



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

OVĚŘENÍ METODIKY MĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH
CHARAKTERISTIK TEPELNÉ VODIVOSTI A TEPELNÉ
KAPACITY STAVEBNÍCH LÁTEK METODOU „HOT WIRE
METHOD“

VERIFICATION OF THE PROCESS OF MEASUREMENT OF THERMAL
CONDUCTIVITY AND HEAT CAPACITY OF BUILDING MATERIALS USING
THE HOT-WIRE METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Průša

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	David Průša
Název	Ověření metodiky měření materiálových charakteristik tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“
Vedoucí práce	prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Šťastník, S., Vala, J., Kmínová, H. Identification of basic thermal technical characteristics of building materials, *Kybernetika* 42, Praha 2007
2. Vala, J., Šťastník, S. On the thermal stability in dwelling structures. *Building Research Journal* 52/1, Bratislava 2004, 31-56.
3. Davies M.G., *Building Heat Transfer*, John Wiley & Sons, 2004
4. Bogoslovskij, V.N., *Stroitel'naja teplofizika*, Vysšaja škola Moskva 1982
5. Halahyja, M., *Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie*, Alfa Bratislava 1985
6. Isakov V., *Inverse Problems for Partial Differential Equations*, Applied Mathematical Sciences (Springer-Verlag), Vol 127, 2nd ed., 2006

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Pro identifikaci tepelně-technických vlastností stavebních materiálů se používá řada fyzikálních metod, z nichž metoda horkého drátu je rychlou metodou, které lze využít i při měření v průběhu změny stavu zkoušeného materiálu. Dosud však chybí pro tuto metodu efektivní a spolehlivá metoda pro zjištění hledaných fyzikálních veličin.

V rámci bakalářské práce proveďte:

- i) klasifikaci stavebních materiálů z hlediska jejich tepelně-izolačních a tepelně-akumulačních vlastností,
- ii) sestavte přehled dostupných metod pro měření uvedených materiálových charakteristik,
- iii) navrhnete vhodný postup pro zjištění hledaných fyzikálních veličin pro oblast tepelných izolantů,
- iv) podle poznatků z provedených zkoušek na vybraném tepelném izolantu proveďte odhad reprodukovatelnosti výsledku,
- v) ověřte využitelnost dosavadních poznatků o materiálové identifikaci pro širší třídu stavebních materiálů.

Při vypracování bakalářské práce dbejte zásad platných na FAST VUT Brno; praktická část do 20 % rozsahu; celkový rozsah do 40 stran včetně tabulek a grafů.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Předložená práce se zabývá studiem mechanismů šíření tepla a popisem fyzikálních jevů provázející nestacionární měření metodou horkého drátu. Zvláštní pozornost je věnována součiniteli tepelné vodivosti, jeho závislosti na teplotě, vlhkosti, pórovitosti a objemové hmotnosti. Uvedeného principu je využito k návrhu konstrukce jednoduchého nestacionárního měřidla, jež vychází z procesu tzv. regulárního ohřevu a věnuje se nestacionární metodě měření tepelné vodivosti a tepelné kapacity metodou „hot-wire“. V praktické části jsou předloženy dosavadní poznatky a rozšíření o princip současného stanovení tepelné kapacity staviv oproti srovnatelným metodám.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelná vodivost, teplotní vodivost, měrné teplo, nestacionární měřidlo tepelné vodivosti, metoda horkého drátu.

ABSTRACT

This aim of task deals with the study of heat dissipation mechanisms and description of physical phenomena accompanying non-stationary measurements by hot wire method. Particular attention is given to the coefficient of thermal conductivity and its dependence on temperature, humidity, density and porosity. These principles are used to design a simple non-stationary device based on regular heating process and deals with measuring of thermal conductivity and thermal capacity by hot wire method. In the second part are presented previous knowledge and enlargement on new principles of measuring thermal conductivity and thermal capacity.

KEYWORDS

Thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat, nonstationary device for thermal analysis, hot wire method.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

David Průša
autor práce

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli prof. RNDr. Ing. Stanislavu Šťastníkovi, CSc za metodické vedení mé bakalářské práce a za cenný čas, který mi vždy ochotně věnoval při konzultacích.

Velké díky patří mé rodině, Bohu a hlavně Michaele, bez které by tato práce nikdy nevznikla.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

David Průša *Ověření metodiky měření materiálových charakteristik tepelné vodivosti a tepelné kapacity stavebních látek metodou „Hot Wire Method“*. Brno, 2017. 46 stran. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

Obsah

Úvod do řešené problematiky	1
1 Teoretické poznatky o mechanismech šíření tepelné energie	2
1.1 Mechanismy šíření tepla	2
1.1.1 Šíření tepla vedením	3
1.1.2 Šíření tepla prouděním	6
1.1.3 Šíření tepla sáláním	8
1.2. Tepelné vlastnosti	9
1.2.1 Tepelná vodivost	9
1.2.1.1 Vliv pórovitosti, hustoty, objemové hmotnosti na součinitel tepelné vodivosti	11
1.2.1.2 Vliv teploty a vlhkosti na tepelnou vodivost	13
1.2.1.3 Vliv směru tepelného toku na tepelnou vodivost	16
1.2.1.4 Vliv struktury materiálu na tepelnou vodivost	17
1.2.1.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti.....	17
1.2.2 Tepelná kapacita	18
1.2.3 Součinitel teplotní vodivosti.....	19
1.2.4 Tepelná jímavost	21
1.2.5 Součinitel prostupu tepla a tepelný odpor	21
1.3. Metody měření součinitele tepelné vodivosti	23
1.3.1 Stacionární metody měření	23
1.3.1.1 Deskový přístroj dle Poensgena	23
1.3.1.2 Podobné deskové přístroje	25
1.3.1.3 Poensgenův jednostranný přístroj	25
1.3.1.4 Cammererův přístroj	26
1.3.1.5 Raischův přístroj	26
1.3.1.6. Přístroj Dr. Bocka	26
1.3.1.7 Válcový přístroj dle van Rinsuma	27
1.3.1.8 Kulový přístroj dle Nusselta	27
1.3.2 Nestacionární metody měření	28
1.3.2.1 Fitchova metoda	28
1.3.3 Novější metody měření součinitele tepelné vodivosti	29
1.3.3.1 Přístroj ISOMET 2104	29
1.3.3.2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu	30

2	Praktické měření součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity pomocí experimentálního měřidla	33
	2.1 Modifikovaná metoda horkého drátu pro měření součinitele tepelné vodivosti	33
	2.2 Měřicí přístroj s označením Michaela	33
	2.3 Přehled materiálů, na kterých bylo prováděno experimentální ověření funkčnosti přístroje Michaela	37
	2.3.1 Beton	37
	2.3.2 Dřevo a výrobky ze dřeva	38
	2.3.3 Anorganické vláknité materiály	38
	2.3.4 Polystyrén	38
	2.4 Průběh měření	39
	2.5 Výsledky měření a vyhodnocení výsledků	40
3	Závěr	44
	Seznam použité literatury	46

Úvod do řešené problematiky

Důležitou součástí projektování a výstavby budov je znalost tepelné vodivosti materiálů používaných pro konstrukce. Jedná se především o obvodové zdivo, podlahy, střešní konstrukce, otvory, nátěry a izolace. Parametry tepelné vodivosti materiálů jsou stále významnější pro posouzení kvality tepelné izolace budov. Dobře tepelně izolovaná budova přináší značné snížení spotřeby energie, která je potřebná pro vytápění, a přispívá tak nepřímo k omezení spotřeby zdrojů tepla, jako jsou fosilní paliva, především zemního plynu, v menší rozsahu pak kamenného uhlí a je též snižována produkce skleníkových plynů. Přímo pak dochází k úspoře elektrické energie.

Tato práce řeší stále aktuální problematiku tepelných fyzikálních veličin, zejména se zabývá tepelnou vodivostí vyjádřenou součinitelem tepelné vodivosti.

V teoretické části práce se věnuji teorii mechanismů šíření tepla a jejich matematicko-fyzikálnímu popisu. Po uvedení do problematiky přenosu tepelné energie je další část věnována tepelným veličinám, které popisují přenos tepelné energie a to tepelné vodivosti, teplotní vodivosti a měrnému teplu.

Zvláštní pozornost věnuji součiniteli tepelné vodivosti, jeho závislosti na teplotě, vlhkosti, pórovitosti a objemové hmotnosti, které určují stav materiálu.

V následující části se zabývám teorií měření tepelné vodivosti různými metodami, kde je hlavní pozornost věnuji nestacionární metodě měření tepelné vodivosti metodou „*hot-wire*“. Tato část reprezentuje dosavadní informace v této oblasti, které jsou doplněny v praktické části o nové poznatky.

V praktické části jsem vyřešil návrh experimentálního měřidla pro měření vodivosti a kapacity, které jsou vhodnou metodou měření i při zachování nízkých výrobních nákladů na pořízení měřidla.

1 Teoretické poznatky o mechanismech šíření tepelné energie

1.1 Mechanismy šíření tepla

Základy teorie tepelně technických vlastností materiálů tvoří především zákony šíření tepla, migrace vlhkosti a filtrace vzduchu. Zákony charakterizují jejich určující veličiny, jejichž hodnoty se následně dále využívají při řešení tepelně technických a energetických problémů budov.

Sdílení tepla (přenos tepelné energie) je nerovnoměrný, termodynamický děj, který probíhá s konečnou rychlostí v prostoru a čase. a může nastat třemi různými mechanismy:

- vedením (kondukcí) - teplo přechází z teplejších míst tělesa na místa studenější, energii si vyměňují jen bezprostředně spolu sousedící částice.
- prouděním (konvencí) – teplo přenáší látky při svém proudění, což se projevuje jen v kapalinách a nebo v plynech. Částice látky mění v prostoru svou polohu ve větším měřítku a unášejí přitom svou energii s sebou.
- sáláním (radiací) – teplo se šíří z tělesa všemi směry ve formě elektromagnetického vlnění o určité vlnové délce [1].

Velmi často převažuje jeden mechanismus nad ostatními, pak můžeme při výpočtech brát v úvahu pouze dominantní mechanismus a podřadným mechanismům nepřihlížet. Pokud nelze předpokládat jediný dominantní mechanismus musíme uvažovat o složeném sdílení tepla (například v pecích).

Tepelným tokem nazýváme tok tepla, který přechází od tělesa s vyšší teplotou k tělesu s nižší teplotou při jejich těsném styku nebo tok proudící prostředím, jímž jsou tělesa obklopena a kterým může procházet vyzařování (sálání).

Přestupem tepla nazýváme výměnu tepla mezi stěnou tuhého tělesa a obtékající kapalinou či plynem.

Prostupem tepla nazýváme sdílení tepla mezi dvěma tekutinami oddělnými tuhou deskou [1].

V tepelné technice budov se zpravidla předpokládá, že se šíří teplo:

- a) prouděním a sáláním mezi vzduchem a povrchovou konstrukcí,
- b) vedením v pevných vrstvách konstrukcí,
- c) vedením, prouděním a sáláním ve vrstvách konstrukcí vyplněných vzduchem (plynem).

1.1.1 Šíření tepla vedením

Vedení (kondukce) tepla je jeden ze způsobů šíření tepla v tělesech, při kterém částice látky v oblasti s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie prostřednictvím vzájemných srážek částicím v oblasti s nižší střední kinetickou energií. Částice se přitom nepřemísťují, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Šíření tepelné energie v pevných látkách vedením nastane předáním kinetické energie mezi molekulami vlivem teplotních rozdílů. Šíření tepla vedením probíhá i v kapalných a plynných látkách, zde se ovšem uplatňuje ve větší míře šíření spíše tepla prouděním [2].

Molekuly mají v místě s vyšší teplotou vyšší kinetickou energii. Molekuly s vyšší kinetickou energií předávají část své kinetické energie sousedním částicím s nižší pohybovou energií. K tomu dochází prostřednictvím srážek částic. Částice se ale v objemu hmoty nepohybují, pouze oscilují kolem své rovnovážné polohy.

Rychlost, s jakou se tepelná energie šíří v prostředí, popisuje tepelná vodivost. Porovnání různých látek pak umožňuje fyzikální veličina zvaná součinitel tepelné vodivosti. Hodnota součinitele tepelné vodivosti pak v praxi rozděluje materiály na tepelné vodiče a tepelné izolanty. Vedení tepelné energie vedením pak rozdělujeme z hlediska dynamiky na stacionární a nestacionární [3].

Pro případ stacionárního vedení tepelné energie budeme uvažovat jednoduchou, rovinnou desku o tloušťce d , jejíž konce jsou udržovány na konstantních teplotách t_2 a t_1 ($t_1 > t_2$) a deska je homogenní a izotropní, a proto proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám. Podíl rozdílu teploty na teplém a studeném konci látky a vzdáleností obou konců se nazývá teplotní gradient (teplotní spád) a jeho jednotkou je $K.m^{-1}$.

$$gradt = \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Pak platí, že množství přeneseného tepla Q_t (velikost tepelného toku), které prochází plochou S desky za čas τ , je dáno vztahem:

$$Q_\tau = -\lambda \cdot \tau \cdot S \cdot \frac{dt}{dx} = \lambda \cdot \tau \cdot S \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Teplo procházející plochou S určuje tzv. tepelný tok. Množství tepla, které projde plochou za čas, se nazývá hustota tepelného toku.

$$q = \frac{Q_\tau}{\tau S}$$

Po dosazení platí:

$$q = -\lambda \frac{t_1 - t_2}{d}$$

Pokud se vzdálenost d zmenšuje na dx , pak se mění na této vrstvě teplota o hodnotu $-dt$, po dosazení platí:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}$$

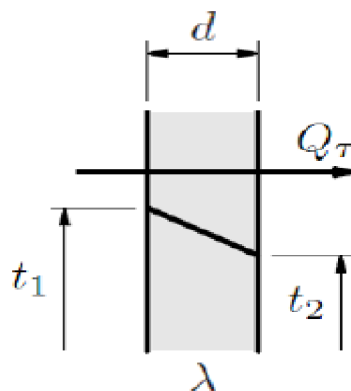
Jedná se o vektorovou veličinu což lze zapsat:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}t$$

Tento vztah je znám jako Fourierův zákon, který se dá rozepsat do složek:

$$\vec{q} = \vec{q}_{x,i} + \vec{q}_{y,i} + \vec{q}_{z,i}$$

Slovně vyjádřeno, hustota tepelného toku q je úměrná teplotnímu gradientu. Konstanta úměrnosti λ se nazývá součinitel tepelné vodivosti. Tento zákon byl odvozen z empirického poznatku, že množství tepla, které se převede mezi rovnoběžnými deskami různé teploty, které jsou ve vzdálenosti dl , je úměrné rozdílu teplot obou desek, ploše a času a nepřímo úměrné jejich vzdálenosti. Rovnice lze použít k výpočtu hustoty tepelného toku, ale nelze ji použít k výpočtu průběhu teplotního pole. Pro tento případ je nutno použít vztahu, kde se odvodí z energetické bilance elementárního objemu [1].



