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 VYSOKOTEPLOTNÍM SOLÁRNÍM TEPELNĚ-AKUMULAČNÍM ZÁSOBNÍKU

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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE — RNDr. Ing. František Šot
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2018

ABSTRAKT

Používání tepelných akumulačních 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 používané v latentních termálních zásobníkových systémech. Metody využívající ukládání tepelné energie, díky materiálovým akumulačním vlastnostem, se uplatňují v zásobníkových systémech senzibilních. V uplynulém desetiletí se oba tyto principy rozšířily pro chlazení a ohřev ve stavebnictví. Existuje celá řada systémů, které pracují v širokém rozsahu teplot, používané v různých aplikacích stavebního inženýrství. Tato práce je zaměřena na průzkum materiálů vhodných pro realizaci senzibilních termálních zásobníkových systémů, pracujících na principu ukládání solární energie.

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, akumulační zásobník.

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. There are a number of PCM systems, which operate over a wide temperature range, are used in various applications. This document includes a brief overview of the development and analysis of available thermal storage working mainly on the principle of PCM.

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.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

RNDr. Ing. František Šot *Výzkum vlastností materiálů pro použití ve vysokoteplotním solárním tepelně-akumulačním zásobníku.* Brno, 2018. 136 s.,11 s. příloh. Disertační 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 disertační práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 9. 1. 2018 .....

podpis autora

František Šot

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych tímto poděkovat mé milé ženě Sylvě, za její trpělivost, povzbuzování a tolerantnost pro její ztracený čas, díky mé nepřítomnosti v důsledku plnění úkolů vyplývajících z tvorby disertační práce.
Velké díky patří mému školiteli Stanislavu Šťastníkovi, za vedení mé disertační práce a jeho ztracený volný čas a za to, jak se mi obětavě věnoval při konzultacích a vývojové činnost. Mé díky patří rovněž i paní Lence Nevřivové, za její konzultace a rady v oblastech žárupevných silikátových materiálů a hmot.

Obsah

1 Ostrovní systémy ... 5

1.1 Ostrovní fotovoltaické systémy ... 5

1.1.1 Ostrovní fotovoltaické systémy s přímým napájením ... 5

1.1.2 Ostrovní systém s akumulací elektrické energie ... 6

1.1.3 Hybridní solární ostrovní systémy ... 7

1.2 Ostrovní zásobníkové systémy ... 9

2 Druhy zásobníků tepla dle akumulačních medií ... 11

2.1 Senzibilní zásobníky tepla ... 12

2.2 Latentní zásobníky tepla ... 13

2.2.1 Materiály pro latentní tepelné zásobníky ... 14

3 Fyzikální a chemické vlastnosti silikátových materiálů senzibilních zásobníků ... 15

3.1 Fyzikální vlastnosti ... 15

3.2 Chemické vlastnosti ... 15

4 Charakteristiky žáruvzdorných materiálů [15] ... 17

4.1.1 Tvarové žáruvzdorné materiály hutné ... 21

4.1.2 Netvarové žáruvzdorné materiály ... 24

5 Fyzikální vlastnosti silikátových žáruvzdorných materiálů ... 29

5.1 Objemová hmotnost ... 29

5.2 Teplotní vodivost ... 29

5.3 Měrná tepelná kapacita ... 30

5.4 Žárové vlastnosti ... 30

6 Teoretické podklady pro vyhodnocení experimentální činnosti ... 31

6.1 Teoretické podklady pro identifikaci tepelných charakteristik (výrobky hutné) ... 31

6.2 Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (ISO 8894-1) ... 33

6.3 Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu výpočtem. ... 36

6.4 Stanovení teplotní vodivosti α metodou topného drátu upraveným přístupem. ... 37

6.5 Teoretické podklady pro ověření tepelných charakteristik zásypových hmot ... 39

6.5.1 Fyzikální a matematický model ... 39

7 Senzibilní zásobníky tepelné energie ze žáruvzdorného betonu ... 42

7.1 Žáruvzdorné betony portlandské ... 43

7.2 Žáruvzdorné betony hlinitanové ... 45

8 Bilance potřeby energie pro docílení tepelné pohody objektu. ... 47

8.1 Parametry senzibilního zásobníku tepla ze žáruvzdorného betonu ... 51

8.2 Koncepce zásobníku energie ... 54

8.2.1 Izolační obal zásobníku ... 54
8.2.2 Materiál pro tepelné akumulační zásobníkové jádro ... 57
8.2.3 Tepelný akumulační zásobníkový systém ... 60
9 Ověření chování modelů zásobníkových systémů ... 63
9.1 Modely zásobníkových systémů ... 63
9.2 Testovací pracoviště pro sledování tepelného zatížení zásobníku. ... 69
9.2.1 Zkoušky tepelného zatížení a ochlazování zásobníku první varianty ... 70
9.2.2 Zkoušky tepelného zatížení a ochlazování zásobníku druhé varianty ... 71
9.2.3 Zkoušky tepelného zatížení a ochlazování zásobníku třetí varianty ... 73
10 Numerické modelování dynamického chování zásobníku v prostředí výpočetního systému ANSYS ... 76
10.1 Řešené součásti a vnitřní vazby tepelného systému ... 76
11 Měření tepelných charakteristik žárupevných materiálů ... 80
11.1 Upravený přístup metody topného drátu ... 80
11.2 Konfigurace měřícího pracoviště. ... 81
11.3 Příprava vzorků pro měření ... 88
11.4 Stabilizace a ustálení teploty vzorků s teplotou prostředí ... 91
11.5 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti vybraných silikátových směsí. ... 92
11.5.1 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti kaolinitických šamotů. ... 92
11.5.2 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti výběru žáruvzdorných betonů ... 111
11.5.3 Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti žárobetonu TermBet OL-12 ... 111
11.5.4 Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti žárobetonu MEBET ACU-M ... 121
12 Souhrn poznatků o silikátových materiálech pro jejich realizaci konstrukčního uplatnění při tvorbě senzibilních termálních zásobníků ... 132
13 Závěr ... 136
14 Přílohy ... 138
14.1 Program PEC ... 138
14.2 Program WIRD ... 143

Úvod do řešené problematiky

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 energie na rozdíl od zdrojů alternativních se liší konečností jejich využívání. Obnovitelné zdroje mají prakticky nekonečnou životnost. 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. Energie větrná využívá energie vzdušných proudů. V současné době je její využívání realizováno v hojném množství v zemích s rozsáhlou činností větrů. Využívání geotermální energie je velmi efektivní. Tento způsob užívání energie se uplatňuje v lokalitách s vyšší geotermální aktivitou. V současné době využívání obnovitelných zdrojů energie je realizováno v ostrovních systémech.

Cíle disertační práce

Dizertační práce se věnuje problematice použití vhodných materiálů pro vysokoteplotní tepelné zásobníky na silikátové bázi, tepelně-izolačnímu plášti i reálným provozním teplotním poměrům při jejich využití. Koncepce zásobníku je v širších souvislostech zaměřena na stanovení optimálního návrhu senzibilního zásobníku na bázi dostupných a levných stavebních materiálů.

Energetickým zdrojem přitom v reálném provedení slouží obnovitelné zdroje energie. Uspořádání energetického zásobníku musí být takové, aby byl schopen dlouhodobě dodávat energii na požadované teplotní úrovni tak, že může být využita jak ve formě energie tepelné, tak i pro malý parní systém pro výrobu elektrické energie. Přitom se předpokládá funkčnost během celého ročního období.

Předmět studia lze shrnout do následujících oblastí:

a. Konstrukce akumulačního tělesa zásobníkového systému,
b. Uspořádání izolačního opláštění akumulačního tělesa,
c. Optimalizace energetického zásobníku z hlediska rozměrů i použitých materiálů.

Ad a. Při návrhu akumulačního tělesa je nutné vycházet z vhodných materiálů, jejichž výběr je určen fyzikálními vlastnostmi:

i. tepelná vodivost,
ii. měrná tepelná kapacita,
iii. objemová hmotnost.

Těžiště dizertační práce spočívá v určení požadovaných 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. Pro aplikace v tepelně akumulačních vysokokapacitních zásobnících navrhuji nejvhodnější materiály získané experimentálně měřením. 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.

Ad b. 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 systémů. Principiálně je výsledek měření stanoven dopočtem z výsledku numerické simulace při šíření tepla modelováním v systému ANSYS.

Ad c. Optimalizační proces spočívá v určení potřebné velikosti zásobníkového tělesa, které je schopné akumulovat potřebné množství energie vzhledem k reálnému stavebnímu objektu i jeho vlastnostem z hlediska tepelných ztrát za vymezených klimatických podmínek dané lokality. Proporce však závisí na dalších parametrech, které je potřebné racionálně sladit, zejména s energetickou náročností zásobovaného stavebního objektu, velikostí energetického zásobníku a tepelnými solárními zisky.

1 Ostrovní systémy

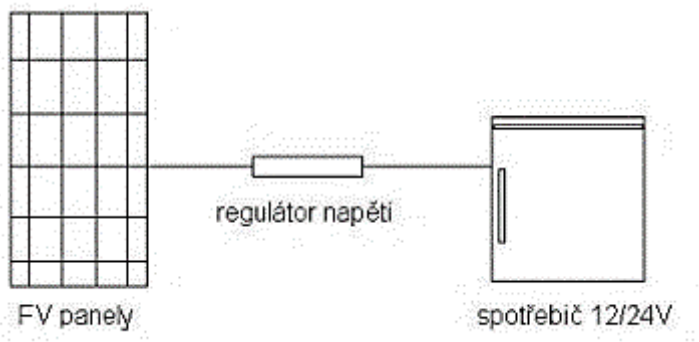
Ostrovním systémem rozumíme komplexní obyvatelný užitný objekt, který disponuje nezbytnými zdroji energie, a přitom je schopen existence bez připojení na žádnou externí energetickou základnu zdrojů. Může tedy existovat bez zásobení energie zvenčí. Jedná se o takové lokality, ke kterým by doprava energie byla ekonomicky náročná anebo vůbec proveditelná. Je rovněž možné takový systém zavádět u soukromých stavebních objektů z důvodů úspor nákladů na energii. Např. u nízkoenergetických domů apod. Užitnou energii je tedy v těchto případech získat a vyrobit za cenu nákladů, které ve druhém případě vedou k přijatelné ekonomické návratnosti. Zde nachází uplatnění obnovitelné zdroje energie. Jedním z klíčových zdrojů obnovitelných energií je slunce a jeho záření. Slunce produkuje v letních měsících energii, která činí přibližně hodnotu 1000 $W.m^{-2}$ přímo ozářené plochy. V zimních měsících je tato hodnota menší. Síla sluneční energie závisí na zeměpisné poloze lokality vzhledem k rovníku. Pro výrobu energie se v současné době a téměř všech lokalitách na zeměkouli nabízí možnost budování fotovoltaických zdrojů. Ostrovní systémy vytvořené na základě aplikací fotovoltaických generátorů elektrické energie tvoří o*strovní fotovoltaické* systémy.

1.1 Ostrovní fotovoltaické systémy

Jsou variantním řešení v lokalitách, ve kterých není možné přivádět energii z externích distribučních sítí, nebo vybudování přípojky by bylo neúměrně nákladné. Ostrovní systém není spojen s elektroinstalační soustavou. Získaná energie má formu energie elektrické. Nevýhodou tohoto systému je její skladování. Kapacita baterií je poměrně malá, takže v zimním období je zapotřebí doplňku výroby energie, kterou je možné řešit zařazením motorové elektrocentrály. V současné době jsou využívány tři druhy těchto systémů.

1.1.1 Ostrovní fotovoltaické systémy s přímým napájením

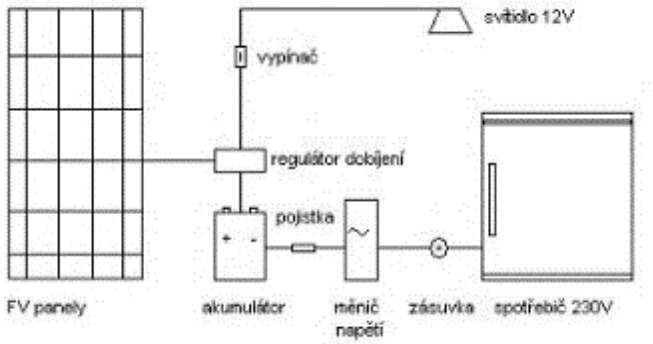
V podstatě se jedná o propojení fotovoltaických panelů a spotřebiče přes regulátor napětí Schematické znázornění tohoto systému je patrné z obrázku 1. Nevýhodou této varianty je její funkce, která je aktivní pouze v době dostatečné intenzity slunečního záření. Využití tohoto systému je vhodné pro napájení malých spotřebičů a vzhledem k tomu, že systém nemá měnič napětí, pak pouze pro napájení spotřebičů s napětím do 24 V.



Obr. 1. *Schéma fotovoltaického systému s přímým napájením[14]*

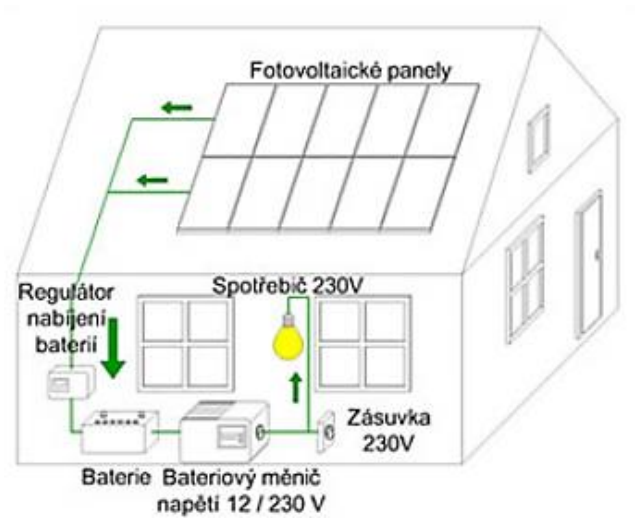
1.1.2 Ostrovní systém s akumulací elektrické energie

Jedná se o systém, který může s nashromážděnou elektrickou energií hospodařit delší časové období. Toto je umožněno díky speciálním akumulátorovým bateriím, jejichž optimální nabíjení a dobíjení zajišťuje regulátor. Takové uspořádání umožňuje pracovat bez jakékoli vnější pomoci (elektrocentrála) i v zimním období. Zabudovaný měnič napětí v tomto systému umožňuje používat spotřebiče jak pro napájení 12 V, 24 V i 230 V. Schematické provedení tohoto systému je znázorněno na obrázku 2.



