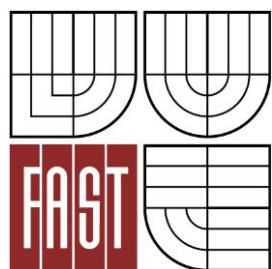




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

STUDIE VYUŽITELNOSTI VHODNÝCH MATERIÁLŮ PRO DLOUHODOBÉ UKLÁDÁNÍ TEPELNÉ ENERGIE

STUDY OF APPLICABILITY OF SUITABLE MATERIALS FOR LONG-TERM STORAGE OF HEAT
ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VERONIKA BUKVOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2016



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 Veronika Bukvová

Název Studie využitelnosti vhodných materiálů pro dlouhodobé ukládání tepelné energie

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

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

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

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

Podklady a literatura

Davies, Morris, G., Building Heat Transfer, John Wiley 2004

Halahyja, M. a kol., Stavebná tepelná technika. Tepelná ochrana budov, Jaga Bratislava 1998

ČSN 730540, Tepelná ochrana budov, ÚNMZ 2011

Dostupná firemní dokumentace o žárovzdorných materiálech

Zásady pro vypracování

Problematika solárních systémů s dlouhodobou akumulací tepla je využívána až v posledních dvou desetiletích. Většinou slouží zásobníky k ukládání tepelné energie zachycené solárními termickými kolektory a energie takto uložená do zásobníků v letním období zajišťuje v období zimním dodávku tepla pro objekty. Selekce vhodných materiálů není jednoduchá, omezením bývají související finanční náklady.

V této souvislosti sestavte:

- 1) přehled technologií používaných v současné době pro dlouhodobé ukládání tepelné energie pro potřeby v bytové výstavbě,
 - 2) popište konstrukční uspořádání studovaných dlouhodobých tepelných zásobníků,
 - 3) vymezte fyzikální vlastnosti materiálů použitelných pro konstrukci vysokoteplotních akumulačních zásobníků,
 - 4) ověřte vhodnou fyzikální metodou závislost součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity na teplotě za žáru u vybraného materiálu,
 - 5) vymezte využitelnost jednotlivých studovaných materiálových skupin z hlediska jejich potenciálu pro dlouhodobé pokrytí energetické náročnosti staveb pro bydlení.
- Obsah bakalářské práce by měl zhodnotit účelnost vhodných materiálů dlouhodobých akumulačních zásobníků pro využití v obytných stavbách, které jsou ovlivněny klimatickými podmínkami ČR.

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/diplomové 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).
- 3.

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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá vhodnými způsoby ukládání tepelné energie a selekcí materiálů pro vysokokapacitní zásobník. V práci jsou popsány technologie využívané v současné době pro dlouhodobé ukládání tepelné energie, konstrukční uspořádání tepelného zásobníku, fyzikální vlastnosti materiálů použitelných pro konstrukci vysokoteplotních zásobníků a využitelnost těchto materiálů. V práci je popsán postup měření materiálových charakteristik a způsob vyhodnocení.

Klíčová slova

Sluneční záření, tepelná energie, akumulace, zásobník, součinitel tepelné vodivosti, tepelná kapacita, metoda topného drátu.

Abstract

This bachelor thesis deals with appropriate ways of storing thermal energy and selection of materials for a high capacity storage unit. The thesis describes technologies currently used for long-term storage of thermal energy, structural arrangement of the thermal unit, physical properties of the materials usable for construction of high-temperature storage units and the utilization of these materials. The thesis also describes the measuring procedure of the material characteristics and the method of evaluation.

Keywords

Solar radiation, thermal energy, accumulation, storage unit, coefficient of thermal conductivity, heat capacity, hot wire method.

Bibliografická citace VŠKP

Veronika Bukvová. *Studie využitelnosti vhodných materiálů pro dlouhodobé ukládání tepelné energie*. Brno, 2016. 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc.

Prohlášení

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

V Brně dne 25. 5. 2016

.....
Veronika Bukvová

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat celé mé rodině, která mi byla po celou dobu studia oporou, a díky které mohla vzniknout tato bakalářská práce. Dále bych ráda poděkovala vedoucímu práce, panu prof. RDNr. Ing. Stanislavu Šťastníkovvi, CSc., za odborné vedení, konzultace, cenné rady, korekce a připomínky při zpracování této bakalářské práce a panu RNDr. Ing. Františkovi Šotovi za užitečné rady a nenahraditelnou pomoc při přípravě experimentálního měření.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	SLUNEČNÍ ENERGIE.....	12
3	SOLÁRNÍ TEPELNÉ SYSTÉMY	13
3.1	SOLÁRNÍ KOLEKTOR.....	13
3.1.1	SOLÁRNÍ TEPELNÝ KOLEKTOR	13
3.1.2	TROMBEHO STĚNA.....	15
3.1.3	FRESNELOVA ČOČKA.....	16
3.1.4	PARABOLICKÝ KONCENTRÁTOR SLUNEČNÍ ENERGIE	16
3.2	TEPELNÝ ZÁSOBNÍK.....	17
4	PRINCIPY AKUMULACE TEPLA	18
4.1	AKUMULACE POMOCÍ SENZIBILNÍHO ZÁSOBNÍKU	18
4.2	AKUMULACE POMOCÍ LATENTNÍHO ZÁSOBNÍKU	19
4.3	AKUMULACE REAKČNÍHO TEPLA	21
4.4	AKUMULACE S VYUŽITÍM SORPCE.....	21
5	ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY	22
5.1	ŽÁROBETON.....	22
5.2	HLINITOKŘEMIČITÉ MATERIÁLY	24
6	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI VYSOKOTEPLOTNÍCH AKUMULAČNÍCH ZÁSOBNÍKŮ	25
6.1	TEPELNÁ VODIVOST	25
6.2	TEPLOTNÍ VODIVOST	25
6.3	MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	25
6.4	TEPELNÁ AKUMULACE.....	25
7	MĚŘENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI	27
7.1	METODA TOPNÉHO DRÁTU.....	27

7.2	UPRAVENÁ METODA TOPNÉHO DRÁTU	29
7.3	IDENTIFIKACE TEPELNÉ VODIVOSTI.....	30
7.4	IDENTIFIKACE TEPLOTNÍ VODIVOSTI UPRAVENÝM PŘÍSTUPEM ...	32
8	PRAKTICKÁ ČÁST	34
9	ZÁVĚR.....	38
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	42

1 ÚVOD

Solární energie patří do skupiny obnovitelných zdrojů, což znamená, že jsou lidstvem prakticky nevyčerpatelné a budou k dispozici stále. Využívání takové energie nemá téměř žádný dopad na životní prostředí, neprodukuje škodlivé odpady, ani nijak neovlivňuje tepelnou rovnováhu Země. Významnou výhodou je i to, že sluneční energie je k dispozici zadarmo. Nehrozí tedy problémy související se zvyšováním cen, jako je tomu u fosilních paliv.

Pro akumulaci tepelné energie slouží zásobníky tepla, které zastupují v solární technice důležitou roli. Zásobník akumuluje tepelnou energii a uchová ji pro pozdější využití. Umožní tak překonat nerovnoměrnost mezi výrobou a spotřebou. Vysokokapacitní zásobník dokáže akumulovat značné množství tepla a je tak schopný zásobovat stavební objekt energií pocházející jen ze slunečního záření. Vhodným výběrem materiálů pro zásobník tepelné energie lze v období s vysokou intenzitou slunečního záření akumulovat takové množství tepla, které pokryje veškerou roční spotřebu energie. Tyto materiály musí disponovat určitými tepelnými vlastnostmi, jejichž charakteristikou se budeme zabývat.

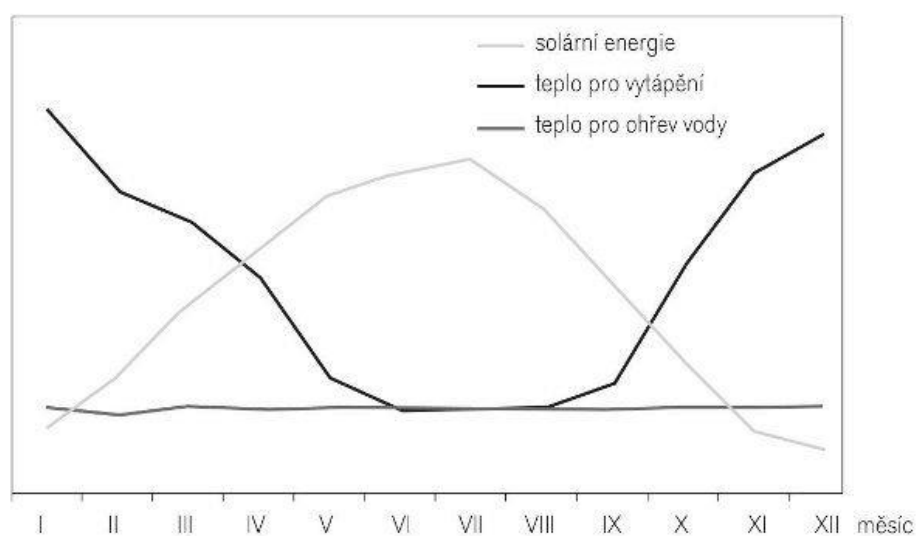
Cílem této bakalářské práce je ověřit vhodnou fyzikální metodou závislost součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity na teplotě.

2 SLUNEČNÍ ENERGIE

I přes to, že je sluneční záření vydatným obnovitelným zdrojem energie, tak se na povrch Země nedostává 24 hodin denně, ale je pro nás k dispozici ve slunečné dny přibližně jen 8 hodin denně a některé dny, kdy je nepříznivé počasí, nemusí být k dispozici vůbec. A to je důvod, proč sluneční energii akumulovat.