Obrázek 1: Schéma při stacionárním vedení tepla jednoduchou, homogenní, izotropní deskou [1]

Řešení nestacionárních polí v pevných tělesech je zvláštní případ energetických bilancí neustálených dějů, který odpovídá časově neustálenému sdílení tepla vyvolanému jiným tepelným způsobem na toto těleso. Mnohdy se zde setkáváme s nestacionárním vedením tepla při ohřevu nebo ochlazení těles, které v technické praxi značný význam.

Při nestacionárním (neustáleném) vedení tepelné energie dochází ke změně teploty v jednotlivých částech tělesa [1].

Budeme-li uvažovat případ vedení tepelné energie deskou, které nastane při náhlém zvýšení teploty na jednom povrchu desky a desku rozdělíme na plochy o tloušťce Δx , pak se bude hodnota tepelného toku v jednotlivých vrstvách lišit, to je zapříčiněno tím, že část tepla, které do vrstvy vstoupí, se spotřebuje na její ohřátí a tuto tepelnou energii je pak tepelný tok v následující vrstvě nižší.

Teplo, které do vrstvy desky o tloušťce Δx , ploše S a za čas $\Delta\tau$, vstupuje, pak je rovno:

$$Q_1 = q_1 S \Delta\tau$$

Teplo, které vystoupí ze stejné vrstvy a za stejný čas je pak rovno:

$$Q_2 = q_2 S \Delta\tau$$

Platí tedy:

$$Q_1 - Q_2 = (q_1 - q_2) S \Delta\tau = -\Delta q S \Delta\tau$$

Vrstva má určitou měrnou tepelnou kapacitu c , objemovou hmotnost ρ , hmotnost Δm a střední teplotu t . Platí vztah:

$$\Delta m = \rho S \Delta x$$

Přírůstek střední teploty vrstvy za čas $\Delta\tau$ označíme Δt a tento přírůstek odpovídá právě rozdílu tepel, které do desky vstoupí a které z desky vystoupí.

Pak platí:

$$Q_1 - Q_2 = c \Delta m \Delta t$$

Po dosazení do předešlých vztahů pak dostaneme rovnici:

$$-\Delta q \Delta\tau = c \rho \Delta x \Delta t$$

Po vhodné úpravě získáme rovnici:

$$\frac{\Delta t}{\Delta\tau} = -\frac{1}{c\rho} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta x}$$

Přechodem k limitě Δx a $\Delta\tau$ se blíží k nule dostaneme:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau} = -\frac{1}{c\rho} \cdot \frac{\partial q}{\partial x}$$

Derivací jednorozměrného Fourierova zákona $q = -\lambda \frac{dt}{dx}$ dle x získáme:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = -\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Pro časovou změnu střední teploty vrstvy získáme pak rovnici:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Tato rovnice představuje jednorozměrnou diferenciální rovnici vedení tepelné energie.

Pro vícerozměrný případ obecně platí:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 t = 0$$

Fundamentální řešení diferenciální rovnice vedení tepelné energie v n rozměrech je:

$$\Phi(x, \tau) = \frac{\chi_{[0, \infty)}(\tau)}{(4\pi\tau)^{n/2}} e^{-\frac{|x|^2}{4a\tau}}$$

Pro zjednodušení se zavádí veličina zvaná teplotní vodivost. Značí se písmenem a , někdy jako k a udává, jak se v daném materiálu vyrovnávají teplotní rozdíly [4].

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

1.1.2 Šíření tepla prouděním

Přenos tepelné energie prouděním je charakteristický pro tekuté a plynné látky (případně plazmatu, 4 skupenství), u pevných látek není možné.

Proudění je vyvoláno uměle, například ventilátorem, nebo přirozeně vlivem sdílení tepelné energie.

Dochází zde k přenosu energie z místa o vyšší teplotě na místo o nižší teplotě makroskopickým tokem částic, tj. z hlediska teorie spojitého prostředí přesunem velkých souborů molekul. Ve vícesložkových soustavách se při sdílení hmoty vytvoří koncentrační gradient, který způsobí difúzi částí a odpovídající difúzní přenos energie.

Ten souvisí se sdílením hmoty a ve srovnání s přenosem tepla vlivem proudění není obvykle významný. Přenos energie prouděním je vázaný na pohybující se částice a je o řád až dva intenzivnější než prosté molekulární sdílení (vedení tepla) v téže látce. Oba typy přenosů energie probíhají v pohyblivém prostředí souběžně [2].

Intenzita přenosu energie prouděním závisí na složce intenzity pohybu částic ve směru požadovaného sdílení tepla, tj. směrem k fázovému rozhraní nebo od fázového rozhraní, které představuje plochu tepelné výměny neboli teplosměnnou plochu. Přičemž hlavní proudění tekutiny probíhá podél tohoto fázového rozhraní.

Proudění tekutiny při sdílení tepla je, jak již bylo řečeno, je volné nebo nucené. Volné je vyvoláno pouze rozdílem hustot (vlivem rozdílu teplot) u teplosměnné plochy a v jádru tekutiny.

Až na výjimky, například voda v rozmezí teplot 0 až 4 °C, klesá hustota tekutiny se vzrůstající teplotou. Potom platí, že u teplosměnné plochy s nižší teplotou, než je teplota v jádru tekutiny dochází v gravitačním poli Země k pohybu tekutiny směrem dolů.

V jádru tekutiny, kde je vyšší teplota, dochází naopak k pohybu tekutiny směrem vzhůru.

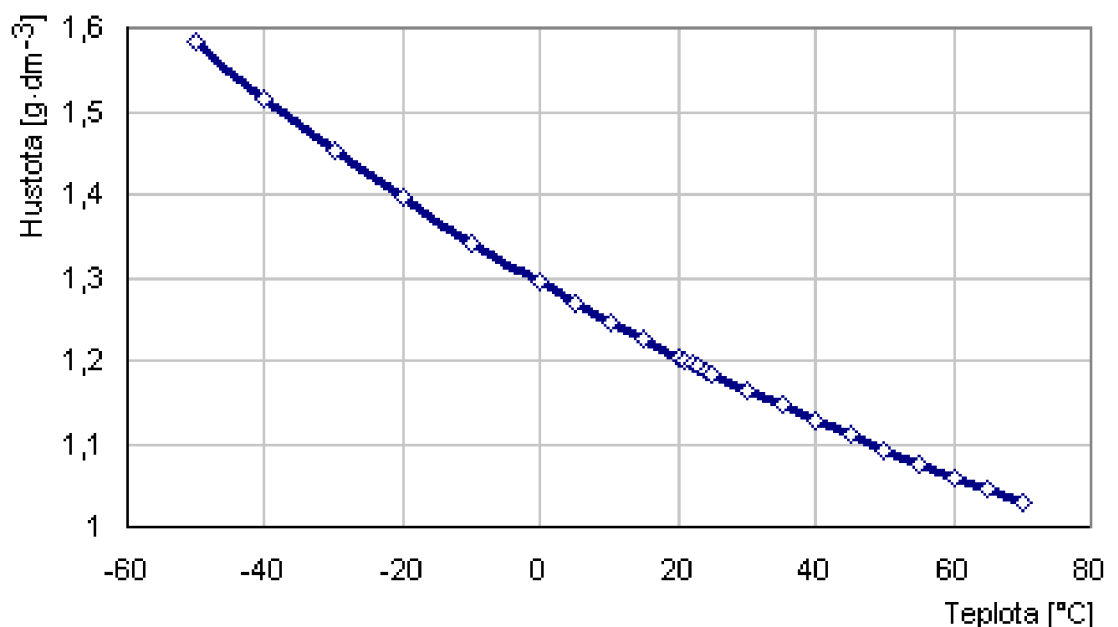
V blízkosti nehybné teplosměnné plochy je rychlost proudění nízká, a proudění je zde proto laminární i při turbulentním proudění v jádru tekutiny.

Pro tento případ platí, že se zde vytváří laminární podvrstva, v níž se tekutina pohybuje pouze podél teplosměnné plochy. Napříč touto laminární podvrstvou nemůže tedy nastat přenos energie pohybem částí, ale jen jejich molekulárním pohybem, tedy vedením tepla.

Z jádra tekutiny se energie na rozhraní s laminární podvrstvou přenáší nejen se vedením tepla, ale i pohybem tekutiny. Turbulentní fluktuace rychlosti v jádru tekutiny zvyšují intenzitu přenosu energie. V laminární podvrstvě se přenáší energie pouze vedením. Celý tento mechanismus se nazývá sdílení tepla prouděním.

Stejný mechanismus přenosu energie je při nuceném proudění, které může být realizováno různým způsobem.

Z toho vyplývá různá intenzita přenosu energie prouděním. Například nucené proudění může být realizováno rozdílem tlaků nebo samospádem v trubce, nehybné vrstvě sytkého materiálu, v cyklónu, v nádobě s mechanickým míchadlem [5].



Obrázek 2: Graf závislosti vlivu teploty na hustotě vzduchu za normálního tlaku [5]

1.1.3 Šíření tepla sáláním

Sálání je proces, při kterém látka emituje energii do prostoru ve formě elektromagnetického záření.

Na rozdíl od přenosu tepla vedením nebo prouděním není přenos tepelné energie sáláním podmíněn látkovým prostředím, avšak za předpokladu, že jsou tělesa v prostředí, které propouští záření. Takové prostředí nazýváme transparentní. V praxi to znamená, že k sálání dochází i ve vakuu.

Ke sdílení tepla sáláním dochází mezi dvěma tělesy tak, že se z jednoho tělesa energie ve formě elektromagnetického vlnění přenáší na druhé těleso. Opačný proces nastává u druhého tělesa, které část energie, která dopadne na povrch, absorbuje a přemění jí na vnitřní energii (absorbovaná radiální energie) a část odrazí.

Výkon vyzařujícího předmětu závisí na jeho povrchu S a teplotě T (v kelvinech) a je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4$$

Kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a ε je označení pro emisivitu povrchu předmětu a nabývá hodnot z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$.

Předmět s emisivitou rovno nule je pak nazýváme bílý zářič a předmět s emisivitou rovno hodnotě jedna pak nazýváme černý zářič (záření Slunce se poměrně dobře blíží záření absolutně černého tělesa s teplotou přibližně 5800 Kelvinů).

Výkon, s jakým předmět absorbuje energii tepelného záření, je:

$$P_a = \sigma \varepsilon S T_0^4$$

Předmět, o teplotě T , vyzařuje energii do okolí, ale současně ji i přijímá. Pokud nebudeme uvažovat přínos záření odraženého je úhrnný výkon dodaný tepelným zářením:

$$P_\Sigma = P_a - P_r = \sigma \varepsilon S (T_0^4 - T_1^4)$$

Celkový tok zářivé energie E na těleso může být z části odražen (reflexe) E_r , pohlcen (absorpce) E_a a částečně propuštěn (transparence) E_t .

Pak platí:

$$E = E_r + E_a + E_t$$

Množství absorbované a odražené energie závisí na emisivitě druhého tělesa. Těleso, které odrazí 100 % energie se nazývá absolutně bílé těleso a naopak těleso, které absorbuje 100 % energie se nazývá absolutně černé těleso. Na Zemi se ovšem taková tělesa nevyskytují a jsou jen teoretickým předpokladem pro matematicko-fyzikální výpočty [5].

1.2 Tepelné vlastnosti

Do oblasti, která charakterizuje tepelné vlastnosti, se řadí především materiálové konstanty jako například měrné teplo, tepelná vodivost, teplotní vodivost, tepelná jímavost a také teplotní roztažnost daného materiálu.

V této kapitole se nejvíce zaměříme na součinitel tepelné vodivosti jakožto hlavní parametr, který rozděluje materiály na tepelné vodiče a izolanty. Zejména v oblasti stavebních izolací a úspory tepelné energie se zabýváme izolačními materiály jenž mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti pod $0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Čím nižší je hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím hůře materiál vede teplo a je tedy lepším tepelně-izolačním materiálem. V minulosti se používala řada přírodních, organických materiálů, jako tepelné izolanty, které jsou v současné době na ústupu (sláma, dřevo nebo korek) a to zejména kvůli ceně (přestože má například korek nesporné výhody). V dnešní době patří mezi nejvíce používané izolační materiály polystyrén, minerální vlna, polyuretan atd.

1.2.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost ve fyzice označuje schopnost dané látky vést teplo (například konstrukcí). Představuje tedy rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné části konstrukce (zahřáté), do jiných chladnějších částí.

Tepelná vodivost dané látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ (měrná tepelná vodivost).

Součinitel tepelné vodivosti je definován jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád, a přitom se předpokládá, že se teplo šíří pouze v jednom směru (například v desce s rovnoběžnými povrchy). Dle této definice pak můžeme definovat součinitel tepelné vodivosti jako výkon (tzn. teplo za jednotku času), který projde každým čtverečným metrem desky o tloušťce jeden metr, jejíž jedna strana má teplotu o 1 Kelvin vyšší než druhá.

Podle hodnoty součinitele tepelné vodivosti se rozdělují materiály na dobré a špatné vodiče tepla. K dobrým vodičům patří kovy, například stříbro ($419 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), hliník ($209 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a zinek ($113 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Vodivost kapalin je přibližně tisíckrát menší než kovů.

Ještě menší tepelnou vodivost mají plyny, a proto jsou porézní látky špatnými vodiči tepla. Stavební a izolační materiály patří mezi špatné vodiče tepla. Jejich hodnota součinitele tepelné vodivosti se pohybuje v rozmezí $0,024 \div 5,000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [1].

Hodnota součinitele tepelné vodivosti je závislá na vlastnostech materiálů, objemové hmotnosti, vlhkosti, teplotě a pórovitosti, přičemž obecně lze součinitel tepelné vodivosti vyjádřit vztahem:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{(\theta_a - \theta_b) S \tau}$$

Reálná hodnota součinitele tepelné vodivosti je pak funkcí řady vnitřních a vnějších proměnných:

$$\lambda = f(\rho_v; w_m; \theta; PR; \varphi(I))$$

Kde ρ_v je objemová hmotnost materiálu, w_m je hmotnostní vlhkost materiálu, θ je teplota materiálu, PR je pórovitost, $\varphi(I)$ je funkce vnitřních proměnných – chemicko-mineralogické složení, fázové složení a krystalické modifikace [1].

Tabulka 1: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti pro různé materiály v suchém stavu při teplotě 20 °C [7]

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$]	Objemová hmotnost ρ [kg.m^{-3}]
Konopná izolace	0,038 - 0,040	25 - 42
Ovčí vlna	0,034 - 0,049	12,5 - 25
Dřevovláknitá izolace	0,040	250
Minerální vata	0,038 - 0,050	100 - 200
Pěnový polystyrén	0,033 - 0,044	15 - 40
Vzduch (za normálních podmínek)	0,0262	-
Hutný beton	1,230 - 1,360	2100 - 2300
Nepálená cihla	1,100	2050
Diamant	895-2300	3500
Železo	73	7870
Sklo	0,6 - 1	2400 - 2800
Měď	395	8960

1.2.1.1 Vliv pórovitosti, hustoty a objemové hmotnosti na součinitel tepelné vodivosti

Mezi hustotou, objemovou hmotností a pórovitostí platí následující vztah:

$$\rho_s = \rho \cdot \left(1 - \frac{p}{100}\right)$$

kde ρ_s je objemová hmotnost v suchém stavu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

ρ je hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

p je pórovitost [%].

