



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

VÝZKUM VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ PRO POUŽITÍ
VE VYSOKOTEPLTNÍM SOLÁRNÍM TEPELNĚ-
AKUMULAČNÍM ZÁSOBNÍKU

MATERIAL PROPERTIES RESEARCH FOR USE IN HIGH-TEMPERATURE SOLAR
THERMAL STORAGE TANK

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

RNDr. Ing. František Šot

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

BRNO 2018

Abstrakt

Používání tepelných akumulčních zásobníků energie využívající jak změnu fáze materiálu, tak i tepelnou vodivost materiálů se jeví jako efektivní cesta pro ukládání tepelné energie s výhodami spočívajícími v akumulaci jejich vysokých objemů. Metody založené na fázových změnách materiálů jsou používány v latentních termálních zásobníkových systémech. Metody využívající ukládání tepelné energie, díky materiálovým akumulčním vlastnostem, se uplatňují v zásobníkových systémech senzibilních. V uplynulém desetiletí se oba tyto principy rozšířily pro chlazení a ohřev ve stavebnictví.

Abstract

The use of thermal storage energy, using phase change materials appears to be an effective way to store thermal energy storage with the benefits of the high amount of energy while maintaining isothermal nature of the process. PCM methods are used in latent thermal storage systems for heat pumps, as well as in solar engineering or for temperature control in spacecraft. The past decade has extended these principles for cooling and heating in the building. working mainly on the principle of PCM.

Klíčová slova

Latentní zásobník, senzibilní zásobník, ostrovní systém, objemová hmotnost, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, objemová tepelná kapacita, žáruvzdorný beton, žárobetony hlinitanové, vysoce hlinitý beton, žárobeton portlandský, cement, hlinitanový cement, pojivo, kamenivo, topný drát, horký drát, horká deska, tepelná pohoda, tepelná bilance, akumulční zásobník.

Keywords

Latent heat storage, sensible heat storage, island system, density, the thermal conductivity, specific thermal capacity, volumetric heat capacity, refractory concrete, aluminous refractory concrete, high alumina cement, Portland concrete, concrete, aluminous cement, binder, aggregate, fuel wire, hot wire, hot plate, hot well-being, heat balance, storage container.

Obsah

1	Současný stav problematiky	6
2	Senzibilní zásobníky tepla	7
3	Žárovzdorné betony	9
4	Fyzikální vlastnosti žárupevných silikátových materiálů.....	9
4.1	Objemová hmotnost.....	9
4.2	Teplotní vodivost.....	10
4.3	Žárové vlastnosti	10
5	Teoretické podklady pro vyhodnocení experimentální činnosti	11
5.1	Teoretické podklady pro identifikaci tepelných charakteristik (výrobky hutné)	11
5.2	Stanovení tepelné a teplotní vodivosti α metodou topného drátu upraveným přístupem.	13
6	Senzibilní zásobníky tepelné energie ze žárovzdorného betonu.....	16
6.1	Koncepce zásobníku energie	17
6.1.1	Materiál pro tepelné akumulční zásobníkové jádro	17
7	Numerické modelování dynamického chování zásobníku v prostředí výpočetního systému ANSYS	18
7.1	Řešené součásti a vnitřní vazby tepelného systému	18
8	Měření tepelných charakteristik žárupevných materiálů.....	19
8.1	Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti některých silikátových směsí.	23
8.1.1	Měření tepelné vodivosti kaolinitických šamotů	24
8.1.2	Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti výběru žárovzdorných betonů	26
8.1.3	Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti žárobetonu TermBet OL-12	26
8.1.4	Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity žárobetonu MEBET ACU-M.....	28
9	Souhrn poznatků o silikátových materiálech pro jejich realizaci konstrukčního uplatnění při tvorbě senzibilních termálních zásobníků.....	29
10	Závěr.....	31
	Životopis autora.....	34

Souvislý nárůst objemu skleníkového plynu, emisí a stoupání cen pohonných hmot jsou hlavními hnacími silami pro efektivnější užívání obnovitelných zdrojů energie. Ve většině světových oblastí se jeví přímé sluneční záření jako nejefektivnější zdroj získání energie. Hledají se nové obnovitelné zdroje energie. Obnovitelné zdroje pracují jednak na základě využívání energie sluneční, energie větrná, geotermální, vodní energie a energie přílivových vod. Sluneční energie je aplikována jednak při realizaci fotovoltaických elektráren a nejnověji na realizaci sběru energie slunečního záření a jejího ukládání do tepelných zásobníků sloužících k akumulaci tepelné energie získávané působením slunečního záření. Předmětem této dizertační práce je použití vhodných materiálů pro vysokoteplotní tepelné zásobníky na silikátové bázi. Koncepce zásobníku je v širších souvislostech zaměřena na stanovení optimálního návrhu tzv. senzibilního zásobníku na bázi dostupných a levných stavebních materiálů. Těžiště dizertační práce tedy spočívá v určení uvedených fyzikálních vlastností vybraných silikátových materiálů a jejich chování za zvýšených teplot. Uvedené fyzikální vlastnosti akumulačních materiálů jsou z hlediska jejich předpokládaného užití experimentálně prověřeny do teploty 800°C. Nejvhodnější materiály navrhuji pro aplikace v tepelně akumulačních vysokokapacitních zásobnících. Fyzikální vlastnosti vybraných materiálů jsou zjištěny experimentálně. K tomu účelu je k dispozici měřicí zařízení, kterým je možné identifikovat jak hodnotu součinitele tepelné vodivosti, tak i hodnotu tepelné kapacity na principu upravené metody topného drátu. Při návrhu izolačního obalu zásobníkového tělesa vycházím z fyzikálních vlastností izolačních materiálů. Některé izolační materiály, jako např. perlit, dále zásypové materiály na bázi pyrogenní kyseliny křemičité, byly již za vysokých teplot experimentálně stanoveny. Fyzikální metody, které lze použít pro stanovení tepelného odporu materiálové vrstvy, využívají stacionární metody měření tepelného toku. Ověření chování izolačních materiálů provádím rovněž experimentálně na modelu zásobníkových

1 Současný stav problematiky

V současné době využívání obnovitelných zdrojů energie je realizováno v ostrovních systémech. Ostrovním systémem rozumíme komplexní obyvatelný užitný objekt, který je schopen existence bez připojení na žádnou externí energetickou základnu zdrojů. Jedná se o lokality takové, ke kterým by doprava energie byla ekonomicky náročná anebo vůbec proveditelná. Je rovněž možné takový systém zavádět u soukromých stavebních objektů z důvodů úspor nákladů na energii. Jedním z nejvýhodnějších obnovitelných zdrojů energií je slunce a jeho záření. Slunce produkuje v letních měsících energii, která činí přibližně hodnotu $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ přímo ozářené plochy. V zimních měsících je tato hodnota menší. Síla sluneční energie závisí na zeměpisné poloze lokality vzhledem k rovníku. Jednou z možností využívání sluneční energie se nabízejí fotovoltaické systémy. Získanou energii je nutné ale ukládat do poměrně drahých a časově krátkodobě udržitelných rezerv. K uložení tepelné energie získané slunečním zářením se nachází možnost jejího skladování v akumulačních zásobnících. V současné době jsou k tomuto účelu používány většinou zásobníky konstruované na bázi zásobníků latentních. Při ohřevu anebo tuhnutí mohou uložit značné množství tepelné energie. Tavení je charakterizováno malým nárůstem objemu obvykle menším než 10 %. Medium v zásobníku je buďto v tekutém nebo tuhém stavu. Tuhnutí nebo tavení media probíhá při konstantní teplotě. Při tavení media je teplo přenášeno do zásobníku a materiál si teplotu udržuje na teplotě tavení. Tato teplota se nazývá teplotou fázové změny. Jestliže je proces fázové přeměny ukončen, pak přenos proces tepla do zásobníku je opět formou senzibilní. Jiným způsobem řešení akumulačního tělesa jsou aplikace zásobníků senzibilních. Teplo přenášené do paměťového media je jím akumulováno a vede ke zvyšování jeho teploty. Paměťovým mediem může být voda, olej nebo jiná pevná látka. Použité látky musí splňovat jisté fyzikální vlastnosti, mezi něž patří dobré vedení tepla a schopnost jímat a udržovat tepelnou energii. Běžným případem senzibilních zásobníků v současnosti je užívání horké vody pro vytápění domácností a její používání jako horké užitkové vody. Pro užívání materiálů v oblasti senzibilních zásobníků se v oblasti stavebnictví nabízí možnost použití žáruvzdorných betonů nebo zásobníků vyrobených na bázi šamotů. Oba druhy zásobníků musí splňovat

faktory fyzikální z hlediska tepelných a objemových charakteristik, ekonomické a ekologické. Vzhledem k tomu, že objem úložné energie je spojen s nárůstem teplot do řádově stovek °C, musí používané materiály těmto hodnotám odolávat. Předchozí vlastnost materiálů je spojena s jejich životností. Z hlediska ekologie je nutné, aby materiály používané pro senzibilní zásobníky splňovaly požadavky na životní prostředí. V prvé řadě se jedná o jejich netoxičnost, nehořlavost a nezávadnost systému vzhledem k životnímu prostředí.