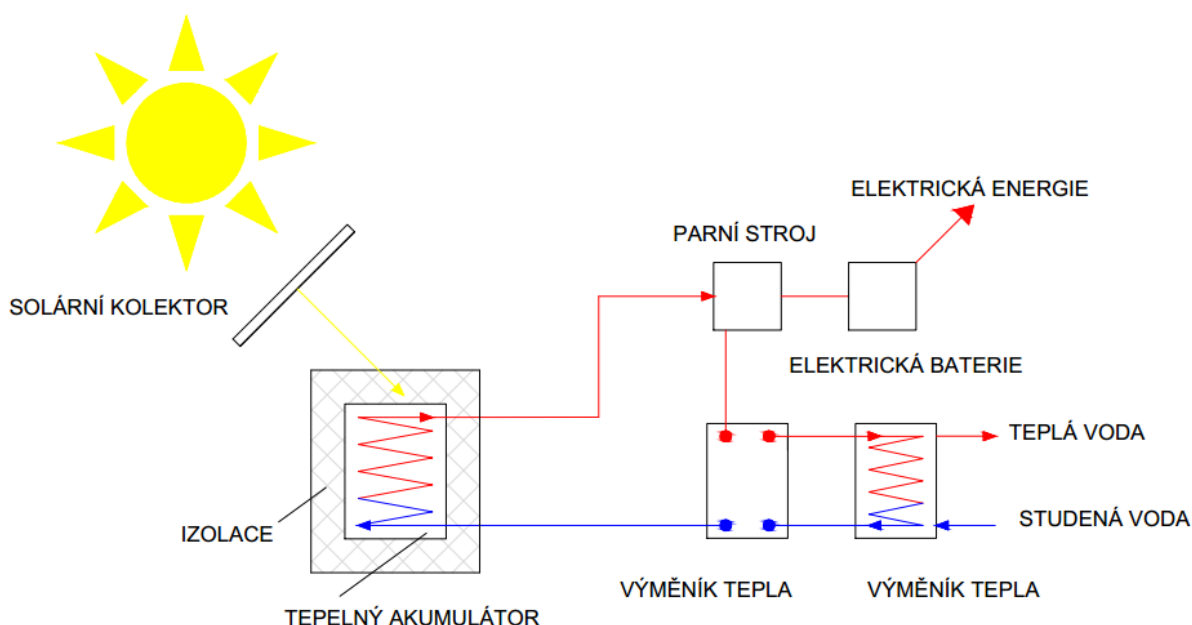
Tab. 1 Sluneční intenzita během roku v porovnání s potřebou tepla pro vytápění [15]

Období	Energie		Podíl [%] vůči		Spotřeba tepla [%]
	kWh.m ⁻²	MJ.m ⁻²	Letnímu období	Celému roku	
Leden	22	80	13,17	2,24	16,91
Únor	36	130	21,56	3,33	11,93
Březen	83	300	49,70	7,68	12,11
Duben	117	420	70,06	10,82	8,48
Květen	150	540	89,82	13,88	5,10
Červen	167	600	100,00	15,45	2,54
Červenec	167	600	100,00	15,45	2,54
Srpen	136	500	83,33	12,86	2,54
Září	100	360	59,88	9,25	4,25
Říjen	56	200	33,53	5,18	5,98
Listopad	25	90	14,97	2,31	12,92
Prosinec	19	70	11,38	1,75	14,70
Celý rok	1081	3890	-	100,00	100,00



Obrázek 1 Spotřeba tepla a nabídka solární energie

3 SOLÁRNÍ TEPELNÉ SYSTÉMY



Obrázek 2 Schéma solárního systému

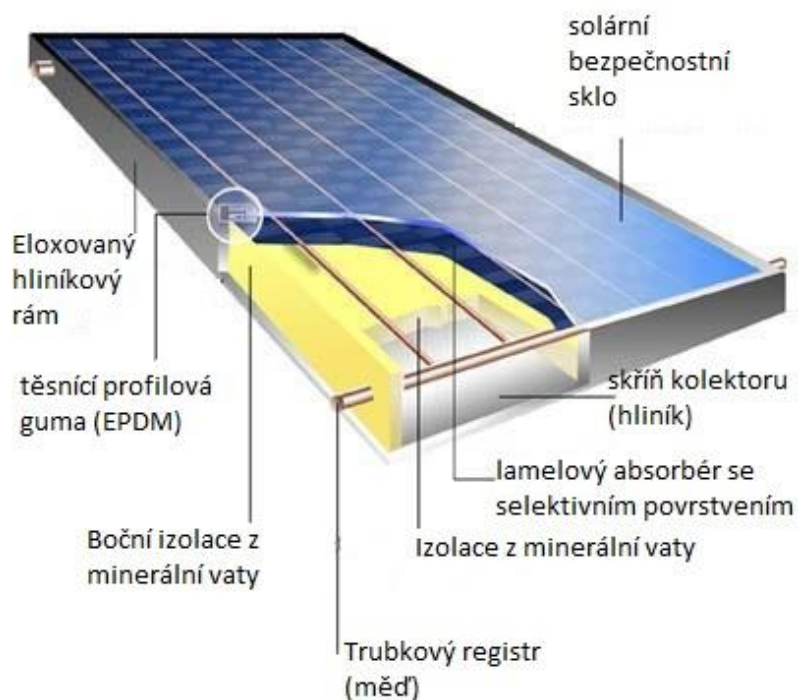
3.1 SOLÁRNÍ KOLEKTOR

3.1.1 SOLÁRNÍ TEPELNÝ KOLEKTOR

Jedná se o zařízení určené k pohlcení slunečního záření a jeho následné přeměně na tepelnou energii. Sluneční paprsky dopadající na termický kolektor jsou pohlcovány absorbérem umístěným v kolektoru. V absorbéru dochází k přeměně slunečních paprsků na tepelnou energii. Absorbér tvoří trubky umístěné těsně vedle sebe, což umožňuje lepší šíření tepla. V trubkách se nachází teplotnosná kapalina (voda, nemrznoucí směs vody a propolenglykolu), která přemísťuje teplo do zásobníku.

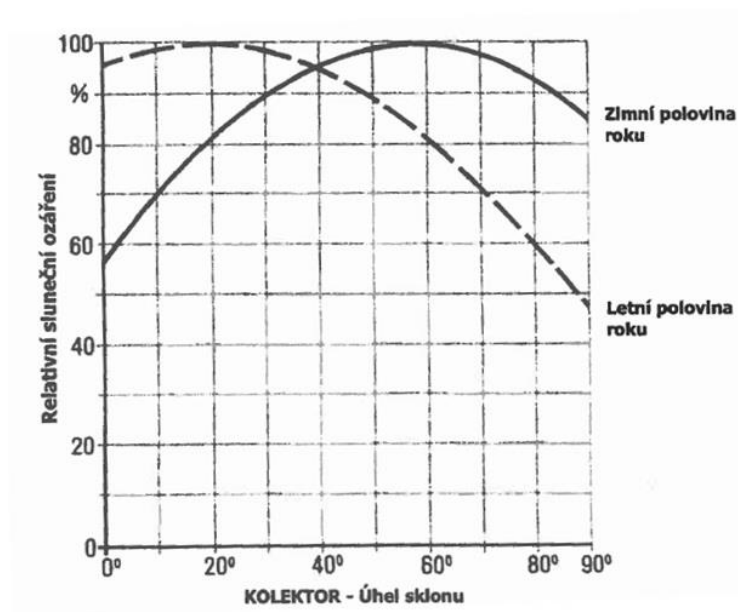
Účinnost kolektorů dosahuje až 75 %, toto poměrně vysoké číslo je dosaženo použitím vhodných materiálů. Absorbér, tvořený z měděných trubek a plechů, je pokryt selektivní vrstvou zbarvenou modře až černě, díky které dochází k pohlcení co největšího množství sluneční energie a zároveň téměř nedochází k vyzařování

energie ve formě tepla do okolí. Popsaný kolektor je vhodný pouze pro vodní zásobníky.



Obrázek 3 Konstrukce solárního kolektoru [19]

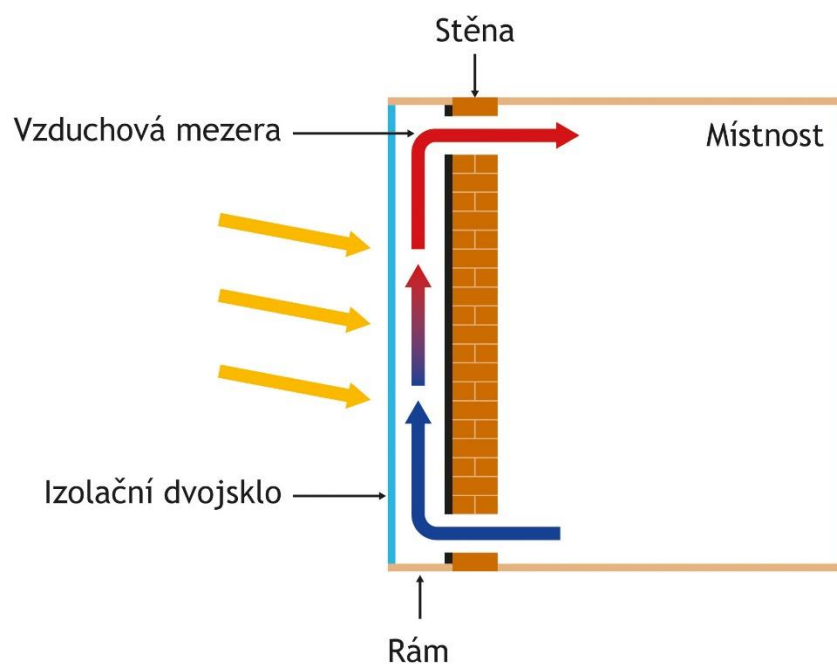
Chceme-li zachytit co nejvíce slunečního záření, je třeba se zabývat také sklonem a orientací kolektorů. Sklon musí být takový, aby kolektor mohl zachytit co nejvíce sluneční energie jak v letním, tak v zimním období. Optimální sklon pro sezónní letní provoz je 25° - 35° . Pro sezónní zimní provoz to je 60° - 90° . Jestliže má být provoz zásobníku tepla celoroční, pak se jako optimální jeví sklon kolektoru 40° - 45° .