Pórovitost vyjadřuje množství póru v materiálu a je dána vztahem:

$$p = \frac{V_p}{V} \cdot 100$$

kde V_p je objem póru [m^{-3}],

V je objem materiálu [m^{-3}].

Zanedbá-li se hmotnost vzduchu v pórech a je-li materiál suchý, lze pórovitost vyjádřit vztahem:

$$p = \frac{\rho - \rho_s}{\rho_s}$$

(1),

kde p je pórovitost [%],

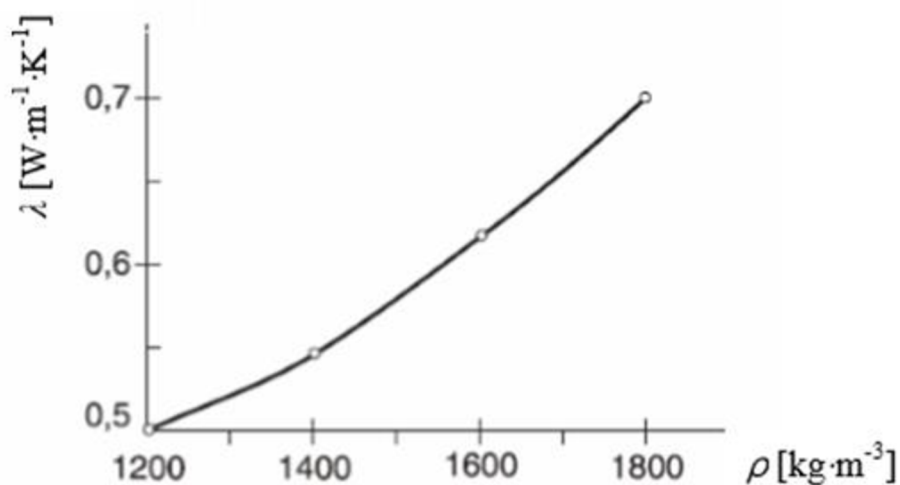
ρ je hustota, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

ρ_s je objemová hmotnost v suchém stavu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$].

V pórech materiálu je vzduch, jehož hodnota součinitele tepelné vodivosti, za normálních podmínek, udává nejnížší možnou hodnotu součinitele tepelné vodivosti stavebních a tepelněizolačních materiálů (pokud jsou pórovité). Vzhledem k faktu, že pevné části materiálu mají několika násobně větší součinitel tepelné vodivosti než vzduch, je zřejmé, že čím je víc materiál pórovitý, tím může být hodnota součinitele tepelné vodivosti menší.

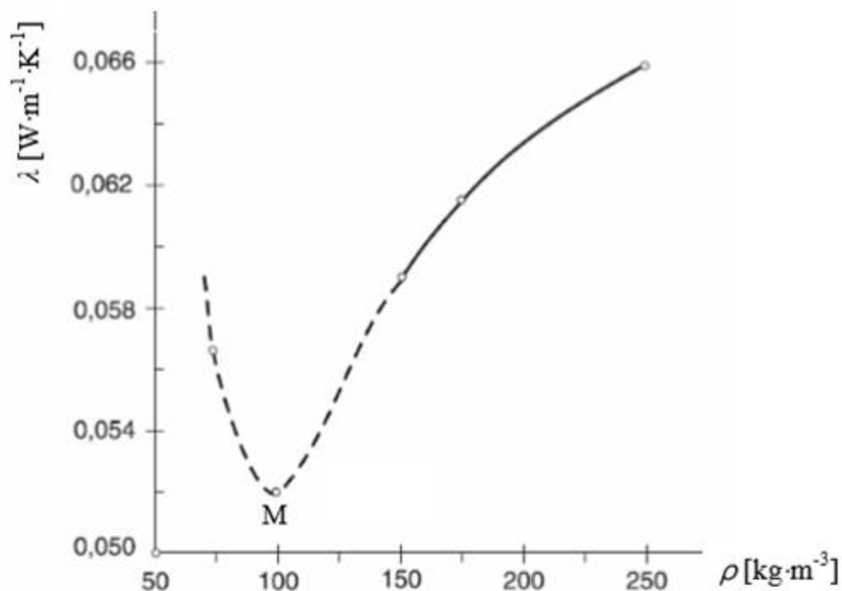
Ze vztahu 1 vyplývá, že mezi pórovitostí a objemovou hmotností platí nepřímá úměrnost: čím je větší pórovitost materiálu, tím je menší objemová hmotnost (nemění-li se hustota materiálu). Za tohoto předpokladu je možno vyjádřit součinitel tepelné vodivosti buď

v závislosti na pórovitosti a nebo na objemové hmotnosti. Jelikož se objemová hmotnost zjišťuje snadněji než pórovitost, uplatňuje se častěji.



Obrázek 3: Závislost součinitele tepelné vodivosti škvárobetonu na objemové hmotnosti [8]

Z obrázku 3 je patrné, že hodnota součinitele tepelné vodivosti je tím větší, čím je vyšší hodnota objemové hmotnosti. Toto pravidlo však obecně neplatí pro všechny materiály za všech okolností.



Obrázek 4: Závislost součinitele tepelné vodivosti minerální vlny v závislosti na objemové hmotnosti

(M – nejnižší hodnota součinitele tepelné vodivosti) [8].

Na obrázku 4 jsou znázorněny dva rozdílné úseky, které rozděluje bod M, tedy bod s nejnižší hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

V pravém úseku křivky odpovídá průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti dle pravidla – tepelná vodivost vzrůstá, zvětšuje-li se objemová hmotnost materiálu. V levém úseku téže křivky je závislost opačná. Tato okolnost je vysvětlena tím, že z hlediska šíření tepla ve vzduchových dutinách není důležitá pouze celková pórovitost, ale také velikost, tvar a rozmístění dutin v materiálu. V pórovitých materiálech se teplo šíří nejen vedením, ale i sáláním a za jistých podmínek i prouděním. Výsledný součinitel tepelné vodivosti suchého pórovitého materiálu je pak dán vztahem:

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_k + \lambda_s \quad (2)$$

kde λ je výsledný součinitel tepelné vodivosti,

λ_v je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla vedením,

λ_k je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla prouděním,

λ_s je součinitel tepelné vodivosti charakterizující šíření tepla sáláním.

Veličina λ vyjádřená vztahem 2 by se měla nazývat jinak než tepelná vodivost nebo součinitel tepelné vodivosti, např. součinitel šíření tepla.

V praxi se však uchoval termín tepelná vodivost bez ohledu na to, které druhy šíření tepla se vedle vedení podílejí na celkovém šíření tepla v pórovitém materiálu. Tento terminologický problém má historické kořeny.

Šíření tepla materiály se zjišťuje experimentálním způsobem a vyhodnocení výsledků měření se provádí podle rovnice vedení tepla, takže i výsledek se označuje jako tepelná vodivost. Z toho ovšem vyplývá důležitý závěr: k hodnotám tepelné vodivosti materiálu zjištěných měření a vyhodnocených dle rovnice vedení tepla musí být připojeny všechny další dílčí určující parametry, při kterých byly hodnoty stanoveny a které způsobují vždy určité riziko nepřesnosti [8].

1.2.1.2 Vliv teploty a vlhkosti na tepelnou vodivost

Tepelná vodivost stavebních materiálů se zvětšuje, roste-li jejich teplota. Způsobuje to intenzivnější šíření tepla vedením v pevných částicích materiálu a šíření tepla prouděním a sáláním v pórech materiálu.

S dostatečnou přesností lze závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě vyjádřit lineárním vztahem:

$$\lambda = \lambda_0[1 + b(t - t_0)]$$

kde λ_0 je součinitel tepelné vodivosti při teplotě t_0 (obvykle laboratorní teplota do 30°C),
 b je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s teplotou materiálu.

Tento vztah byl modifikován pro jednoduché zjištění závislosti součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti a teplotě sledovaného materiálu. Lze ho přijmout jako lineární nárůst s vlhkostí i teplotou a je tedy možno vyjádřit jej rovnicí:

$$\lambda = \lambda_0[1 + w \cdot \alpha_w + b(t - t_0)]$$

kde λ_0 je součinitel tepelné vodivosti při teplotě t_0 (obvykle laboratorní teplota do 30°C),
 b je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s teplotou materiálu,

α_w je linearizovaný koeficient nárůstu součinitele tepelné vodivosti s vlhkostí materiálu,

w je hmotností vlhkost udaná v %.

Vlhkost je ve stavebních materiálech obsažena v různých formách, rozhodující je přitom způsob vazby vlhkosti s materiálem [8].

1. Chemická vazba: Je součástí strukturní mřížky materiálu, do které se dostává při chemických reakcích a krystalizaci. Vyznačuje se vysokou energetickou úrovní molekulární vazby s materiálem. Za normálních podmínek se ze stavebních konstrukcí nevysuší.
2. Fyzikálně chemická vazba: Vzniká při adsorpci vlhkosti na povrchu póru a kapilár, ani tato vlhkost se nevysuší za normálních klimatických podmínek.
3. Fyzikálně mechanická vazba: Udržuje se v pórech a kapilárách v důsledku kapilárního tlaku a smáčivosti hydrofilních materiálů, tento druh vlhkosti se vypařuje z konstrukcí poměrně snadno za normálních klimatických podmínek.

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost, za teplotních podmínek, kterým jsou stavební materiály vystaveny, se projevuje tak, že roste-li vlhkost materiálu, zvyšuje se i jeho hodnota součinitele tepelné vodivosti. To se zdůvodňuje obecně dvěma příčinami.

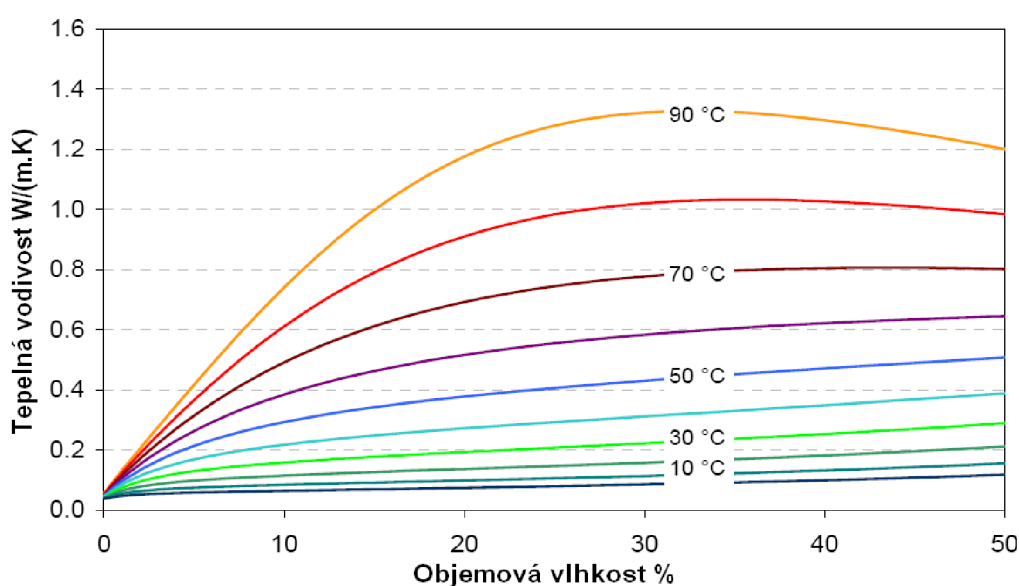
První vychází z faktu, že voda v pórech materiálu, která je zde místo vzduchu, má tepelnou vodivost zhruba 25krát větší než vzduch.

Druhá příčina má oporu ve skutečnosti, že při působení rozdílu teplot ve vlhkém materiálu, vzniká vedle tepla vedením, prouděním a sáláním také přenos tepla proudící vlhkostí.

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost materiálu může být ještě mnohem výraznější, jestliže se změní voda v led. Je to z důvodu, že hodnota součinitele tepelné vodivosti ledu je zhruba 2,2 W/mK. Problém je však stanovit teplotu, při které se mění voda v led v pórech materiálu. Z experimentálních výsledků je známo, že tato přeměna nastává při teplotách nižších než je bod mrazu volné vody (0 °C). Platí ale, že čím jsou póry materiálu menší, tím je nižší teplota, při které se změní voda v led. Například voda v pórech 3,2 μm zamrzla při teplotě -4 °C a v pórech o 1,4 μm při teplotě -17 °C [8].

Tabulka 2: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti v závislosti na hmotnostní vlhkosti a objemové hmotnosti [8].

Objemová hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] při vlhkosti u_m [%]					
	0	5	10	15	20	25
400	0,116	0,137	0,157	0,178	0,198	0,219
500	0,145	0,171	0,197	0,222	0,247	0,272
600	0,169	0,198	0,228	0,257	0,286	0,316
700	0,204	0,240	0,274	0,311	0,347	0,381
800	0,238	0,280	0,322	0,364	0,405	0,447
900	0,279	0,328	0,377	0,426	0,475	0,523

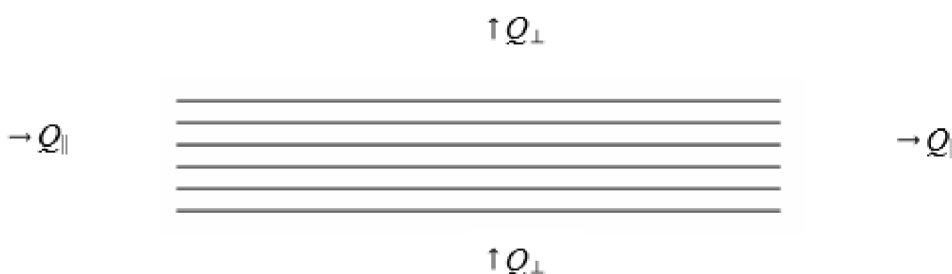


Obrázek 5: Závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové vlhkosti při různých teplotách materiálu [8].

1.2.1.3 Vliv směru tepelného toku na tepelnou vodivost

Vliv směru tepelného toku se projevuje u neizotropních materiálů, tj. materiály, které se vyznačují různými vlastnostmi v různých směrech. Typickým představitelem neizotropního materiálu je například materiál z minerálních vláken. Model struktury takového materiálu můžeme vidět na obrázku 6.

Rovnoběžné uspořádání vláken, jejichž délka je mnohonásobně větší než jejich tloušťka, vytváří vzduchové dutiny s malou tloušťkou kolmo na vlákna a s velkou tloušťkou vzduchové dutiny rovnoběžně s vlákny.



Obrázek 6: Schéma modelu struktury neizotropního materiálu [8]

Zvětšuje-li se velikost porů (vzduchových dutin), roste i hodnota tepelné vodivosti vzduchu v této dutině.