Obr. 2. *Schéma ostrovního systému s akumulací elektrické energie [14]*

Praktické uspořádání tohoto systému je zřejmé z obrázku 3. Na tomto vyobrazení je zdroj elektrické energie, kterým je solární panel, umístěn na střeše obytného domu. Napětí ze zdroje je vedeno k regulátoru nabíjení baterií odtud do akumulátoru. Vzhledem k tomu, že napětí odebírané z fotovoltaického panelu činí 12 V, je nutné pro další využívání použít napěťový měnič. Toto zařízení umožňuje transformaci elektrického stejnosměrného napětí na napětí střídavé o výši 230 V. Nejslabším článkem tohoto systému je opět baterie. V současné době je výzkumný trend věnován bateriím, které mají vyšší kapacitu a tím větší schopnost akumulovat poměrně značné objemy elektrické energie.



Obr. 3. *Schematické uspořádání solárního systému s akumulátorem [39]*

Velký vzestup v současnosti zaujímá provedení a vývoj lithium fosfátových a lithium polymerových baterií, které jsou schopny zabezpečovat poměrně vyšší kapacitní objemy elektrické energie vzhledem k akumulátorům na bázi olova. Oba druhy baterií jsou vyobrazeny na obrázcích 4 a 5. Rovněž tak i klesá poměr váhy ke kapacitě.

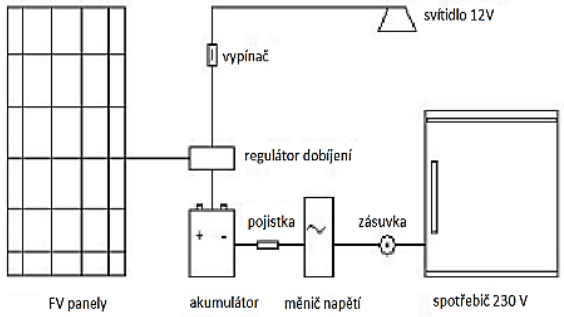
Obr. 4. *Fotografie lithium fosfátové baterie [38]*

Obr. 5. *Fotografie lithium polymerové baterie [38]*

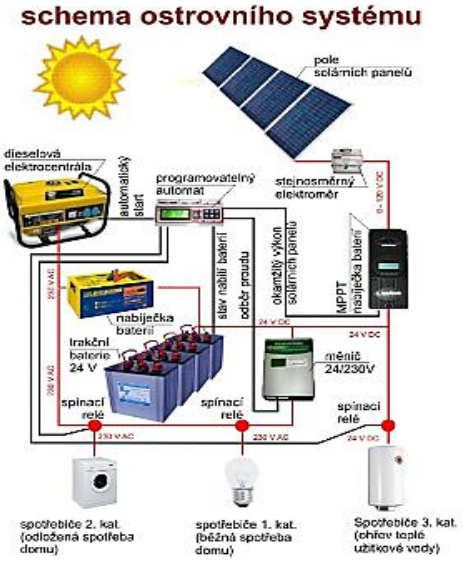
1.1.3 Hybridní solární ostrovní systémy

Tyto systémy jsou vzhledem solárním ostrovním systémům s akumulací energie rozšířeny o doplňkový zdroj elektřiny (elektrocentrála). Doplňkový zdroj pokrývá potřebu elektrické energie v obdobích s nedostatečným slunečním svitem nebo při provozu zařízení, které vyžaduje vysoký příkon. Tato ostrovní fotovoltaická zařízení jsou vhodná pro objekty, ve kterých se předpokládá jejich celoroční provoz. Schéma hybridního solárního systému je

znázorněno na obrázku 6. Zjednodušené schéma realizace ostrovní elektrárny je demonstrována na obrázku 7.



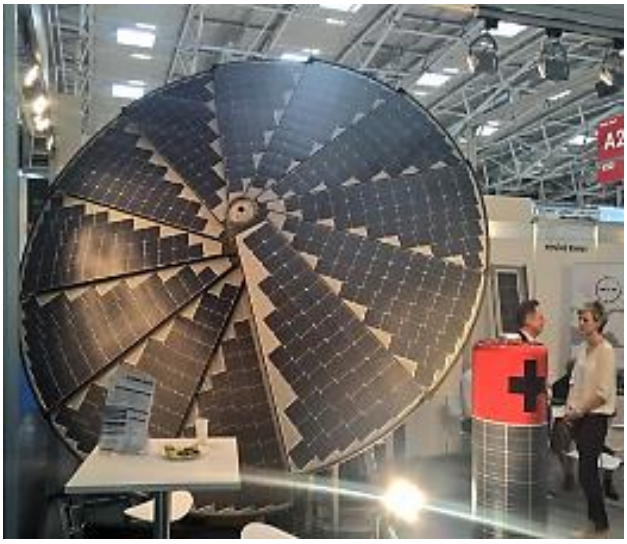
Obr. 6. *Schéma hybridního solárního systému[14]*



Obr. 7. *Zjednodušené schéma ostrovní elektrárny [7]*

Zdrojem elektrické energie je fotovoltaický panel přivádějící na vstup systému napětí 24 V DC. Toto napětí je dále rozváděno přes MPPT nabíjecí zařízení baterií k trakčním bateriím a k měniči DC napětí 24 V DC/ 230 V AC. Na výstupu měniče je možné zapojit spotřebiče 230 V. V systému je zabudována motorová elektrocentrála, která v případě nedostatku oslunění dodává do systému potřebná napětí. Celý systém je řízen programovatelným automatem.

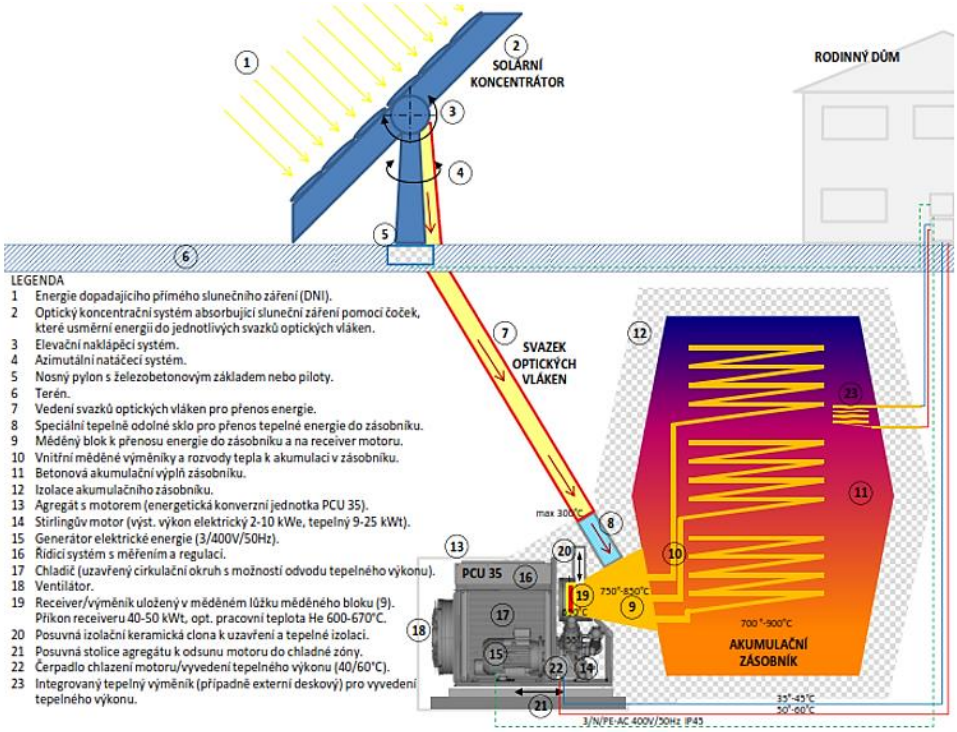
Zisk sluneční energie je zabezpečován fotovoltaickými panely. Jeden z výkonných solárních panelů je vyobrazen na obrázku 8.



Obr. 8. *Vysoce výkonný fotovoltaický solární panel [38]*

1.2 Ostrovní zásobníkové systémy

Jako v předchozích systémech zásobníkové ostrovní systému využívají k získání energie slunečního záření. Tyto systémy se od předchozích liší zásadním způsobem. V prvé řadě nepoužívají jako zdroj elektrické energie fotovoltaické panely, ale čerpaná sluneční energie je skladovaná do zásobníků. Transport energie slunečního záření probíhá následujícím způsobem: Sluneční paprsky jsou sbírány buďto Fresnelovou lupu anebo parabolickým zrcadlem. V ohnisku těchto komponent je umístěn svazek optických kabelů, který transformuje koncentrované záření, na tepelné převodníky, zabudované uvnitř tělesa akumulátoru. Tyto převodníky zabezpečují rozvod tepelné energie do tělesa zásobníku. Energii uloženou v zásobníku je možné použít buďto pro ohřev vody na páru pro aktivování parní turbíny anebo přímo ji odvést na výměník Stirlingova motoru. Výhodou těchto akumulačních systémů je ta okolnost, že jsou funkční i v případě nepřítomnosti slunečního záření. Podmínkou pro použití systému s parní turbínou je nutno zásobník vyhřát na teplotu 400 °C. Pro případ využití Stirlingova motoru je možné použít zásobník s teplotou vyšší než 700 °C. Schéma ostrovního zásobníkového systému užívajícího Stirlingova motoru je znázorněno na obrázku 9.



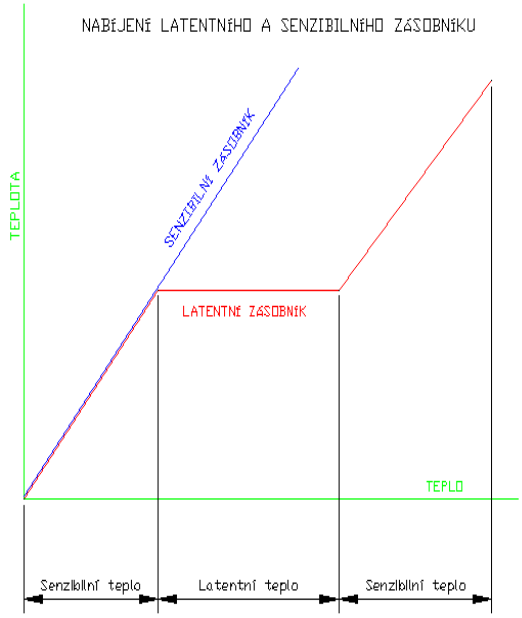
Obr. 9. *Schéma ostrovního zásobníkového systému se Stirlingovým motorem [zdroj: technická dokumentace Strojírny Bohdalice, a.s., 2015]*

Zásobníkový systém je sestaven ze solárního koncentrátoru, kterým je Fresnelova čočka. Sluneční paprsky koncentrované v jejím ohnisku jsou přenášeny optickými kabely přes speciální žáruvzdorné sklo na převodník tepla, zabudovaný v žárobetonovém zásobníku. Teplo ze zásobníku je jednak odebíráno pro pohon Stirlingova motoru a jednak rozváděno měděnými tyčemi do tělesa zásobníku za účelem rozvodu tepla. Uvnitř zásobníku je zabudováno potrubí pro ohřev teplé užitkové vody. Systém koncentrátoru rotací a naklápěním umožňuje sledování dráhy slunce během denního osvitu. Žáruvzdorný zásobník je obalen izolační hmotou, zabraňující únik tepla. Celý systém s výjimkou solárního koncentrátoru je zabudovaný pod úrovní terénu. Je zřejmé, že zásobník používaný v tomto systému musí mít v prvé řadě z důvodu akumulace tepelné energie dobrou tepelnou kapacitu a pro rovnoměrné rozložení tepla dobrou tepelnou vodivost.

2 Druhy zásobníků tepla dle akumulačních medií

Úložiště tepelné energie je možné aplikovat dle použití akumulačních medií dvěma způsoby. Prvním z nich je způsob ukládání tepla do zásobníků tepelně citlivých dále senzibilních. Závislost teploty na úložné energii je znázorněna na diagramu v obrázku 10. Teplo přenášené do paměťového media je tímto akumulováno a vede ke zvyšování jeho teploty. Paměťovým mediem může být voda, olej nebo jiné pevné látky. 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.

Druhým dnes častěji používaným způsobem ukládání energie je akumulace tepla do medií využívajících fázových změn. Při ohřevu těchto medií je možné 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. Tato teplota se nazývá teplotou fázové změny. Jestliže je proces fázové přeměny ukončen, pak přenos proces tepla do zásobníku je opět formou senzibilní. Na diagramu v obrázku 10 je znázorněn rozsah regulace změn teplot akumulovaného tepla v zásobnících senzibilních a latentních [6]. Latentní tepelné zásobníky určené pro ukládání tepla nebo chladu jsou založeny na principu jeho získání z fázových přeměn. Pro latentní zásobníky jsou používána jak organická, tak i anorganická media. Anorganická media jsou založena na hydrataci solného roztoku s vodou. Chemické složení soli je odvozeno z požadované fázové přeměny.