2 Senzibilní zásobníky tepla

V těchto zásobnících je tepelná energie ukládána zvyšováním teplot pevného nebo tekutého media. Senzibilní zásobníky tepelné energie akumulují energii formou změny vnitřní energie materiálu. Systém využívá svojí tepelnou kapacitu, která během procesu akumuluje a dodává nastřádanou energii. Kapacita senzibilních zásobníků je závislá na druzích používaných materiálů, jejich hmotnosti a teplotním rozdílu. Z hlediska použitých materiálů se v této práci zaměřuji na výběr materiálů ze silikátových hmot. Požadavky na vlastnosti zamýšlených materiálů spočívají v jejich schopnosti akumulovat tepelnou energii, odolávat vysokým teplotám a schopnosti dobře rozvádět teplo po celém objemu. Výše uvedeným vlastnostem z výběru silikátových směsí nejlépe vyhovují výrobky šamotových směsí a žárobetony.

Důležitým faktorem pro realizaci zásobníků energie je tepelná vodivost stavebního materiálu. Dobrá tepelná vodivost zajišťuje efekt rychlého průběhu akumulace tepelné energie do prostoru zásobníku. Větší tepelná kapacita použitého materiálu nabízí akumulaci většího množství tepelné energie a dobrá tepelná vodivost zajistí rychlé a pravidelné rozložení tepla v akumulátoru. Fyzikální vlastnost materiálů, používaných pro realizaci senzibilních zásobníků mají nesporný vliv na kvalitu jejich výsledného chování. Mezi nejdůležitější fyzikální vlastnosti náleží:

- *Tepelná vodivost λ*
- *Tepelná kapacita c*
- *Objemová hmotnost m*

- *Odolnost vzhledem k vysokým teplotám*

Vybraný materiál pro některé aplikace, pracovní teplota ohřevu nebo chlazení by měly být v souladu s teplotou media sloužícího k přenosu uložené energie. Vysoká tepelná kapacita a vysoká hustota zaručují akumulaci vysokého objemu energie. Z hlediska chemických vlastností materiálů používaných pro senzibilní zásobníky patří tepelná stabilita, netoxičnost a nehořlavost. Důležitým faktorem použitelnosti je stránka ekonomická, tzn. dostupnost a příznivá cena. Zkoumání použitelnosti materiálů pro realizaci senzibilních zásobníků je v této práci zaměřeno především na ověření fyzikálních vlastností týkajících se tepelné vodivosti λ , tepelné kapacity a jejich chování za zvýšených teplot. Odolnost proti vysokým teplotám silikátové žáruvzdorné materiály spolehlivě zabezpečují. Silikátové žáruvzdorné materiály rovněž vyhovují požadavkům splňujícím jejich vhodnost z hlediska chemického. Volba těchto materiálů zajišťuje chemickou stabilitu za vysokých teplot. Tyto materiály jsou netoxické a nehořlavé. Z hlediska ekonomiky jsou relativně levné a snadno dostupné. Výrobky ze silikátových směsí tedy pro realizaci senzibilních zásobníků plně vyhovují. Výzkumy v této práci jsou zaměřeny na zkoumání výrobků ze skupiny šamotů a žáruvzdorných betonů. Je známo, že hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity závisí na teplotě. S rostoucí teplotou se jejich hodnoty mění. Práce se zabývá experimentálním ověřením hodnot těchto fyzikálních vlastností za zvýšených teplot. Z hlediska použitelnosti silikátových směsí pro senzibilní zásobníky tepla mě zajímá chování těchto materiálů za zvýšených teplot od 200 °C do 800 °C

Šamoty jsou nejrozšířenější skupinou hlinitokřemičitých výrobků. Patří mezi jednu z možných variant, se kterými se uvažuje pro realizaci akumulačních jader senzibilních zásobníkových systémů. Vzhledem ke konstrukci zásobníku je nutné předpokládat s předlitými polotovary ve tvaru kruhových prstenců se zabudovaným trubkovým systémem usazeným v polotovarech. Tato okolnost vede k vyšším ekonomickým nákladům, a proto v těchto případech se zaměřuji hlavně na materiály se žáruvzdorného betonu.

3 Žáruvzdorné betony

Žárobetony jsou směsí žárovzdorných kameniv a pojiv. Většinou se dodávají v suchém stavu a používají se při smísení s vodou. Ukládají se litím, litím bez vibrace, pýcháním nebo dusáním. Vytváří se vazba a materiál tvrdne bez ohřívání. Žárobetony můžeme rozdělit podle objemové hmotnosti na žárobetony hutné, které mají objemovou hmotnost vyšší než 1500 kg.m^{-3} a lehké izolační žárobetony s objemovou hmotností nižší než 1500 kg.m^{-3} .

Pro složitější tvary monolitů se používají samotekoucí žárobetony. Mají velmi nízkou zrnitost a obsahují deflokulační činidla a dosahovaná pevnost je srovnatelná s pevností žárobetonů LCC. Žárobetonová směs se skládá z plniva (různé chemické složení), které může být hutné nebo lehčené a pojiva a přísad. Předpoklady pro vhodnost použití žárovzdorných materiálů závisí na jejich fyzikálních vlastnostech a to hlavně na objemové hmotnosti, tepelné vodivosti a tepelné kapacitě. Důležitým faktorem jejich použitelnosti je odolnost proti žáru při zachování dobrých mechanických vlastností.

4 Fyzikální vlastnosti žárupevných silikátových materiálů

S hlediska žárovzdorných silikátových materiálů pro jejich použití v oblastech tepelných zásobníků patří mezi základní fyzikální vlastnosti v první řadě *objemová hmotnost*, dále pak vlastnosti tepelné jako jsou *teplotní a tepelná vodivost*, *měrná tepelná kapacita a odolnost proti žáru*. Vysoká objemová hmotnost dokáže při stejném objemu zásobníku energie absorbovat vyšší množství tepla. Stejný účinek má i hodnota tepelné kapacity. Vysoká tepelná vodivost zapříčiňuje dokonalejší šíření tepla akumulační hmotou. Odolnost proti žáru zabezpečuje odolnost zásobníku energie proti vysokým teplotám, což vyvolává opět akumulaci většího množství energie při jeho delší životnosti.

4.1 Objemová hmotnost

Je definována hmotností daného silikátového materiálu vztaženého na jednotku hmoty. Jednotka této veličiny je kg.m^{-3} . Stanovuje se jako poměr hmotnosti daného objektu

k jeho objemu. Hutnější materiály mají vyšší objemovou hmotnost při stejném objemu, než materiály pórovitější. Hutnost materiálu se zvyšuje jeho zhutňováním.

4.2 Teplotní vodivost

Označuje se symbolem α [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$] a je také zvaná jako difuzita. Teplotní vodivost vyjadřuje intenzitu šíření tepla v materiálu. Fyzikální podstatou této veličiny je rychlost šíření tepla v tuhé látce za konstantního tlaku. Lze ji vypočítat při známé měrné tepelné vodivosti, objemové hmotnosti a tepelné kapacitě. Vzhledem k vlastnosti měrné tepelné kapacity, která se s rostoucí teplotou mění, mění se s teplotou rovněž i teplotní vodivost.

Teplotní vodivost se měří dynamickými metodami, jejichž podstatou je měření šíření prostupující teplotní vlny v čase v několika vzdálenostech od zdroje tepla. V této práci je hodnota teplotní vodivosti měřena nepřímou prostřednictvím měření tepelné vodivosti λ v procesu nestacionárního šíření tepelné vlny, metodou topného drátu. Měrná tepelná kapacita

Je obvykle používána jako měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku. Je definována jako množství tepla, které je potřebné k ohřátí 1 kg dané látky o 1 K. Matematicky je možné ji vyjádřit vztahem:

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \quad (1)$$

Její hlavní význam spočívá v aplikaci při výpočtu akumulace tepla v uvažovaném elementu. Je známo, že hodnota měrné tepelné kapacity s rostoucí teplotou narůstá.

4.3 Žárové vlastnosti

U vysokoteplotních žárovevných materiálů musíme sledovat především jejich odolnost proti žáru, pevnost v žáru při zatížení konstrukce, tečení za vysokých teplot a především jejich chování z hlediska objemových změn. V konstrukci akumulátorů tepelné energie může teplota zásobníku docílit řádově až 850 °C. Předpokládá se, že zásobník energie bude sloužit především k výrobě přehřáté vodní páry, sloužící jako vstupní medium

parní turbíny. Musí být tedy konstrukčně upraven pro lokaci parního generátoru, takže teplotní deformace silikátových žárovevných složek, které jsou stavebním jeho kamenem, budou hrát významnou roli při návrhu. Materiály používané pro tyto účely musí splňovat podmínku minimální tepelné roztažnosti. I tato musí být při konstrukci tepelného zásobníku eliminována.

5 Teoretické podklady pro vyhodnocení experimentální činnosti

Cíl této části práce spočívá v identifikaci tepelných charakteristik některých žárovzdorných materiálů pro výrobky hutné a zásypových tepelných izolací za zvýšených teplot. Pracovní teplota akumulčního zásobníku se pohybuje v rozsahu 200 až 800 °C. Výše teploty je závislá nejen na dodávkách a čerpání energie ale hlavně na izolaci akumulčního zásobníku. Tepelný zásobník, zhotovený z hutného žárovevného materiálu a jeho izolační obal tvoří tepelný zásobníkový systém. Schopnost tohoto systému jednak akumulovat a udržet teplotní rozsah v uvedených mezích závisí na jeho tepelně akumulčních charakteristikách. Tyto jsou dány fyzikálními tepelnými charakteristikami, mezi které patří především tepelná kapacita a tepelná a teplotní vodivost. Důležitou roli z hlediska akumulace tepla hraje objemová hmotnost.