Z toho plyne fakt, že je-li směr tepelného toku rovnoběžný s vlákny, tj. ve směru vzduchových dutin s velkou tloušťkou, pak je jeho hodnota větší, než proudí-li kolmo na vlákna, kolmo na vzduchové dutiny s malou tloušťkou. U tepelné vodivosti to znamená, že tepelná vodivost materiálu ve směru kolmém na vlákna je menší než tepelná vodivost ve směru rovnoběžném s vlákny.

Vláknité materiály, zvláště ty z minerální vlny, patří k tzv. měkkým nebo polotuhým materiálům. Může se tedy měnit, vlivem stlačení, objemová hmotnost a tím také pórovitost. Dochází přitom ke změně celkové pórovitosti a také ke změně dutin mezi vlákny. To má za následek změnu tepelné vodivosti v závislosti na objemové hmotnosti.

U vláknitých materiálů má vliv na tepelnou vodivost také tloušťka vláken. Například skleněná vlákna při tloušťce vláken $15,5 \mu\text{m}$ mají hodnotu součinitele tepelné vodivosti $0,041 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a při tloušťce $35,2 \mu\text{m}$ hodnotu $0,045 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Dále u minerální vlny působí nepříznivě na tepelnou vodivost také množství nerozvlákněného materiálu, který zvyšuje jeho tepelnou vodivost [8].

1.2.1.4 Vliv struktury materiálu na tepelnou vodivost

Vliv struktury na tepelnou vodivost je vidět v tabulce K. Jsou zde hodnoty součinitele tepelné vodivosti různých pevných částic skeletu pórovitého materiálu. Z porovnání největší a nejmenší hodnoty v tabulce vyplývá, že se odlišují přibližně 17krát. Ve skutečnosti ale nejsou rozdíly v hodnotách tak rapidní, jak ukazují uvedené hodnoty.

Je to z důvodu, že šíření tepla vedením tvoří pouze malou část z celkového toku proudícího pórovitým materiálem.

Tabulka 3: Přehled hodnot součinitelů tepelných vodivostí různých pevných částí skeletu pórovitého materiálu [8]

Materiál	λ [W.m⁻¹.K⁻¹]
Vápenec amorfni	0,43
Mramor bílý	2,99
Rula	3,86
Křemen	7,44

Některé stavební a tepelně izolační materiály jsou složeny z materiálů s různou tepelnou vodivostí. Obecně pak platí, že výsledná tepelná vodivost je tím větší, čím je větší tepelná vodivost jednotlivých složek daného materiálu.

Chemické složení má rovněž vliv na tepelnou vodivost. Uvádí se, že materiály zásaditého charakteru jsou lepšími vodiči tepla než materiály kyselého charakteru [8].

1.2.1.5 Stanovení součinitele tepelné vodivosti

Stanovení součinitele tepelné vodivosti lze hned několika způsoby, které se od sebe liší teplotním stavem a dále způsobem stanovení a vyhodnocení tepelné vodivosti zkušební vzorku. Obecně se metody dělí na stacionární a nestacionární.

Stacionární metody vycházejí ze vztahu $Q.d$, kdy je nutno zajistit ustálený tepelný tok procházející od teplejšího povrchu měřeného vzorku k jeho chladnějšímu povrchu. Pak lze z rozdílu teplot, průřezu a tloušťky vzorku vypočítat jeho součinitel tepelné vodivosti. Mezi stacionární metody se řadí metoda chráněné teplé desky, metoda válce, metoda koule a metoda elipsoidu.

Nestacionární měření je založeno na sledování dynamického vývoje teplot. Tyto metody nevyžadují ustálený teplotní stav, sledují průběh šíření teplotní vlny měřeným vzorkem.

Na základě různého způsobu sledování nestacionárního vývoje během měření pak rozlišujeme metodu nestacionárního tepelného toku a metodu tepelných impulsů (metoda horkého drátu – Hot Wire Method, záblesková metoda Laser Flash Method).

Nestacionární metody lze též dělit z hlediska časové závislosti výkonu tepelného zdroje na metody s impulsním tepelným zdrojem, s kontinuálním tepelným zdrojem a s periodickým tepelným zdrojem [9].

1.2.2 Tepelná kapacita

Měrné teplo c , neboli měrná tepelná kapacita, je definována jako množství tepla Q v Joulech, které je potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň.

Teplo potřebné k ohřátí tělesa o hmotnosti m o teplotu Δt lze vypočítat ze vztahu:

$$Q = mc\Delta t$$

kde $\Delta t = t_2 - t_1$ je rozdíl mezi počáteční a koncovou teplotou [8].

Hodnota měrné tepelné kapacity je mírně závislá na teplotě, a proto se pro větší teplotní intervaly uvádí střední měrná tepelná kapacita c .

K určování hodnot měrného tepla se využívá kalorimetrická rovnice.

U plynů se rozlišuje měrná tepelná kapacita při stálém tlaku (c_p) a při stálém objemu (c_v).

Vztah mezi těmito měrnými tepelnými kapacitami udává Poissonova konstanta a Mayerův vztah.

Tabulka 4. Přehled hodnot měrné tepelné kapacity různých materiálů [8]

Látka	c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]
Voda	4180
Vzduch (0 °C)	1003
Led	2430
Olej	2000
Zlato	129
Absolutně suché dřevo	1450

Nejsou-li známé hodnoty měrné tepelné kapacity, je možno použít orientační hodnoty:

- $c = 1880 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pro materiály organického přirozeného původu,
- $c = 1250 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pro materiály organického umělého původu a smíšené anorganicko-organického původu,
- $c = 840 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pro materiály anorganického původu [8].

Z hlediska tepelné techniky je důležitá znalost závislosti měrné tepelné kapacity na vlhkosti. Stanovuje se experimentálně.

Tabulka 5: Přehled hodnot měrné tepelné kapacity škvárobetonu v závislosti na hmotností vlhkosti [8].

u_m [%]	0	5	10	15	20
c [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	0,808	0,963	1,097	1,214	1,310

Platí obecný vzorec:

$$c = \frac{c_s + 42 \cdot u_m}{1 + 0,01 \cdot u_m}$$

- Kde c je výsledná hodnota měrné tepelné kapacity [J.kg⁻¹.K⁻¹],
 c_s je měrná tepelná kapacita v suchém stavu [J.kg⁻¹.K⁻¹],
 u_m je hmotností vlhkost [%] [8].

1.2.3 Součinitel teplotní vodivosti

Součinitel teplotní vodivosti udává, jak rychle se vyrovná teplotní rozdíl na dvou protilehlých stěnách krychle o hraně 1 m a je definován jako poměr tepelné vodivosti k měrnému teplotnímu vztahem na jednotku objemu a platí zde vztah:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}$$

Teplotní vodivost se zjistí buď výpočtem z tepelné vodivosti, měrného tepla, měrné hmotnosti a nebo na Pykově-Stahlanově přístroji. Podstatou této metody je zjištění doby, za kterou se projeví určitá teplota (50 °C) na horní ploše zkušební destičky, položené na hladinu rtuťové lázně o teplotě 100 °C. Zkušební tělesa mají v průměru 50 mm a tloušťku v rozmezí od 7 do 10 mm. Stěny těles musí být hladké a rovnoběžné. Měření teploty se provádí pomocí termočlánku. Destička opatřená termočlánkem se položí na hladinu rtuti a zjistí se čas, za který teplota odvrácené plochy zkušební tělesa dosáhne 50 °C.

Okamžik, kdy teplota dosáhne této hodnoty se měří pomocí krystalu difenilaminu, protože ten má dobře definovaný bod tání (54 °C). Pokud není stanoveno jinak, měří se 3 destičky téže látky.

Teplotní vodivost se pak vypočte dle vzorce:

$$a = Z \frac{d}{\tau}$$

Kde: Z je konstanta přístroje.

Teplotní vodivost se stanoví nejméně pětkrát a vypočte se průměr, který je pak střední teplotní vodivostí zkoušené látky v rozmezí od 20 °C do 100 °C.

Konstanta přístroje C se pak určí pokusem se zkušební destičkou z nerostné látky, jejíž střední teplotní vodivost je známá (například sklo) [1].

Podle novější metody se součinitel teplotní vodivosti stanovuje tzv. metodou a-kalorimetru v regulárním režimu 1. druhu.

Zkušební těleso vytemperované na určitou teplotu se přemístí do temperační lázně o jiné teplotě (měrné temperační lázně) a vyhodnocuje se průběh změny teploty středu tělesa.

Po dosažení poloviny celkové tměny je možné považovat algoritmus rozdílu teploty okamžité a ustálené na konci pokusu za lineární funkci času. Toto stádium označujeme za regulární stav I. druhu.

Po provedení zkoušky je nutné mít určité přístrojové vybavení, přičemž jsou potřeba dva kapalinové termostaty, diferenciální termočlánek, jehož jeden spoj je ve středu zkušebního tělesa a druhý v měrné temperační lázni. Tento druhý kontakt je obvykle zhotoven z materiálu s nízkou tepelnou vodivostí. Tímto materiálem může být například železo nebo konstantan. Dalším nutným přístrojem je lineární zapisovač s možností lineárního posuvu registračního papíru a mikrometr.

Při zkoušce se zkušební těleso vloží, včetně termočlánu, do termostatu pro vytemperování před měřením do ustálené teploty. Pak zkušební těleso přeneseme co možná nejrychleji do měrné temperační lázně a současně se zapne registrace spuštěním posuvu registračního papíru zapisovače. Zápis se ukončí po vyrovnání teplot zkušebního tělesa a měrné temperační lázně, kterému odpovídá minimální výchylka zapisovače.

Hodnoty výchylky zapisovače se udává v libovolných jednotkách. Ze záznamu se odečte hodnota x_0 , odpovídající ustálenému teplotnímu stavu na konci pokusu a také x_τ příslušící časům τ . Z těchto hodnot se stanoví regresní analýzou směrnice b (s^{-1}) přímkové závislosti dané vztahem:

$$\log(x_\tau - x_0) = u + b \cdot \tau$$

Teplotní vodivost se pak stanoví ze směrnice a konstanty K_2 závislé na tvaru a rozměrech zkušebního tělesa.

$$a = K_2 \cdot b$$

Měření touto metodou se provádí za předpokladu, že teplotní vodivost hodnoceného materiálu, je ve zvoleném rozsahu teplot konstantní.

Stanovení teplotní vodivosti touto metodou nelze provést při velkých odchylkách od tohoto předpokladu (například při teplotách blízcí se bodu tání). V oblastech, kde je teplotní závislost značně výrazná, je vhodné volit menší teplotní interval mezi lázněmi [10].

1.2.4 Tepelná jímavost

Tepelná jímavost b je dána vztahem:

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho$$

kde b je tepelná jímavost $[(W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})^2]$,
 λ je součinitel tepelné vodivosti $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,
 c je měrná tepelná kapacita $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$,
 ρ je objemová hmotnost materiálu $[kg \cdot m^{-3}]$.

Tepelná jímavost je veličina, která se používá v tepelné technice pro hodnocení vlivu dvou dotýkajících se materiálů (těles), tj. vlivu na tzv. dotykovou (kontaktní) teplotu. Je to veličina, která se uplatňuje zejména při navrhování a hodnocení podlahových konstrukcí.

Tepelná jímavost, podobně jako tepelná vodivost, závisí na všech činitelích ovlivňujících tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost [8].

1.2.5 Součinitel prostupu tepla a tepelný odpor

Součinitel prostupu tepla určuje celkovou výměnu tepla mezi prostory oddělenými od sebe určitou stavební konstrukcí. Čím je hodnota menší, tím lepší jsou tepelně izolační vlastnosti konstrukce. Označuje se velkým písmenem U $[Wm^{-2}K^{-1}]$.

Jeho výpočet se pak provede z celkového tepelného odporu a vypadá následovně:

$$U = \frac{1}{R_i + R + R_e}$$

a musí platit:

$$U < U_N,$$

kde U_N je normou stanovený součinitel pro danou konstrukci.

Vzájemný vztah součinitele prostupu tepla U a tepelného odporu R :

$$U = \frac{1}{R_i + R + R_e}$$
$$R = \frac{1}{U - (R_i - R_e)}$$

Tepelný odpor R :

Tepelný odpor udává míru odporu proti pronikání tepla. Čím vyšší je tepelný odpor materiálu či konstrukce, tím pomaleji teplo prochází, a proto je cílem aby byl tepelný odpor obálky budovy (podlaha na terénu, obvodové stěny i střecha) co nejvyšší.

Vyjadřuje tepelně izolační vlastnosti konstrukce a označuje se velkým písmenem R a jeho jednotkou je [m^2KW^{-1}].

Výpočet se provede pomocí tloušťky (v metrech) jednotlivých materiálů a jejich součinitelů tepelné vodivosti:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

U vícevrstevných konstrukcí použijeme tento vzorec pro každý materiál, který se v nich vyskytuje, a výsledné odpory na závěr sečteme pro dosažení výsledku.

Celkový tepelný odpor vyjadřuje konečný tepelný odpor konstrukce při přestupu tepla se započítáním odporu v interiéru a exteriéru.

R_i odpor při přestupu tepla na vnitřní straně – interiéru, $R_i=1/\alpha_i$

R_e odpor při přestupu tepla na vnější straně – exteriéru, $R_e=1/\alpha_e$

Hodnoty obou znaků „ α “ jsou dány nornou ČSN v závislosti na druhu ročního období a poloze stavební konstrukce.

Celkový odpor se poté vypočítá součtem všech odporů. $R_T = R_i + R + R_e$ [11].

1.3 Metody měření součinitele tepelné vodivosti

Měření tepelné vodivosti lze v podstatě provést hned několika způsoby, které jsou určeny především tepelným režimem, v němž se dané měření uskutečňuje.

Nejčastěji se měření provádí ve stacionárním a nestacionárním režimu. Pro každý z těchto způsobů bylo vyvinuto několik metod, které se úspěšně používají.

Obecně lze předpokládat, že pro dobře tepelně vodivé materiály postačí stacionární metody a pro tepelné izolanty a výpočet závislosti tepelné vodivosti na vlhkosti, jsou vhodnější metody nestacionární [1].

1.3.1 Stacionární metody měření tepelné vodivosti

Základní princip je při všech metodách stejný – teplo přechází od povrchu vyhřívané desky, válce, koule nebo elipsoidu izolační vrstvou k chladnějšímu povrchu, kde se odvádí. Při měření se pak zjišťuje tloušťka vzorku, obě povrchové teploty a množství tepla (nejčastěji převodem elektrické energie spotřebované ve vyhřívacím zařízení).

Na starších měřicích přístrojích se určovalo množství tepla z oteplení nebo ochlazení a množství přiváděné kapaliny.

Základní a tou nejvíce důležitou podmínkou pro měřicí metodu je předpoklad, že celé přiváděné teplo prochází zkušebním vzorkem při ustáleném stavu a bez ztrát.

Měřicí zařízení tedy musí být zkonstruováno tak, aby se vyloučily boční ztráty odklonem tepla a aby byly zajištěny rovnoběžné tepelné proudnice.