Obr. 10. *Průběh závislosti akumulovaného tepla v závislosti na teplotě u senzibilního a latentního akumulačního systému [6]. Modrou čarou je vyobrazen průběh senzibilního zásobníku, červenou čarou zásobníku latentního*

Do směsi se přidávají speciální nukleační činidla, minimalizující jednak fázovou přeměnu oddělené soli, a dále minimalizující chlazení. Tato činidla jsou charakteristická pro danou hydratační sůl. Medium musí být netoxické, nehořlavé a ekonomicky výhodné. Organická media používaná v latentních zásobnících jsou převážně mastné kyseliny například rostlinné oleje. Jejich chemická složení, teploty fázových změn mohou být různá. Tyto materiály jsou netoxické, nepodléhají korozi a jejich životnost je prakticky nekonečná. Avšak jsou finančně nákladné a při vysokých teplotách hořlavé.

Pro užívání materiálů v oblasti senzibilních zásobníků se nabízí možnost použití žáruvzdorných betonů nebo zásobníků vyrobených na bázi šamotů. Oba druhy zásobníků musí z fyzikálního hlediska splňovat faktory tepelných a objemových charakteristik. Neméně důležitá je stránka ekonomická a ekologická. Z hlediska fyzikálního se jedná se o dobrou tepelnou vodivost a vysokou tepelnou kapacitu. Vzhledem k tomu, že objem úložné energie je spojen s nárůstem teplot do řádově stovek stupňů celsia, 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. Znamená to jejich netoxicitu, nehořlavost a nezávadnost systému vzhledem k životnímu prostředí.

2.1 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. Tyto materiály jsou cílem výzkumu této dizertační práce. V prvé řadě nás zajímá množství akumulované tepelné energie Q. Množství energie je závislé nejen na schopnosti akumulace, dané měrnou tepelnou kapacitou, ale také i na hmotnosti akumulačního tělesa. Množství tepla naakumulovaného do zásobníku je možno vyjádřit následujícím vztahem:

$$Q = \int_{Ti}^{Tf} mc_p dT \qquad (1)$$

Integrace součinu představuje součet všech teplotních změn při ohřevu akumulátoru z počáteční teploty T_i na teplotu konečnou T_f. Tepelnou kapacitu zásobníků je možno vyčíslit z fyzikálních tabulek pro různé materiály. Např. voda se jeví jako nejlepší zásobník z tekutých materiálů protože je levná a má vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity. Avšak její teplotní interval při normálním tlaku dosahuje maximálně 100 °C. V případech použití vyšších teplot jsou vhodné oleje, tekuté soli, tekuté kovy anebo jiné tuhé látky, s vhodnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi.

2.2 Latentní zásobníky tepla

Latentní zásobníky tepla jsou založeny na principu absorbování tepla za konstantní teploty. Tento stav nastává tehdy, kdy matriál přechází z jedné stabilní fáze na druhou, tedy kdy se mění fáze tuhá v tekutou a obráceně. Tepelný obsah těchto zásobníků je možné matematicky vyjádřit následující následovně [1]

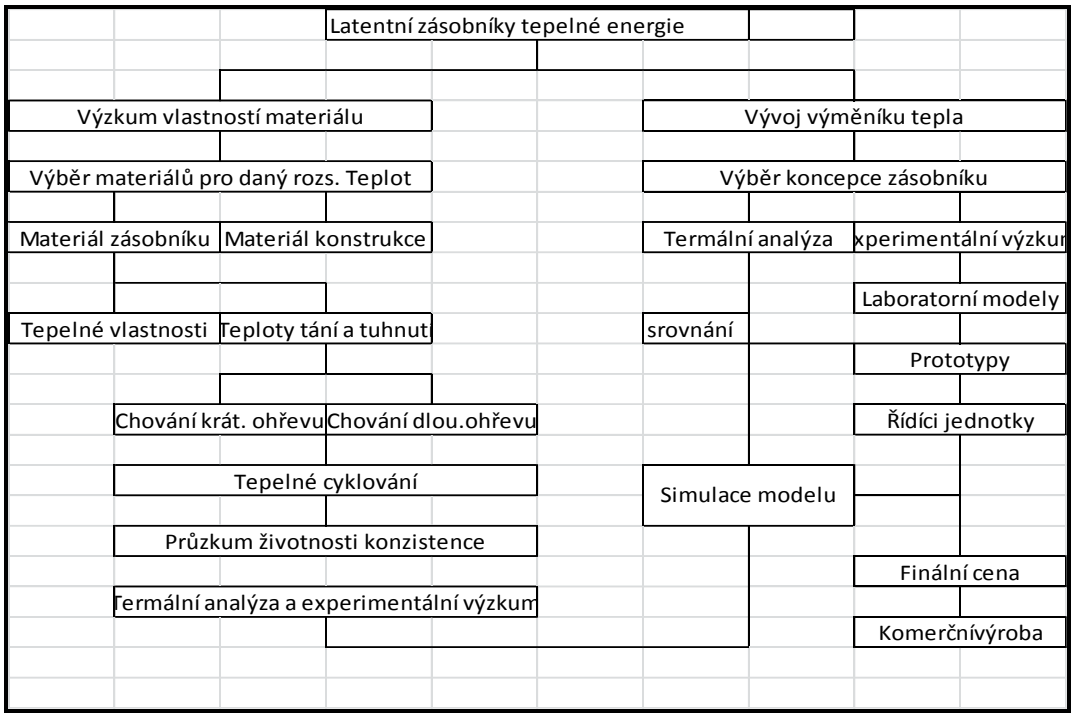
$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m_t C_p \, dT + m_t a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m_t \, C_p dT \tag{2}$$

$$Q = m_t \left[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h + C_{lp}(T_f - T_m) \right] \tag{3}$$

Vývoj těchto zásobníků zahrnuje zvládnutí tří základních problémů, spočívajících jednak ve fázových změnách materiálu, dále na volbě vhodného materiálu zásobníku a nakonec na konstrukci tepelného výměníku. Široký rozsah problémů zahrnujících návrh nízkoteplotních latentních tepelných zásobníků je znázorněn v tabulce 1

Vývoj probíhá dvěma na sobě nezávisejícími směry. Jedna větev vývoje je zaměřena na výzkum materiálů a druhá na konstrukčním vývoji výměníku tepla. Při výzkumu použitých materiálů pro akumulaci energie je nutné uvažovat o rozsahu teplot, na kterých latentní zásobník pracuje a na tomu přiřazených materiálů zásobníkového obalu tedy požadavků na konstrukci. Ve větvi vývoje výměníku musí po výběru koncepce zásobníku následovat termální analýza potvrzená experimentálními zkouškami. Po ukončení této části vývoje je zhotoven prototyp a po simulaci modelu je provedeno srovnání termální analýzy zásobníkového systému s výsledky experimentálních zkoušek na prototypu.

Tabulka 1: Strategie vývoje latentních zásobníků [6]



2.2.1 Materiály pro latentní tepelné zásobníky

K akumulaci tepelné energie dochází v tom okamžiku, kdy materiál přechází z fáze pevné do fáze tekuté. Vzhledem k tomu, že tato změna nenastává skokem, ale materiál se postupně rozpouští, tak přechod z jedné fáze na druhou trvá jistou časovou dobu. Latentní změna probíhá za konstantní teploty. Množství tepla, které se na rozpuštění materiálu spotřebuje, je teplo latentní. Takto nabitý zásobník akumuluje objem tepelné energie, který je úměrný latentnímu teplu použitého materiálu a objemu rozpuštěné fáze. Vybíjením zásobníku odčerpáváním tepla se materiálová substance ochlazuje a tím i tuhne. Děj se cyklicky opakuje. Na rozdíl od materiálů používaných v senzibilních zásobnících např. kámen nebo voda je objem tepla u těchto materiálů při akumulaci anebo uvolňování 5 až 14x větší. Materiály používané pro latentní zásobníky musí tedy splňovat jisté vlastnosti, mezi které patří:

- vlastnosti termodynamické,
- vlastnosti kinetické,
- vlastnosti chemické,
- ekonomičnost aplikací.

Vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena na využití materiálů pro zásobníky senzibilní, pak se výše uvedenou problematikou týkající se latentních zásobníků dále nezabývám. Podrobnější popis uvedených vlastností latentních zásobníků je uveden v [1] a [6]

3 Fyzikální a chemické vlastnosti silikátových materiálů senzibilních zásobníků

Ze vztahu (1) charakterizujícího objem akumulované tepelné energie, jsou zřejmé základní požadavky na fyzikální vlastnosti materiálů používaných pro realizaci senzibilních zásobníků. Důležitým faktorem pro realizaci senzibilních zásobníků energie je tepelná vodivost stavebního materiálu. Dobrá tepelná vodivost zajišťuje efekt rychlého průběhu akumulace tepelné energie do prostoru zásobníku. Větší měrná tepelná kapacita použitého materiálu nabízí akumulaci většího množství tepelné energie a dobrá tepelná vodivost zajistí rychlé a pravidelné rozložení tepla v akumulátoru.

3.1 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti silikátových materiálů používaných pro realizaci senzibilních zásobníků mají nesporný vliv na kvalitu jejich výsledného chování. Vliv na dobrou funkci zásobníku, tj. rychlost akumulace tepla a výše jeho objemu byly deklarovány v kapitole 2.1. Mezi nejdůležitější fyzikální vlastnosti tedy náleží:

- tepelná vodivost λ,
- měrná tepelná kapacita c,
- hmotnost akumulačního zásobníku 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 měrná tepelná kapacita a vysoká hustota zaručují akumulaci vysokého objemu energie.

3.2 Chemické vlastnosti

Charakterizují chování materiálů pro senzibilní zásobníky z hlediska jejich chemického působení na konstrukci a životní prostředí. Mezi tyto vlastnosti patří:

- tepelná chemická stabilita,
- kompatibilita materiálu ke konstrukci,
- netoxičnost,
- nehořlavost.

Materiály se mohou znehodnocovat ztrátou vody při hydrataci, chemickou dekompozicí nebo nekompatibilitou vzhledem materiálu konstrukce. Tato musí být netoxická nehořlavá a

neexplozivní. Důležitým faktorem použitelnosti je stránka ekonomická. Mezi její nejdůležitější faktory patří:

- hojný výskyt,
- dostupnost,
- příznivá cena.

Otázka používání vhodných materiálů pro senzibilní zásobníky spočívá hlavně v jejich nízké ceně a snadné dostupnosti. Předmětem zkoumání použitelnosti materiálů pro realizaci senzibilních zásobníků je tato práce zaměřena na ověření všech faktorů popsaných ve stati 2.2.1. Fyzikální vlastnost týkající se součinitele tepelné vodivosti λ je poměrně nízká ale přijatelná. Její hodnoty se pohybují v okolí 2,0 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Měrná tepelná kapacita uvažovaných silikátových materiálů dosahuje hodnot v oblastech okolí 900 $J.kg^{-1}.K^{-1}$. Objemová hmotnost se pohybuje v rozmezí od 1200 do 3500 $kg.m^{-3}$. Odolnost proti vysokým teplotám silikátové žáruvzdorné materiály spolehlivě zabezpečují. Tyto žáruvzdorné materiály rovněž vyhovují požadavkům splňujícím jejich chování z hlediska chemického. Volba žáruvzdorných silikátových hmot 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 obstojně vyhovují realizaci senzibilních zásobníků. Ve své práci jsem se zaměřil na výrobky skupiny šamotů a žáruvzdorných betonů. Je známo, že hodnoty tepelné vodivosti a tepelné kapacity jsou závislé na změně teploty. S rostoucí teplotou se jejich hodnoty mění. Práce se zabývá experimentálním ověřením změn fyzikálních vlastností tepelné vodivosti a tepelné kapacity souvisejících s teplotními změnami. Z hlediska použitelnosti silikátových směsí pro senzibilní zásobníky tepla mě tedy zajímá jejich chování za zvýšených teplot v oblastech od 200 °C do 800 °C. Hodnoty tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity v těchto intervalech jsou vyhodnocovány nepřímo měřením časové závislosti teplot, která je vyvolána dotací tepelné energie na konkrétní sledované teplotě. Metodika vyhodnocení těchto procesů je popsána ve stati 7 - Teoretické podklady pro vyhodnocení experimentální činnosti.

4 Charakteristiky žáruvzdorných materiálů [15]

Žáruvzdorné materiály jsou realizovány ve všech oblastech a odvětvích průmyslu hlavně tam, kde se jeví potřeba použití vysokých teplot. Jsou výchozím materiálem pro stavbu technologických agregátů pro výrobu cementu a vápna, ve slévárenství, v keramickém průmyslu apod. Z hlediska jejich vlastnosti odolávat vysokým teplotám jsou použitelné i v aplikacích konstrukce senzibilních zásobníků tepla. Každý ze žáruvzdorných materiálů může být určen pro jinou aplikaci. Výrobky zhotovené ze žáruvzdorných materiálů jsou extrémně namáhány zejména:

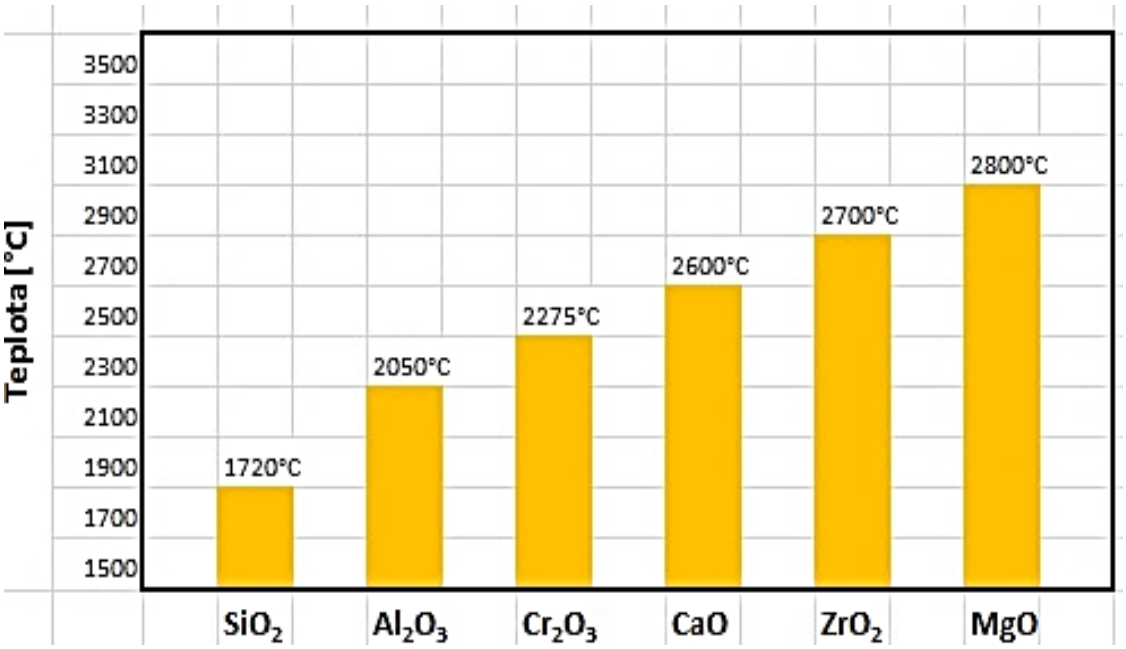
- vysokou teplotou,
- otěrem,
- agresivními plyny,
- zářením.