5.1 Teoretické podklady pro identifikaci tepelných charakteristik (výrobky hutné)

Pro odhad tepelně namáhaných stavebních konstrukcí je nezbytně nutné znát hodnoty základních tepelných charakteristik použitých materiálů, které výrazně ovlivňují jejich vlastnosti jak tepelně izolační tak i tepelně akumulční. Uvedené odhady vycházejí ze zákonů zachování energie klasické termodynamiky, spočívající v zachování energie tepelné. Výsledkem rovnováhy tepelných procesů je klasická evoluční Fourierova rovnice představující nestacionární šíření tepla. Pro studium rozložení teploty v některé lokální části dané konstrukce je nutné znát alespoň hodnoty tepelné vodivosti λ , jde-li o proces stacionární, dále pak hodnoty měrné tepelné kapacity c vztažené k hmotnosti materiálu a případně i hodnotu teplotní objemové kapacity κ vztažené k jednotce objemu ρ . Výhodnější bývá pracovat s hodnotou teplotní vodivosti α , která představuje

poměr tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity. Hodnota tepelné vodivosti λ je důležitá pro tepelně izolační vlastnosti. Při hodnocení tepelně akumulčních vlastností hraje podstatnou roli tepelná kapacita. Jak již bylo uvedeno z řešení tepelné rovnováhy v daném materiálu, uvažujícím jak vnitřní tak i vnější zdroje energie, byla vytvořena základní Fourierova rovnice šíření tepla. Její nestacionární verze charakterizuje časové změny teploty v prostoru v závislosti na tepelných charakteristikách daných materiálů. Vyjádření Fourierovy rovnice v kartézských souřadnicích je následující:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q_z}{\rho \cdot c} \quad (2)$$

Podle možnosti užívaného zařízení jsem byl schopen pozorování v oblastech teplot v intervalu od 20 °C do 800 °C. Metoda vhodná pro vyhodnocení tepelné vodivosti žáruvzdorných stavebních materiálů je metoda topného drátu. Umožňuje výpočtovou identifikaci hodnot tepelné vodivosti za zvýšených teplot. Za předpokladů jistých podmínek týkajících se lokalit měřených prostorů, je možné použití klasického analytického vztahu (3) pro rozložení teploty v měřeném vzorku [3].

$$T(r, t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\lambda} Ei \left(\frac{r^2}{4at} \right) \quad \forall (r, t) \in R_+ \times R_+ \quad (3)$$

V němž Ei představuje exponenciální integrál

$$Ei(\beta) = \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-u)}{u} du \quad (4)$$

Definovaný pro libovolné číslo $\beta \in R_+$. Podle (3) tedy dále platí:

$$T(r, t) = T(r, t_a) - \frac{Q}{4\pi\lambda} \left(Ei \left(\frac{r^2}{4at} \right) - Ei \left(\frac{r^2}{4at_a} \right) \right) \quad \forall (r, t) \in R_+ \times R_+ \quad (5)$$

Je zřejmé, že teplota $T(r, t)$ ze vztahu (5) vyhovuje evoluční parciální rovnici vedení tepla bez vnitřních zdrojů pro osově souměrnou úlohu danou vztahem (6).

$$r\kappa \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right) \quad \forall (r, t) \in R_+ \times R_+ \quad (6)$$

opatřené počáteční podmínkou

$$\lim_{t \rightarrow 0_+} T(r, t) = T_0 \quad \forall r \in R_+ \quad (7)$$

dále okrajovou podmínkou Dirichletova typu

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T(r, t) = T_0 \quad \forall t \in R_+ \quad (8)$$

a okrajovou podmínkou Neumannova typu

$$\lim_{r \rightarrow 0_+} \frac{-\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r}}{\frac{Q}{2\pi r}} = 1 \quad \forall t \in R_+ \quad (9)$$

V poslední podmínce (9) představuje jmenovatel Fourierův tepelný tok. Odvození rovnice (3) ze standartní rovnice šíření tepla v kartézských souřadnicích je provedeno ve [4] kap. 9. Touto problematikou se rovněž zabývá autor v [5] kap. 3.

Tepelná vodivost λ představuje hustotu tepelného toku děleného teplotním gradientem. Jednotkou tepelné vodivosti je $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Odvozenou fyzikální veličinou je teplotní vodivost α , nazývaná také difuzivita. Výpočet této veličiny je dán vztahem (2). Stanovení tepelných charakteristik klíčových fyzikálních vlastností předepisuje norma ISO 8894. Z hlediska výzkumné práce jsem v tomto dokumentu použil novou progresivnější metodu, tj. stanovení tepelné a teplotní vodivosti metodou topného drátu upraveným přístupem.

5.2 Stanovení tepelné a teplotní vodivosti α metodou topného drátu upraveným přístupem.

Předpokládejme, že máme nyní experimentálně naměřené hodnoty $T^*(r, t)$ teploty $T(r, t)$ vyjádřené analyticky na množině $R_+ \times R_+$ a zavedme funkci $F(\lambda, \alpha)$ takovou že platí:

$$F(\lambda, \alpha) = \frac{1}{2} (T - T^*, T - T^*) \quad (10)$$

Při čemž (.,.) označíme skalární součin v Lebesgueově prostoru funkcí integrovatelných ve druhé mocnině na množině $R_+ \times R_+$ s vhodně zvolenou váhou $w(r,t)$. Minimu funkce F pak zřejmě odpovídají hodnoty α a λ . Známe-li speciálně hodnoty teplot pro n poloměrů $\{r_1 \dots r_n\}$ a m časů $\{t_1 \dots t_m\}$ můžeme uvedený integrální skalární součin pro jakékoliv přípustné funkce φ a ψ definovat následujícím vztahem:

$$(\varphi, \psi) = \iint_0^\infty w(r,t) \varphi(r,t) \psi(r,t) dr dt \quad (11)$$

Kde pro kladné diskrétní váhy w_{ij} vlastnosti

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} = 1 \quad (12)$$

a dvourozměrnou Diracovu míru

$$w(r,t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta(r - r_i, t - t_j) \cdot w_{ij} \quad (13)$$

Je F obecně nelineární funkcí dvou proměnných α a λ . Ve výpočtu se volí $n=1$ a $w_{11}=w_{12}= \dots w_{1m}=1/m$ místo proměnné λ v definici F proměnná $\alpha=Q/4\pi\lambda$. Pak vychází:

$$\left(\ln \frac{t}{t_a}, \ln \frac{t}{t_a} \right) Q/4\pi\lambda = \frac{1}{2} (T^* - T_a^*, \ln \frac{t}{t_a}) \quad (14)$$

Odtud je možné přímo vypočítat hodnotu tepelné vodivosti λ . Pro jednoduchost uvažujme, že hodnotu α hodláme určit z dalšího nezávislého experimentu. Od předchozího se liší pouze tím, že jej měříme v jiné vzdálenosti od zdroje výkonu, tedy

$$r_1 = d \quad (15)$$

Namísto proměnné α nyní můžeme funkci F uvažovat jako funkci nové proměnné b kde

$$b = \frac{r_1^2}{4\alpha} \quad (16)$$

Po vyčíslení má rovnice (10) následující tvar:

$$T(r_1, t) = T(r_1, t_a) + \alpha \left(Ei\left(\frac{b}{t}\right) - Ei\left(\frac{b}{t_a}\right) \right) \quad \forall t \in R_+ \quad (17)$$

Označíme-li čárkou první a druhé derivace funkce F , pak postupně dostáváme hodnoty potřebné pro následné výpočty. Základní funkce F má následující tvar:

$$F(\lambda, b) = \frac{1}{2} (T - T^*, T - T^*) \quad (18)$$

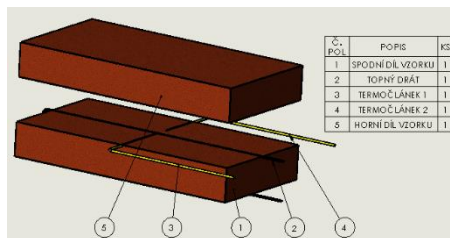
$$\text{První derivace} \quad F' = (T', T - T^*) \quad (19)$$

$$\text{Druhá derivace} \quad F'' = (T', T') + (T'', T - T^*) \quad (20)$$

Pokud jsou známy první a druhá derivace funkce F pak je možné aplikovat iterační Newtonovu metodu tečen ve tvaru:

$$F''(b - b^{\sim}) = F' \quad (21)$$

Vlnovka u proměnné b označuje zpřesněnou hodnotu parametru. Zobecněním uvedeného přístupu je tedy volba $n=2$, s podmínkou blížící se vzdálenosti $r_1 \rightarrow 0$ zprava a $r_2 = d$. Postup lze navíc modifikovat Levenberg-Marquartovou technikou podle [6] kap. 10.b. Po i té iteračním kroku je možné zjistit nepřímě b a z něho posléze i parametr α . Ve své práci ověřuji výpočet λ i α experimentem, který aplikuje metodu topného drátu. Rozdíl této metody od metody klasické, stanovené normou ISO 8894, spočívá jednak ve způsobu dodávky tepelné energie prostřednictvím výkonu realizovaného topným drátem a po té následným chladnutí vzorku po jejím přerušení. Proces je časově limitován jak dobou ohřevu, tak i chladnutí. Oba časové intervaly jsou stejné. Konfigurace sestavení vzorku a měřících termočlánků pro účel experimentu se liší od sestavení při měření λ klasickou metodou topného drátu dle normy ISO 8894-1. Schématické uspořádání měřeného bloku je na obrázku 1. Celý proces je řízen počítačem.