Obrázek 4 Úhel sklonu kolektoru [19]

3.1.2 TROMBEHO STĚNA

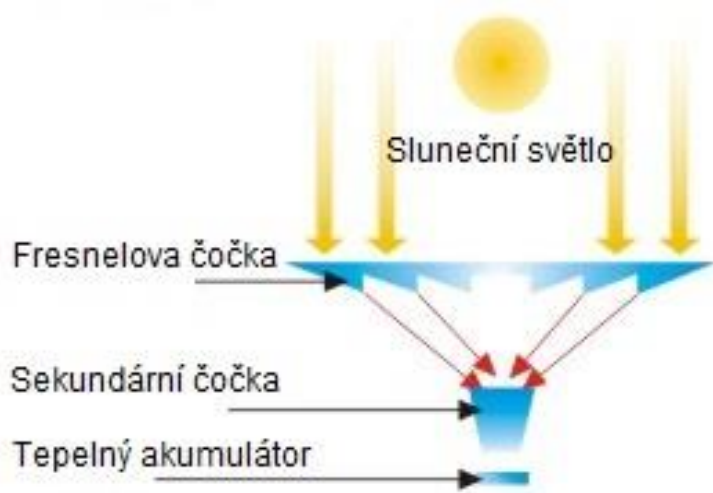
Jedná se o stěnu natřenou černou barvou, která absorbuje teplo z dopadajících slunečních paprsků a zahřívá se tak. Akumulované teplo je pak vyzařováno do okolí. Před zdí může být skleněná bariéra a prostor mezi ní a sklem funguje jako skleník.



Obrázek 5 Schéma ohřevu vzduchu v Trombeho stěně [20]

3.1.3 FRESNELOVA ČOČKA

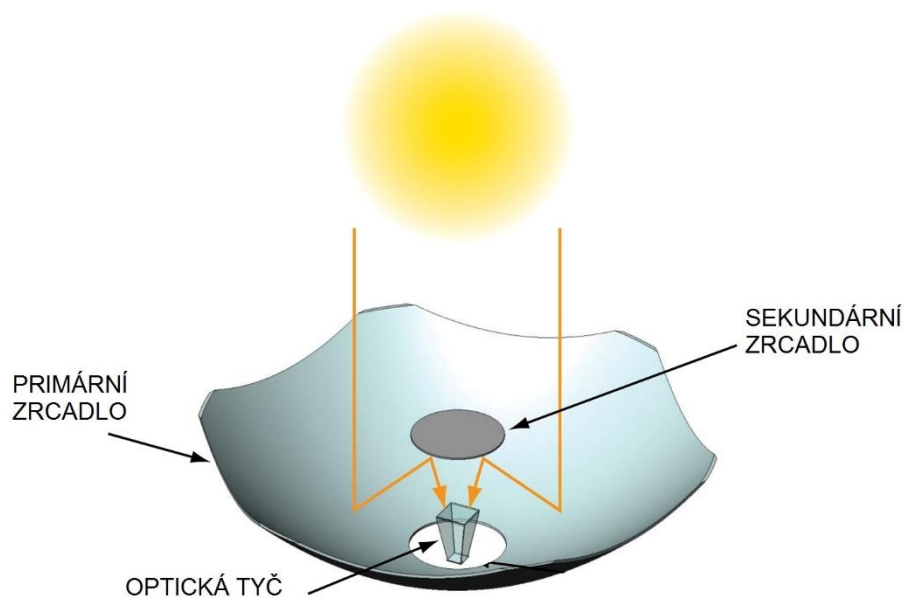
Fresnelova čočka je deska s řadou drážek. Každá z nich má stejný profil jako odpovídající část konvenční čočky. Z čočky jsou odstraněny ty části, které se přímo nepodílejí na lomu paprsků. Díky tomu je dosaženo úspory materiálu, která snižuje výrobní náklady. Čočka slouží ke koncentraci solární energie a k získání vyšší teploty v tepelném absorbéru. Popsaný způsob je vhodný pro vysokokapacitní tepelný zásobník.



Obrázek 6 Schéma uspořádání Fresnelovy čočky [21]

3.1.4 PARABOLICKÝ KONCENTRÁTOR SLUNEČNÍ ENERGIE

Kolektor využívá odrazu dopadajícího slunečního záření od odrazivé plochy do ohniska paraboly a koncentraci této energie. Energie je dále vhodným způsobem přemísťována do zásobníku. Podle časové polohy Slunce v průběhu dne se parabola otáčí a dochází tak k absorpci co největšího množství solární energie. Také tento způsob je vhodný pro vysokokapacitní tepelný zásobník.



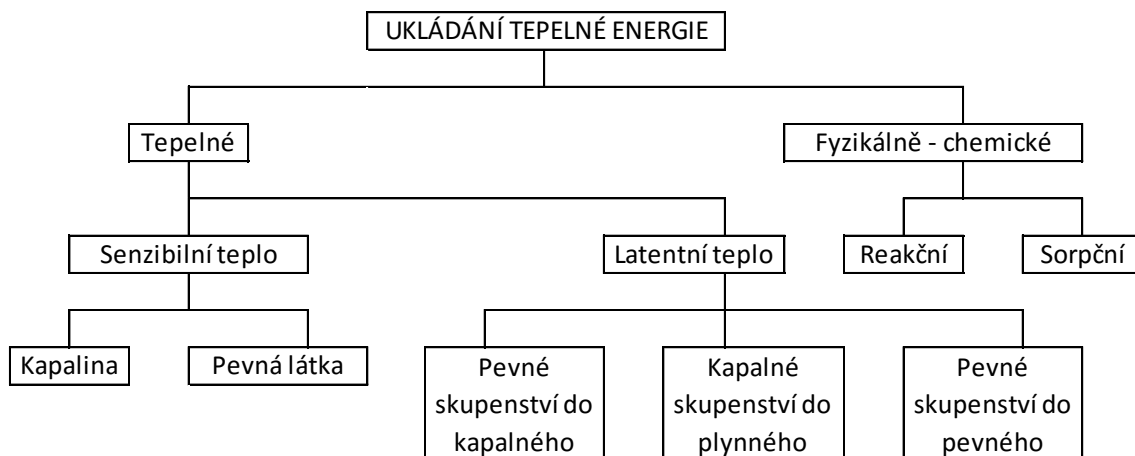
Obrázek 7 Schéma parabolického koncentrátoru [22]

3.2 TEPELNÝ ZÁSOBNÍK

U tepelných zásobníků se sleduje množství tepla, které je zásobník schopen akumulovat v objemu 1 m^3 , tedy hustota akumulace, která je rozhodující pro návrh jeho velikosti. Materiál s velkou hustotou akumulace umožňuje navrhnout zařízení menších rozměrů než materiál s menší hustotou akumulace.

4 PRINCIPY AKUMULACE TEPLA

Tepelná energie může být v zásobníku akumulována různými způsoby. K dispozici je tepelné skladování energie s využitím senzibilního zásobníku, latentního zásobníku, akumulace reakčního tepla a akumulace s využitím sorpce. Různé typy tepelného skladování sluneční energie jsou znázorněny na obrázku.



Obrázek 8 Rozdělení zásobníků

4.1 AKUMULACE POMOCÍ SENZIBILNÍHO ZÁSOBNÍKU

U využití akumulace tepla tímto způsobem je teplo akumulováno do vhodných materiálů, aniž by došlo ke změně jejich skupenství. Senzibilní akumulace tepla využívá tepelnou kapacitu a změnu tepla materiálu během procesu nabíjení a vybíjení. Problém nízké hustoty akumulace u tohoto způsobu ukládání tepla musí být kompenzován poměrně velkým objemem zásobníku. Matematicky lze tento děj popsat podle následující rovnice:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT = mC_{ap}(T_2 - T_1).$$

Vhodným materiálem je materiál s vysokou tepelnou kapacitou a nízkými pořizovacími náklady. Těmto požadavkům nejlépe odpovídá voda s tepelnou kapacitou $1160 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}$ a hustotou akumulace $100 - 300 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$. Problém nastává v rozsahu teplot, které se pohybují jen mezi 0°C a 100°C .

Možné je i použití betonu. Je to materiál s vysokou tepelnou kapacitou, dobrými mechanickými vlastnostmi (např. tlaková pevnost) a vysokou mechanickou

odolností vůči cyklickému tepelnému zatížení. Objemová kapacita je podstatně nižší než u vody, pohybuje se jen mezi 460 a 560 Wh.m⁻³.K. Rozsah teplot je zde příznivější než u vody. Pohybuje se od 0°C do 500°C. Výhoda v použití zásobníků s pevnými látkami je i to, že nehrozí porušení mrazem jako u zásobníků s použitím vody. [4], [6]

*Tab. 2 Objemová tepelná kapacita materiálů pro akumulaci tepla
při 20°C [7]*

Médium	Rozsah teplot [°C]	Specifická tepelná kapacita [Wh.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Objemová tepelná kapacita [Wh.m ⁻³ .K ⁻¹]	Hustota [kg.m ⁻³]
voda	0 - 100	1,16	1160	998
vzduch	-50 - 1000	0,28	0,31	1,1
olej	0 - 400	0,44 - 0,5	350 - 450	800 - 900
šterk, písek	0 - 800	0,2	360 - 390	1800 - 2000
granit	0 - 800	0,21	570	2750
beton	0 - 500	0,24	460 - 560	1900 - 2300
cihla	0 - 1000	0,23	330 - 440	1400 - 1900
železo	0 - 800	0,13	1000	7860
směs solí (53KNO ₃ +4NaNO ₂ +7NaNO ₃)	150 - 450	0,36	480 - 550	2561 - 2243

4.2 AKUMULACE POMOCÍ LATENTNÍHO ZÁSOBNÍKU

Při tomto způsobu akumulace tepla je využito skupenského tepla tání a tuhnutí a tepelné kapacity materiálu (tj. citelné teplo materiálu v kapalném a pevném stavu). Při změně skupenství látky se uvolňuje/spotřebovává energie, která je označována jako latentní a nedochází ke změně teploty. Skladovací kapacita je dána rovnicí:

