelným tokem. Síla stěny: 24,25 mm	2,14 2,28 2,27 2,74 3,21 2,84 3,59	731 735,8 882,9 984,3 1108,7 1182,8 1289,6	33	dtto

*) Měření provedená v rámci mezinárodní spolupráce ICG

Literatura

- [1] Czerny M., Genzel L.: *Glastech. Ber.* 25, 134 (1952).
- [2] Geffcken W.: *Glastech. Ber.* 25, 342 (1952).
- [3] Genzel L.: *Z. Phys.* 135, 77 (1953).
- [4] Condon E. U.: *Journ. Quantit. Spectroscopy and Radiative Transfer* 8, 369 (1968).
- [5] Siegel R., Howell J. B.: *Thermal Radiation Heat Transfer*, McGraw-Hill Book Company, New York 1972.
- [6] Anderson E. E., Viskanta R.: *J. Am. Cer. Soc.* 56, 541 (1973).
- [7] Anderson E. E., Viskanta R.: *Combined Conduction and Radiation in Semitransparent Solids; An Experimental and Analytical Study*. PhD thesis, Purdue University, Lafayette, Ind. 1972.
- [8] Blažek A., Endrýs J., Ederová J., Kada J., Rosmusová J.: *Studium tepelných vlastností skloviny*. Výzkumná zpráva státního úkolu IV-5-3/1b VŠCHT Praha, katedra technologie silikátů, květen 1980.
- [9] Ratcliffe E. H.: *British Journal of Appl. Physics* 10p, 22 (1959).
- [10] Birch F., Clark H.: *Amer. J. of Science* 238, 529 (1940).
- [11] Sugawara A.: *J. of Appl. Physics* 39, 5994 (1968).
- [12] Kruszewski L.: *J. Am. Cer. Soc.* 44, 333 (1961).
- [13] Stephens R. W. B.: *Philosophical Magazin* 14, 897 (1932).
- [14] Wray K. L., Connolly T. J.: *J. of Appl. Physics* 30, 1702 (1959).
- [15] Gutop V. G.: *Stekol. prom.* [11—12], 24 (1940).
- [16] Eckhardt G.: *Glastech. Ber.* 32, 373 (1959).

- [17] Kröger C., Elligehausen H.: *Glastech. Ber.* 32, 362 (1959).
- [18] Van Zee A. F., Babcock C. L.: *J. Am. Cer. Soc.* 34, 244 (1951).
- [19] Grove F. J., Charnock H.: *Glastech. Ber.* 32, Sonderband, Heft VII, 24 (1959).
- [20] Schill F., Dušánek V.: *Měření tepelné vodivosti skla v závislosti na teplotě*. SVÚS Hradec Králové, Informativní přehled 1975, č. 1, 18, p. 12.
- [21] Hašková E.: *Sklář a keramik* 25, 197 (1957).
- [22] Hayashi K., Fukui M., Hei J.: *Determination of Thermal Conductivity of Solid Materials by Means of the Hot Wire Method*. Memoirs of Faculty of Industrial Arts Kijoto Techn. Univ. 20, 1971.
- [23] Blažek A., Endrýs, J., Kada J., Staněk J.: *Glastech. Ber.* 49, 75 (1976).
- [24] Genzel L.: *Glastech. Ber.* 24, 55 (1951).
- [25] Grove F. J., Jellyman P. E.: *J. Soc. Glass Technol.* 39, 3T (1955).
- [26] Scholze H.: *Glastech. Ber.* 32 K, Heft VII., S. VII/1—VII/5 (1959).
- [27] Franz H.: *Proceedings 9. Congr. intern. of Glass*, Sect. AI.2, 243—259, Versailles 1971.
- [28] Coenen M.: *Glastech. Ber.* 41, 1 (1968).
- [29] Wedding B.: *J. Amer. Ceram. Soc.* 58, 102 (1975).
- [30] Blažek A., Endrýs J., Tydlitát V., Kada J., Staněk J.: *Proceedings 9. Congress International of Glass*, Sekce A 1.7, 735—755, Versailles 1973.
- [31] Blažek A., Endrýs J., Kada J., Ederová J., Rosmusová J.: *Vliv některých kyslíčků na radiální tepelnou vodivost skloviny*. Zpráva řešení úkolu IV-5-3/1b; VŠCHT Praha 1977.
- [32] Champomier F., Guillement C.: *Service Central de Rech. Saint Gobain Ind. Francie* — soukromé sdělení.
- [33] Blažek A., Endrýs J., Ederová J., Kada J.: *VŠCHT Praha*, vlastní měření.
- [34] Kingery W. D.: *J. Amer. Ceram. Soc.* 44, 302 (1961).