Obr. 1: Stanovení tepelné vodivosti λ a α metodou topného drátu

6 Senzibilní zásobníky tepelné energie ze žárovzdorného betonu

Žárovbetony jsou betony, které dokáží odolávat vysokým teplotám. Směsi betonů jsou tvořeny dle toho, jakou teplotu bude muset budoucí výrobek vydržet. Betony, u nichž tvoří pojivo portlandský cement, jsou schopny snášet teplotu zhruba do 1000 °C. Pro vyšší teploty je nutno použít speciální cementy nebo pojiva, vhodná pro danou teplotu. Beton, který je vystaven vysokým teplotám, podléhá jednak degradaci způsobené rozkladem hydratačních produktů, ale také rozpadem kameniva vlivem vysoké teploty. Proto je nutné volit takové složky betonové směsi, které těmto dvěma způsobům degradace podléhají co nejméně anebo až při dosažení velmi vysokých teplot. Možné směsi žárovbetonů, produkovanými společností *Průmyslová keramika spol. s r.o. Rájec Jestřebí* jsou znázorněny v tabulce 1.

Tabulka 1: Směsi žárovbetonů produkovaných ve společnosti *Průmyslová keramika Rájec Jestřebí*

HUTNÉ ŽÁROBETONY								Průmyslová keramika Rájec				
Označení	klasifikační teplota [°C]	Složení %					OH kg.m ⁻²	tepelná vodivost λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]				
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		400	600	800	1000	
Žárovbet 1250	1250	38	45,0	5,0	10,0	0	2120	1,06	1,07	1,11	1,19	
Žárovbet 1300	1300	38	47,0	2,8	8,0	0	2130	1,06	1,08	1,11	1,20	
Žárovbet 1400	1400	46	44,0	1,6	6,0	0	2190	1,10	1,10	1,15	1,22	
Žárovbet 1400 HT	1450	48	42,0	1,1	4,1	0	2120	1,14	1,14	1,17	1,26	
Žárovbet 1500	1500	50	40,0	0,8	6,2	0	2250	1,25	1,24	1,30	1,35	
Žárovbet 1550 HT	1550	53	40,0	0,9	4,5	0	2250	1,36	1,36	1,42	1,51	
ŽO 1600	1600	89	3,0	0,5	5,0	0	2730	2,70	2,35	2,28	2,22	
Žárovbet 1650	1650	93	1,0	0,3	5,0	0	2800	2,90	2,46	2,33	2,28	
Žárovbet 1700 HT	1700	96	0,1	0,1	2,7	0	2880	2,80	2,36	2,24	2,20	
TermBet OL-12	1200	7	40,0	8,5	5,5	35	2700	Cíl dizertační práce				
Mebet ACU-M	1200	28	21,0	55,0	5,0		3400	Cíl dizertační práce				
Žárovbet 1750-TAB	1750	96	0,3	0,1	3,1		2930	2,85	2,48	2,30	2,29	

6.1 Koncepce zásobníku energie

Pro dobrou akumulaci tepelné energie je nutné jádro žáruvzdorného betonového zásobníku vyrobit s dostatečnou hmotností, vysokou tepelnou vodivostí a tepelnou vysokou tepelnou kapacitou. Z důvodu úniku tepla do vnějšího prostředí musí být uloženo v dostatečně mohutném izolačním obalu. Koncepci tepelného zásobníku je tedy nutné řešit jak z hlediska materiálu pro ukládání energie, tak i z hlediska vnějšího izolačního obal. V rámci dizertační práce byly prověřeny tři varianty zásobníkových obalů, z nichž nejvýhodnější byla varianta druhá s následujícím složením:

Druhá varianta:

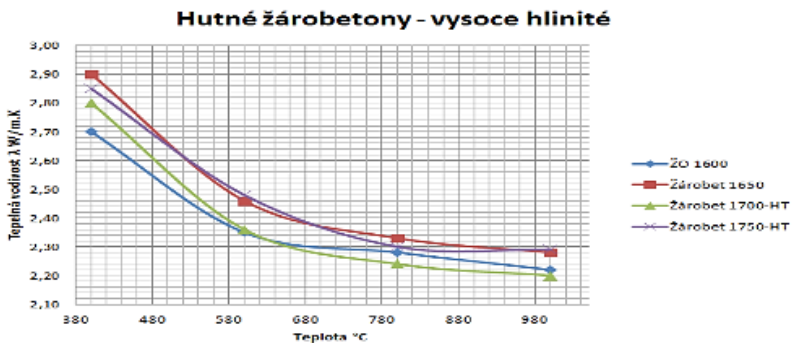
Obal akumulačního jádra primární-Promaglaf HTI	tl. 2×20mm
Obal akumulačního jádra sekundární Slatted	tlo 1×20mm
Zásyp Free flow	tl. 190mm
Izolační rohož Rockwool	tl. 160mm
Plášť ocelový plech pozinkovaný	tl. 1mm

Zkoušky ukázaly, že podstatný vliv na udržení tepelné kapacity zásobníku z hlediska izolačního obalu má tloušťka izolačního obalu a druh zásypu.

6.1.1 Materiál pro tepelné akumulační zásobníkové jádro

Pásmo teplot, ve kterých zásobník z hlediska požadavků na pokrytí akumulované energie pracuje, se pohybuje v rozsahu 250 °C až 800 °C. Z hlediska mechanického a tepelného chování zásobníku musí být navržen z materiálu, který vydrží vysoké teploty a má v těchto podmínkách dobré fyzikální vlastnosti. Mezi hlavní fyzikální vlastnosti materiálů zásobníků jsou vysoká hustota, dobrá pevnost, vysoká tepelná kapacita a tepelná vodivost. Jedním z materiálů, vyhovujícím z hlediska požadovaných fyzikálních vlastností, se jeví žáropevný beton. Některé fyzikální vlastnosti materiálů, vhodných pro návrh akumulačního zásobníku, jsou uvedeny v tabulce 1. Z těchto materiálů byl pro zkoušky vybrán materiál Žárobet 1750-TAB. Tepelná vodivost, která je vzhledem jiným žáruvzdorným betonovým směsím velká, zajišťuje dobrý přenos tepla do

celého objemu zásobníku. Závislosti tepelné vodivosti žárobetonových směsí, produkovaných firmou Průmyslová keramika Rájec-Jestřebí, na pracovní teplotě jsou znázorněny na obrázku 2. Z technického listu žáruvzdorného betonu je patrná vysoká klasifikační teplota. Má rovněž i značnou objemovou hmotnost a objemovou tepelnou kapacitu a rovněž i poměrně vhodnou tepelnou vodivost.



Obr. 2 Průběh závislosti tepelné vodivosti na růstu teploty pro vysocehlinité betony

7 Numerické modelování dynamického chování zásobníku v prostředí výpočetního systému ANSYS

Numerické modelování dynamického chování zásobníku nám nejbližše vysvětluje tepelné procesy, které probíhají v uzavřené izolované soustavě zásobníkového systému. Zásobníkový systém je tvořen žárobetonovým jádrem obaleným izolačními materiály. Z důvodu dobrého rozložení tepelné energie musí být toto jádro opatřeno vhodným tepelným výměníkem, který v tomto případě představuje stromovou konstrukci, rozvětvenou pravidelně v jeho objemu. Takto uspořádaná konstrukce zásobníku je geometricky a materiálově zadána do výpočetního systému, který při daném externím tepelném výkonu řeší metodou konečných prvků nestacionární procesy ohřevu a chladnutí v závislosti na dodávce a odběru tepelné energie.

7.1 Řešené součásti a vnitřní vazby tepelného systému

Výpočetní prostředí softwarového systému Ansys řeší v první řadě problematiku nezátíženého zásobníkového systému. Bere v potaz jednak zásobníkové jádro a

komplexní izolační obal. Děje tepelných přechodů jsou simulovány jednak při ohřevu a při jeho samovolném přirozeném ochlazování. Simulační proces tedy řeší:

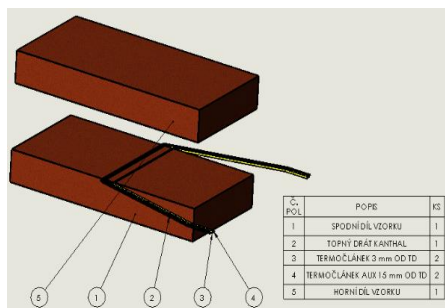
- Akumulační schopnost tepelného zásobníku,
- ztrátový tepelný tok / tepelný odpor izolačního opláštění zásobníku,
- dimenzování vnitřního měděného rámu,
- dimenzování pohltivého povrchu pro absorpci solární energie ze světlovodů,
- ověření pohotovosti pro čerpání potřebného tepelného výkonu parní turbínou,
- chlazení zásobníku,
- rizikové stavy - bezpečnost při používání zásobníku,
- výpočtové teplotní pochody v těsné blízkosti skutečných procesů.