Z hlediska zpracování je rozdělujeme na tvarové a netvarové, z nichž první skupina slouží zejména ke zdění. V jisté skladbě mohou být použity jako konstrukční materiál pro stavbu zásobníku tepla. Druhé k opravám anebo jako monolitické komponenty. Zdící tvarové materiály se vyrábějí z plastického těsta, nebo z polosuché výrobní směsi (drolenky), dále tavením a bývají v provedení hutné nebo lehčené. Převážně jsou vyrobeny na bázi oxidů křemíku, hliníku, zirkonia, chromu anebo vápníku. Přehled tavících teplot čistých oxidů je patrný z tabulky 2. Vlastnosti těchto žáruvzdorných výrobků závisí hlavně na jejich chemickém a mineralogickém složení.

Tabulka je uspořádána podle rostoucích tavících teplot oxidů. Nejnižší tavící teplota se vyskytuje u oxidu křemičitého. Teploty tavení postupně narůstají od oxidu hlinitého až po oxid hořečnatý. Výše tavící teploty jednotlivých oxidů, které jsou komponentami různých žáruvzdorných směsí, a jejich procentuální obsah ve směsi, logicky určují výši příslušných klasifikačních teplot.

Rozložení teplot a stejně tak i zatížení žárovzdorných materiálů v různých aplikacích není rovnoměrné. Závisí na skladbě materiálu (chemické složení a odpovídající reakce, objemová hmotnost, klasifikační teplota, pórovitost apod.). V každé s použitých aplikací se vyskytuje značné množství žárovzdorných složek různého druhu, kvality a různých strukturálních tvarů.

Tabulka 2. Přehled teplot tavení čistých oxidů [15]



4.1 Rozdělení žáruvzdorných materiálů

Žáruvzdorné materiály můžeme rozdělit na druhy podle rozličných hledisek. Dělení je možné provádět dle chemického charakteru výrobku, dále dle technologie výroby, podle fyzikálních vlastností apod.

Za základní rozdělení je považováno dělení dle ČSN EN 12475. Na základě této normy je možné žárovzdorné materiály rozdělit na dvě základní sorty a to:

- výrobky tvarové,
- výrobky netvarové.

Každou z těchto skupin je možné dále rozložit dle používání na

- výrobky hutné,
- výrobky izolační.

Rozdělení výrobků z izolačních materiálů je v podstatě totožné jako rozdělení výrobků hutných. Je z toho důvodu, že se jedná o materiály stejného mineralogického složení ale s pórovitostí vyšší. Proto není v následujícím schématu uvedeno. Rozdělení žárovzdorných materiálů uvádí norma ČSN EN 12475. Toto rozdělení je zřejmé z tabulky 3

Tabulka 3: Základní rozdělení žáruvzdorných materiálů [15]

Výše uvedená norma v její první části třídí hlinito křemičité výrobky dle obsahu oxidů hlinitých a křemičitých na pět skupin. Jedná se o směsi od hmot s vysokým obsahem oxidu hlinitého až po směsi s vysokým obsahem oxidu křemičitého (dinasy). Rozdělení vyjadřuje tabulka 4. Norma ČSN EN 12475 její druhá část rozděluje zásadité žárovzdorné materiály podle obsahu zbytkového uhlíku do 7% do skupin podle různých hledisek. Hlediskem je obsah jistých oxidů nebo minerálů v materiálech s nižším obsahem zbytkového uhlíku. Podrobnější dělení dle normy je uvedeno v následujícím schématu znázorněným v tabulce 5. Norma ČSN EN 1402 popisuje rozdělení žárovzdorných netvarových výrobků. První část této normy je zaměřena na rozdělení žárovzdorných betonů. Toto rozdělení je zřejmé z tabulky 6. Dle výše uvedené normy jsou žárovzdorné betony opět rozděleny na hutné a izolační. Hutné žárobetony se dále dělí na betony s vazbou hydraulickou a chemickou. Žárobetony s vazbou hydraulickou se vyskytují jako *ztekucené* anebo *běžné*. Ztekucené žárobetony obsahují nízké procento vody a přídavné ztekucovadlo. Tyto žárobetony jsou dále vytříděny jako *středně cementové*, *nízko cementové*, betony *s velmi nízkým obsahem cementu* a betony *bezcementové*.

Tabulka 4: Rozdělení tvarových hlinitokřemičitých výrobků [15]

Hlinitokřemičité výrobky	
Vysocehlinité (HA)	Al_2O_3 100-45%
Šamotové (FC)	Al_2O_3 45-30%
Šamot s nízkým obsahem Al_2O_3 (I	Al_2O_3 30-10% do 85% Si
Kyselý šamot (SS)	SiO_2 více než 85-93%
Dinas (SL)	SiO_2 více než 93%

Tabulka 5: Rozdělení tvarových zásaditých výrobků s obsahem uhlíku menším než 7 %

Zásadité výrobky obsahující méně než 7% zbytkového uhlíku	
Magneziové (M)	MgO 80-98%
Magnezio - vápenaté (ML)	
Magnezio - dolomitové (MD)	
Dolomitové (D)	
Magnezio - spinelové (MSp)	
Forsteritové (F)	
Magnezio - chromitové (MCr)	
Chromitové (Cr)	
Vápenné (L)	
Magnezio - zirkoničito křemičité (MZ, MZS)	

Tabulka 6: Rozdělení žáruvzdorných betonů [15]

Žárobeton (C)	
Hutný (DC)	Izolační (IC)
S hydraulickou vazbou (HBC)	S chemickou vazbou (CBC)
Ztekucený (DCC)	Běžný (RCC)
Žárobeton se středním obsahem cementu (MCC)	
Žárobeton se nízkým obsahem cementu (LCC)	
Žárobeton s velmi nízkým obsahem cementu (ULCC)	
Bezcemntový žárobeton (NCC)	

4.1.1 Tvarové žáruvzdorné materiály hutné

Vyznačují se tím, že před jejich zabudováním do konstrukce mají přesně definovatelný tvar. Při zabudování se používá malta, tmel nebo jiná lepící hmota. Tyto směsi musí mít stejné anebo podobné vlastnosti jako používaný žáruvzdorný materiál. Dle předchozí kapitoly jsou prvními s používaných materiálů materiály hlinitokřemičité.

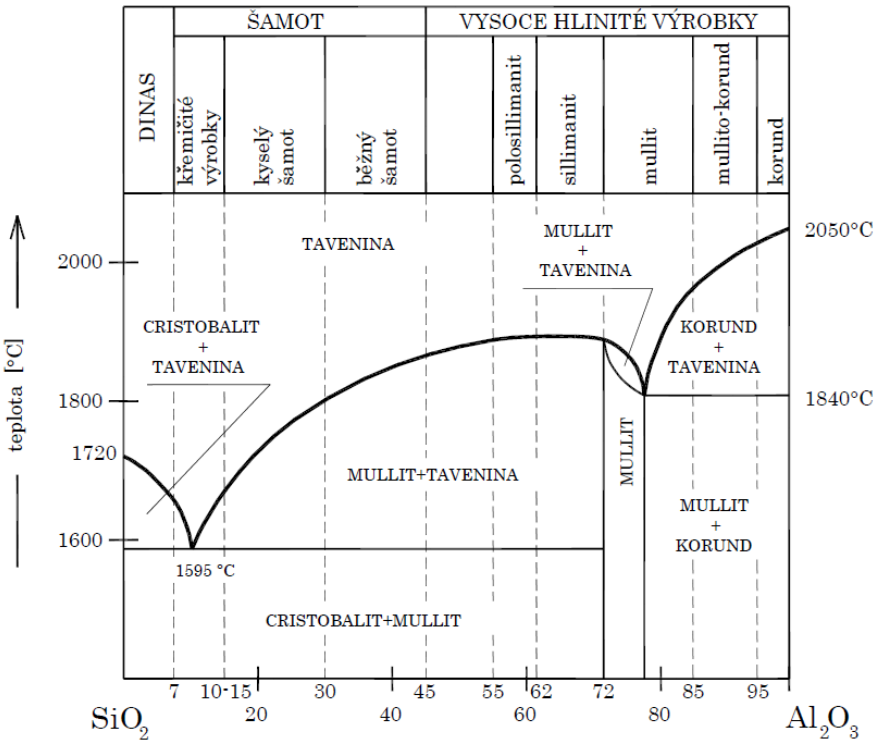
4.1.1.1 Hlinitokřemičité materiály

Hlavními komponentami hlinitokřemičitých materiálů jsou oxid křemičitý a oxid hlinitý. V malém množství jsou tu přítomny i doprovodné oxidy jako oxid železitý, oxid vápenatý, oxidy sodný a draselný a podobně. Jejich množství je v základním materiálu ale limitováno. Dle zastoupení fundamentálních oxidů v těchto materiálech můžeme výrobky dělit na:

- dinasové (SiO_2 nad 93 %),
- šamotové (SiO2 <93 %, Al2O3<45 %),
- vysoce hlinité (Al_2O_3>45 %).

Z diagramu na obrázku 11 je patrné, že jedinou hlinitokřemičitou krystalickou fází je mullit ($3Al_2O_3.2SiO_2$). Dle diagramu s proměnnou koncentrací v tuhém roztoku se v krystalické fázi prolíná s cristobalitem. Mullit je stabilní chemickou sloučeninou s vysokou teplotou tání s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, jako je pevnost a vysoký modul pružnosti. Vytváří se jako jehlicovitá struktura při teplotách kolem 1300 °C.

Výrobky z šamotových materiálů můžeme dále dělit dle obsahu Al_2O_3 na výrobky křemičité (10-15 % Al_2O_3), kyselý šamot (15-30 % Al_2O_3) a výrobky z běžného šamotu (30-45 % Al_2O_3). Rozdělení těchto materiálů dle obsahu Al_2O_3 je patrné z binárního diagramu znázorněného na obrázku 11.



Obr. 11. *Fázový diagram SiO_2 – Al_2O_3 [15]*

4.1.1.2 **Šamoty**

Šamoty jsou nejrozšířenější skupinou hlinitokřemičitých výrobků. Jsou jednou z možných variant, se kterými se počítá pro realizaci akumulačních jader senzibilních zásobníkových systémů. Vzhledem ke konstrukci zásobníku je nutné uvažovat s předlitými polotovary ve tvaru kruhových prstenců se zabudovaným trubkovým systémem pro ohřev a tvorbu vodní páry pro napájení turbíny. Šamoty označujeme všechny materiály obsahující 55 až 93 % oxidu křemičitého a 7 až 45 % oxidu hlinitého. Šamotové materiály se vyrábějí převážně z přírodních surovin, které jsou před zpracováním upravovány plavením, pálením, magnetickou separací a odležením. Hlavními surovinami pro výrobu šamotu jsou následující:

- ostřiva – pálené jíly a lupky, nepálené lupky, křemičitý písek, šamotové zlomky,
- ostřiva u vysoce hlinitých materiálů – skupiny silimanitů, diaspor, jíly, bílý bauxit,
- možné je používat syntetický Al_2O_3, v podobě α, nebo β korundu a hydrát hlinitý,
- pojiva – jedná se o jíly a kaolíny,
- přísady – taviva, lepiva, lehčící přísady.

Ostřivo vytváří v materiálu nosnou kostru a ovlivňuje mechanické vlastnosti produktu. Jeho přidáním se snižuje plastičnost hmoty, smrštění sušením a pálením a umožňuje dosažení přesných rozměrů. Mezi ostřiva, jak již bylo zmíněno, *patří pálené jíly a lupky*. Ostřiva tvoří hlavní surovinu výroby šamotu. Obsahují až 95 % objemu základní hmoty. Výchozí surovina se získává pálením lupků při teplotách nad 1300 °C. Procesem pálení se odstraní chemicky vázaná voda a proběhne tvorba minerálů. Vzniká jednak mullit a vytváří se cristobalit, kteréžto komponenty tvoří základní strukturální komponenty šamotu. Podle jejich vzájemných koncentrací v tuhém roztoku jsou šamoty rozděleny na křemičité, kyselé a běžné. Cristobalit reaguje s přítomnými nečistotami a za vzniku taveniny vytváří tvrdou a křehkou skelnou fázi. Kvalita šamotového ostřiva je posuzována dle množství mullitu a jeho zhutnění.

Šamotové zlomky – jedná se o úlomky použitých výrobků a v menší části použití výmětu vlastní výroby. Při drcení a dalším zpracování těchto zbytků je nutné dbát na jejich čistotu, tzn., že ve směsi by se neměly vyskytovat žádné druhy jiných materiálů a hlavně nečistoty.