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_2}^{T_3} mC_p dT,$$

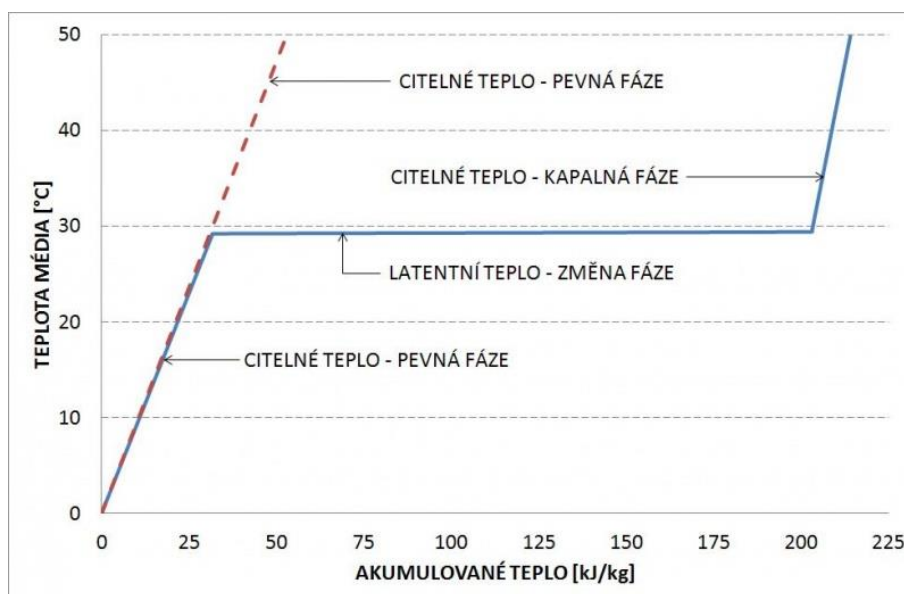
$$Q = m[C_{sp}dT(T_2 - T_1) + a_m \Delta h_m + C_{lp}(T_3 - T_2)].$$

Výhodou je především možnost větší akumulace tepla, tedy menší velikost zásobníku oproti citelnému skladování. V dnešní době se používá přechod pevné fáze v kapalinu a látky používané v rámci této technologie se označují jako materiály se změnou fáze (PCM). Hustota akumulace takových materiálů dosahuje 200 až 500 MJ.m⁻³. Vzhledem k tomu, že je při této akumulaci tepla využito fázové přeměny látek, u kterých tak dochází ke změně objemu, není tento způsob skladování energie vhodný pro vysokokapacitní zásobník. [2]

Výběrem vhodných látek se změnou skupenství ve vhodném teplotním rozmezí a způsobem jejich použití lze akumulaci optimalizovat. K dispozici jsou látky organické a látky anorganické.

Mezi organické látky vhodné k použití akumulace tepla patří technické parafíny a vosky. Hodnota skupenského tepla těchto materiálů se pohybuje mezi 90 až 200 MJ.m⁻³, ale mají velmi nízkou tepelnou vodivost 0,2 W.m⁻¹.K⁻¹. [2]

Vhodné je využití i anorganických látek a to hydratovaných solí, např. Glauberova sůl (síran sodný Na₂SO₄.10H₂O) nebo sůl kyseliny octové (CH₃COONa.3H₂O), jejichž hodnota skupenského tepla tání je 180 až 350 MJ.m⁻³, příznivá je i hodnota tepelné vodivosti 0,5 W.m⁻¹.K⁻¹. Použití těchto materiálů v zásobnících je limitováno řadou problémů. Jde o problémy spojené se sníženou akumulační hodnotou a zvýšenou korozivitou. [2]



Obrázek 9 Porovnání průběhu teplot při akumulaci latentního tepla a akumulaci citelného tepla [17]

4.3 AKUMULACE REAKČNÍHO TEPLA

Akumulace s využitím chemických reakcí využívá vratných chemických reakcí vhodných látek, které jsou doprovázeny jímáním/uvolňováním (v jednom směru reakce endotermická, v druhém směru reakce exotermická) tepla.



Přivedením reakčního tepla ΔH lze sloučeninu AB rozložit na dvě samostatné látky A a B . Produkty reakce A a B musí být snadno oddělitelné. Složky AB a A jsou zpravidla v pevném nebo kapalném skupenství, látka B je zpravidla plyn. Množství naakumulovaného tepla vyjadřuje rovnice:

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H$$

Předpokládaná hustota akumulace dosahuje 1000 až 3000 MJ.m⁻³.

Mezi nejvhodnější materiály patří organické pevné látky, např. roztok pentaerythritolu, pentaglycerinu, Li₂SO₄ (síran lithný) a KHF₂ (hydrogendifluorid draselný).

4.4 AKUMULACE S VYUŽITÍM SORPCE

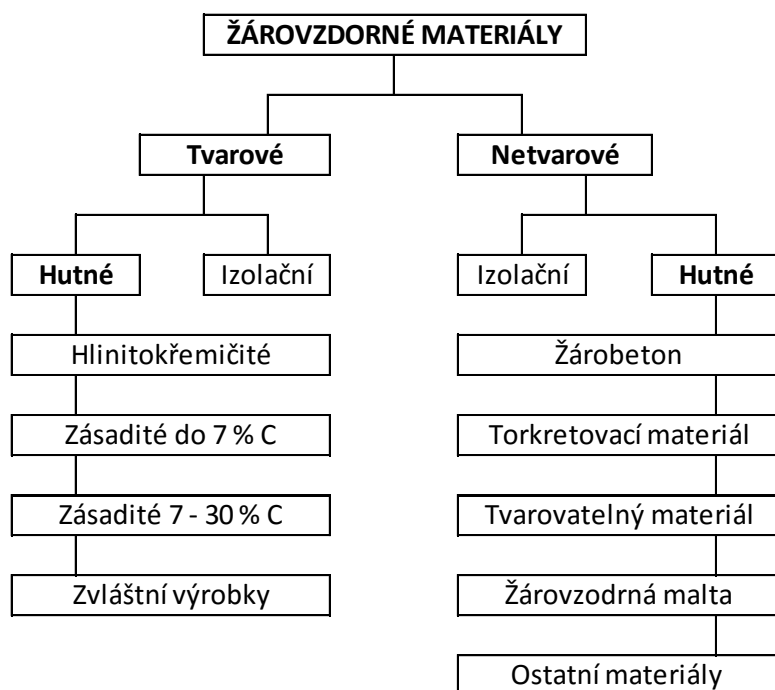
Zde je využito fyzikálního děje absorpce a adsorpce. Absorpce probíhá v kapalně látce a adsorpce v tuhé látce. Systém využívá teplo, které se uvolní při sorpci. Tento druh akumulace můžeme rozdělit na systém otevřený a systém uzavřený.

Při adsorpci dochází ke shromažďování plynné nebo rozpuštěné látky na povrchu pevné látky, to způsobuje exotermní reakci, při které dochází k uvolňování tepla. Desorpce je děj opačný. Při desorpci dochází k uvolňování absorbované látky z pevného povrchu.

Nejčastěji používanými materiály jsou mikroporézní a mezoporézní materiály zeolity a silikagely. Z kapalných látek se nejvíce využívá LiCl (chlorid lithný). Mezi nevýhody, které omezují využití těchto látek, patří především malý rozsah provozních teplot (20 – 150°C) a vysoká cena. Hustota akumulace tepla činí 500 až 1000 MJ.m⁻³. [8]

5 ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY

V oblasti vysokých teplot mají nezastupitelné postavení žárovzdorné materiály. Jedná se o materiály, které se vyznačují schopností odolávat působení vysokých teplot. Žárovzdornost se stanovuje ze žároměrné shody zkušební a laboratorní žároměrky a vyjadřuje se číslem příslušné laboratorní žároměrky, s níž se zkušební žároměrka současně dotkla podložky. Složení těchto materiálů tvoří především oxidy SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , Cr_2O_3 a CaO .



Obrázek 10 Rozdělení materiálů

5.1 ŽÁROBETON

Žárovzdornost je vlastnost žárovzdorných materiálů, která požaduje žárovou deformační teplotu nejméně 1580°C . Tento požadavek většina betonů nesplňuje, proto je vhodnější tyto materiály označit jako betony odolné vyšším teplotám, které jsou schopné odolávat teplotám nad 200°C . Působením vysoké teploty beton degraduje (rozklad hydratačních produktů a rozpad kameniva).

Tab. 3 Chování betonu v závislosti na teplotě [18]

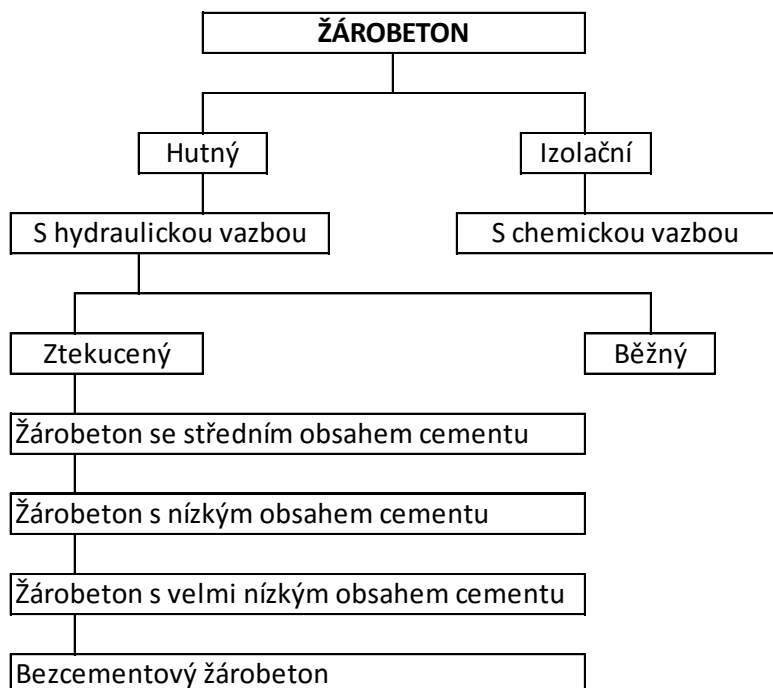
Teplota [°C]	Chování betonu	
20 - 80	pomalá ztráta kapilární vody	explosivní odprýskávání
100	zřetelné zvýšení propustnosti vody	
80 - 150	dehydratace ettringitu	
150 - 170	rozklad sádry $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
200	ztráta fyzikálně vázané vody, zvýšení vnitřního tlaku	
300	praskání křemičitého kameniva	
400	rozklad portlanditu	výskyt trhlin
500	změna krystalové fáze v kamenivu a písku	
700	rozklad uhličitanu vápenatého, uvolňování oxidu uhličitého	
1300	celkový rozklad betonu, tavení některých složek	

Beton odolný vysokým teplotám je možné vyrobit při použití speciálních materiálů. Vyhovující jsou takové materiály, které degradaci buď vůbec nepodléhají, nebo jí podléhají co nejméně.