V rámci předběžných výpočtů energetické bilance válcového tepelného akumulčního zásobníku jsme provedli ověření rozložení teplotních polí při nabíjení a nabití zásobníku. Výpočet proběhl v prostředí simulačního systému Ansys. V procesech simulací bylo pro zásobníkové jádro použito materiálu Žárobet 1750-TAB, který je produktem firmy *Průmyslová keramika Rájec-Jestřebí*. Tato firma nabízí pro účely aplikací konstrukce akumulčního jádra materiál hutnější definovaný jako hutný žárobeton se středním obsahem hlinitanového cementu a surovinovou magnetitovou bází. Klasifikační teplota tohoto materiálu představuje výši 1200 °C, což je dostačující pro použití při aplikacích akumulčních jader. Chování tohoto materiálu z hlediska jeho tepelných fyzikálních vlastností je ověřováno v další části dizertační práce. Izolační obal zásobníkového jádra byl pro simulaci zvolen ve stejném složení jako izolační obal použitý ve zkoušce chování zásobníkového systému druhé varianty, realizované ve firmě Alumistr spol. s r.o. v Hrušovanech. Hodnoty tepelné a teplotní vodivosti pro materiál Žárobet jsou uvedeny v technickém listu výrobku.

8 Měření tepelných charakteristik žárupevných materiálů

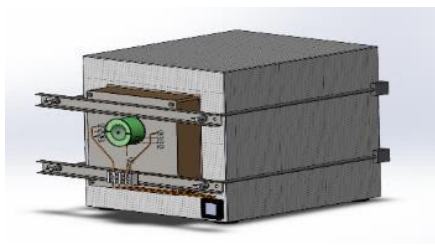
Žáruvzdorné materiály používané pro aplikaci konstrukcí akumulátorových jader senzibilních zásobníků musí splňovat požadavky, definované v kapitole 2. Upravený přístup metody topného drátu. Upravený přístup metody měření tepelných charakteristik metodou topného drátu [7] [8] spočívá jednak ve změně polohy měřících

bodů identifikujících teplotu vzdálených míst od topného drátu na vzorku, dále v počtu vyhodnocení měření v těchto lokacích v časovém průběhu a nakonec v konfiguraci měřicího pracoviště. Výpočetní metoda využívá srovnání analytického fundamentálního řešení rovnice nestacionárního vedení tepla srovnávaného metodou nejmenších čtverců s výsledky časových vzorků teplot získaných měřením. Systém je vyhodnocován programem v prostředí softwarového balíku Matlab [11]. Základními vstupy do programu jsou jednak vzdálenosti měřících bodů od topného drátu, jeho délka L , dále počáteční volba předpokládané hodnoty tepelné vodivosti, a nakonec matice teplotních dat získaných experimentem. Tepelná vodivost a objemová tepelná kapacita jsou měřeny nepřímou prostřednictvím měnících se teplot v prostoru vzorku, které je způsobeno šířením tepelné vlny vyvolané topným výkonem průchodem proudu topným drátem. Metodika provedení měření upravenou metodou topného drátu je vypracována v kapitole 5.2. Měřící pracoviště bylo lokalizováno na stavební fakultě pod záštitou katedry materiálového inženýrství v Brně. Měření probíhalo v upravené laboratorní peci o výkonu 3 kW. V důsledku rozměrů bylo nutné používat vzorky o maximálním rozměru žárobetonové tvarovky $230 \times 115 \times 70$ mm. Do komory pece byl vkládán upravený vzorek na přípravku vyrobeném pro účely měření. Jednalo se o speciální konstrukci, která zajišťovala jednak uložení měřeného vzorku, dále provedení izolační přepážky zabraňující úniku tepla s komory a průchodních otvorů pro vývody měřících a topících vodičů. Přípravek byl konstrukčně zhotoven tak, aby nahradil dveře pece. Konstrukční provedení pece je zobrazeno na obrázku 4.

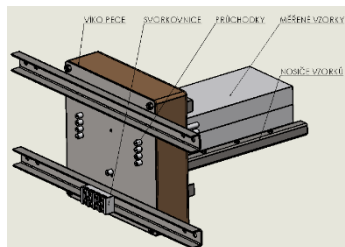


Obr. 3: Vzorek pro měření upravenou metodou topného drátu

Žárovková tvarovka $250 \times 25 \times 0$ je rozříznutá na dvě poloviny rozměrů $250 \times 115 \times 35$ mm, na obrázku 3 popsány jako HORNÍ a SPODNÍ DÍL VZORKU, mezi něž jsou vloženy topný drát a měřicí termočlánky. Topný drát je proveden z kanthalového pásu rozměru $0,7 \times 0,1$ mm délky 115 mm a je uložen příčně do tvarovky ve vzdálenosti 125 mm od jejího čelního okraje. Provedení měřicího přípravku je vyobrazeno na obrázku 5.



Obr. 4 Úprava pece 3000W



Obr. 5 Provedení měřicího přípravku

Další komponentou měřicího systému je stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí. Tepelný efekt je nepřímo vyhodnocován změnou teplot v jistých lokacích vzorku měřicím přístrojem. Přístroj umožňuje nastavení hodnot proudu, napětí a jím odpovídajícímu výkonu v rozsahu 0 až 24 V s přesností na 100 mV. Zdroj je řízen hodnotami nastavenými v počítači. Stabilizovaný zdroj napájí po dobu 800 sekund topný drát, dodávající vzorku vyhřátému na sledovanou teplotu dávku tepelné energie. Působením tepla dodávaného výkonem z liniového zdroje je vyvoláno jeho šíření, které je možné charakterizovat prostorovou změnou teploty. Časový průběh náběhu teplot při ohřevu a jejich pokles při vypnutí výkonu jsou dostatečnými podklady pro vyhodnocení tepelné vodivosti a teplotní vodivosti. Tyto hodnoty jsou závislé na teplotě prostředí. Získáním časových údajů změn teplot při náběhu a ochlazování vzorku vyhřátého a stabilizovaného na aktuální teplotě můžeme výpočtem vyhodnotit tepelné fyzikální vlastnosti na této teplotě závislé. V měřicím systému jsou zabudovány tři termočlánky, z nichž dva jsou lokalizovány na měřeném vzorku a třetí v prostředí pece. Termočlánky umístěné na vzorku jsou uloženy v jeho ose ve vzdálenostech 3 a 15 mm od liniového zdroje. Časový průběh ohřevu a ochlazování je po dobu měřicího cyklu po čtyřech

sekundách snímán přístrojem. V této době je rovněž zaznamenávána časová změna teploty stabilizovaného prostředí. Termočlánky jsou zapojeny do svorek měřidla. Časování měření teplot na vzorku a v peci je rovněž řízeno počítačem. Měření je spuštěno v okamžiku, kdy hodnota teploty prostředí je stabilizována na nastavené aktuální teplotě. Uspořádání pracoviště pro měření upravenou metodou topného drátu je zobrazeno na obrázku 6. Okamžité údaje sledovaného procesu jsou zaznamenávány na obrazovce monitoru. Sledované údaje jsou zapisovány do formuláře s názvem *Měření tepelné vodivosti za vysokých teplot*. Program řízení procesu a komunikace s okolím byl vypracován v systému Delphi a je majetkem fakulty stavebního inženýrství. Zaměření této dizertační práce spočívá ve výzkumu vlastností silikátových materiálů za účelem jejich použití pro vysoce teplotních solárních akumulčních zásobníků tepla. Pro zkoumání chování silikátových jsem vybral dva druhy šamotových vzorků, dva druhy žáruvzdorných betonů a tvarovku materiálů s vysokým obsahem MgO.



Obr. 6 Fotografie kompletního měřicího pracoviště

Měřítkem porovnání vhodnosti použití materiálů pro solární tepelné zásobníky byly jejich fyzikální vlastnosti, které představovaly objemovou hmotnost, tepelnou vodivost a tepelnou kapacitu. U všech druhů zkoumaných vzorků jsem prováděl měření všech výše uvedených fyzikálních vlastností za zvýšených teplot. Příprava vzorků před

prováděním měření tedy spočívala v následujícím ve vysušení vzorků od absorbované vlhkosti a ve vyhodnocení objemové hmotnosti. Důležitým faktorem identifikace jednotlivých vzorků bylo jejich chemické složení. Hlubším rozбором výsledků, plynoucích z měření fyzikálních tepelných charakteristik zvolených materiálů, je možné posoudit vliv chemického složení, které tyto změny vyvolává. Chemické složení vybraných představitelů žáruvzdorných materiálů je zřejmé z tabulky č. 2. Tvarovky z materiálu obsahujícího oxid hořečnatý rozměrů 250×120×60 byly dodány firmou Alumistr spol. s r.o. Hrušovany, ve které probíhají zkoušky švédské firmy, ověřující systémy solárních senzibilních zásobníků.