Křemičitý písek je levnou a výhodnou surovinou pro výrobu kyselých šamotových výrobků. Na písky nejsou kladeny žádné přísné požadavky. Je pouze vyžadováno minimální znečištění sloučeninami železa. Přítomnost hlinitých látek není na závadu.

Pojivo je možné po přídavku vody zpracovat na plastické těsto, které po vysušení zachovává daný tvar a výpalem je zpevněno.

Jako pojiva se používají *jíly a lupky* jejichž základní komponentou jsou vodné hlinitokřemičitany. Jíly jsou měkké, snadno se opracovávají a modelují. Tlaky v horninách vytvořily z jílů lupky. Jsou tvrdé a v některých případech je možné je použít jako ostřivo i v nepáleném stavu. Jemným mletím získávají jíly plastické vlastnosti. Nejrozšířenějším jílovým minerálem je kaolinit ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$). Nejkvalitnější jíly mají nejvyšší množství oxidu hlinitého. Teoreticky nejvyšší obsah této sloučeniny nepřesahuje 46 %. Pro výrobu šamotových dílů je nutné použití pouze žáruvzdorné jílů, žárovzdornost je minimálně 1580 °C. Hlavním kritériem pro jejich volbu je obsah AL_2O_3 v rozsahu 15 až 45 % a minimum Fe_2O_3, který nesmí přesáhnout 2 %.

Dalším druhem pojiva pro výrobu šamotových výrobků jsou kaolíny. Jedná se o surovinu, která obsahuje téměř čistý minerál kaolinit. Od jílů se odlišují hlavně čistotou a jsou téměř bílé. Plavený kaolín má vysoký obsah oxidu hlinitého a nízký obsah nečistot což je prakticky oxid železitý. Vyznačuje se vysokým stupněm žárovzdornosti (cca 1700 °C) a poměrně těžko se spéká. Je však poměrně drahý.

4.1.1.3 Vlastnosti šamotových směsí

Obyčejný šamot se vyznačuje nízkou pevností v tlaku a vysokou nasákavostí. Používá se hlavně tam, kde se nevyskytuje žádné namáhání ať již tlakem nebo otěrem. Obsah Al_2O_3 se pohybuje od 30 do 45 %.

- šamoty s nízkým obsahem Al_2O_3 (15 až 30 %) mají poměrně nízkou pevnost a vysokou nasákavost. Používají se hlavně v zařízeních pro tavení kovů v pecích na pálení porcelánu,
- šamoty se zvýšeným obsahem oxidu hlinitého (nad 45 %), tzv. vysoce hlinité výrobky, obsahují více jak 60 % mullitu a úměrně tomu menší procento skelné fáze (malé procento cristobalitu). Používají se tam, kde je zapotřebí vysoká odolnost proti žáru.

4.1.2 Netvarové žáruvzdorné materiály

Rozdělení těchto materiálů bylo definováno v kapitole 4.1 v tabulce 3. Tvarovky vyrobené z netvarových žárovzdorných materiálů se vyrábějí litím nebo formováním. Nazýváme je prefabrikáty a řadíme je k jiným netvarovým materiálům. Netvarové materiály mají řadu výhod před materiály tvarovými:

- odpadá konečný výpal, k jeho vypálení dochází až při aplikaci u spotřebitele,
- tvarování se provádí při jeho aplikaci u spotřebitele,
- spáry a jejich množství je podstatně vzhledem k odlití nebo formování sníženo.

Při aplikaci je nutné striktně dodržovat technologický postup a uvedení realizovaného projektu do provozu. Doba zrání konstrukce je podstatně delší než u materiálů tvarových. Obecně se netvarové žárovzdorné materiály skládají z již vypálených surovin definované zrnitosti a pojiva. Dodávají se ve formě suchých směsí. Zpracovávají se v místě aplikace, kde se tvarují a tepelně upraví (vysuší a vypálí). Důležitou roli u těchto materiálů hraje vazba, která může být:

- keramická,
- hydraulická,
- organicko chemická,
- anorganicko chemická.

Druh vazby zajišťuje odolnost proti žáru. Vazba keramická je vhodná pro použití do teplot 1200 až 1500 °C. Vazba hydraulická snáší teploty od 200 do 600 °C. Vazba organicko-chemická je vhodná pro použití do nižších teplot (50 až 200 °C) a vazba anorganicko-chemická do teplot 1000 až 1400 °C.

4.1.2.1 **Žáruvzdorné betony**

Žáruvzdorné betony jsou směsí žáruvzdorných kameniv a pojiv. Většinou se dodávají v suchém stavu a používané při smísením s vodou. Ukládají se litím, litím bez vibrace, pěchováním 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 $kg.m^{-3}$. Rozdělení žáruvzdorných betonů je znázorněno v tabulce 6.

- žárobetony IC – vyznačují se objemovou hmotností <1800 $kg.m^{-2}$,
- žárobetony ICC – vyznačují se objemovou hmotností >1800 $kg.m^{-2}$,
- žárobetony CBC - obsahují jedno nebo více pojiv způsobující ztvrdnutí směsi,
- žárobetony RCC - obsahují 15-30 % cementu (obsah CaO<3,5 %,
- žárobetony DCC - obsahují min 2 % částic pod 1μm a druhy ztekucovadel,
- žárobetony LCC - obsahují 3 až 6 % cementu (obsah CaO je 1 až 3,5 %),
- žárobetony ULCC - obsahují 1 až 3 % cementu (obsah CaO je 0,2 až 1 %),
- žárobetony NCC – bezcementové žárobetony.

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, pojiva a přísad:

- plnivo – tvoří hlavní složku žárobetonů. Tvoří je hrubozrnná frakce o zrnitosti až 45 mikronů. Celkový objem plniva činí cca 70 % z celkové části betonu. Druh plniva rovněž určuje žárovzdornost výsledného produktu,
- pojivo – hydraulické (hlinitanový cement), keramické (žárovzdorné jíly), organicko a anorganicko chemické pojivo,
- přísady – přidávají se ztekucovadla nebo přípravky na ztuhnutí betonové směsi.

Plnivo.

Plnivo má podstatný vliv na konečné žáruvzdorné vlastnosti betonů. Žárobetony jsou vytvářeny na bázi hlinitokřemičitých nebo jílových pojiv. První z výše jmenovaných obsahuje oxid hlinitý a oxid křemičitý, v různých poměrech. Kromě těchto dvou oxidů obsahuje rovněž i malé procento jiných prvků, které jsou základními složkami eutektika, a které snižují žárové

vlastnosti. Používaná plniva, určená pro vytvoření požadované žáruvzdorné směsi, jsou druhově definována a mají předepsanou zrnitost.

Hutná plniva jsou kameniva o vysoké pevnosti, nízké pórovitosti a vysoké objemové hmotnosti. Podle žáruvzdorné teploty je dělíme:

- pálené lupky nebo šamotové drtě do 1400 °C,
- pálený kaolin, bauxit, silimanit od 1400 °C do 1600 °C,
- bílý korund, mullito korund, syntetický mullit nad 1600 °C.

Kamenivo pro žáruvzdorné betony – použití do 1400 °C

Jako kameniva se používají pálené lupky. Pálené lupky se získávají výpalem žáruvzdorných jílů, jílovců anebo lupků. Hodnotí se podle obsahu Al_2O_3 (od 35 % až nad 45 %), dále podle žáruvzdornosti (165 až nad 175), podle obsahu Fe_2O_3 (od 1,8 až 3,5 %) a podle zdánlivé pórovitosti (0 až 27 %). Používají se jako ostřivo při výrobě šamotů anebo kamenivo v hlinitokřemičitých monolitech.

Kamenivo pro žáruvzdorné betony – použití do 1600 °C

Kamenivo pro žáruvzdorné betony do nižších teplot je složeno z kaolinových šamotů, obsahujících cca 50 %mullitu, maximálně 1 % křemene a 1 % cristobalitu. Tyto šamoty se používají jako ostřivo do vysokoteplotních žárobetonových aplikací. Jako kameniva se používá pálený kaolin. Pálený kaolín se vyrábí pálením plaveného kaolinu, do kterého jsou přidávány další přídavné směsi.

Kamenivo pro žáruvzdorné betony – použití nad 1600 °C

Jako kameniva se používá korund, tavený spinel a syntetický mullit. Korund, který se vyznačuje vysokou pevností je používán buďto jako tavený nebo tabelární. Má dobrou teplotní vodivost a vysokou odolnost proti chemické korozi**.**

Spinel ($MgO.Al_2O_3$) je stabilní sloučenina v binární směsi Al_2O_3-MgO. V eutektické koncentraci tvoří základní spinelové krystalické jádro s minimem interkrystalických fází což je zajištěno čistotou vstupních surovin při tavení v obloukových pecích. Rovněž jako korund má spinel vysokou pevnost odolnost proti chemické korozi a navíc odolnost proti otěru a náhlým změnám teplot.

Syntetický mullit se vyrábí s vysokým obsahem Al_2O_3 (až 75 %). Používají se mullitokorundová ostřiva obsahující až 75 % Al_2O_3. Slinutý mullit se vyrábí ze směsi kalcinovaného oxidu hlinitého a kaolinitických surovin.

Lehčená plniva se používají pro výrobu izolačních žárobetonů, mají nízkou objemovou hmotnost, velkou pórovitost a malou pevnost. V oblastech aplikací vysokoteplotních zásobníků nemají tedy uplatnění.

Pojivo.

Druhy pojiva jsou děleny podle druhu vazby. Základní a nejznámější vazbou je vazba hydraulická. Je tvořeny cementy a zajišťuje tuhnutí při normální teplotě. Vzniklé hydráty se rozkládají v teplotním intervalu od 200 °C do 600 °C. Pevnost podstatně klesá při teplotě 800 C. Při dalším jejím zvyšování je možné pozorovat nárůst pevnosti, což je opodstatněno vznikem keramické vazby. Pojivem v betonech s hydraulickou vazbou je hlinitanový cement. Reakce během nárůstu teploty probíhají v následujícím pořadí:

Hydratace (hydraulická vazba) *dehydratace-slinování* (keramická vazba). Hydraulická vazba s hlinitanovým cementem je vazba, ve které je nosným prvkem hlinitanový cement. Hlavními složkami tohoto cementu jsou sloučeniny $12CaO.7Al_2O_3$, $CaO.Al_2O_3$ a $2Al_2O_3$. S obsahem oxidu hlinitého roste kvalita hlinitanového cementu. Podle jeho obsahu rozlišujeme:

- cement s nízkým obsahem Al_2O_3 45-50 %,
- cement se středním obsahem Al_2O_3 50-70 %,
- cement s vysokým obsahem Al_2O_3 70-85 %,
- cement s velmi vysokým obsahem Al_2O_3 > 85 %.

Hydratace cementu vede ke vzniku hydrátů s různým obsahem vody, které vytváří požadovanou vazbu. Během tuhnutí při pokojové teplotě dochází k fázovým změnám závislým na čase a teplotě.

Keramická vazba – tvoří ji převážně plastické žárovzdorné jíly. Po rozdělání a vytvarování dochází ke zpevnění sušením. Další zvyšování teploty vyvolává prvotní rozklady. Probíhají reakce analogické s rozpadem kaolinitu. Rozpad z hlediska nárůstu teploty probíhá dle následujícího schématu:

Kaolinit 560 °C – *metakaolinit* 980 °C – *defektní spinel* 1100 °C – *mullit* + *cristobalit.*

Jako pojivo se u žáruvzdorných betonů CBC a NCC používají vazby anorganicko-chemické a organicko-chemické vazby.

Anorganicko-chemická vazba je v podstatě vazba s pojivem fosforečným, vodním sklem chloridem nebo síranem hořečnatým. *Fosforečná vazba* je charakterizována přídavkem kyseliny fosforečné, nebo fosforečnanů do směsi ostřiva. Jejím působení v ostřivu vznikají fosforečnany hlinité, které posilují žárovzdornost betonové frakce. Po vysušení při zvyšování teplot postupně dochází k dehydrataci a k vytvoření polyfosforečnanů. Fosforečná vazba přechází na fosforečnan hlinitý, který se při teplotách 600 °C rozpadá, uniká oxid fosforečný, a vzniká stabilní keramická vazba. Vazba *vodním sklem* využívá chemické reakce ve vodě rozpustných křemičitanů sodných anebo draselných.

Organicko-chemická vazba se zakládá na vazby na bázi dehtu, při čemž se často používá louh, karboxymethylceluloza a polyvinylalkohol. Její působení je omezeno do teploty 200 °C, neboť nad touto teplotou dochází k jejímu rozpadu a pak v oxidační atmosféře k postupnému zničení vyhořením.

Přísady

Jako přísady se používají plastifikátory a regulátory tuhnutí. *Plastifikátory* používají se jako přísada do žárobetonů s nízkým procentuálním objemem záměsové vody zabraňující deflokulaci jejich jemných částic. Nejčastěji používaný procentuální objem činí 0,2-0,3 % (polyforečnan sodný, lignosulfátový derivát apod.). *Urychlovače tuhnutí* značně zkracují dobu tuhnutí žárobetonu.

5 Fyzikální vlastnosti silikátových žáruvzdorných materiálů

S hlediska žáruvzdorných silikátových materiálů pro jejich použití v oblastech tepelných zásobníků patří mezi základní fyzikální vlastnosti v prvé 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.

5.1 Objemová hmotnost

Je definována hmotností daného silikátového materiálu vztaženého na jednotku objemu. 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.