Mezi metody a přístroje měření při stacionárním toku tepla patří tři hlavní typy:

- Deskový přístroj dle Poensgena a Bocka,
- Válcový přístroj Van Rinsuma,
- Kulový přístroj dle Nusselta [8].

1.3.1.1 Deskový přístroj dle Poensgena

Tento přístroj je určen na měření tepelné vodivosti vzorku ve tvaru desek, a to jak z vláknitých, tak sypkých materiálů. Mezi vyhřívanou a chlazenou deskou přístroje je vytvořené tepelné pole se souběžnými proudnicemi, které přechází kolmo zkoušenou deskou [9].

Podstatou zkoušky je šíření tepelného toku a rozdílů povrchových teplot vzorků za ustáleného teplotního stavu. Ze zjištěných hodnot, měrné plochy a tloušťky vzorku zkoušeného vzorku se pak vypočítá součinitel tepelné vodivosti.

Přístroj je schematicky naznačen na obrázku A). Je složen z vyhřívané desky a dvou chladících desek. Výchřevná deska obsahuje elektrickou výchřevnou mřížku, oboustranně krytou elektricky izolačními deskami a povrchovými deskami z hliníkového nebo měděného plechu. Z obou stran jsou na výchřevnou desku přiloženy zkušební izolační desky stejné jakosti a tloušťky. Jejich rozměr je kromě šířky shodný s výchřevnou deskou.

Aby se zamezilo vedlejším ztrátám, výchřevná deska je ve stejné rovině obklopena prstencovitě kompenzační výchřevnou deskou s vlastní výchřevnou mřížkou, ohřívanou na stejnou teplotu jako výchřevná deska uvnitř. Na styku obou desek je nepatrná mezera.

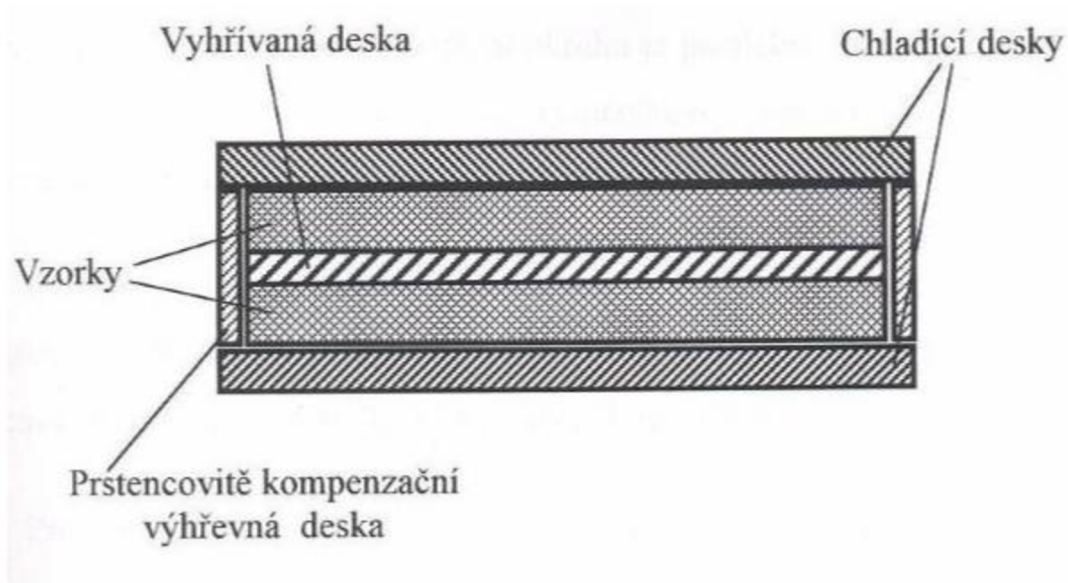
Na vnějších plochách vzorků jsou uloženy dvě chladící desky, které jsou chlazeny protékající vodou. Jejich půdorysné rozměry jsou shodné s vnějšími rozměry kompenzační desky. Volný prostor po obou stranách mezi kompenzačními a chladícími deskami je buď vyplněný stejným materiálem jako je zkušební vzorek nebo jiným izolačním vláknitým nebo sypkým materiálem.

Celé měřicí deskové zařízení je uloženo ve skříni a volný prostor je vyplněn izolační vlnou. Výchřevný elektrický příkon se určuje ze sledovaných hodnot napětí a intenzity proudu. Vzájemné vyrovnání teplot výchřevné a kompenzační desky se sleduje termočláňkovým systémem.

Voda, která prochází chladícími deskami, se uvádí do pohybu vodním čerpadlem. Zapojení desek ve vodním okruhu je paralelní. Požadovaná teplota vody se může nastavit zapojením výměňkové nádrčky nebo použitím termostatu, který upraví vodu na požadovanou teplotu automaticky.

Povrchové teplo zkoušeného vzorku na výchřevné desce a chladících deskách se měří termočláňky. Na každé ploše je nejméně pět termočláňků s koncovými měděnými destičkami na teplém konci čláňku.

Při měření práškovitých a vláknitých izolantů je třeba uvedené měřicí zařízení doplnit tak, aby se materiály mohly přeměňovat při vhodných objemových hmotnostech. Proto se na spodní i horní stranu desky vkládá tenký dřevěný rám se stejným obvodem, jako má výchřevná deska. Takto vzniklý prostor se pak vyplní vypočítaným a odváženým množstvím materiálu [12].



Obrázek 6: Schéma deskového přístroje dle Poensgena [12]

1.3.1.2 Podobné deskové přístroje

Z principu Poensgenova přístroje byly odvozeny další deskové měřicí systémy, přičemž základní způsob je stále stejný a jen se mění uspořádání desek a vzorků [12].

1.3.1.3 Poensgenův jednostranný přístroj

Tento přístroj je podobný původnímu, pouze místo dvou zkušebních desek se používá jedno. Horní polovina výhřevné desky se nemění, ale místo spodního zkušebního vzorku je pod výhřevnou deskou uložena vhodná izolační deska a k ní ze spodní strany pomocná spodní výhřevná deska, která má zadržet tok tepla z měřicí výhřevné desky směrem dolů tak, aby všechno vyvinuté teplo přecházelo nahoru zkušebním vzorkem. Pomocná výhřevná deska se proto musí neustále regulovat na stejnou teplotu jako měřicí a kompenzační deska.

Teplotní spád je stanoven z rozdílu odměřených povrchových teplot, které se měří termočlánky.

Doplňkem tohoto přístroje může být Schmidtův měřič průtoku tepla [12].

1.3.1.4 Cammererův přístroj

Tento přístroj je založen na jednostranném toku tepla.

Na spodní výhřevné desce bez kompenzačního pásu je uložena zkušební deska a na ní Schmidtův měřič průtoku tepla. Povrchové teploty se měří termočlánky.

Toto uspořádání je vhodné pro teploty od 50 °C do 150 °C [12].

1.3.1.5 Raischův přístroj

Tento deskový přístroj je přizpůsoben měření tepelné vodivosti při vyšších teplotách ve zkoušeném vzorku.

Chladicí desky původního Poensgenova přístroje jsou nahrazeny dalšími výhřevnými a kompenzačními deskami a další vrstvou izolačních desek. Tímto uspořádáním mají dosáhnout vysoké teploty až do 1200 °C [12].

1.3.1.6 Přístroj Dr. Bocka

Princip přístroje je založen na Poensgenově metodě, tzn. na kolmém průtoku tepla z výhřevné desky vrstvou zkoušeného vzorku k chladicí desce přístroje. Měření se provádí při ustáleném teplotním stavu a můžeme zkoušet vláknité i sypké materiály. Cela aparatura je účelně uspořádána ve formě laboratorního stolu a částečně automatizovaná, čímž je zjednodušené nastavování ustáleného teplotního stavu.

Jádrem přístroje je horní vytápění a dolní chlazená deska, mezi kterými je zkušební těleso. Vnitřní část tvoří vlastní měřicí výhřevná deska kruhového tvaru.

Druhou část horní desky tvoří horní ochranná kompenzační výhřevná deska, která prstencově obklopuje měřicí desku a těsně k ní přiléhá, je však od ní tepelně izolována. Ochranná část horní desky je vyhřívána na konstantní teplotu kapalinou, která je ohřívána v termostatu.

Spodní chlazená deska přístroje se stejnými rozměry jako kompenzační deska se chladí na stálou teplotu protékající vodou. Teplota vody se udržuje na konstantní výši ultratermostatem.

Jádro měřicí soustavy je při měření zakryté izolovaným krytem. Za krytem je otočné rameno, které se používá na zavěšení celé horní výhřevné desky při zakládání do přístroje. Měření elektrického příkonu spotřebovaného výhřevnou deskou se zaznamenává počítačem [12].

1.3.1.7 Válcový přístroj dle van Rinsuma

Základní metoda vypracovaná van Rinsumem tkví v tom, že se izolační materiál upevní na zkušební elektricky vyhřívanou rourku. Na ní se měří elektrický příkon, odměřují se teploty na vyhřívané rource a na povrchu izolantu při ustáleném stavu a z těchto hodnot, jako z rozměru izolantu se vypočítá součinitel tepelné vodivosti materiálu.

Základem přístroje je ocelová rourka, uvnitř které je uložena elektricky vyhřívaná spirála, izolovaná z obou stran elektrickou izolací.

Výhřevná spirála je napájena proudem se stabilizovaným napětím a příkon je regulován autotransfornátorem. Výhřevná rourka se po celé délce obalí izolačním materiálem. Na každé straně k výhřevné rource upevníme ocelové rourky s vlastním vytápěním a regulací příkonu.

Povrchové teploty se měří termočlánky, a to buď přímým výchylkovým měřením nebo kompenzačním měřením.

Tepelná vodivost se pak určuje pouze z hodnot v ustáleném teplotním stavu [12].

1.3.1.8 Kulový přístroj dle Nusselta

Podstatou zkoušky je zjištění tepelné vodivosti syvkých a vláknitých materiálů zformovaných do mezikulové vrstvy výpočtem z hodnot jejich rozměrů, teplotního rozdílu vnějších povrchů obou koulí zkušebního zařízení a množství prostupujícího tepla za ustáleného teplotního stavu.

Nusseltův přístroj se skládá ze dvou soustředných koulí. Vnitřní koule má plášť z měděného plechu. Uvnitř je uloženo keramické tělísko s vloženou elektrickou výhřevnou spirálou tak, aby vyvinuté teplo bylo pravidelně rozloženo po celém povrchu. Na povrchu pláště jsou v některých místech upevněny termočlánky na měření teploty vnitřního povrchu. Vnější kulový plášť je také z měděného plechu, ale je rozdělný. Horní polovina má příklop na plnění vnitřního mezikulového prostoru zkoušeným materiálem. Na vnějším povrchu pláště jsou opět pevně uloženy termočlánky na měření povrchové teploty.

Prostor mezi oběma koulemi se vyplní přesně odváženým a vypočítaným množstvím zkoušeného materiálu. Přitom se musí dbát zejména na rovnoměrné rozvrstvení izolace v celém prostoru. Teplo vyvinuté ve vnitřní vyhřívané kouli přestupuje beze ztrát zkoušeným izolantem až k vnějšímu plášti a odtud do okolí. Nevznikají zde tedy okrajové ztráty, a proto se nemusí používat kompenzační zařízení.

Množství elektrické energie je určováno wattmetrem [12].

1.3.2 Nestacionární metody měření tepelné vodivosti

Způsoby měření při neustáleném teplotním stavu jsou založeny na podobném principu jako ustálená měření, ale jsou krátkodobé a vyžadují si zkušební tělesa s malými tloušťkami. Tyto okolnosti jsou příčinou velké nepřesnosti měření, na druhou stranu je ale měření velmi rychlé a umožňuje tak zkoušení vlhkých vzorků a určení vlivu vlhkosti na tepelnou vodivost.

- Fitchova metoda,
- LaserFlash metoda,
- Metoda horkého drátu [12].

1.3.2.1 Fitchova metoda

Fitchova metoda je nejvíce používaná laboratorní metoda měření tepelné vodivosti při nestacionárních podmínkách.

U přístroje dle Fitche proudí teplo z ohřívací nádoby přes zkušební těleso do měrného válce. Pomocí diferenciálně zapojených termočlánků se sleduje na vhodném přístroji (milivoltmetr, galvanometr) rozdíl tepla na dně ohřívací nádoby a měrného válce v regulární fázi za stanovenou dobu.

Vlastní přístroj je válcového typu a je dvojdílný. V jeho spodní části je uprostřed uložen měděný váleček s přesně opracovanou horní plochou, která nepatrně přesahuje nad horní izolační desku spodní části přístroje. Uvnitř válečku je pevně uložený spoj termoelektrického článku, konec je vyveden na svorky upevněné na plášti. Celý prostor okolo válečku je tepelně izolovaný proti ztrátám tepla do okolí.

Horní část je vyrobena ve formě měděné válcové nádoby s plošně přesným měděným dnem, ve kterém je uložen druhý konec termočlánku. Pomocí termostatu se vytemperuje ohřívací nádoba Fitchova přístroje na danou teplotu.

Na měrný válec se položí zkušební těleso a ručním ovládním se sníží ohřívací nádoba tak, aby tlak mezi dnem nádoby a měrným válcem, působícím na zkušební těleso odpovídal tlaku, při kterém byla naměřena tloušťka zkušebního tělesa.

Před vlastním měřením tepelné vodivosti se zjistí doba náběhu k dosažení lineární závislosti změny rozdílu teplot na čase pro zkoušený materiál.

Po nastavení příslušného tlaku a po uplynutí doby náběhu zkoušky se zaznamená výchylka galvanometru (p_1) s po uplynutí 2 minut výchylka (p_2). Ohřívací nádoba se opět zvedne nahoru a po ochlazení prstence na teplotu prostředí a měrného válce na zjištěnou hodnotu je přístroj připraven k měření.

Sypké a vláknité materiály se upravují do přístroje podobně jako při Poensgenově metodě. Použije se tenká obruč z fólie nebo tvrdého papíru a její prostor se vyplní vypočítaným množstvím izolačního materiálu.

Vzhledem na malou tloušťku vzorku, na určité nepřesnosti termočlánekového měření, poměrně malé teplotní rozdíly a na ztráty tepla do okolí, je přesnost výsledku horší než při metodách za ustáleného tepelného toku. Přesto se však tento přístroj využívá na měření vlhkých vzorků [12].

1.3.3 Novější metody měření součinitele tepelné vodivosti λ

Současným trendem jsou metody a přístroje, které jsou jednoduché, rychlé, přesné, počítačem vyhodnocované a poměrně drahé [8].

1.3.3.1 Přístroj ISOMET 2104

Multifunkční zařízení ISOMET 2104 je mikroprocesorem řízený mobilní přístroj pro přímé měření termo-fyzikálních vlastností (součinitele tepelné a teplotní vodivosti a tepelné kapacity).

ISOMET 2104 používá nestacionární měřící metodu, která redukuje dobu měření na

10 – 16 minut. ISOMET 2104 je vybaven vyměnitelnými sondami (jehlové – pro sypké materiály a vláknité, plošné – pro pevné materiály). Každá sonda obsahuje zabudovanou paměť, ve které jsou uloženy její kalibrační konstanty.