Tab. 2 Chemické složení výběru vhodných žáruvzdorných silikátových směsí

DRUHY MĚŘENÝCH VZORKŮ											
Vzorek č.	Název	Složení materiálu									
		složka	%	složka	%	složka	%	složka	%	složka	%
vz_OH10-1927	Šamot	Al ₂ O ₃	36,00	SiO ₂	60,00	Fe ₂ O ₃	2,00	CaO	0,25	TiO ₂	
vz_OH02-1944	Šamot	Al ₂ O ₃	38,00	SiO ₂	58,00	Fe ₂ O ₃	2,00	CaO	0,35		
vz_OH02-1987	Šamot	Al ₂ O ₃	42,00	SiO ₂	55,00	Fe ₂ O ₃	2,50	CaO	0,40		
vz_SLIQ	směs MgO	Al ₂ O ₃	0,20	SiO ₂	0,50	Fe ₂ O ₃	0,50	CaO	2,20	MgO	96,00
Mebet	žároveton	Al ₂ O ₃		SiO ₂		Fe ₂ O ₃		CaO		MgO	
TermBet	žároveton	Al ₂ O ₃	7,00	SiO ₂	40,00	Fe ₂ O ₃	8,50	CaO	5,50	MgO	35,00

8.1 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti některých silikátových směsí.

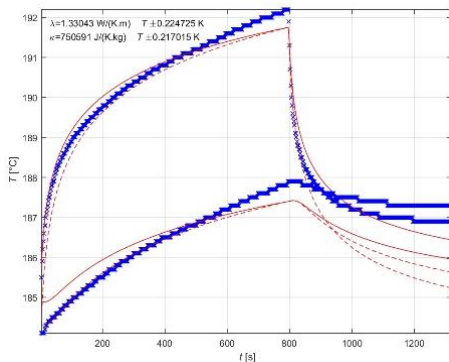
Proces měření tepelných fyzikálních veličin v závislosti na teplotě se provádí v prostředí s danou závislostní teplotou. Teplota prostředí je nastavována řídicím termostatem pece. Doba stabilizace je pro různé druhy vzorků a pro různé teploty prostředí odlišná. Z experimentů bylo zjištěno, že doba prohřátí vzorku na příslušnou teplotu se pohybovala od dvou do čtyř hodin.

Jako první vzorky na ověření chování silikátových materiálů za zvýšených teplot byly použity vzorky z kaolinitických šamotů. Předpokladem úspěšného vyhodnocení fyzikálních vlastností týkajících se tepelné a teplotní vodivosti za zvýšených teplot byla stabilní teplota vzorku. Předmět zkoumání – šamotový vzorek – byl umístěn ve střední

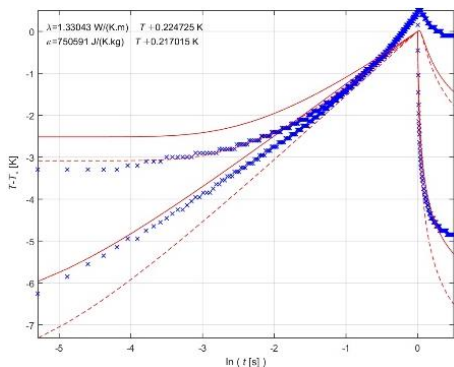
části komory pece. Měřicí termočlánek sloužící ke sledování teploty pece pro účely měření, byl umístěn pod střední část měřeného vzorku. Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti kaolinitických šamotů. Uvedené vlastnosti vzorků šamotových výrobků, ověřovány na přístroji Isomet 2014 při teplotách v okolí 24°C se poměrně přesně shodly s výsledky prvních zkoušek tepelné a objemové vodivosti získaných upravenou metodou topným drátem.

8.1.1 Měřených tepelných vodivosti kaolinitických šamotů

Vzorky č. OH1927 a OH1987 jsou šamotové tvarovky rozměrů 250×115×70 mm jsou zhotoveny z kaolinitického šamotu, z nichž prvního chemické složení tvoří 60 % oxidu křemičitého a 36 % oxidu hlinitého a druhý obsahuje ze 54 % oxidu křemičitého a 42 % oxidu hlinitého Tvarovky jsou upravené púlením na rozměry 250x115x35mm. Takto upravené rozpúlené tvarovky jsou v páru vloženy do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Uložení tvarovek, polohy měřících termočláneků a topného drátu je stejné pro všechna následující měření a jsou znázorněna na obrázku 5. Před zahájením ohřevu je teplota změřena teplota vnitřku komory. Následně je nastavována teplota pece na vybrané hodnoty vzorkování. Tato teplota je měřítkem závislosti fyzikálních veličin tepelné a teplotní vodivosti. Zahájení měřícího procesu probíhá v okamžiku, kdy teplota v peci je stabilizována. Následná měření jsou řízena programem *Pec* [12], zpracovaném v systému Delphi 7. Výsledky zpracování jsou zobrazeny ve formě dvou grafických závislostí. První závislost demonstruje závislost změny teploty ve vymezených lokalitách 3 a 5 mm od topného drátu v závislosti na čase. Druhý graf představuje konvergenci iteračních pochodů při změnách λ a κ , k nulovému bodu funkce a tedy k jejímu minimu. Diagramy, vyhodnocujících konstanty λ a κ na teplotách 190 ° jsou pro vzorek OH-1927 vyznačeny na obrázcích 7 až 8.

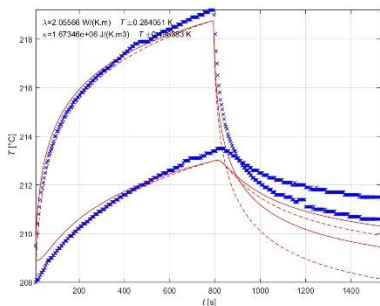


Obr. 7 Změny teplot na vzorku OH1927-
teplota 190°C

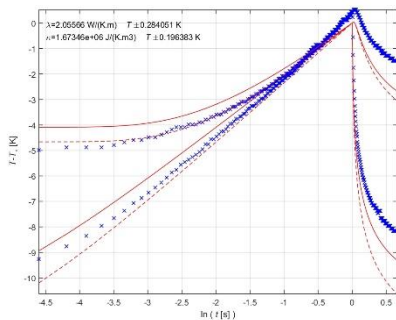


Obr. 8 Konvergence iterací λ a κ

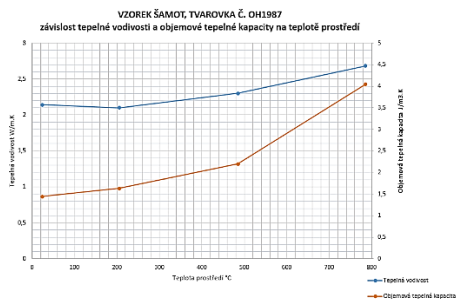
Diagramy vyhodnocující konstanty λ a κ na teplotě 205 °C jsou pro vzorek OH-1928 vyznačeny na obrázcích 9 až 10. Vyhodnocení závislosti součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity na teplotě prostředí pro vzorek OH 1987 je znázorněno na obrázcích 11 a 12.



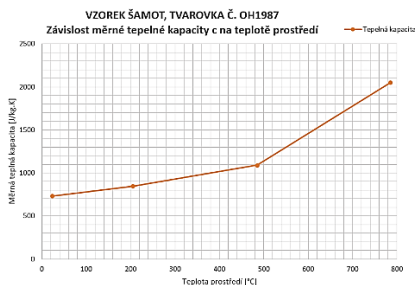
Obr. 9 Změny teplot na vzorku OH1987-
teplota 205 C°



Obr. 10 Konvergence iterací λ a κ



Obr. 11 Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě



Obr. 12 Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě

Vzhledem k porovnání fyzikálních vlastností, týkajících se známých žárobetonových materiálů a vzorků kaolinitických šamotů mohu konstatovat, že z hlediska jak tepelné kapacity, tak i měrné tepelné vodivosti, nejsou tyto materiály příliš vhodné pro konstrukci tepelných zásobníků.

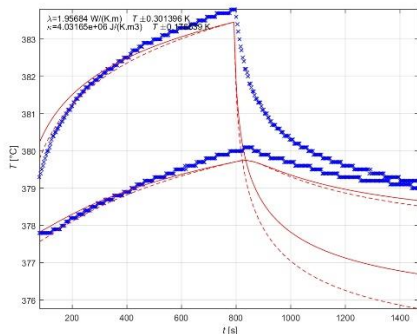
8.1.2 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti výběru žáruvzdorných betonů

Pro měření tepelných fyzikálních vlastností žárupevných materiálů a jejich závislosti na teplotě byly vybrány dva druhy hutných tvarových žáruvzdorných betonů s vysokou objemovou hmotností. Tato se pohybovala v oblasti 2700 až 3400 kg.m⁻³. Jednalo se o žárobetony se středním obsahem cementu s hydraulickou vazbou. Vysoká objemová hmotnost těchto materiálu byla docílena přidáním magnetitu a oxidu železitého do základního kameniva. V prvním případě probíhalo měření žárobetonu s označením TermBet. Tvarovky obou druhů materiálu dodala firma Průmyslová keramika spol. s r.o. Rájec Jestřebí.