5.2 Teplotní vodivost

Označuje se symbolem α [$m^2.s^{-1}$] 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. Výpočet teplotní vodivosti je možné realizovat dle následující závislostí $\alpha = \frac{\lambda}{\kappa}$ kde symbol κ představuje objemovou tepelnou kapacitu.

$$\kappa = \rho(T) \times c(T) = \frac{\rho_{20}}{(1+\gamma\Delta(T)} \times c(T) \qquad (4)$$

Funkce objemové hmotnosti ρ a měrné tepelné kapacity *c* jsou závislé na teplotě. Ve vztahu (4) vystupuje veličina koeficientu objemové vodivosti γ, která se pro šamoty pohybuje v intervalu $6 \cdot 10^{-6}$ a pro betony ve výši 10^{-5}. 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 nepřímo prostřednictvím měření tepelné vodivosti λ v procesu nestacionárního šíření tepelné vlny, metodou topného drátu. Metoda spočívá v měření časového průběhu teplot vyhodnocovaných ve dvou přesně definovaných vzdálenostech od liniového zdroje dodávky tepla. Jedná se o modifikovanou metodu topného

drátu. Hodnota teplotní vodivosti je z vyhodnocené měrné tepelné vodivosti přímo vypočítána. Měří se pouze dynamicky měnící se teploty nikoliv teplo.

5.3 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:

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)} \tag{5}$$

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

5.4 Žárové vlastnosti

U vysokoteplotních žárupevných 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 žárupevných 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.

Výše popsané fyzikální vlastnosti tvoří základní tepelné charakteristiky, které je nutno experimentálně ověřit a zjistit jejich chování a změny při vysokých teplotách.

6 Teoretické podklady pro vyhodnocení experimentální činnosti

Cíl této části práce spočívá v identifikaci tepelných charakteristik některých žáruvzdorných materiálů pro výrobky hutné a zásypových tepelných izolací za zvýšených teplot. Pracovní teplota akumulačního zásobníku se pohybuje v rozsahu 250 až 800 °C. Výše teploty je závislá nejen na dodávkách a čerpání energie ale hlavně na izolaci akumulačního zásobníku. Tepelný zásobník, zhotovený z hutného žárupevného materiálu a jeho izolační obal tvoří tepelný zásobníkový systém. Schopnost tohoto systému spočívá v akumulaci a udržení teplotního rozsah v požadovaných mezích, takže závisí na jeho tepelně akumulačních charakteristikách. Tyto jsou dány fyzikálními tepelnými charakteristikami, mezi které patří především měrná tepelná kapacita a tepelná a teplotní vodivost. Důležitou roli z hlediska akumulace tepla hraje objemová hmotnost.

V prvé části teoretických podkladů pro vyhodnocování tepelných charakteristik se zaměřuji na metodiku výpočtů zaměřenou na vlastnosti žárupevných materiálů hutných. Druhá část teorie je věnována výpočtům, které se uplatňují pro šetření tepelných charakteristik izolačních zásypových materiálů.

6.1 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-akumulační. Uvedené odhady vycházejí ze zákonů zachování klasické termodynamiky, spočívající v zachování tepelné energie. 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 dynamiku šíření akumulovaného tepla. Při hodnocení tepelně akumulačních vlastností hraje podstatnou roli měrná 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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho.c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{Q_z}{\rho.c} \tag{6}$$

Transformací vztahu (6) do cylindrických souřadnic ve dvoudimenzionálním prostoru získáváme evoluční parciální rovnici pro nestacionární vedení tepla (7).

$$\frac{dT}{dt} = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}\right) + \frac{Q_z}{\rho c} \tag{7}$$

Podle možnosti užívaného zařízení jsem byl schopen pozorování chování žáruvzdorných materiálů v oblastech teplot od 20 °C do 800 °C. Metoda vhodná pro vyhodnocení tepelné vodivosti těchto druhů stavebních materiálů je metoda topného drátu. Umožňuje výpočtovou identifikaci hodnot tepelné vodivosti za zvýšených teplot. Identifikace tepelné vodivosti metodou topného drátu pracuje na základě následujících předpokladů:

a) *topný drát je možné uvažovat jako dlouhý a tenký a jeho tepelnou a teplotní vodivost lze zanedbat,*
b) *materiálový vzorek lze předpokládat jako dlouhý rotační válec s velkým poloměrem r, v jehož ose leží topný drát,*
c) *topný drát počínaje časem t=0 přivádí na jednotku délky konstantní tepelný výkon Q_w* [W.m^{-1}]*, takže výkon $Q_w\, l$* [W*] lze vtáhnout k povrchové ploše válce obsahu $2\pi r l$, při čemž r udává vzdálenosti všech bodů od topného drátu s uvážením předchozích předpokladů pro limitní přechod $r \rightarrow 0_+$,*
d) *materiál je možné považovat za homogenní a izotropní, se skalárními charakteristikami λ, α,*
e) *charakteristiky λ, α je možné v dané teplotní úrovni měření považovat za nezávislé na teplotě vzorku T(r,t) pro jakýkoliv poloměr $r \in R_+$ i čas ze stejné množiny. Množinu R_+ považujeme za množinu kladných reálných čísel,*
f) *Teplota okolí vzorku je neměnná v jakékoliv vzdálenosti od měřeného vzorku.*

Za těchto předpokladů je možné použití klasického analytického vztahu (7) pro rozložení teploty v měřeném vzorku [19]. Pak teplota okolí topného drátu ve vzdálenosti *r* v čase *t* dosahuje hodnoty:

$$T(r,t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\lambda} Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \; \forall (r,t) \epsilon R_+ \times R_+ \tag{8}$$

v němž *Ei* představuje exponenciální integrál (9).

$$Ei(\beta) = \int_\beta^\infty \frac{\exp(-u)}{u} du \tag{9}$$

Definovaný pro libovolné číslo $\beta \in R_+$. Podle (8) tedy dále platí:

$$T(r,t) = T(r,t_a) - \frac{Q}{4\pi\lambda}\left(Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - Ei\left(\frac{r^2}{4\alpha t_a}\right)\right) \; \forall (r,t) \epsilon R_+ \times R_+ \tag{10}$$

Je zřejmé, že teplota *T(r,t)* ze vztahu (10) vyhovuje evoluční parciální rovnici vedení tepla bez vnitřních zdrojů pro osově souměrnou úlohu danou upraveným vztahem (7):

$$r\kappa \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda \frac{\partial T(r.t)}{\partial r}\right) \ \forall (r,t) \epsilon R_+ \times R_+ \tag{11}$$

opatřené počáteční podmínkou v čase $\mathrm{t} \rightarrow 0_+$

$$\lim_{\mathrm{t}\rightarrow 0_+} T(r,t) = T_0 \ \forall r \epsilon R_+ \tag{12}$$

dále okrajovou podmínkou Dirichletova typu

$$\lim_{\mathrm{r}\rightarrow \infty} T(r,t) = T_0 \ \forall t \epsilon R_+ \tag{13}$$

a okrajovou podmínkou Neumannova typu

$$\lim_{\mathrm{r}\rightarrow 0_+} \frac{-\lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r}}{\frac{Q}{2\pi r}} = 1 \quad \forall t \epsilon R_+ \tag{14}$$

V podmínce (14) představuje jmenovatel Fourierův tepelný tok. Odvození rovnice (10) ze standartní rovnice šíření tepla v kartézských souřadnicích je provedeno ve [25] kap. 9. Touto problematikou se rovněž zabývá autor v [26] kap. 3.

Tepelná vodivost λ představuje hustotu tepelného toku děleného teplotním gradientem. Jednotkou tepelné vodivosti je $W.m^{-1}.K^{-1}$. Odvozenou fyzikální veličinou je teplotní vodivost α nazývaná difuzivita. Výpočet této veličiny je dán vztahem $\alpha = \frac{\lambda}{\kappa}$ jejíž jednotkou je $[m^2 s^{-1}]$.

6.2 Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu (ISO 8894-1)

Je prováděna dle evropské normy ISO 8894-1. Postup dle této normy umožňuje stanovení tepelné charakteristiky u hutných stavebních materiálů s tepelnou vodivostí do 25 $W.m^{-1}.K^{-1}$. U materiálů s vyššími hodnotami je nutné použití zkušebních těles větších rozměrů. Tepelná vodivost u tvarovek s hydraulickou nebo chemickou vazbou může být ovlivněna množstvím obsažené zbytkové vody, takže v těchto případech je nutné použití nezbytných předúprav teplot pro její odstranění. Metoda topného drátu je dynamická metoda měření časového nárůstu teploty, který je důsledkem šíření tepelné vlny vyvolané působením dodávaného konstantního výkonu liniovým vodičem, uloženým uvnitř sledovaného vzorku stavebního materiálu. Teplota se měří v pevné vzdálenosti od zdroje dodávané energie a její časový průběh (rychlost šíření tepla) je podkladem pro výpočet veličiny λ. Vzorek je umístěn ve vyhřívaném prostoru, při

čemž podmínkou důvěryhodného vyhodnocení fyzikálních veličin je stabilita okolní teploty, jejíž hodnota se může pohybovat v toleranci 10 K.

Topný drát (v textech obrázků uváděn jako TD), je proveden z materiálu kanthal nebo platiny s délkou rovnou délce zkušebního vzorku musí být změřen s přesností 0,5 mm. Konce topného drátu jsou propojeny s napěťovým zdrojem a digitálním multimetrem. Teplota je měřena termočlánky. Přívodní vodiče (měřící, napájecí) mimo prostor vzorku musí mít průměr nejméně 0,5 mm tak, aby nebyly ovlivňovány jednak hodnoty měření či výkonové poměry.

Stabilizovaný napájecí zdroj, jehož napětí a proud dodává příslušný tepelný výkon topnému drátu, nesmí v průběhu měření kolísat o více než 2 %. Potřebný topný výkon topného drátu musí být větší než 250 $W.m^{-1}$. Při délce topného drátu 200 mm činí potřebný výkon 50 W.

Měřící termočlánky v provedení železo-konstantan jsou umístěny tak aby první z nich měřil teplotu v těsné blízkosti topného drátu a druhý srovnávací, měřil ve vzdálenosti 15 mm. Vývody termočlánků jsou přivedeny na přesný měřicí přístroj, který vzorkuje změny teplot v krátkých časových intervalech. Nárůst teplot je vyvoláván dodávkou elektrického výkonu přiváděného na svorky topného drátu po jistou dobu danou buďto empirickým vztahem anebo doporučením udávaným normou ISO 8894-1. Podle této normy pro vzorek výšky 76 mm, tepelnou vodivost λ=2 $W.m^{-1}.K^{-1}$, a dobu působení ohřevu 450 s je doporučený výkon 30 $W.m^{-1}$. Přibližný vzorec je matematicky dán vztahem:

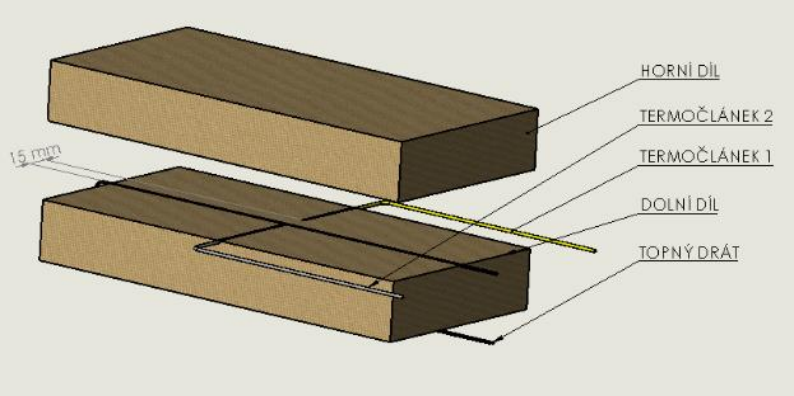
$$h = \sqrt{\frac{2\tau\lambda}{\rho c}} \tag{15}$$

Hodnota h ve vztahu 15 znázorňuje výšku vzorku. Je tedy možné pro danou výšku vzorku h, odhad tepelné kapacity c a tepelné vodivosti λ, dobu působení tepelného výkonu τ a objemovou hmotnost ρ vypočítat potřebný tepelný výkon P.

Postup zkoušky je prováděn následovně. Zkušební celek, znázorněný na obrázku 12, se připraví ke zkoušce. Topný drát a měřící termočlánky se uloží mezi horní a spodní díl zkušebního tělesa, přičemž *termočlánek 2* se uloží do drážky ve středu kontaktní hrany tvarovky a případně se zatmelí. *Termočlánek 1* (srovnávací) se uloží do drážky kolmé na topný drát tak, že jeho měřící část je od drátu vzdálena 15 mm. Zkušební celek se umístí do pece. V peci je vzhledem k rovnoměrnému ohřevu uložen na tři podložky z obdobného materiálu, jakým je zkoušený vzorek. Topný drát se připojí ke stabilizovanému stejnosměrnému zdroji (výkon do 100 W napětí do 20 V). Výstupy termočlánků se připojí k přesnému multimetru.

Jsou-li splněny podmínky dané příslušnou normou (*ISO 8894-1* viz body *a)* až *f)*), je možné zapojit proud ze stabilizovaného zdroje a postupně v jistých časových intervalech měřit na obou

termočláncích teploty. Působení topného výkonu je nutno provádět po dobu τ stanovenou pro předpokládané hodnoty λ, ρ a c dle normy ISO 8894-1. Po uplynutí této doby se přeruší topný proud a ukončí se záznam průběhu teplot. Vyčká se na ustálení teplot mezi oběma termočlánky a měření je možné za znovu stejných podmínek opakovat.



Obr. 12. *Stanovení tepelné vodivosti λ metodou topného drátu [autor]*

Vyhodnocení výsledků je prováděno z posloupnosti podílů rozdílů teplot v časovém okamžiku současném t_i a k jeho dvojnásobku. Rozdíly teplot jsou počítány k teplotě zahájení dodávky výkonu. Tepelná vodivost je vypočítána na základě následujícího vztahu:

$$\lambda = \frac{P}{4.\pi.L} \frac{-Ei(\frac{-r^2}{4.\alpha.t})}{\Delta\theta(t)} \tag{16}$$

$$P = U.I \tag{17}$$

Ve výše uvedeném vztahu je *Ei* exponenciální integrál daný závislostí (9), ve které je výraz *u* formulován následovně:

$$u = \frac{-r^2}{4.\propto.t} \tag{19}$$

Hodnoty naměřených teplot jsou tabelovány po stejných časových intervalech. Při vyhodnocování výsledků se počítá s poměrem rozdílů naměřených teplot v čase *t* a v čase dvojnásobném tedy *2 t*. Poměr naměřených rozdílů je označován symbolem *Z:*

$$z = \frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)} \tag{20}$$

Hodnota exponenciálního integrálu *Ei* je funkcí této proměnné a je normou ISO 8894-1 tabelována. V tabulce měření jsou pro jednotlivé časové okamžiky počítány hodnoty *Z*, kterým je přiřazen odpovídající integrál. V každém *i*-tém řádku je dle vztahu (16) proveden výpočet tepelné vodivosti λ_i. Výsledná tepelná vodivost je vyhodnocena jako průměr všech λ_i.