Hutné žárovzdorné betony o objemové hmotnosti $1500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a vyšší, které jsou vystavené teplotě do 700°C , mohou obsahovat hutné přírodní kamenivo (čedič, diabas, andezit). Na kamenivo jsou kladeny určité požadavky. Nesmí se smršťovat, ani měnit své mechanické vlastnosti. Jako plnivo do betonu je zcela nevhodné použít žulu, která se při působení vysoké teploty smršťuje nebo křemenné kamenivo, které naopak svůj objem zvětšuje. Pro výrobu žárobetonů vystaveným teplotám vyšším 700°C se používá kamenivo umělé, např. drcený keramický stěp nebo drcená pomalu chlazená struska. Plnivem pro žárobetony odolávající teplotám nad 1000°C je drcený šamot, korund, drcený bauxit, chromit nebo karborundum.

Nejen kamenivo, ale i hydraulické pojivo je složka, které je třeba věnovat velkou pozornost při volbě materiálů pro vhodné složení žárobetonu. Optimálním pojivem je směsný cement s malým obsahem portlandského slínku, jehož součástí jsou příměsi na bázi strusky nebo popílku. Nejvhodnějším pojivem je hlinitanový cement. Naopak nejméně vhodné je použití čistého portlandského cementu, neboť vlivem působení vysoké teploty podléhá degradaci (ztráta chemicky vázané vody vede k jeho rozkladu). Pomocí elektrérenského popílku, jemně mleté vysokopecní

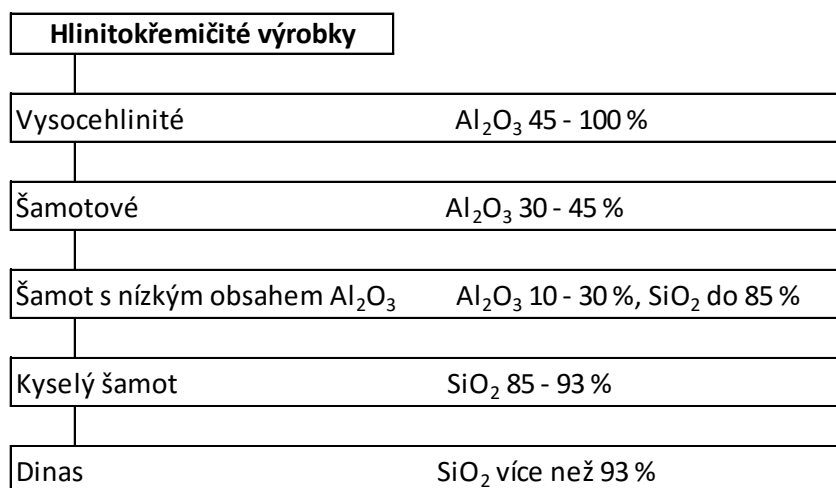
strusky, šamotového prachu, jemného cihlářského prachu nebo jemně mletého chromitu můžeme odolnost betonu působení vysokých teplot ještě zvýšit. [18]



Obrázek 11 Rozdělení žárobetonů

5.2 HLINITOKŘEMIČITÉ MATERIÁLY

Hlavní složkou těchto materiálů je oxid křemičitý SiO_2 a oxid hlinitý Al_2O_3 . Dále obsahují doprovodné oxidy Fe_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , TiO_2 .



Obrázek 12 Rozdělení hlinitokřemičitých materiálů [9]

6 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO KONSTRUKCI VYSOKOTEPLOTNÍCH AKUMULAČNÍCH ZÁSOBNÍKŮ

Pro použití žárovzdorných materiálů jsou důležité jejich tepelné vlastnosti, jako je tepelná vodivost, teplotní vodivost, měrná tepelná kapacita a tepelná akumulace.

6.1 TEPELNÁ VODIVOST

Součinitel tepelné vodivosti λ udává množství tepla, které prostoupí 1 m² plochy při teplotním spádu 1 K.m⁻¹. Hodnotu součinitele tepelné vodivosti ovlivňuje řada faktorů, mezi ty nevýznamnější patří teplota. Se zvyšující se teplotou roste i tepelná vodivost. Dalším faktorem významně ovlivňujícím součinitel tepelné vodivosti je objemová hmotnost. Pro vyšší teploty jsou vhodnější materiály s vyšší objemovou hmotností. Dále je to pórovitost, chemické a mineralogické složení. Se zvyšující se teplotou roste i tepelná vodivost.

6.2 TEPLTNÍ VODIVOST

Teplotní vodivost vyjadřuje intenzitu šíření tepla v materiálu. Udává rychlost šíření teplotního pole v tuhé látce za konstantního tlaku. Lze ji vyjádřit podle následující rovnice:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_b}$$

6.3 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA

Měrná tepelná kapacita vyjadřuje množství tepla potřebného k ohřátí 1 kg látky o 1 K. Lze ji vyjádřit podle rovnice:

$$c_p = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}$$

6.4 TEPELNÁ AKUMULACE

Tepelná akumulace je schopnost materiálu při ohřívání přijímat určité množství tepla, které při ochlazování odevzdává okolí. Tepelně akumulační schopnost je tím větší, čím větší je objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a měrná

tepelná kapacita materiálu. Dobrou tepelnou akumulací se vyznačují materiály, které dokážou pojmout velké množství tepla a zároveň k odevzdání tepla do okolí dochází poměrně pomalu.

S rostoucí hodnotou měrného tepla roste hodnota akumulace tepla. Materiál musí mít velkou tepelnou vodivost z toho důvodu, aby bylo možné teplo v zásobníku rovnoměrně rozvrstvit a bylo tak rozvrženo do celého objemu akumulátoru. Naopak v období vybíjení zásobníku musí být teplo snadno odvedeno z celého objemu.

Vhodným řešením k akumulaci tepelné energie s využitím senzibilního tepla se zdá být beton a keramika. Tyto materiály jsou ideální především vzhledem k jejich dobré tepelné vodivosti, vysokému rozmezí teplot, dostupnosti, nízké ceně a snadnému zpracování.

7 MĚŘENÍ SOUČINITELE TEPELNÉ VODIVOSTI

Součinitel tepelné vodivosti můžeme stanovit stacionárními i nestacionárními metodami. Kromě způsobu stanovení a vyhodnocení se od sebe tyto metody liší teplotním stavem zkušebního vzorku během měření.

Stacionární metody jsou charakterizovány ustáleným teplotním stavem. Mezi tyto metody řadíme Metodu desky, Metodu chráněné teplé desky, Metodu měřidla tepelného toku, Metodu válce a Metodu koule.

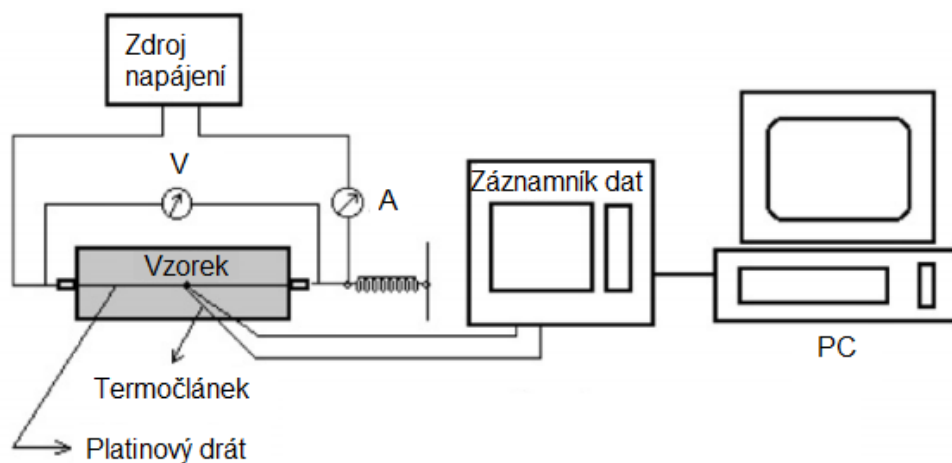
Nestacionární metody ustálený teplotní stav nevyžadují. Měření je založeno na sledování průběhu šíření teplotní vlny měřeným vzorkem. Tuto oblast zastupuje Metoda nestacionárního tepelného toku, Metody tepelných impulsů – Metoda horkého drátu, Záblesková metoda.