Měření je založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu.

Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v rezistoru sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota je vzorkována a jako funkce času přímo vyhodnocena pomocí polynomiální regrese. Koeficienty získané touto regresí jsou použity k výpočtu měřených veličin.

ISOMET 2104 umožňuje jednoduchou interaktivní komunikaci s uživatelem, optimalizuje podmínky měření z hlediska minimální spotřeby energie a doby měření. Má zabudovanou paměť pro 500 měření, napájen buď akumulátorem nebo síťovým adaptérem (9 V). Rozsah pracovních teplot je od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Součinitel tepelné vodivosti dokáže měřit v rozsahu:

Jehlová sonda: $0,015 - 1\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Plošná sonda: $0,015 - 5\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [13].

1.3.3.2 Stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu

Metoda horkého drátu je standardní nestacionární metoda založena na měření teplotního nárůstu na definované vzdálenosti ze zdroje tepla vloženého do testovaného materiálu.

Jestliže zdroj tepla převzal konstantní a jednotný výstup podél délky zkušební vzorku, může být tepelná vodivost odvozena přímo od výsledné změny v teplotě přes známý časový interval. Sonda při této metodě obsahuje topný drát a teplotní čidlo. Tato sonda elektricky izoluje horký drát a tepelné čidlo od testovaného materiálu.

Ideální matematický model je založen na předpokladu, že horký drát je dokonalý, nekonečně tenký a dlouhý linkový zdroj tepla, který je v nekonečném obklopení homogenního a izotropního materiálu s konstantní vstupní teplotou. Jestliže je q je konstantní množství produkce tepla vztažené na jednotku času a jednotkou délku drátu topení, v té době $t=0$ s, nastane paprskovité proudění tepla kolem drátu.

Pak teplotní růst $DT(r,t)$ u paprskovité pozice r od zdroje tepla odpovídá zjednodušené rovnici:

$$\Delta(T(r,t)) = \frac{q}{4\pi} \ln \frac{4at}{r^2 C_d}$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti,

a je teplotní vodivost,

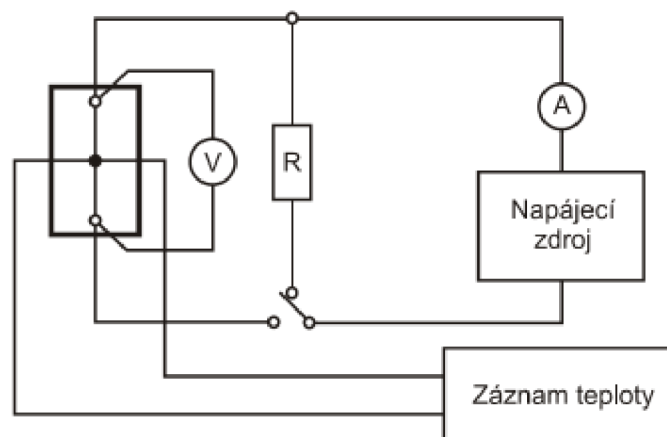
$C_d = \exp(\psi)$, $\psi = 0,5772157$ je Eulerova konstanta.

Tato metoda slouží k určení tepelné vodivosti pevných látek, prachů, písků a zrnitých materiálů. Jsou dostupné tři měřící techniky: standardní, křížová drátová technika, odpor-potenciální metoda olova [14].

Měření se provádí v souladu s postupem dle normy ČSN EN ISO 8894-1 (726047), kde je definován měřící postup stanovení součinitele tepelné vodivosti žárovzdomých výrobků a materiálů metodou topného drátu.

Touto metodou lze měřit jak materiály hutné, tak zrnité nebo práškové.

Na měření se standardně připraví dva až tři vzorky, jejichž rozměry jsou alespoň 200 x 100 x 50 mm. Povrchové plochy vzorků, které se ve zkušebním tělese dotýkají, musí být zabroušeny tak, aby odchylka od rovinnosti dvou bodů nebyla větší než 0,2 mm. Před začátkem měření je třeba vytemperovat měřící soustavu do stacionárního stavu, dále se připojí obvod topného drátu ke zdroji, který je nastaven tak, aby nárůst teploty dosahoval maximálně 100 °C za 15 min. Od tohoto okamžiku dochází k záznamu teploty na topném drátu [16].



Obrázek 7: Schéma uspořádání měřícího zařízení [8]

Hodnota součinitele tepelné vodivosti λ se pak vypočítá ze vztahu:

$$\lambda = \frac{I \cdot U_m}{4\pi} \cdot \frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\Delta t_2 - \Delta t_1}$$

kde I je topný proud v [A],

U_m je úbytek napětí na délkovou jednotku topného drátu ve [V.m⁻¹],

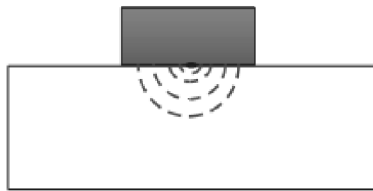
R_m je elektrický odpor topného drátu vztažený na délkovou jednotku v [Ω.m⁻¹],

τ_2, τ_1 jsou časy od zapojení topného okruhu v [min],

Δt_1 a Δt_2 je zvýšení teploty topného drátu po zapojení okruhu v časech τ_2, τ_1 [°C] [16].

Tato metoda je mnohdy používána v průmyslových měřicích systémech, přičemž pro zjednodušení měření je tepelný zdroj integrován v tělese zkušební sondy daných vlastností.

Tedy měřicí soustava se skládá ze dvou ohraničených poloprostorů – zkušební sondy a zkušební vzorku. Tato metoda je označována jako „metoda horkého drátu“.



Obrázek 8: Schéma nestacionárního šíření tepla při stanovení součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu [6]

Protože vlastnosti zkušební sondy jsou při měření vždy konstantní, lze tyto přístroje kalibrovat dvěma referenčními materiály se známou hodnotou součinitele tepelné vodivosti λ_1 a λ_2 .

$$b = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{x_2 - x_1}$$

$$a = \lambda_1 - b \cdot \lambda_2$$

Přičemž veličina x představuje okamžitou rychlost regulárního ohřevu:

$$x = \frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\Delta t_2 - \Delta t_1}$$

Hodnota součinitele tepelné vodivosti zkušební sondy je pak určena pomocí kalibračních konstant dle vztahu [6]:

$$\lambda = a + b \cdot x$$

2 Praktické měření součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity pomocí experimentálního měřidla

2.1 Modifikovaná metoda horkého drátu pro měření součinitele tepelné vodivosti

Předložená práce se zabývá návrhem konstrukce nestacionárního měřidla, jež vychází z procesu tzv. regulárního ohřevu a věnuje se nestacionární metodě měření tepelné vodivosti a tepelné kapacity metodou „*hot-wire*“.

Identifikace tepelné vodivosti modifikovanou metodou topného drátu pracuje na základě následujících předpokladů:

- a) topnou plochu je možno uvažovat jako nekonečně tenkou a její tepelnou a teplotní vodivost za zanedbatelnou a zároveň se předpokládá zcela rovnoměrné šíření tepla po celé ploše.
- b) materiálový vzorek lze předpokládat jako nekonečně dlouhý vzorek s minimální tloušťkou 15 mm.
- c) materiál je možné považovat za homogenní a izotropní, se skalárními charakteristikami λ , α a c .
- d) charakteristiky λ , c a α je možné v dané teplotní úrovni měření považovat za nezávislé na teplotě vzorku $T(r,t)$ pro jakýkoliv poloměr $r \in R_+$ i čas ze stejné množiny. Množinu R_+ považujeme za množinu kladných reálných čísel.
- e) teplota okolí vzorku je neměnná v jakékoliv vzdálenosti od měřeného vzorku.

2.2 Měřicí přístroj s označením Michaela

Modifikace metody horkého drátu spočívá ve změně tepelného zdroje, kdy experimentálně zkusíme tepelný zdroj ve tvaru kruhové plochy. Předpokládáme, že plocha vydává ve všech směrech stejné teplo, je dokonale tenká a excelentně vede teplo.

Samotné měřicí ústrojí se skládá ze dvou částí, kdy v první části nejprve řešíme odběr vzorků teplot v jisté vzdálenosti od zdroje tepla a ve druhé zpracováváme naměřené hodnoty. K dispozici máme tři teplotní čidla Pt1000.

První čidlo je umístěno na topné ploše, druhé čidlo je umístěno ve vzdálenosti 7,5 mm od topné plochy a poslední čidlo slouží k odběru teploty prostředí, čímž získáme kalibrační teplotu. Každé čidlo je připojeno na svůj vlastní obvod MAX31865. Tyto obvody slouží ke zpracování signálu z čidel Pt1000 (MAX31865 měří čtyřvodičovou metodou elektrický odpor čidla Pt1000, ze znalosti elektroniky víme, že elektrický odpor součástek je nelineárně závislý na teplotě, hodnoty odporu jsou dále zpracovány v Raspberry Pi II).

Všechny obvody přenáší dále naměřený signál do mikroprocesoru Atmel ATmega 8, který je samotný řízen malým deskovým počítačem Raspberry Pi II, jenž zároveň řídí teplotu topidla. Atmel ATmega 8 nejen přijímá naměřené hodnoty (a dále je posílá do RPI II), ale řídí i periody vzorkování a počet vzorků.

Topná plocha se skládá z velmi tenké vrstvy hliníkové pásky, na které je umístěn horký drát tak, aby byla rovnoměrně rozložena teplota v celém kruhu.

Pro zlepšení přesnosti měření byl použit odběr teplot 10x za jedno měření, který se zprůměruje (v tom čase se přeruší dodávka energie do topidla) a zároveň experimentálně nevyužíváme pouze teploty, které získáme při zapnutém topidle, ale využíváme i získané hodnoty během fáze vychládání.

Raspberry Pi II obsahuje řídicí program, který řeší výkon topidla ve wattech, který může nabývat hodnot od 0 do 2,512 W, periodu vzorkování (v rozmezí 0,25 až 20 s) a počet vzorků (v intervalu od 1 do 800).

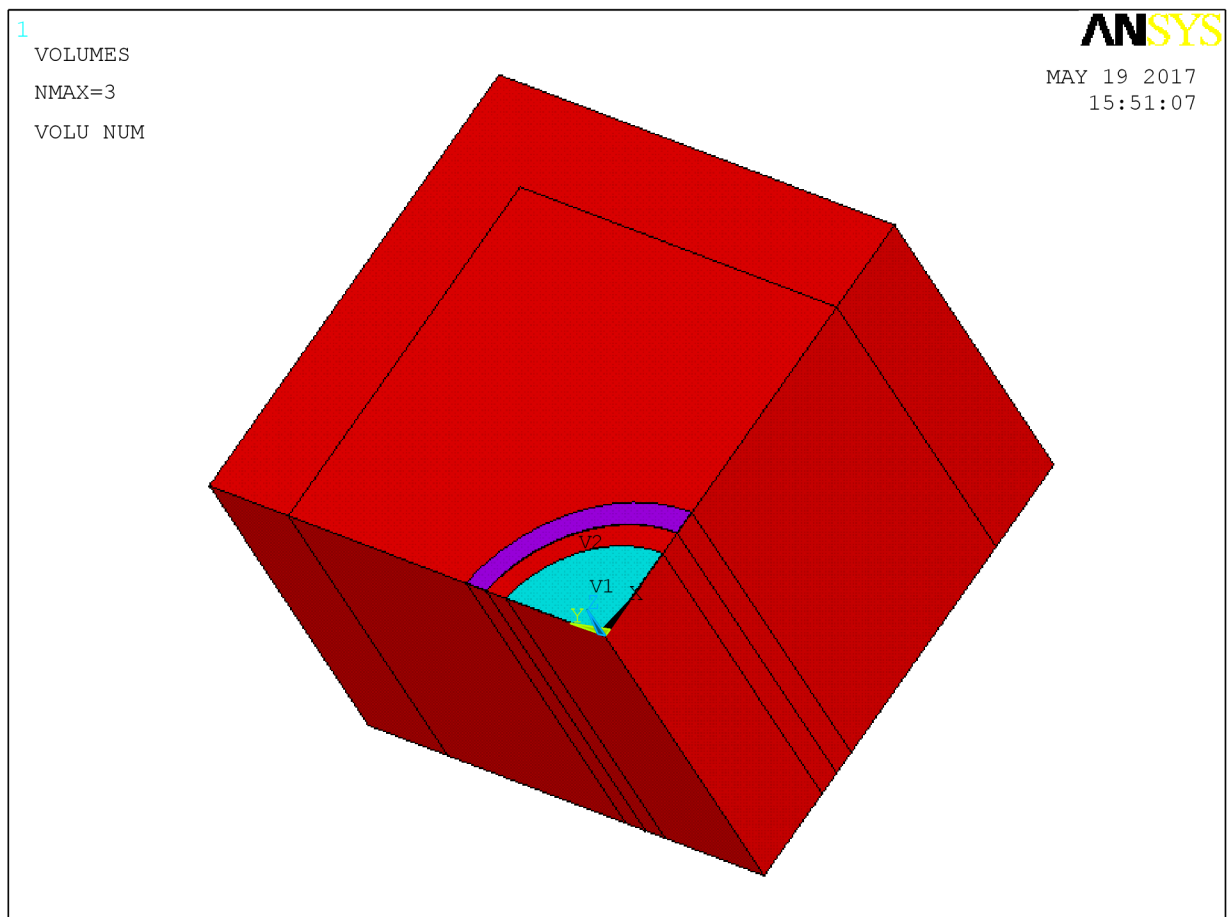
Vyhodnocení výsledků v současné době probíhá pomocí matematicko-fyzikálního softwaru ANSYS. Systém ANSYS je pokročilý software, který slouží k vytvoření teoretických modelů chování vnitřního energetického systému. V praxi to znamená, že zde můžeme vytvořit teoretický model konstrukce a pozorovat například šíření teplotní vlny celým systémem, pokud zde vytvoříme zdroj tepelné energie.

Pokud do softwaru ANSYS zadáme parametry materiálu, tj. součinitel tepelné vodivosti, tepelnou kapacitu a objemovou hmotnost a zároveň zadáme výkon a charakter topného systému (výkon, čas, rozměry topidla), můžeme zde pozorovat, jak se v systému výpočtově šíří tepelná energie, resp. teplotní vlna. Jestliže známe charakter šíření teplotní vlny systémem teoreticky a zároveň pak máme k dispozici materiál, který má stejnou objemovou hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a tepelnou kapacitu a zároveň pokud máme stejný zdroj tepla, tj. víme jak se zde reálně šíří teplotní vlna, jsme schopni pomocí metody zpětného modelování získat přibližné hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity.