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}{n} \tag{21}$$

Z prováděného měření je zřejmé, že hodnota tepelné vodivosti konverguje k její konečné hodnotě. Vzhledem k tomu, že pro výpočet tepelné vodivosti λ je nutné používat tabelární vyčíslení exponenciálního integrálu, je provádění touto metodou zdlouhavé a pracné. Počet měřených hodnot a tím i délka měřících časových intervalů jsou z důvodu zdlouhavosti výpočtu omezovány, čímž dochází ke snížení přesnosti vyhodnocení.

6.3 Stanovení tepelné vodivosti metodou topného drátu výpočtem.

Jiný výhodnější způsob, který umožňuje mechanizovat možnosti výpočtu tepelné vodivosti je metoda založená na výpočtu λ přímo z hodnot vzorkovaných teplot. Analytické výsledky lze ověřit např. aplikací funkcí toolboxu *symbolic* programového prostředí MATLAB, odkazujícího se na jádro software MAPLE. Pokud by byly známy konstanty λ a α (tedy i κ=λ/α), pak bychom mohli vypočítat rozložení teplot v jistém místě *r* pro libovolný čas *t*. Pro vyčíslení vztahu (9) je nutné provést rozvoj exponenciálního integrálu do nekonečné řady. Rozvoj tohoto integrálu je dán vztahem:

$$Ei(\beta) = -\gamma - \ln(\beta) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\beta^k}{k.k!} \tag{22}$$

Vztah (22) obsahuje Euler-Mascheroniho konstantu γ

$$\gamma = \lim_{j\to\infty}\left(\sum_{k=1}^{j} \frac{1}{k} - \ln j\right) \approx 0{,}5772156649 \tag{23}$$

Dosazením hodnot exponenciálních integrálů pro časové okamžiky *t* a t_a do vztahu (10) se hodnoty Eulerovy konstanty vyruší a ve výsledné závislosti zůstává pouze rozdíl logaritmů β. Hodnoty β ve vztahu (9) jsou dány následovně:

$$\beta = \frac{r^2}{4\alpha t} \tag{24}$$

$$\beta_a = \frac{r^2}{4\alpha t_a} \tag{25}$$

Čas t_a odpovídá době zahájení dodávky topného výkonu a čas *t* je čas v průběhu ohřevu. Výsledné řešení vztahu (10) má po úpravě spočívající v limitním přechodu následující tvar:

$$\lim_{r\to 0}(T(r,t) - T(r,t_a) = \frac{Q}{4\pi\lambda} \ln \frac{t}{t_a} \tag{26}$$

Vztah (26) je základem výpočtového vzorce, podle kterého jsme schopni z naměřených teplot v jistých časových okamžicích *t* a t_a, vyskytujících se na levé straně vztahu (26), stanovit hodnoty tepelné vodivosti λ. Limitní přechod ale způsobil vyloučení vyhodnocení teplotní vodivosti α. Pokud hodláme experimentálně ověřit i hodnotu α, musíme provést změnu metodiky daného vyhodnocování.

6.4 Stanovení teplotní vodivosti α metodou topného drátu upraveným přístupem.

Předpokládejme nyní, že máme experimentálně naměřené hodnoty *T*(r,t)* a teploty *T(r,t)* vyjádřené analyticky na množině $R_+ \times R_+$. Zaveďme funkci F(λ, κ) takovou, že platí:

$$F(\lambda,\kappa) = \frac{1}{2}(T - T^*, T - T^*) \tag{27}$$

Při čemž výraz v závorce (.,.) 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 (27) pak zřejmě odpovídají hodnoty κ a λ. Známe-li speciálně hodnoty teplot pro *n* poloměrů $\{r_1 \ldots r_n\}$ a *m* časů $\{t_1 \ldots t_m\}$ můžeme uvedený integrální skalární součin pro jakékoliv přípustné funkce φ a ψ definovat vztahem:

$$(\varphi,\psi) = \iint_0^\infty w(r,t)\varphi(r,t)\psi(r,t)\,dr\,dt \tag{28}$$

pro kladné diskrétní váhy w_{ij} vlastnosti:

$$\sum_{i=1}^{\boldsymbol{n}} \sum_{j=1}^{m} w_{\boldsymbol{ij}} = 1 \tag{29}$$

a dvourozměrnou Diracovu míru:

$$w(r,t) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \delta\big(r - r_i, t - t_j\big).w_{ij} \tag{30}$$

potom je *F* obecně nelineární funkcí dvou proměnných κ a λ. Ve výpočtu (27) se volí $n=1$ a $w_{11}=w_{12}= \ldots w_{1m}=1/m$. Takže uváží-li se v definici (27) místo proměnné λ proměnná $\alpha=Q/4\pi\lambda$, pak vychází dle (26) a (27):

$$\left(\ln\frac{t}{t_a}, \ln\frac{t}{t_a}\right)\alpha = \frac{1}{2}(T^* - T_a^*, \ln\frac{t}{t_a}) \tag{31}$$

Hodnoty s hvězdičkou ve výrazu (31) představují experimentálně naměřená data. Odtud je možné přímo vypočítat hodnotu tepelné vodivosti α. 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 liniového zdroje výkonu, tedy

$$r_1 = d \tag{32}$$

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

$$b = \frac{{r_1}^2}{4\kappa} \tag{33}$$

Pak rovnice (10) má následující tvar:

$$T(r_1,t) = T(r_1,t_a) + \kappa\left(Ei\left(\frac{b}{t}\right) - Ei\left(\frac{b}{t_a}\right)\right) \quad \forall t \in R_+ \tag{34}$$

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

$$F(\lambda, b) = \frac{1}{2}(T - T^*, T - T^*) \tag{35}$$

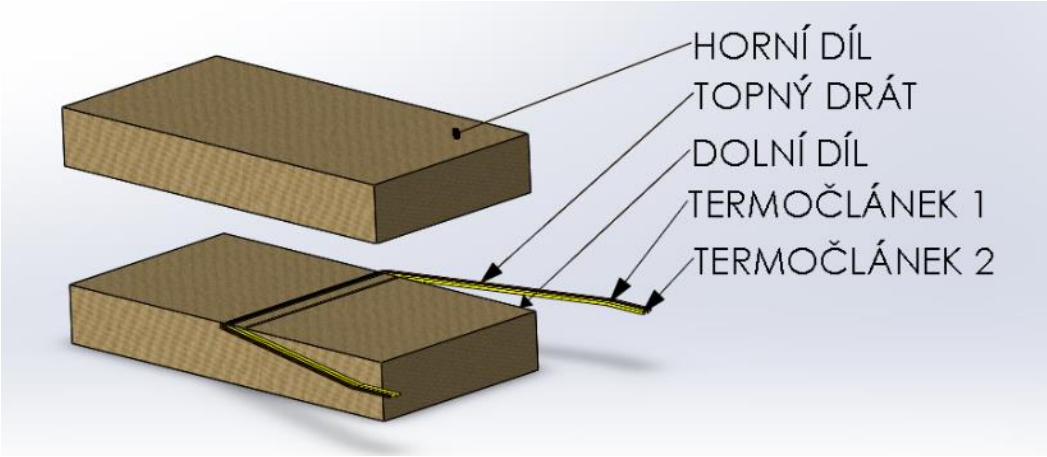
První derivace $$F' = (T', T - T^*) \tag{36}$$

Druhá derivace $$F'' = (T', T') + (T'', T - T^*) \tag{37}$$

Pokud jsou známy první a druhá derivace funkce (27) pak je možné aplikovat iterační Newtonovu metodu tečen ve tvaru:

$$F''(b - b^{\sim}) = F' \tag{38}$$

Vlnovka nad proměnou b označuje zpřesněnou hodnotu parametru. Zobecněním uvedeného přístupu je tedy volba n=2, s podmínkou blížící se vzdálenosti $r_1 \to 0$ zprava a $r_2 = d$ .Postup lze navíc modifikovat Levenberg-Marquardtovou technikou podle [28] v kapitole 10.b. Chceme li formálně dodržet metodu topného drátu dle ISO 8894-1 *Žáruvzdorné materiály – Stanovení tepelné vodivosti* λ, můžeme tepelnou vodivost vyhodnotit pro $r_1 \to 0_+$ při čemž není nutné znát hodnotu κ. Po té iteračním postupem je možné zjistit nepřímo b a z něho posléze i parametr κ. Ve své práci ověřuji výpočet λ i κ experimentem, který aplikuje upravenou 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 a rozložením termočlánků pro měření teplot postupné tepelné vlny. 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. První měřící termočlánek neleží v těsné blízkosti topného drátu, ale je od něj vzdálen 3 mm. Druhý termočlánek leží rovnoběžně s topným drátem a termočlánkem číslo 1 ve vzdálenosti 15 mm od topného drátu. Schematické uspořádání měřeného bloku je na obrázku 13. Celý proces je řízen počítačem. Podrobný popis zařízení a metody budou popsány v části *8 Měření* t*epelných charakteristik žárupevných stavebních materiálů.*



Obr. 13. *Schéma uspořádání vzorku při měření tepelné vodivosti λ a κ upravenou metodou topného drátu [autor]*

6.5 Teoretické podklady pro ověření tepelných charakteristik zásypových hmot

Pracovní teplota akumulujícího zásobníku je předpokládána v rozsahu 250 až 800 °C. Z těchto důvodů je kladen vysoký požadavek na kvalitu materiálů, izolujících akumulační zásobníkové jádro, které musí být účinné a stabilní v rámci požadovaného rozsahu teplot. Měření tepelných charakteristik je možné provádět díky uspořádání laboratorních podmínek, s podporou netriviální matematické a fyzikální analýzy a výpočetních nástrojů potřebných pro identifikaci materiálových parametrů zejména tepelné vodivosti λ.

6.5.1 Fyzikální a matematický model

Pro modelování úlohy týkající se přenosu tepla v zásypových materiálech uvažujeme oblast, která je prvkem třírozměrného euklidovského prostoru ($\Omega \in R^3$) v kartézském souřadnicovém systému $x=(x_1, x_2, x_3)$, jehož hranice tvoří množina $\partial\Omega$. Zaveďme časový interval I, jehož čas t začíná od času $t=0$. Korektní formulace tepelných procesů v materiálu, který se nachází v oblasti Ω, se opírá o klasický princip bilance skalárních množství dle klasické termodynamiky a to hustoty, hybnosti a tepelné energie. Zjednodušujícími předpoklady pro řešení rovnováhy jsou konstantní hodnota hustoty hmoty, dále nízká rychlost částic a okolnost že tepelná energetická bilance probíhá bez vnitřních zdrojů tepla, pracující s termodynamickými teplotami jako skalárními proměnnými, založené na Fourierově zákonu za předpokladu homogenity materiálu. Bilanční rovnici je možné popsat následující závislostí [3]:

$$\kappa(T(x,t)).\partial T(x,t)/\partial t-\nabla\cdot(\lambda(T(x,t))\nabla T(x,t))=0 \qquad x\in\Omega \quad t\in I \tag{38}$$

Symbol ∇ značí Hamiltonův operátor a vyjadřuje vektor parciálních derivací

$$\nabla(T(x) = (\frac{\partial T}{\partial x_1}, \frac{\partial T}{\partial x_2}, \frac{\partial T}{\partial x_3}) \tag{39}$$

Materiálovými charakteristikami uvedenými ve (38) jsou měrná tepelná vodivost λ a objemová tepelná kapacita κ, což je měrná tepelná kapacita vztažená na jednotku objemu ($\kappa = \rho . c$). Řešení je založeno na předpokladu, že veličiny κ i λ nejsou proměnné. Fyzikální veličiny λ i κ ale mohou být závislé na teplotě. Pro nalezení jednoznačného řešení je nutné rovnici (38) doplnit o okrajové a počáteční podmínky. Tyto podmínky definují vztahy, charakterizující hodnoty proměnné T na hranicích tedy okrajové podmínky Dirichletova typu

$$T(x,t) = T^*(x,t) \tag{40}$$

Neumannova typu

$$\lambda(T(x,t))\nabla T(x,t)\cdot\nu(x)+q(x,t)=0 \quad \forall\, x\in\Gamma \quad \forall\, t\in I \tag{41}$$

a podmínka časovou tedy počáteční

$$T(x,0) = T_0\,(x) \qquad \forall\, x \in \Omega \tag{42}$$

Všechny potřebné hodnoty počáteční teploty $T_0\,(x)$, hranice tepelného toku normálou (41) a hraniční teploty $T^*(x,t)$ musí být známy předem. Podmínka (41) udává tepelný tok hranicí do prostoru Ω. Znalost $q(x,t)$ v rovnici ,(41) může být nahrazena podmínkou šíření tepla z jiné doménové oblasti Ω_x do sousední oblasti Ω. Pak je možné nahradit toto dodávané teplo formálně indexy x, jako jeho dávku vztahující se k Ω_x.Předpokládejme, že:

i. zobrazení teploty T_x z množiny Θ existují tak, že T_x je součástí Sobolevova prostoru $W^{1,2}(\Omega)$ pro každý pevný čas t$\in I$,
ii. hranice $\partial\Omega$ je dostatečně hladká tak, aby byla zajištěna platnost standardních předpokladů Sobolevových vět,
iii. výraz (.,.) označuje skalární součin veličin ve druhé mocnině v $L^2(\Omega)$ a skalární součin veličiny v prostoru $L^2(\Gamma)$, které obsahují q pro pevné $t\in I$,
iv. měrná tepelná kapacita λ a měrná tepelná objemová vodivost κ jsou ohraničeny hodnotou skutečné funkce.