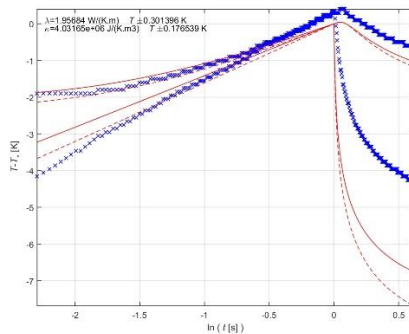
8.1.3 Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti žárobetonu TermBet OL-12

Základní surovinovou bázi tvoří olivín. Objemová hmotnost tohoto druhu žárobetonu dosahuje při teplotě 110 °C hodnoty 2700 kg m⁻³. Základní fyzikální vlastnosti tohoto materiálu jsem získal z technického listů [9], získaného dodavatelskou firmou. Výsledek měření fyzikálních tepelných konstant na teplotě 380 °C je zahrnut

na obrázcích 13 a 14. Vyhodnocení závislosti součinitele tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity na teplotě prostředí je graficky provedeno na obrázcích 15 a 16.

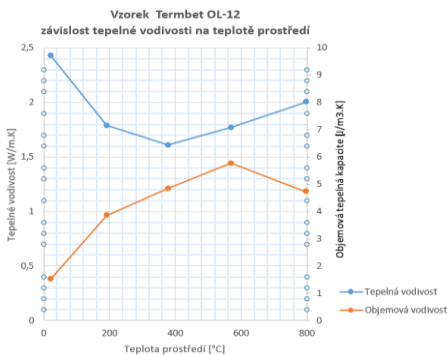


Obr. 13 Změny teplot na vzorku TERMBET-teplota 380 °C

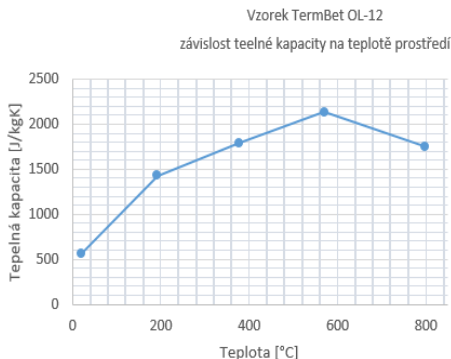


Obr. 14 Konvergence iterací λ a κ

Z obrázku 15 je patrný pokles tepelné vodivosti v oblastech v okolí 400 °C a její opětovný nárůst do 800 °C.



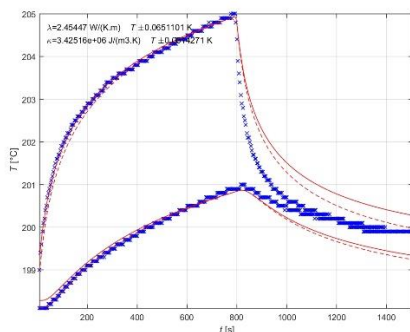
Obr. 15 Změna součinitele tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě



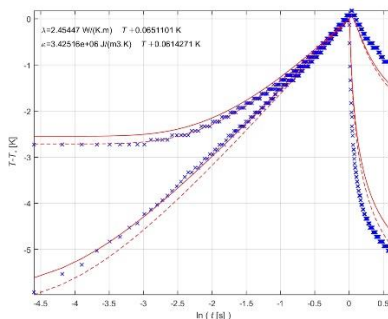
Obr. 16 Změna měrné tepelné kapacity na teplotě

8.1.4 Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity žárobetonu MEBET ACU-M

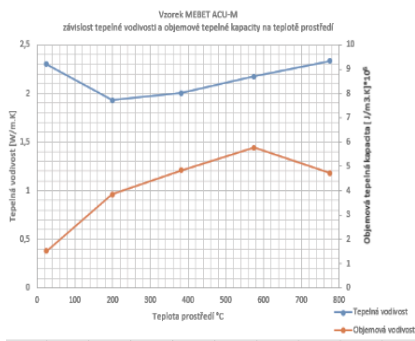
Jedná se o hutný žárobeton se středním obsahem cementu s hydraulickou vazbou použitelný do prostředí s teplotou do 1200 °C. Surovinovou bázi, zabezpečující vysokou objemovou hmotnost tvoří magnetit. Jedná se o nerost, využívaný v hutnictví k výrobě surového železa. Jeho označení je oxid žleznato-železitý a chemická značka je Fe_3O_4 . Fyzikální vlastnosti, týkající se objemové hmotnosti, klasifikační teploty a chemického složení byly získány z technického listu [10], zpracovaného dodavatelem



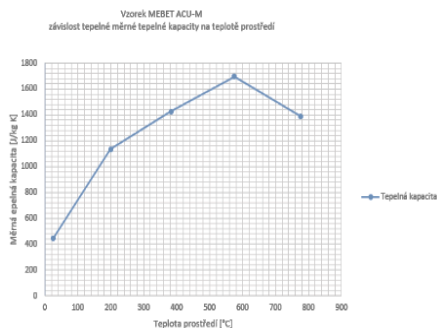
Obr. 17 Změny teploty na vzorku MEBET-
teplota 200 °C



Obr. 18 Konvergence iterací λ a κ



Obr. 19 Změna tepelné vodivosti a objemové
tepelné kapacity na teplotě



Obr. 20 Změna měrné tepelné kapacity na
teplotě

Výsledky měření na teplotě 200 °C jsou zahrnuty na obrázcích 17 až 18. Grafy na obrázcích 19 a 20 demonstrují vliv teploty na změny tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity materiálu MEBET ACU-M.

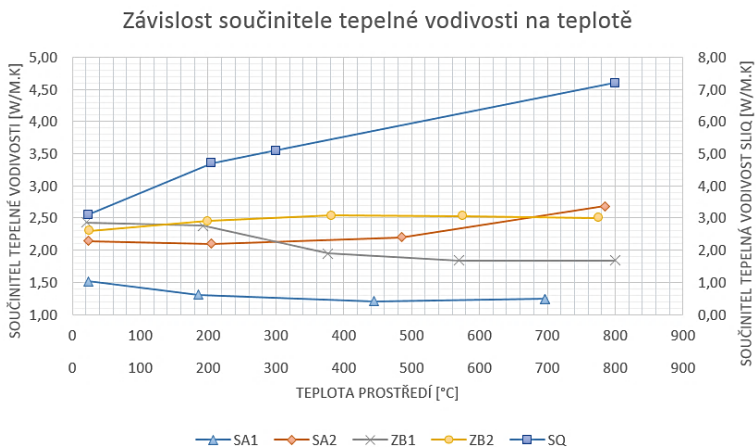
9 Souhrn poznatků o silikátových materiálech pro jejich realizaci konstrukčního uplatnění při tvorbě senzibilních termálních zásobníků

Za účelem ověření chování silikátových materiálů za zvýšených teplot byly k tomuto účelu vybrány představitele šamotových směsí a žárobetonů odolávajícím teplotám nad 800 °C. Klasifikačními ukazateli vhodnosti jejich použití byla určena hodnota tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity. Senzibilní zásobník musí mít takové vlastnosti, které zabezpečí dodávat potřebnou energii, nutnou pro zabezpečení tepelné pohody obytného prostoru. Zásobník je akumulován osvitem slunce v průběhu klimatického roku. Pro senzibilní zásobník energie, instalovaný v Bohuticích, sloužící pro dodávku energie rodinného domku, byl proveden výpočet maximálního úbytku teploty. Vstupními údaji byly objemová hmotnost, měrná tepelná kapacita, okamžitý dodávaný výkon v průběhu časového období jednoho roku, velikost zásobníku a denní odběr. Pro tyto hodnoty vycházejí následující údaje: v letních měsících byla teplota zásobníku regulována na hodnotě 475 °C. Zásobník nabitý letním ohřevem na kapacitu 13,2 MJ, docílil denní spotřebou 3,66 kWh K⁻¹ 15. ledna teploty 367 °C. Kapacita zásobníku a jeho dynamické chování závisí mimo jiné hlavně na hodnotě měrné tepelné kapacity stavebního materiálu a jeho objemové hmotnosti. Důležitým faktorem akumulace energií je rovněž i jeho tepelná vodivost. Pracovní teploty zásobníku se pohybují mezi 300 °C a 500°C. V této oblasti musíme hledat hodnoty měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti. Výsledky měření představitelů šamotů a žárobetonů jsou uvedeny v tabulce 3. Jednotlivé druhy materiálu jsou v této tabulce popsány v textové podobě. Typ SA1 je vzorek s označením OH 1927 představující kaolinitický šamot. Ve druhém řádku tabulky typ SA2 je vzorek s označením OH 1987 představující jiný typ kaolinitického šamotu. Ve třetím řádku tabulky se nachází typ s označením ZB1. Jedná se o vzorek žárobetonu s označením TERMBET. V dalších řádcích tabulky je typ ZB2, který označuje vzorek žárobetonu MEBET a v posledním řádku tabulky typ s označením SQ

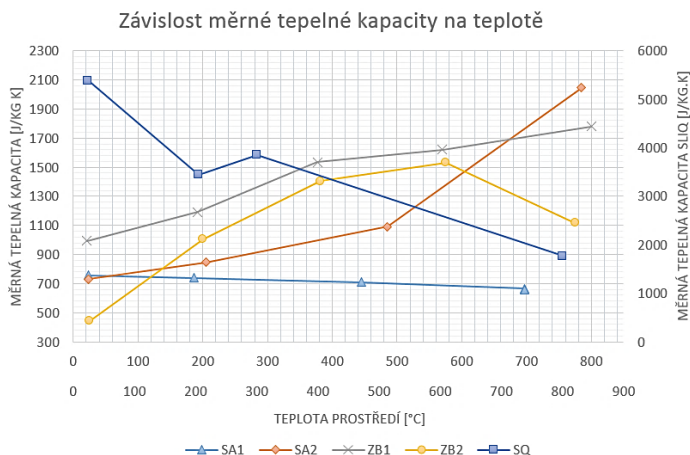
popisuje materiál na bázi oxidu hořečnatého s označením SLIQ. V jednotlivých sloupcích tabulky jsou pod označením římských číslic *I* až *V* uvedeny teploty testování. Ve sloupci symbol jsou uvedeny fyzikální vlastnosti materiálů.