7.1 METODA TOPNÉHO DRÁTU

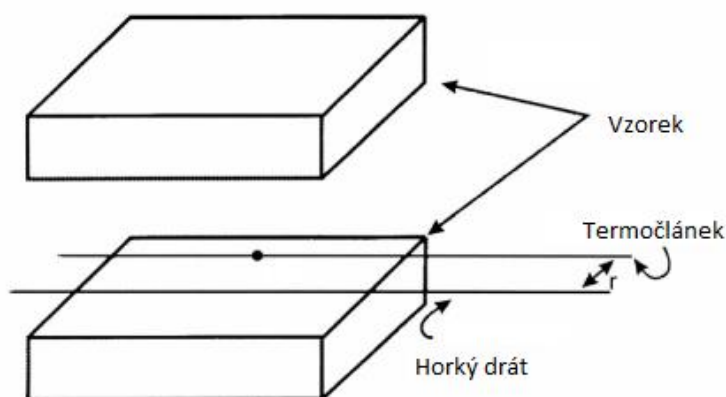
Metoda topného drátu v křížovém uspořádání patří mezi dynamické metody stanovení součinitele tepelné vodivosti. Podstatou zkoušky je stanovení teplotního nárůstu jako funkce času lineárního zdroje tepla (topného drátu) vloženého mezi dvě zkušební tělesa, která tvoří zkušební sestavu. Tato sestava je zahřívána v peci na definovanou teplotu, při které se udržuje. Další místní ohřev se uskutečňuje pomocí lineárního elektrického vodiče (topného drátu), symetricky uloženého do zkušební sestavy. Elektrickým vodičem prostupuje elektrický proud o známém výkonu, který je konstantní v čase a v podélném směru zkušebního vzorku. Nárůst teploty je měřen a zaznamenáván od okamžiku zapojení lokálního topného proudu. Nárůst teploty probíhá logaritmicky. Z rychlosti nárůstu teploty a z přiváděného proudu se vypočítá tepelná vodivost zkušebních těles. U křížového uspořádání probíhá měření pomocí termočlánku, který je upevněn na střed topného drátu. Metoda je založena na předpokladu nekonečně dlouhého topného drátu, který je obklopen nekonečným a homogenním materiálem.

Tepelná vodivost materiálu se vypočte z následující rovnice:

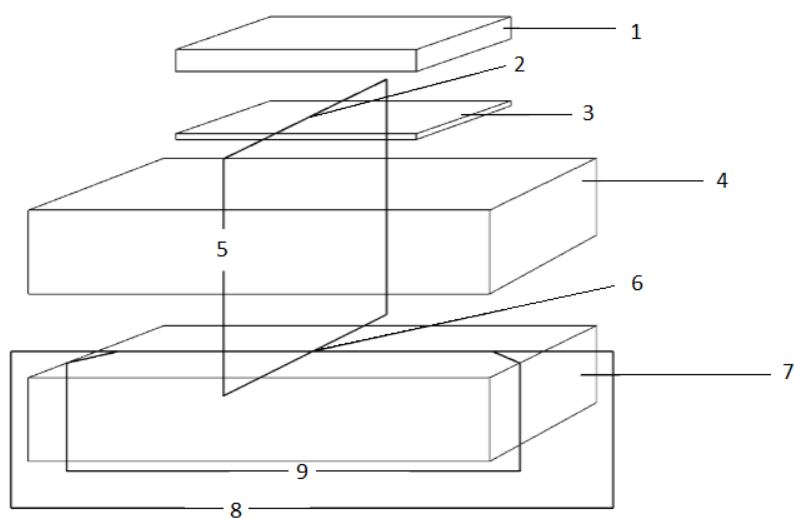
$$\lambda = \frac{P}{4\pi} \times \frac{\ln(t_2/t_1)}{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}$$



Obrázek 13 Schéma uspořádání měřícího zařízení [16]



Obrázek 14 Umístění horkého drátu a termočlátku



Obrázek 15 Umístění topného a měřícího obvodu s diferenčním termočlánekem pro křížové uspořádání [12]

Legenda k obrázku:

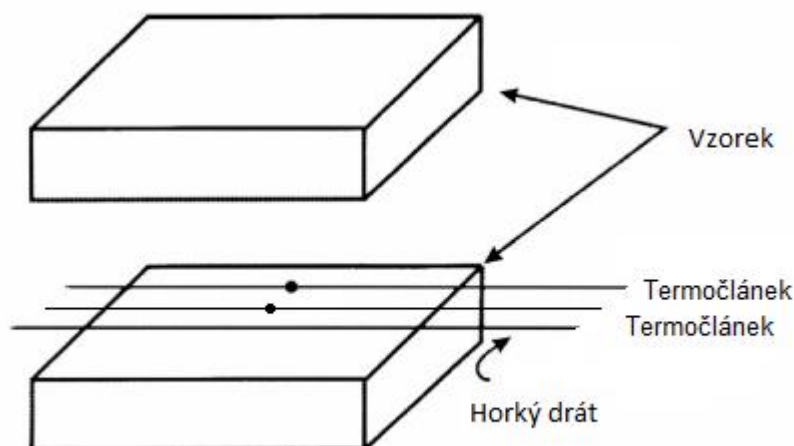
- 1 krycí vrstva
- 2 srovnávací termočlánek
- 3 izolační vrstva
- 4 zkušební těleso
- 5 diferenční měřící obvod
- 6 měřící termočlánek
- 7 zkušební těleso
- 8 topný obvod
- 9 napěťové odbočky

7.2 UPRAVENÁ METODA TOPNÉHO DRÁTU

Upravíme – li zkušební zařízení, můžeme pomocí výpočtu zjistit tepelné charakteristiky materiálu. K tomu je nutná znalost základních tepelných charakteristik materiálu závisících na jeho tepelně izolační a tepelně akumulaci schopnosti, jako je tepelná vodivost, tepelná kapacita, popřípadě teplotní vodivost.

Teplotní průběh je měřen pomocí dvou termočlánků umístěných v různé vzdálenosti od topného drátu. Metoda umožňuje stanovit tepelnou a teplotní vodivost materiálu současně v rámci jednoho experimentu. Měření se ovšem musí provádět opakovaně pro různé provozní teploty, protože se mohou tyto dvě zmíněné charakteristiky ovlivňovat.

Rozdílné uspořádání zkušebního zařízení přináší obtíže, které značně ztěžují výpočet vztahů, které vedou ke zjištění tepelných charakteristik materiálu. Z jednoduchého výpočtového vzorce uvedeného v normě se stává složitý výpočetní vztah obsahující exponenciální integrály.



Obrázek 16 Umístění topného drátu a termočlánků – upravená metoda

7.3 IDENTIFIKACE TEPELNÉ VODIVOSTI

Identifikace tepelné vodivosti metodou topného drátu podle EN ISO 8894-1 je založena na následujících předpokladech:

- Topný drát je nekonečně dlouhý a tenký, jeho tepelná a teplotní vodivost je zanedbatelná,
- Zkušební vzorek má tvar nekonečně dlouhého rotačního válce s velkým poloměrem, jehož osa je tvořena topným drátem,
- Topným drátem je do všech směrů vzorku dodáván stále stejný tepelný výkon,
- Materiál je homogenní a izotropní,
- Tepelná a teplotní vodivost jsou nezávislé na teplotě ve vzorku pro jakýkoliv poloměr a čas v množině kladných čísel,
- Teplota v počátečním i libovolném čase je shodná s teplotou prostředí.

Při splnění výše popsanych podmínek lze použít pro rozložení teploty ve vzorku následující vzorec:

$$T(r, t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\lambda} Ei \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad \forall (r, t) \in R_+ \times R_+,$$

$$Ei(\beta) = \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-u)}{u} du,$$

Teplota $T(r,t)$ je vhodná pro rovnici vedení tepla:

$$r\kappa \frac{\partial T}{\partial t}(r,t) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right) \quad \forall (r,t) \in R_+ \times R_+,$$

odvozenou z rovnice pro vedení tepla v trojrozměrném euklidovském prostoru:

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = \nabla(\lambda \nabla T(x,t)) \quad \forall (x,t) \in R^3 \times R_+,$$

Rovnici vedení tepla opatříme počáteční podmínkou a dvěma okrajovými podmínkami:

a) Počáteční podmínka

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} T(r,t) = T_0 \quad \forall r \in R_+,$$

b) Okrajová podmínka Dirichletova typu

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(r,t) = T_0 \quad \forall t \in R_+$$

c) Okrajová podmínka Neumannova typu

$$\lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{-\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r}}{\frac{Q}{2\pi r}} = 1 \quad \forall t \in R_+,$$

Složitě derivování i integrování usnadňuje programové prostředí MATLAB, v němž bylo řešení naprogramováno.

Můžeme tedy získat rozložení teploty ve vzorku. To ovšem za předpokladu, že známe konstantu κ , tj. podíl λ a α . Rozložením exponenciálního integrálu do nekonečné řady dostáváme vztah:

$$Ei(\beta) = -\gamma - \ln \beta + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta^k}{k \cdot k!},$$

$$\gamma = \lim_{j \rightarrow \infty} \left(\sum_{k=1}^j \frac{1}{k} - \ln j \right) \approx 0,5772156649,$$

pro $r \rightarrow 0$ dostáváme:

$$\lim_{r \rightarrow 0^+} (T(r,t) - T(r,t_a)) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \frac{t}{t_a}.$$

Z uvedeného vztahu lze získat λ . [23]

7.4 IDENTIFIKACE TEPLOTNÍ VODIVOSTI UPRAVENÝM PŘÍSTUPEM

Zavedeme následující vztah:

$$F(\lambda, \alpha) = \frac{1}{2}(T - T^*, T - T^*),$$

kde počítáme s již naměřenými hodnotami teploty.

Známe-li speciálně hodnoty teploty pro n poloměrů $\{r_1, \dots, r_n\}$ a m časů $\{t_1, \dots, t_m\}$, můžeme uvedený skalární součin pro jakékoliv přípustné funkce φ a ψ definovat integrálním vztahem

$$(\varphi, \psi) = \int_0^\infty \int_0^\infty w(r, t) \varphi(r, t) \psi(r, t) dr dt,$$

kde pro kladné diskrétní váhy w_{ij} vlastnosti

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} = 1$$

a dvourozměrnou Diracovu míru δ volíme

$$w(r, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta(r - r_i, t - t_j) w_{ij}.$$

F je obecně nelineární funkcí dvou proměnných λ a α . Ve výpočtu podle ČSN EN ISO 8894-1 se nicméně speciálně volí $n = 1$, navíc ještě s limitním $r_1 \rightarrow 0$ zprava, a obvykle $w_{11} = \dots = w_{1m} = 1/m$. Pokud zaměníme λ za $a = Q/(4\pi\lambda)$, dostáváme:

$$\left(\ln \frac{t}{t_a}, \ln \frac{t}{t_a} \right) a = \frac{1}{2} \left(T^* - T_a^*, \ln \frac{t}{t_a} \right).$$

Z uvedeného vztahu lze získat λ .