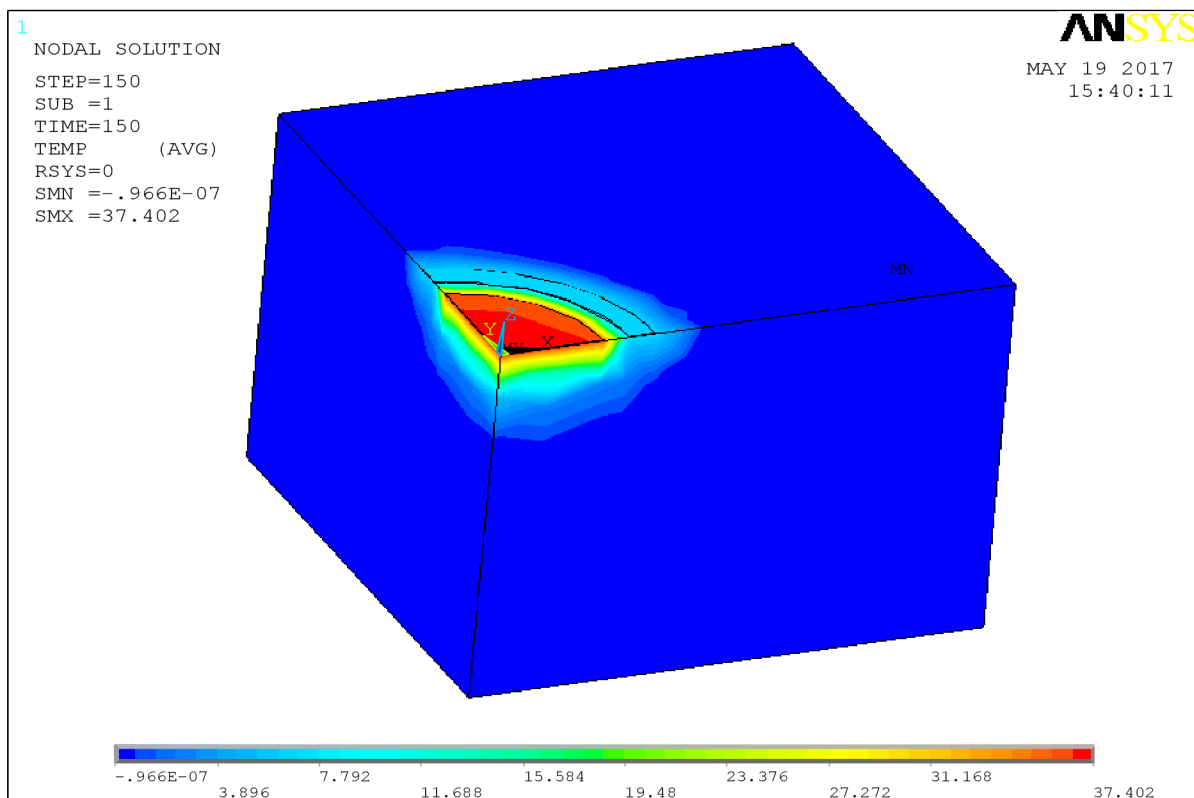
Je zřejmé, že hodnota součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity konverguje k její konečné velikosti, pokud v teoretickém modelu v softwaru ANSYS budeme měnit hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity, bude se měnit průběh šíření teplotní vlny. Znamená to tedy, že se snažíme najít průběh šíření teplotní vlny, který pro diferenci obou případů šíření vln (teoretický model i praktický model) konverguje k hodnotě 0.

Vzhledem k tomu, že pro výpočet tepelné vodivosti λ je nutné používat vyčíslení pomocí softwaru ANSYS, je provádění touto metodou zdlouhavé a pracné. Počet měřených hodnot a tím i délka měřících časových intervalů jsou z důvodu zdlouhavosti výpočtu omezeny, čímž dochází ke snížení přesnosti vyhodnocení.

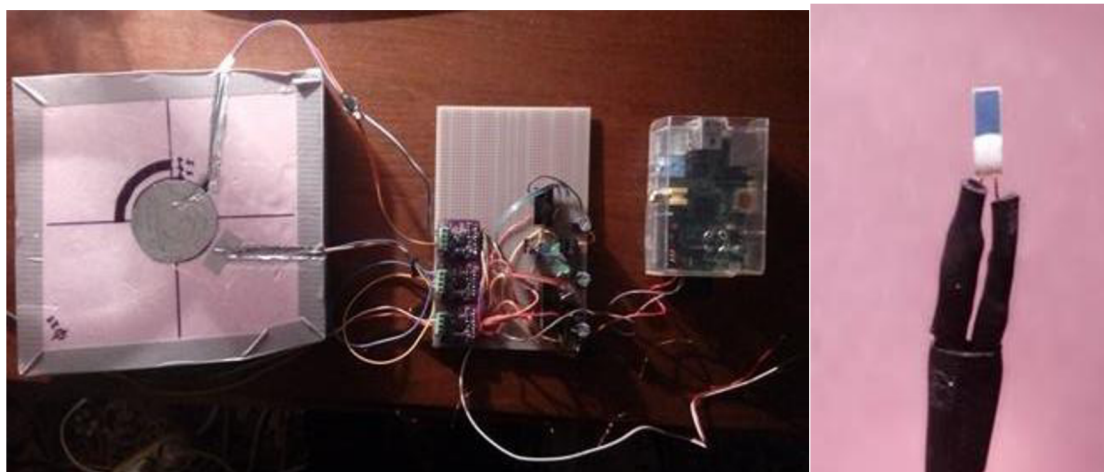
Přesnost měření je ovlivněna několika faktory, mezi které patří odvod tepla z povrchu vzorku, geometrie a rozměry vzorku, vliv velikosti tepelného zdroje, odvod tepla zdrojem samotným a setrvačností snímače teploty.



Obrázek 9: Teoretické schéma měřícího přístroje Michaela



Obrázek 10: Numerické schéma šíření tepelné energie v měřidle Michaela



Obrázek 11: Měřicí přístroj Michaela s detailem čidla Pt1000

```
pi@Pimerak: ~/Desktop/pimerak
Soubor Upravit Karty Nápověda
parametry mereni:
-----
perioda vzorkovani: 1.00 s
pocet vzorku mereni se zapnutym topidlem: 300
Åtkon: 2.512 W

volte moznost:
-----
) Ukoncit program
) Nastavit periodu vzorkovani
) Nastavit pocet vzorku mereni se zapnutym topidlem
) Nastavit vykon
) Zahajit mereni

volte: 4

dev1 poslalo 8978 a to je teplota 24.639522Å°C.
dev2 poslalo 8989 a to je teplota 24.985430Å°C.

dev0 poslalo 8976 a to je teplota 24.576398Å°C.
dev1 poslalo 8979 a to je teplota 24.670785Å°C.
dev2 poslalo 8988 a to je teplota 24.953964Å°C.
```

Obrázek 12: Vzhled řídicího programu měřicího systému Michaela

2.3 Přehled materiálů, na kterých bylo prováděno experimentální ověření funkčnosti přístroje Michaela

2.3.1 Beton

Beton je kompozitní materiál, která se skládá z kameniva, cementu a vody. Výslednou pevnost betonu ovlivňuje kvalita kameniva, vody, druh cementu a jeho množství. Beton se vyrábí v míchačkách přímo na stavbách a nebo se na stavby dováží z centrálních betonáren. Na stavbách se ukládá do bednění, zhušťuje se a následně se ošetřuje během tuhnutí a tvrdnutí. Nevýhodami betonu jsou nízká pevnost v tlaku, velká objemová hmotnost a vysoká hodnota součinitele tepelné vodivosti (1-1,8 W/m.K).

Dle objemové hmotnosti se beton rozděluje na lehký, obyčejný a těžký [15].

2.3.2 Dřevo a výrobky ze dřeva

Dřevo je přírodní kompozitní anizotropní materiál, který se skládá z celulózy (50 %), hemicelulózy (22 %), ligninu (22 %) a další látek (6 %, pryskyřičné, dusíkaté a neustrojené látky). Dřevo je široce použitelný materiál, který je v zásadě obnovitelný, na rozdíl od všech ostatních druhů, jejichž těžba je nenávratně odebrána z přírody. Dřevo je lehce opracovatelný materiál s nízkou hodnotou součinitele tepelné vodivosti [15].

2.3.3 Anorganické a organické vláknité materiály

Anorganický materiál je tvořený převážně anorganickými sloučeninami a nebo chemickými prvky. Může obsahovat příměsi díky organickým sloučeninám. Obvykle se jedná o velice různorodou směs, která může mít libovolné složení a může být heterogenní nebo homogenní. Typické anorganické vláknité materiály používané ve stavebnictví jsou čedičová vlákna, lněná vlákna, plastová vlákna, minerální vata, strusková vata, skleněná vata a skleněná vlákna, azbest, rohože z minerálních vláken atd [15].

Materiály na bázi přírodních vláken jsou obnovitelným zdrojem, který v současné době rozvíjí svůj potenciál. Hlavním zástupcem je technické konopí (obsah THC < 0,3 %), kde je udávaná hodnota součinitele tepelné vodivosti v rozmezí 0,038 - 0,044 W.m⁻¹.K⁻¹ při objemové hmotnosti do 42 kg.m⁻³.

2.3.4 Polystyrén

Polystyrén je umělá hmota, pevný, snadná lámavý a levný plast, který vzniká jako produkt polymerace styrenu. Do skupiny polystyrénových hmot patří standardní polystyrén (krystalový), houževnatý polystyrén, vytlačovaný polystyrén (XPS), zpěňovaný polystyrén (EPS) a kopolymery.

Nevýhodou polystyrénu je jeho malá tepelná odolnost (při teplotě 70 °C se výrobky z polystyrénu deformují). Mezi hlavní výhody patří snadná zpracovatelnost a nízká hodnota součinitele tepelné vodivosti a nízká nasákavost.

Ve stavebnictví se běžně používá polystyrén zejména v deskách o rozměrech 0,5 x 1 m, tl. dle potřeby. Osvědčil se například v tepelných izolacích domů nejčastěji EPS 70 F a EPS 100 F – kontaktní zateplovací systém.

Číslo značí pevnost v tlaku v kPa. Písmena za pevností značí:

F – fasádní – pro kontaktní zateplování

S – stabilizovaný – pro tepelné izolace střech

Z – základní – do podlah.

XPS je polystyrén, který se vyrábí extruzí (vytlačováním) taveniny z krystalového polystyrénu za současného sycení vzpěňovadlem, které po uvolnění tlaku umožní na konci vytlačovací hubice napěnění materiálu. Kvůli vysoké hořlavosti plastické hmoty se do ní přidávají bromované zpomalovače hoření, zejména hexabromcyklododekan (HBCD). Zpravidla desky 1250 x 600 mm, nejčastěji s polodrážkou nebo kolmou hranou, pro použití na sokl se zdrsňeným povrchem pro lepší přilnutí lepidla (Styrodur). Je nenasákavý o různém barevném provedení [15].

2.4 Průběh měření

Měření proběhlo na skupině vybraných vzorků a každý vzorek byl měřen několikrát, a to z důvodu ověření opakovatelnosti a správnosti měření. Byly vybrány tři reprezentativní vzorky stavebních materiálů, a to technické konopí, dřevo a pěnový polystyrén.

Před zahájením měření byly zvoleny následující parametry pro všechna měření:

Výkon topidla: 2,0175 Watt

Perioda vzorkování: 1 s

Počet vzorků: 300

Délka měření: 300 s, dvě fáze (150 s se zapnutým topidlem, 150 s fáze vychládání).

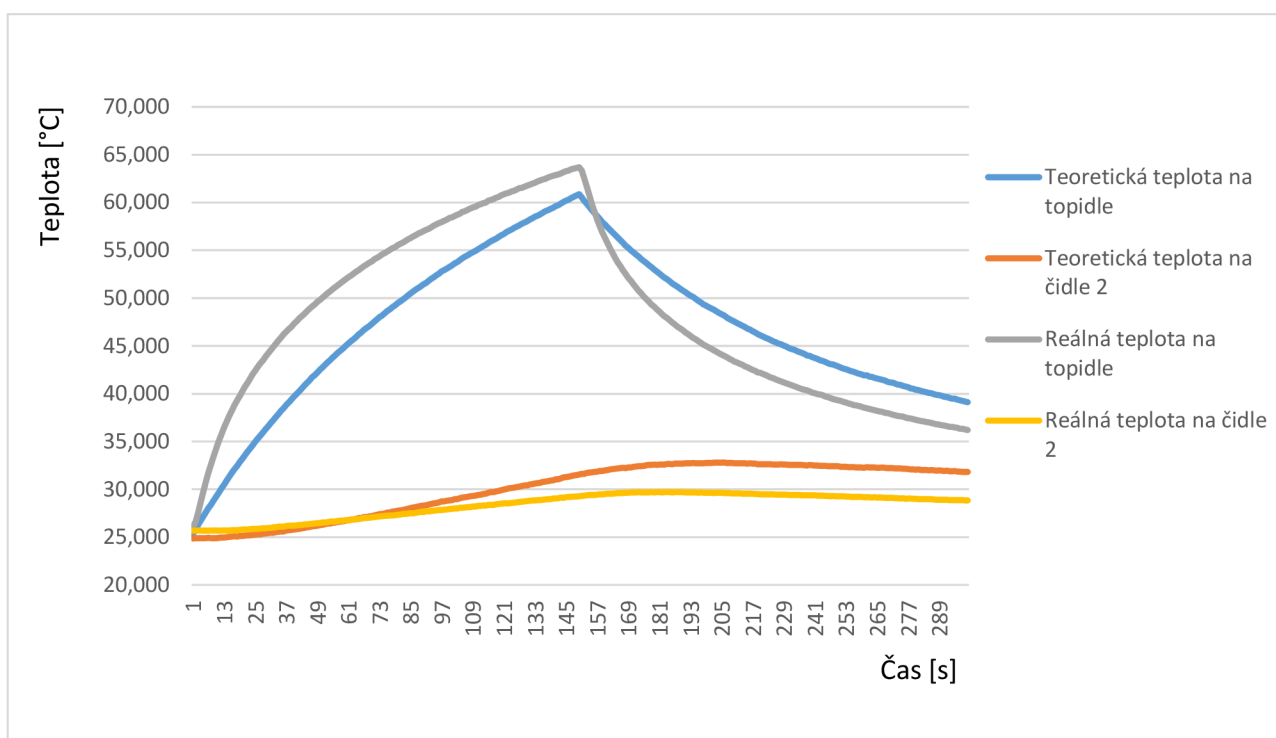
Teplota prostředí: 25,116 °C

Datum měření: 5. 5. 2017

Samotné měření pak probíhalo tak, že byl vzorek vhodně umístěn na měřicí část přístroje a následně zatížen závažím o hmotnosti 2,25 kg (z důvodu eliminace proudění vzduchu na rozhraní měřidlo-vzorek). Vyhodnocení probíhalo pomocí softwaru ANSYS a tabulkového procesoru Excel.