Tabulka 3 Souhrn výsledků měření vybraných představitelů silikátových směsí

Typ	Symbol	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	ρ kg.m ⁻³
SA1	t °C	23,5	187	397	547	700	1 907
	λ W.m ⁻¹ K	1,50	1,33	1,26	1,25	1,37	
	c J kg ⁻¹ K	758	500	490	500	580	
SA2	t °C	24	205	485	785		1 974
	λ W.m ⁻¹ K	2,14	2,10	2,30	2,70		
	c J kg ⁻¹ K	730	825	1115	2046		
ZB1	t °C	21	192	380	570	800	2 713
	λ W.m ⁻¹ K	2,40	1,80	1,60	1,75	2,00	
	c J kg ⁻¹ K	562	1426	1795	2135	1750	
ZB2	t °C	25	200	382	575	775	3 401
	λ W.m ⁻¹ K	2,30	3,85	2,00	2,20	2,34	
	c J kg ⁻¹ K	445	1132	1425	1695	1390	
SQ	t °C	24	205	300	800		2 929
	λ W.m ⁻¹ K	3,10	4,70	5,10	7,20		
	c J kg ⁻¹ K	5390	3447	3857	1775		



Obr. 21 Změna součinitele tepelné vodivosti na teplotě



Obr. 22 Změna měrné tepelné kapacity na teplotě

Výsledky hodnocení měření představitelů silikátových materiálů jsou patrné na diagramech v obrázcích 21 a 22. Srovnáním hodnot tepelné vodivosti v teplotních intervalech 300 °C až 500 °C se jeví jako nejvhodnější materiál ZB1 žárobeton MEBET ACU-M. Jeho výhoda vyplývá rovněž i z jeho objemové hmotnosti. Vzhledem k objemové hmotnosti tohoto materiálu bude jeho objem 1,25 krát menší než objem zásobníku z materiálu TERMBET při stejných požadavcích na výši akumulované energie. Optimální volbou použitého materiálu bude tedy materiál s označením MEBET ACU M.

10 Závěr

V rámci prvních kapitol tohoto příspěvku jsem provedl přehled základních druhů akumulačních zásobníků a vysvětlení jejich funkcí. Naše pracoviště se začalo zabývat možností využití senzibilního zásobníku tepla vyrobeného z betonu pracujícího v oblasti pracovních teplot 200 °C až 550 °C. Vývoj tohoto zařízení je ve stávající době v počátcích, některé údaje v tomto příspěvku mohou být dodatečně upřesněny. Bude

nutné provést řadu zkoušek, nejen sledování tepelných vlastností použitých materiálů, ale rovněž i deformace a zatížení tělesa zásobníku vzhledem k rozdílným objemovým změnám betonu i vnitřního výměníku tepla. Současně je nutné se zaměřit i na jeho mechanickou konstrukci zahrnující jednak možnosti blokování vstupního tepelného toku a regulaci dodávky energie podle požadavku na její využití. Tento problém v konečné fázi bude zahrnovat komplexní energetickou bilanci vztaženou na systém příjmu energie, její akumulaci i odběr.

Knihy časopisy konferenční příspěvky a internetové prezentace.

- [1]. Lach, V., *Teoretické základy výroby pálených stavebních látek*, Keramika II, Vysoké učení technické, v Čs redakci VN MON 1989.
- [2]. Nevřivová, L., *Speciální keramika. Žáruvzdorné materiály*, VUT Brno, Fakulta stavební, 1992
- [3]. Carslaw, H.S., and Jaeger, J.,C., *Conduction of Heat in Solids* (Clarendon Press Oxford,1959).
- [4]. Bochev, P.B. a Gunzburger, M.D., *Least-Squares Finite Element Methods*. Springer, New York, 2009.
- [5]. Dohnalová, L., Trhlíková I. a Zmeškal, O., *Temperature dependence of thermal parameters of building materials*. Proceedings of Thermophysics in Podkylava (Slovakia).
- [6]. Gutierrez, E. Miravete, *Conduction Heat Transfer*. Hartford University, 2006.
- [7]. Vala, J., Šťastník, S., Jarošová, P., *Identifikace tepelných charakteristik stavebních materiálů metodou topného drátu*. Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně, Maltoviny 2013.
- [8]. Šťastník, S.,Vala, J., Šot, F., *Physical properties of selected silicates for long-term heat container*, Fakulta stavební Vysoké učení technické v Brně.
- [9]. TermBet OL-12, Průmyslová keramika, spol. s r.o., Rájec-Jestřebí, *Technický list*, <http://www.prumker.cz>, (cit. 2. 2015).
- [10]. MEBET ACU-M, Průmyslová keramika, spol. s r.o., Rájec-Jestřebí, *Technický list*, <http://www.prumker.cz>, (cit. 2. 2015).
- [11]. Vala, J., Šot, F., WIRD, *Opis programu, příloha [41]* Dizertační práce, Výzkum vlastností materiálů pro použití ve vysokoteplotním solárním tepelně akumulčním zásobníku.
- [12]. Šťastník, S., Šot, F.,PEC, *Opis programu, příloha [40]* Dizertační práce, Výzkum vlastností materiálů pro použití ve vysokoteplotním solárním tepelně akumulčním zásobníku.
- [13]. Isakov, V., *Inverse Problems for Partial Differential Equations* (Springer, 2006).
- [14]. ČSN EN ISO 8894-1: Žáruvzdorné materiály – *Stanovení tepelné vodivosti*. ÚNMZ, Praha, 2011.
- [15]. Davies, M.,G., *Building Heat Transfer* (Wiley,J., & Sons, 2004).
- [16]. Technický list, SCH 60, <http://www.pd-refractories.cz/cs/pdf/162>, (cit. 10.2013)
- [17]. *Phase change energy storage*, Dostupné na <http://www.rgees.com/technology.php#pcm>, (cit.10.2013).

Životopis autora

Základní údaje

Jméno a příjmení RNDr. Ing. František Šot

Narozen 31. října 1941 ve Vyškově

Státní příslušnost Česká republika

Bydliště 679 06 Jedovnice, Na Kopci 502

Telefon 605 067 303

E-mail sot.f@fce.vutbr.cz, sot.f@seznam.cz,

Přehled o vzdělání a odborné praxi

2012-2017	studium doktorského studia na Fakultě stavební VUT v Brně, oboru Fyzikální a materiálové inženýrství na ústavu technologie stavebních hmot a dílců
2012-2017	Koplast spol. s r. o. Jedovnice, konstrukce lisů pro tváření plastů
2006-2012	BEF Home. Spol. s r. o. -konstrukce spalovacích prostorů v šamotových komorách
2002-2006	Terra Computer systems konstrukce duplikačních systémů
1989-1991	Studium doktorandského oboru Přírodovědecká fakulta, obor Matematická informatika, teoretická kybernetika a teorie systémů, Masarykova univerzita Brno
1984-1989	Přírodovědecká fakulta, obor Matematická informatika, teoretická kybernetika a teorie systémů, Masarykova univerzita Brno
1965-2002	Metra a.s. Blansko, vývojový pracovník technologie a technologického vývoje.

1959-1965	studium Vysoké učení technické – Fakulta strojní v Brně
1955-1959	studium Střední průmyslová škola přesné mechaniky a optiky v Přerově

Další schopnosti

- řidičský průkaz skupiny B,
- cizí jazyky - ruština (aktivně), angličtina (pasivně).

Další aktivity během doktorandského studia

- autor nebo spoluautor 3 publikací,
- odborné přednášky o obnovitelných zdrojích energie,
- odborné přednášky o dlouhodobých akumulacích zásobnicích solární tepelné energie.

[1] ŠŤASTNÍK, S.; ŠOT, F.; VALA, J. *Material properties of refractory concrete under high temperature*. Advanced Materials Research, 2015, vol. 1126, p. 155-160. ISSN: 1022-6680.

[2] ŠŤASTNÍK, S.; VALA, J.; MAJSNIAR, M.; ŠOT, F. *Influence of degradation of surface layer of light-weighted panels on its sunray absorptance*. Materials Science Forum, 2017, vol. 908, p. 129-133. ISSN: 1662-9752.

[3] ŠOT, F., ŠŤASTNÍK, S., VALA, J., *Computational modelling of sensible heat storage*, odborná konference FAST VUT Brno, Křtiny 2015