Pro zjednodušení výpočtu uvažujeme novou proměnnou b nahrazující α . Dostáváme rovnici:

$$T(d, t) = T(d, t_a) + a \left(Ei \left(\frac{b}{t} \right) - Ei \left(\frac{b}{t_a} \right) \right) \quad \forall t \in R_+$$

$$b = \frac{d^2}{4\alpha}$$

Pokud čárkou označíme derivace funkce F podle uvažovaného parametru (parametr b), dostáváme:

$$F' = (T', T - T^*), \quad F'' = (T', T') + (T'', T - T^*);$$

Poté aplikujeme iterační Newtonovu metodu tečen ve tvaru

$$F''(b - \tilde{b}) = F'. [23]$$

8 PRAKTICKÁ ČÁST

Na zkušební vzorek jsou umístěny termočlánky ve vzdálenosti 3 mm a 15 mm od topného drátu.

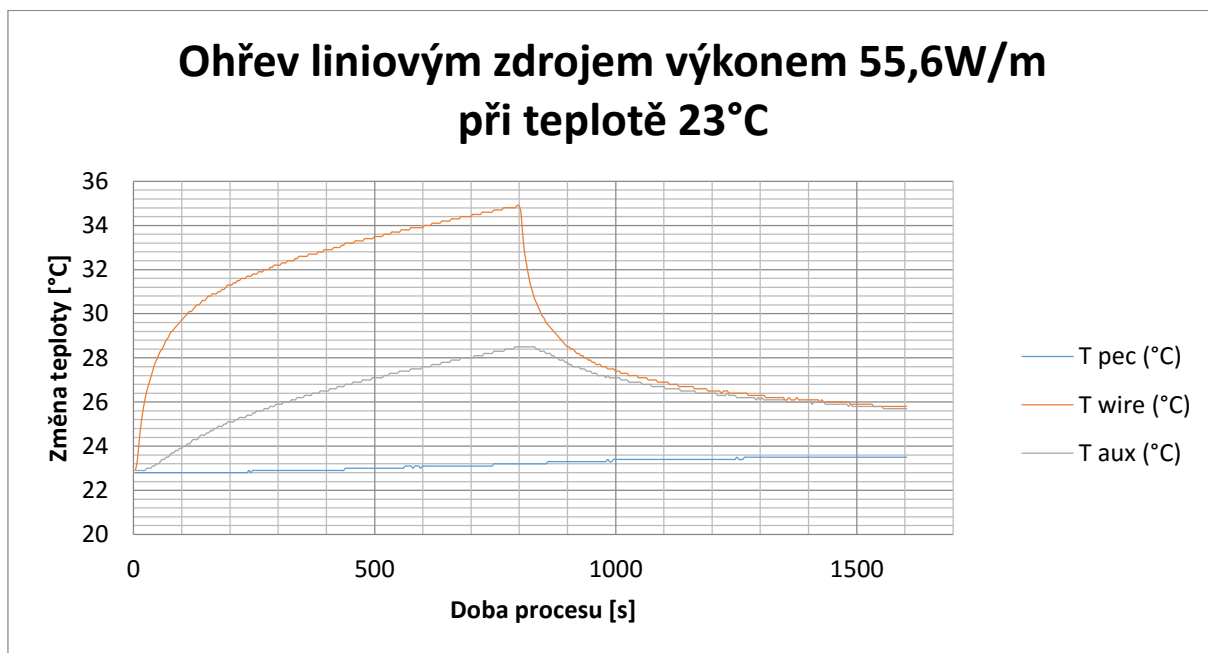


Obrázek 17 Fotografie umístění termočlánků v měřeném vzorku



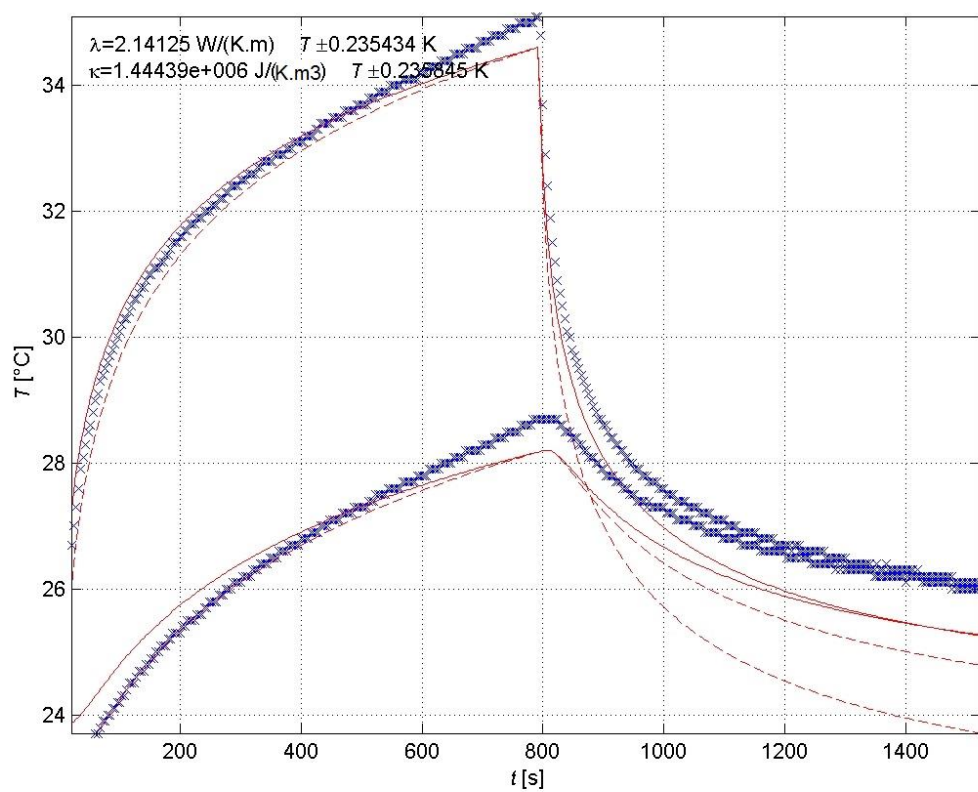
Obrázek 18 Fotografie umístění topného a měřicího obvodu

Zkušební vzorek je v peci temperován na požadovanou teplotu. Po vyrovnaní teplot v peci, kdy je teplota vzorku i pece konstantní, je spuštěno měření. Měření má dvě fáze. V první fázi je topným drátem přiváděn stabilizovaný elektrický proud o známém výkonu. V jeho okolí se šíří válcovitá teplotní vlna. V druhé fázi probíhá ustalování teplotní vlny, která vznikla lokálním ohřevem. Experiment je nastaven tak, že doba topení je stejná jako doba ustalování. Výsledek měření tvoří elektronické záznamy o velikosti topného výkonu topným drátem a teploty měřené v průběhu experimentu na obou termočláncích. V grafu 19 je vyobrazen průběh měřených údajů, zejména nárůst teplot obou termočlánků po dobu přivádění elektrického proudu do topného drátu a následně pokles teplot po dobu, kdy proud přiváděn není.



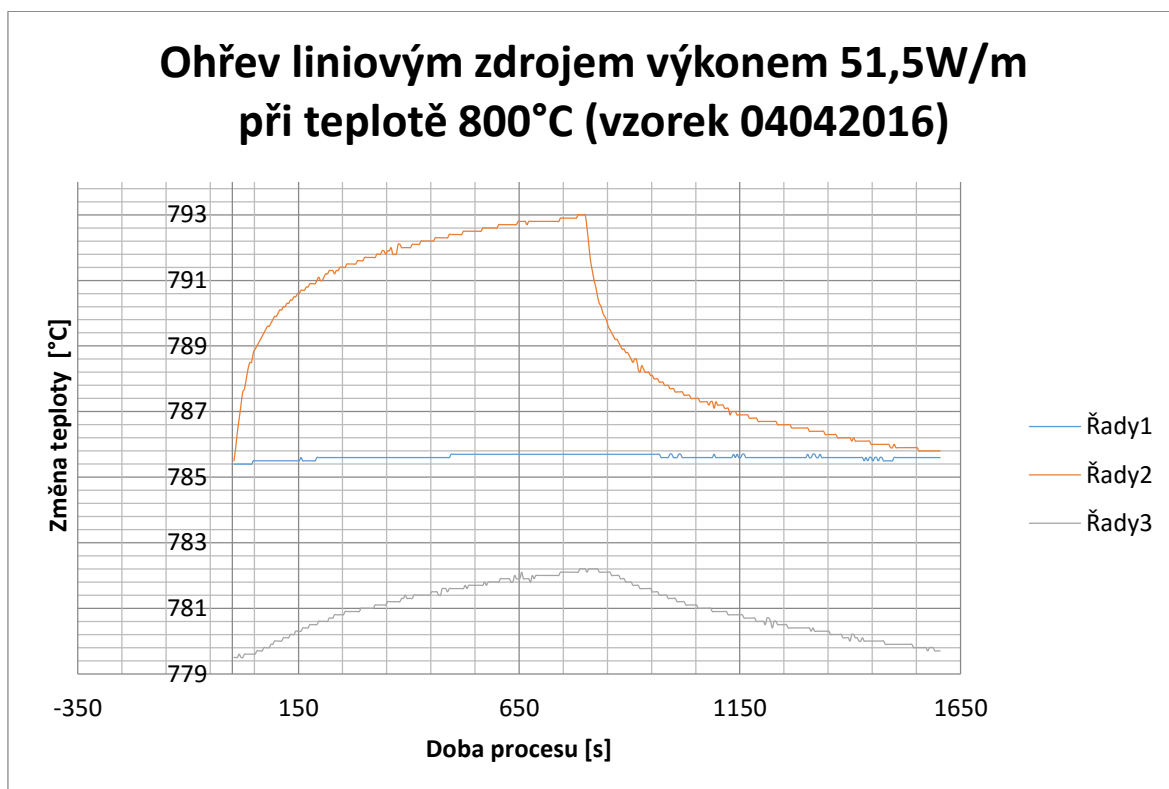
Obrázek 19 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 23°C

Takto naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny pomocí programu MATLAB. Jedná se o interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk. Program výpočtově metodou nejmenších čtverců nahrazuje děj, který proběhl při měření. Program poskytuje predikci fyzikálních vlastností zkoušeného vzorku o tom, jaké materiálové charakteristiky (tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu) materiál zaujímá, aby měření proběhlo právě tak, jak jsme jej naměřili.