2.5

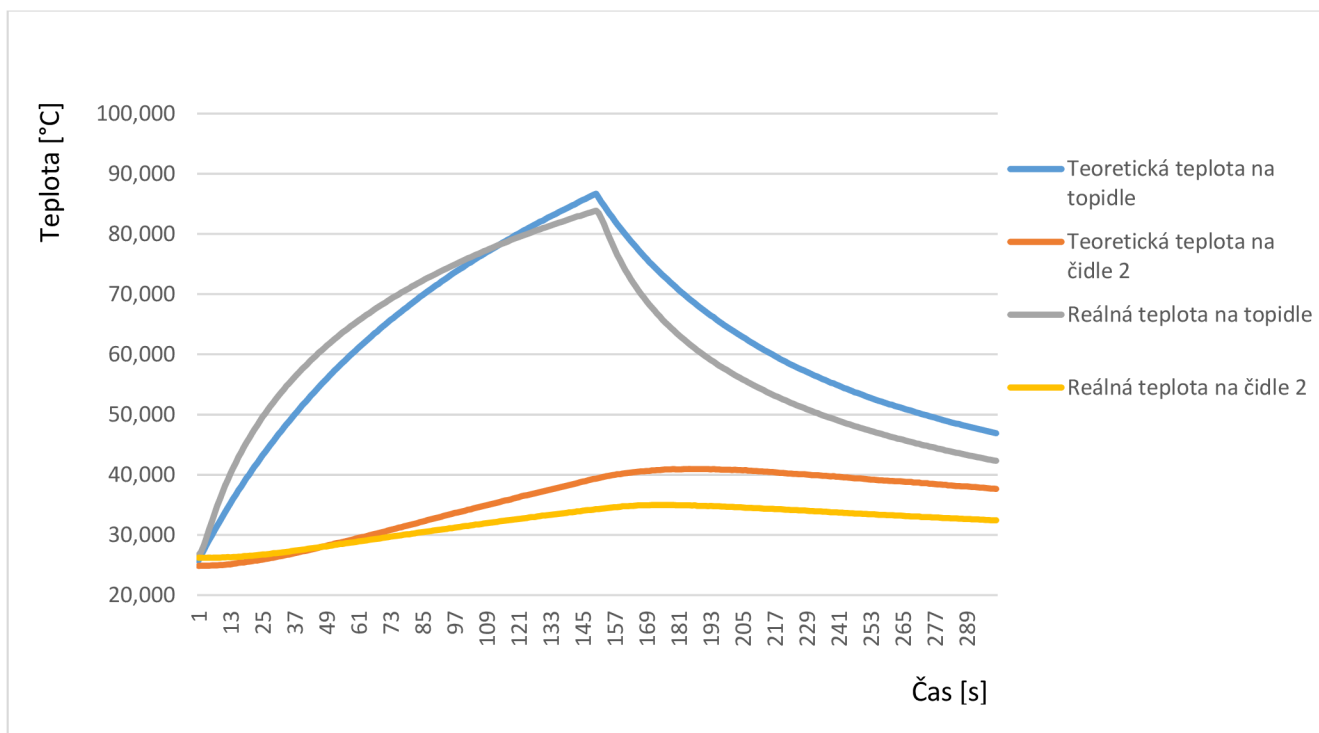
Výsledky měření a vyhodnocení výsledků



Obrázek 13: Graf šíření reálné a teoretické teplotní vlny vzorkem technického konopí

Tabulka 5: Hodnoty kvadrátu rozdílu teplotních vln při různých hodnotách součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity pro vzorek technického konopí

λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	c [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Kvadrát difference	Diference
0,060	2200	116	8589	92,677
0,050	2200	116	10912	104,461
0,065	2200	116	9696	98,468
0,063	2200	116	9022	94,984
0,061	2200	116	8699	93,268
0,059	2200	116	7852	88,612
0,055	2200	116	8892	94,297
0,059	2300	116	7942	89,118
0,059	2350	116	8083	89,906
0,059	2400	116	8337	91,307
0,059	2325	116	7972	89,286
0,059	2310	116	7920	88,994



Obrázek 14: Graf šíření reálné a teoretické teplotní vlny vzorkem pěnového polystyrénu s grafitem

Tabulka 6: Hodnoty kvadrátu rozdílu teplotních vln při různých hodnotách součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity pro pěnový polystyrén s grafitem

λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	ρ [kg.m ⁻³]	Kvadrát difference	Diference
0,035	1200	41	11023	104,990
0,038	1200	41	10546	102,694
0,037	1200	41	10722	103,547
0,038	1250	41	10569	102,806
0,045	1250	41	14562	120,673
0,038	1400	41	13157	114,704
0,04	1250	41	10953	104,657
0,038	1100	41	10752	103,692
0,038	1225	41	10304	101,509
0,038	1210	41	10596	102,937

Z tabulky 5 a tabulky 6 je patrné, že dominantním parametrem při vyhodnocování výsledků je součinitel tepelné vodivosti a tepelná kapacita slouží jen k nepatrnému zpřesnění výsledné hodnoty.

Pro vzorek technického konopí jsme předpokládali počáteční hodnotu součinitele tepelné vodivosti $0,060 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a hodnotu tepelné kapacity $2200 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Při snižování hodnoty součinitele tepelné vodivosti se kvadrát difference zvyšoval až do hodnoty $0,059 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Při zvyšování hodnoty součinitele tepelné vodivosti nad hodnotu $0,060 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ se kvadrát difference zvyšoval vždy, a proto jsem usoudil, že hodnota součinitele tepelné vodivosti pro tento vzorek je $0,059 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Při zvyšování hodnoty tepelné kapacity se snižoval kvadrát difference až na hodnotu $2310 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, poté se opět kvadrát difference zvyšoval, a proto jsem usoudil, že hodnota tepelné kapacity je $2310 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Pro vzorek pěnového polystyrénu jsme stejným způsobem usoudili hodnotu součinitele tepelné vodivosti $0,038 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a hodnotu tepelné kapacity $1225 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Pro vzorek dřeva ve formě dřevěné desky a směrem tepelného toku kolmo k vláknům jsme usoudili hodnotu součinitele tepelné vodivosti $0,19 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a hodnotu tepelné kapacity $2300 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Parametry technického konopí a pěnového polystyrénu udávané výrobcí jsou uváděny v tabulce 1. Hodnoty součinitele tepelné vodivosti technického konopí se značně liší z důvodu vyšší objemové hmotnosti našeho měřeného vzorku.

Tabulka 7: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity získané metodou zpětného modelování

Vzorek	$\lambda \text{ [W.m}^{-1}\text{K}^{-1}]$	$\rho \text{ [kg.m}^{-3}]$	$c \text{ [J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
Technické konopí	0,059	116	2310
Pěnový polystyrén s grafitem	0,038	41	1225
Dřevěná deska s přirozenou vlhkostí. Směr tepelného toku: kolmo k vláknům	0,19	414	2300

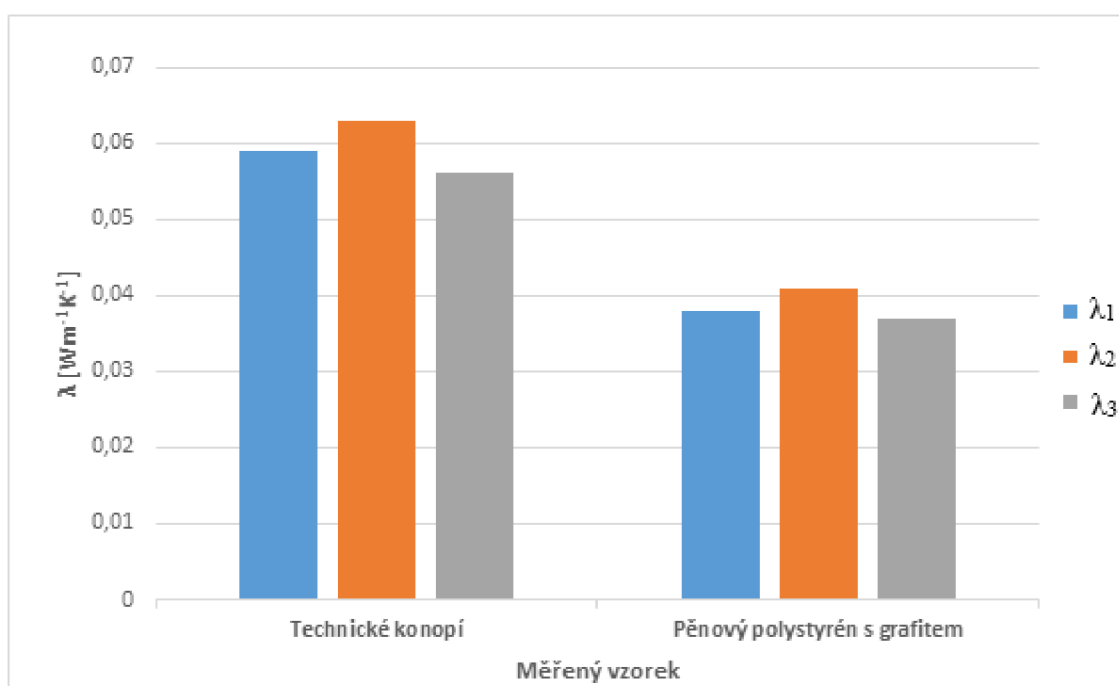
Tabulka 8: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti získané metodou zpětného modelování, přístrojem SHOTERM a přístrojem ISOMET

Vzorek	λ_1 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	λ_2 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	λ_3 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Technické konopí	0,059	0,063	0,056
Pěnový polystyrén s grafitem	0,038	0,041	0,037
Dřevěná deska s přirozenou vlhkostí. Směr tepelného toku: kolmo k vláknům	0,19	-	-

Kde λ_1 je hodnota součinitele tepelné vodivosti získaná metodou zpětného modelování

λ_2 je hodnota součinitele tepelné vodivosti získaná přístrojem SHOTHERM

λ_3 je hodnota součinitele tepelné vodivosti získaná přístrojem ISOMET



Obrázek 15: Hodnoty součinitele tepelné vodivosti získané metodou zpětného modelování, přístrojem SHOTHERM a přístrojem ISOMET

3 Závěr

Tato práce je věnována problematice měření součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity. První kapitola je věnována popisu mechanismů šíření tepla. Druhá kapitola se zabývá veličinami, které přenos tepla popisují a podrobně uvádí součinitel tepelné vodivosti a jeho závislost na vlhkosti, teplotě, objemové hmotnosti atd. Třetí kapitola je věnována teorii měření součinitele tepelné vodivosti různými metodami.

Praktická část je věnována rozvoji metody měření součinitele tepelné vodivosti metodou horkého drátu a přináší do této problematiky nové poznatky, zejména řeší tvar topidla a následně způsob zpracování naměřených výsledků pomocí metody zpětného modelování.

Pro potřeby této práce bylo vyvinuto experimentální měřidlo s pracovním označením Michaela, které má za cíl rychlé a přesné měření součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity i za zachování relativně nízkých výrobních nákladů.

Přístroj Michaela je první verzí jednoduchého přístroje nestacionárního měření součinitele tepelné vodivosti za použití kruhového zdroje tepla. Jak se zjistilo v průběhu měření, je obrovskou nevýhodou velikost teplotních čidel Pt1000. Přestože jsou tato čidla velmi přesnými snímači, dochází v jejich blízkém okolí k lokálnímu proudění ohřátého vzduchu, což zkresluje naměřené a vypočítané hodnoty. Teoretický model šíření teplotní vlny v softwaru ANSYS uvažuje jako zdroj tepla nekonečně tenkou plochu s nulovou teplotní vodivostí, to je v praxi nemožné a dále to znehodnocuje výsledky měření.

Naměřené výsledky by se teoreticky daly zpřesnit pomocí matematického modelování, vytvořením 3D plochy závislosti tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti a kvadrátu rozdílu teplotních vln. Následná parametrizace takové plochy a hledání globálních extrémů (globálních minim) na takovéto funkci (pomocí prvních derivací a hessianu) by měly vykázat nejpresnější hodnotu výsledků. Taková metoda je ovšem příliš zdlouhavá a pro praxi naprosto nepoužitelná, a proto se v další verzi přístroje Michaela využije přesnější model matematického modelování, který vychází ze standardní metody horkého drátu, ale je značně modifikováno pro případ topidla tvaru kruhu.

Pro porovnání měřicí schopnosti vyvinutého měřidla byly výsledky měření porovnány s výsledky měření na přístroji SHOTHERM a ISOMET 2104. Porovnáním dosažených výsledků byla prokázána těsná shoda výsledků pořízených různými měřidly. Tedy problematika reprodukovatelnosti výsledků se ukázala být příznivá. Dřevěná deska nebyla dále měřena.

V současné době mohu přístroj Michaela doporučit jako jednoduché měřidlo, které indikuje sledování šíření teplotní vlny pro následující numerické zpracování vhodnou metodikou.

Seznam použité literatury

- [1] KOLOMAZNÍK, K., SEDLÁŘ, J., MACHÁČKOVÁ, A.: Teorie technologických procesů III. Vysoké učení technické v Brně, Brno 1978, 1.vydání, skriptum VUT.
- [2] BRZOBOHATÝ, P.: Měření tepelné a teplotní vodivosti polymerních materiálů. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, Zlín 2002, s. 15-18
- [3] KREMPASKÝ, Július. Meranie Termofyzikálnych veličín. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied v Bratislave, 1969. ISBN 71-0,44-69.
- [4] Vedení tepla: Wikipedie. [Http://cs.wikipedia.org/](http://cs.wikipedia.org/) [online]. 2012 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Veden%C3%AD_teplo
- [5] BITTNER, J.: Měření tepelných vlastností materiálů. Bakalářská práce, fakulta technologická, UTB ve Zlíně, Zlín 2006
- [6] ZACH, HROUDOVÁ, Možnosti stanovení součinitele tepelné vodivosti u keramických zdících tvarovek. Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014, GRANT journal ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online), ETTN 072-11-00002-09-4
- [7] Tabulka hodnot součinitele tepelné vodivosti a objemové hmotnosti materiálů dostupná: <http://www.prirodnistavba.cz/popup/soucinitel-tepelne-vodivosti-33e.html>
- [8] ŘEHÁNEK, J. a kol.: Tepelně technické a energetické vlastnosti budov, Praha, Grada, 2002
- [9] HORÁK, Z.: Praktická fyzika. SNTL, Praha 1968
- [10] ONDRÁŠ, J.: Nestacionární metody měření tepelné vodivosti. Diplomová práce, fakulta technologická, VUT Brno, Gottwaldov 1983
- [11] Tepelný odpor, součinitel prostupu tepla, dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/prostup-tepla-stavebni-konstrukci/312-tepelny-odpor-r>
- [12] KUNO, Z.: Tepelné izolácie a meranie tepelných ztrát. SNTL. Praha 1963
- [13] Applied Precision Ltd. [on line]. [cit. 2006-04-25]. Dostupný z: <http://www.appliedp.sk/en/isomet.htm>
- [14] Thermophysical properties laboratory [on line]. [cit. 2006-04-21]. Dostupný z: http://www.tpl.ukf.sk/engl_vers/hot_wire.htm
- [15] MOŠNA, F.: Materiály a technologie III.- Nekovové materiály, SPN, 1988
- [16] ČSN EN ISO 8894-1 (726047) Žárovzdorné materiály - Stanovení tepelné vodivosti - Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)