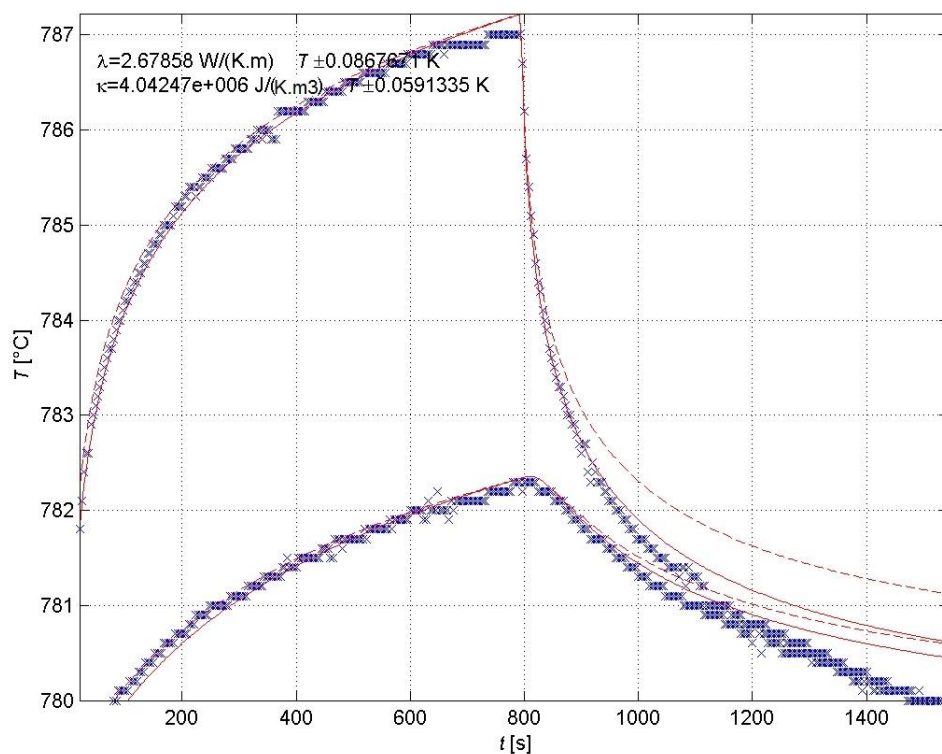


Obrázek 20 Graf vyhodnocení průběhu teplot (23°C)

Elektronické záznamy měřených hodnot a jejich vyhodnocení při teplotě 800°C:



Obrázek 21 Graf průběhu zjištěných teplot při měření na teplotě 800°C



Obrázek 22 Graf vyhodnocení průběhu teplot (800°C)

9 ZÁVĚR

Slunce je nevyčerpatelný zdroj sluneční energie, který bude lidstvu k dispozici stále. Využíváním energie pocházející pouze ze slunečního záření se vyhneme problémům souvisejícím s neustálým narůstáním cen fosilních paliv, ale především eliminujeme problémy související s životním prostředím. Nebudeme se aktivně podílet na devastaci krajiny a následným znečišťováním ovzduší plyny vznikajícími spalováním fosilních paliv. Nevýhodou využívání sluneční energie je její nepravidelný přísun v závislosti na ročním období. Proto je třeba sluneční energii vhodným způsobem akumulovat v období, kdy je intenzita záření dostatečná na dobu, kdy její přísun není téměř žádný. K akumulaci slouží tepelné zásobníky, do kterých energii vhodným způsobem dopravíme a uložíme k pozdějšímu využití. Akumulovaná energie může sloužit k vytápění objektu, ohřevu teplé užitkové vody i k výrobě elektrické energie. Vhodným výběrem materiálů pro vysokoteplotní zásobník lze v období vysoké intenzity slunečního záření dosáhnout takové akumulace energie, která dokáže pokrýt celkovou roční spotřebu. Aby byl materiál použitelný, musí se vyznačovat vysokou tepelnou kapacitou, aby bylo v letním období možné akumulovat co největší množství tepla. Neméně důležitou charakteristikou je také tepelná vodivost, aby bylo vůbec možné přiváděnou energii rozvést do všech částí akumulačního jádra zásobníku a využít tak celý jeho akumulační objem. Úpravou normové metody lze tyto tepelné parametry experimentálně ověřit, což je předmětem této předložené studentské práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MATUŠKA, T. *Solární soustavy pro bytové domy*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010. Profi. ISBN 978-80-247-3503-0.
- [2] MATUŠKA, T. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2.
- [3] BUDÍN, J. *Technologický plán akumulace energie* [online]. 2015 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>.
- [4] SHARMA, Atul, V.V. TYAGI, C.R. CHEN a D. BUDDHI. *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, vol. 13, issue 2, s. 318-345. DOI: 10.1016/j.rser.2007.10.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032107001402>.
- [5] LADENER, H., SPÄTE, F. *Solární zařízení*. 1. vyd. Praha: Grada, 2003. Stavitel. ISBN 80-247-0362-9.
- [6] GIL, Antoni, Marc MEDRANO, Martorell INGRID, Lázaro ANA, Pablo DOLADO, Belén ZALBA a Luisa F. CABEZA. *State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization: An International Journal. Renewable and Sustainable Energy Reviews: power for a sustainable future*. Oxford University Press, 2010, vol. 14, issue 1, s. 31-55. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035. [online]. 2010 [cit. 2016-04-20]. DOI: 10.1016/j.rser.2009.07.035. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109001774>.
- [8] MOKRIŠ, L. *Akumulace tepla v solárních tepelných soustavách* [online]. 2011 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41947.
- [9] NEVŘIVOVÁ, L. *SPECIÁLNÍ KERAMIKA, MODUL BJ14 M04 ŽÁROVZDORNÉ MATERIÁLY*. 2006. s. 1-68.
- [10] HANYKÝŘ, V., KUTZENDOERFER, J. *Technologie keramiky*. 1. vyd. Hradec Králové: Vega, 2000, 287 s. ISBN 8090086063.

- [11] SOKOLÁŘ, R. *Speciální keramika/Modul BJ14-M01*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006. 67 s.
- [12] ČSN EN ISO 8894-1. *Žárovzdorné materiály – stanovení tepelné vodivosti. Část 1: Metoda topného drátu (křížové uspořádání a uspořádání s odporovým teploměrem)*. Praha: ČNI, 2011.
- [13] FERNÁNDEZ, Inés A., Mónica MARTÍNEZ, M. SEGARRA a Luisa F. CABEZA. *Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage* [online]. 2010 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_4_1_High_Temperature_Applications/29.pdf.
- [14] NEJEDLÝ, P. *Nejmodernější solární elektrárna na světě: Španělský Andasol* [online]. 2009 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/fotovoltaika-1/nejmodernejsi-solarni-elektrarna-na-svete-spanelsky-andasol.aspx>.
- [15] KRAMOLIŠ, P. *Zásobníky tepla* [online]. 2004 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1950-zasobniky-tepla>.
- [16] SARI, Ahmet a Ali KARAIPEKLI. *Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material* [online]. 2007 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1359431106004030>
- [17] OSTRÝ, M. *Akumulace tepla při změnách skupenství* [online]. 2012 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/akumulace-tepla-pri-zmenach-skupenstvi>
- [18] VETCHÝ, J. *Žárobeton (beton odolný vysoké teplotě)* [online]. 2015 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.mct.cz/soubor/zarobeton/>
- [19] Czech nature energy. *Termické systémy pro ohřev vody a podporu vytápění*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.cne.cz/solarni-ohrev-vody/uvod-do-termickych-systemu/>

[20] Envic. *Trombeho stěna – vyhodnocení efektivity v diplomové práci*. [online]. 2009 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://old.envic-sdruzeni.cz/trombeho-stena-vyhodnoceni-efektivita-v-diplomove-praci.htm>

[21] Chroma Energy Pvt. Ltd. *CPV Technology*. [online]. 20016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.chromaenergy.in/enr/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=101

[22] Solaflect Energy. *FAQ: What about future advances in solar technology?*. [online]. 20015 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.solaflect.com/faq-what-about-future-advances-in-solar-technology/>

[23] VALA, J.; ŠŤASTNÍK, S.; JAROŠOVÁ, P., Identifikace tepelných charakteristik stavebních materiálů metodou topného drátu, příspěvek na konferenci *Maltoviny 2013 - sborník příspěvků*, ISBN 978-80-214-4815-5, VUT, Brno, 2013

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Q	[J]	množství akumulovaného tepla
m	[kg]	hmotnost tepelně-akumulačního média
C_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
T	[°C]	teplota
a_m	[-]	podíl tekuté fáze
Δh_m	[J.kg ⁻¹]	teplo tavení na jednotku hmotnosti
C_{sp}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná kapacita
C_{lp}	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná kapacita
a_r	[-]	podíl reagujících látek
ΔH	[J.kg ⁻¹]	reakční teplo
α	[m ² .s ⁻²]	měrná teplotní vodivost
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná vodivost
C	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrné teplo
ρ_b	[kg.m ⁻³]	objemová hmotnost
c_p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrné teplo při konstantním tlaku
P	[W.m ⁻¹]	elektrický příkon
t_1, t_2	[s]	čas
$\Delta\theta_2, \Delta\theta_1$	[K.s ⁻¹]	nárůst teploty
V	[m ³]	objem materiálu