Slabá formulace (40), (41) a (42) pochází z Green-Ostrogradského věty s využitím aditivního rozkladu $T=\tau+T^*$ závislé na času t dle následujícího vtahu

$$\left(\varsigma, \kappa\frac{\partial\tau}{\partial t}\right) + (\nabla\varsigma, \lambda\nabla\tau) = (\varsigma, q) - (\nabla\varsigma, \lambda\nabla T_*) \tag{43}$$

kde ς prvek libovolného elementu podprostoru V pro všechny funkce Sobolevova prostoru $W^{1,2}(\Omega)$ s nulovými hodnotami na množině Θ. Pro neměnné vlastnosti λ a κ poskytují existenci řešení (38) s podmínkami (41) a (42) využívajíce metodu časové diskretizace přímo z Rotheho posloupnosti. Pro obecný případ, kde hodnoty λ a κ jsou proměnné s teplotou, je použitelný výpočet dle důkazu v [30], s četnými odkazy na [4]. Zejména pak pro pevnou dodávku tepla q

a teplotu prostředí T^* klesá hodnota změny teploty vzorku $\frac{\partial \tau}{\partial t}$ pro nekonečný čas t k nule, což odpovídá eliminaci prvního členu v rovnici (38) v popisu ustáleného vedení tepla.

Uvažujme nyní analýzu inverzního stavu. Pro vzorek není k dispozici hodnota tepelné vodivosti λ. Proto je možné získat teplotu jako funkci λ, kromě x a t, kterými je možná kompenzace tohoto nedostatku. Vložení průniku množin $\Theta \backslash \Gamma$ místo Θ do (40), s využitím objemu V, jakož i zavedením (.,.) jako skalárního součinu v Bochnerově prostoru $L^2(I,L^2(\Theta \cap \Gamma)$, dostáváme výsledek podle [31] na původně složitý problém s využitím minimalizace funkcionálu $F(\lambda)$ ve tvaru:

$$F(\lambda) = [T(\lambda) - T^*, w(T(\lambda) - T^*)] \tag{44}$$

kde všechny funkce λ patří do množiny přípustných funkcí Λ a $w(x,t)$ zde označuje omezení pozitivní váhové funkce na množině $(\theta \cap \Gamma) \times I$ všech dostupných dvojic (x,t). Obvykle je numerické řešení nestabilní. Vyžaduje regularizaci tak, jak je popsáno v [22]. Pak je vhodné zjednodušit geometrickou formulaci a praktické nastavení experimentů tedy v podstatě je odvodit tak jak je popsáno v [22] pro dostatečně jednoduchý popis a dosažení kvalitního numerického výpočtu.

7 Senzibilní zásobníky tepelné energie ze žáruvzdorného betonu

Žáruvzdorné betony 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 [15]. 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 [15].

Žáruvzdorné betony můžeme rozdělit podle objemové hmotnosti na *žáruvzdorné betony hutné*, které mají objemovou hmotnost vyšší než 1500 kg.m^{-3} a lehké izolační žárobetony s objemovou hmotností nižší než 1500 kg.m^{-3}. Rozdělení žárobetonů je znázorněno v tabulce 6. Pro výrobky z hutných žárobetonů, vystavené teplotám do 700 °C postačí přírodní kamenivo. Pro teploty vyšší než 700 °C je třeba použít umělého kameniva. Nejvhodnějšími přírodními kamenivy pro hutné žárobetony jsou čedič, diabas anebo andezit. Naprosto nevhodnými kamenivy jsou křemenná kameniva a žula. Křemenná kameniva vlivem vysoké teploty pukají a žula se vlivem vysoké teploty nesouměrně smršťují. Pro hutné žárobetony vystavené teplotám v rozsahu 800-1000 °C již nelze použít přírodní kamenivo. Pro tyto teploty lze použít buď drcený keramický střep anebo drcenou pomalu chlazenou vysokopecní strusku. Pro teploty nad 1000 °C lze použít jako kameniva jako jsou drcený šamot, korund, karborundum, drcený bauxit anebo chromit. Pro lehké izolační žárobetony se používají lehká kameniva. Vhodnou komponentu tvoří keramzit, křemelina, lehčený šamot, expandovaný perlit, drcená pemza apod. Jako hydraulické pojivo je pro výrobu žárobetonu nejvhodnější hlinitanový cement. Nejméně vhodným hydraulickým pojivem je čistý portlandský cement, který podléhá rozpadu po ztrátě chemicky vázané vody v hydratačních produktech. Proto je vhodnější použít cementy směsné, které obsahují méně portlandského slínku a více příměsí na bázi popílku, strusky apod. [9] [15]. Z žárobetonu je možno vyrobit jakýkoliv výrobek. Je však nutno dodržet přesné dávkování směsi. Možné směsi žárobetonů, z produkce společnosti *Průmyslová keramika spol. s r.o. Rájec Jestřebí* jsou znázorněny v t*abulce 7*.

Tabulka 7: Směsi žárobetonů z produkce ve společnosti Průmyslová keramika Rájec Jestřebí

DRUHY MĚŘENÝCH VZORKŮ

Vzorek č.	Název	Složení materiálu									
		složka	%	složka	%	složka	%	složk	%	složka	%
vz_OH10-1927	Šamot	Al_2O_3	36,00	SiO_2	60,00	Fe_2O_3	2,00	CaO	0,25	TiO_2	1,45
vz_OH02-1944	Šamot	Al_2O_3		SiO_2		Fe_2O_3		CaO			
vz_OH02-1987	Šamot	Al_2O_3		SiO_2		Fe_2O_3		CaO			
vz_SLIQ	směs MgO	Al_2O_3	0,20	SiO_2	0,50	Fe_2O_3	0,50	CaO	2,20	MgO	96,00
Mebet	žárobeton	Al_2O_3		SiO_2		Fe_2O_3		CaO		MgO	
TermBet	žárobeton	Al_2O_3	7,00	SiO_2	40,00	Fe_2O_3	8,50	CaO	5,50	MgO	35,00

7.1 Žáruvzdorné betony portlandské

Žáruvzdorný beton portlandský je beton, jehož pojivou složku tvoří portlandský cement. Chemické složení portlandského cementu tvoří hlavně oxid vápenatý, oxid siřičitý, dále pak v malém množství oxid hlinitý, oxid železitý a oxid hořečnatý. Vlastní portlandský cement je vyroben z cementového slínku a dávky síranu vápenatého, který při smísení s vodou reaguje společně se složkou C_3A (tricalciumaluminát) za vzniku primárního ettringitu, což zpomaluje jeho rychlé tuhnutí. Tuhnutí betonu je vyvoláno reakcemi slínkových materiálů s vodou. Slínkové minerály, které se vyskytující se v portlandském cementu jsou alit, belit, hlitnitan trojvápenatý, a hlinitoželezitan čtyřvápenatý jinak označeno celit. Složení slínkových materiálů v portlandském cementu je zobrazeno v tabulce 8. Po smísení s vodou portlandský cement tuhne a následně tvrdne za vzniku cementového kamene. Alit a belit, jenž jsou hlavními zdroji pevnosti cementového kamene, hydratují s vodou. Hydratací vznikají složky afwillit a portlandit.

Proces je možné popsat podle Z. Šaumana teoretickými rovnicemi

$$2C_3S + 6H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \tag{45}$$

$$2C_2S + 4H_2O \rightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \tag{46}$$

Afwillit je rovněž označován ve své nedokonalé krystalické formě označován jako C-S-H gel, který může nabývat dvojí formy a to gelu C-S-H-I a gelu C-S-H-II. Existuje několik teorií zpevňování cementového kamene. Např. teorie hydratace dle Michaelise udává, že zrna cementu vytvářejí spolu se záměsovou vodou koloidní roztok, který postupující hydratací mění svoji formu na gel.

Tabulka 8: Slínkové minerály portlandského cementu [37]

Název	Vzorec	Orientační zastoupení v CEM I [% hmotnostní]
Alit	C_3S	50 až 70
Belit	β-C_2S	10 až 30
Tricalciumaluminát	C_3A	5 až 10
Broenmillerit, Celit	C_4AF	5 až 15

Gel postupem času vysychá a dává někdy vznik skrytě krystalické struktuře. Krom těchto gelů jsou ve vyzrálé struktuře cementového kamene zastoupeny složky hydroxidu vápenatého, AFm a AFt fází, do kterých spadá ettringit (Pytlík 2000). Chemické reakce s vodou dávají vznik čtyřem druhům sloučenin a to kalciumhydrátů, dále dobře vykrystalizovaným kalciumaluminátů, a portlanditu a nakonec dobře vykrystalizovanému ettringitu. Portlandský cement z hlediska jeho chemického složení obsahuje značné množství oxidu vápenatého. V binární soustavě SiO_2-Al_2O_3 se oxid vápenatý chová jako tavící. Lehce reaguje s oxidem siřičitým za vzniku hlinitokřemičitanů s nízkou teplotou tavení. Z chování oxidu vápenatého ve směsi vyplývá problém snížené tepelné odolnosti. V průběhu zahřívání se ztrácí voda vázaná v křemičitanech za vzniku oxidu vápenatého. Při odstávce ohřevu tento oxid znovu reaguje s vodou zpět na hydroxid vápenatý, což vyvolává značné zvýšení objemu. Vzniklé mezikrystalické tlaky žárobeton zcela rozruší. Chemické složení cementu neumožňuje odstranit nepříznivý vliv snížení teplotní odolnosti. Za to ovlivnění destrukce betonu při odstávce ohřevu je možné odstranit přidáním přísad – stabilizátorů (mletý šamot, mletý jíl, struska apod.), do směsí, které oxid vápenatý váží a tím zabraňují jeho zpětné reakce s vodou na hydroxid vápenatý.

Další složkou žárobetonové směsi tvoří kamenivo, které může být přírodní nebo umělé. Přírodním kamenivem mohou být čedič, diabas a andesit. Tohoto kameniva se používá u žárobetonů do teploty 700 °C. Z umělých kameniv se převážně používá šamotové ostřivo. Pro vysokoteplotní žárobetony se jako ostřiva používá chromit a mletý mullit. Podmínkou pro kvalitní žárobeton je jeho hutnost. Na tuto vlastnost má největší vliv zrnitost kameniva a množství záměsové vody. Odolnost žárobetonů s pojivem tvořeným portlandským cementem ve zvýšených teplotách klesá. Jeho pevnost je tedy dána druhem kameniva a příslušným mikroplnivem. Pro zvýšení odolnosti proti vyšším teplotám je vhodné použít kamenivo tvořené šamotem nebo mletým lupkem anebo keramzitem. Tyto směsi jsou odolné do teplot 1100 °C. Vzhledem k jejich poměrně nízké objemové hmotnosti (cca 1900 kg m^{-3}) jsou z hlediska

akumulace tepla pro akumulační zásobníky méně vhodné. Proto se výzkumem portlandských žáruvzdorných betonů ve své práci nezabývám.

7.2 Žáruvzdorné betony hlinitanové

Hlinitanové žáruvzdorné betony patří k zrněným žáruvzdorným směsím, s hydraulickou vazbou, jejichž pojivem je hlinitanový cement. Na rozdíl od žáruvzdorných betonů portlandských je možné jejich použití aplikovat do teplot až 1900 °C. Zde ale záleží na množství hlinitanového cementu ve směsi a na vysoké žáruvzdornosti použitého kameniva. Podle obsahu oxidu hlinitého dělíme tyto cementy na obyčejné a vysoce hlinitanové. Obyčejné hlinitanové cementy obsahují do 55% oxidu hlinitého. U vysoce hlinitanových cementů se obsah oxidu pohybuje od 65 % až do 85 % a výše. Hlavními minerálními složkami hlinitanových cementů jsou dvě formy kalcium-hlinitanů, které v chemické reakci s vodou vytváří kalciumhydroaluminát. Jedná se o $CaO.Al_2O_3.10H_2O$ a $2CaO.Al_2O_3.8H_2O$. s chemicky vázanou vodou. Hydratovaná voda se ohřátím nad teploty 550 °C ztrácí a vytváří se znovu hlinitan vápenatý a oxid hlinitý. Vysoký obsah oxidu hlinitého značně ovlivňuje žáruvzdornost betonů. U obyčejných hlinitanových žárobetonů se pohybuje kolem 1450 °C. S binární soustavy slitiny SiO_2-Al_2O_3 je zřejmé že obsah oxidu siřičitého musí být co nejnižší vzhledem k obsahu oxidu hlinitého. U žárobetonů s obsahem oxidu hlinitého vyšším než 62 % krystalizuje za teploty 1855 °C mullit. Slitina SiO_2-Al_2O_3 se chová jako dokonale nerozpustná. Složení odpovídající slitině s podílem cca 70 % oxidu hlinitého a 30 % oxidu siřičitého krystalizuje ve formě korundu (α−fáze Al_2O_3) obalené eutektikem složeným s mullitu a korundu.

Na obrázku 11 je znázorněn diagram dokonale nerozpustné slitiny SiO_2-Al_2O_3. Při vysokém procentu SiO_2 tento oxid krystalizuje ve formě cristobalitu. Při koncentraci cca 95 % SiO_2 a 5% Al_2O_3 se při teplotě 1600 °C vytváří eutektikum cristobalit–mullit. Při koncentracích do 65% Al_2O_3 za nižších teplot (do 1500 °C) vykazuje slitina krystaly mullitu a cristobalitu. Obsah mullitu se zvyšuje s narůstající koncentrací Al_2O_3 v hlinitanovém cementu. Tím může u těchto slitin být zaručena odolnost proti žáru až do teploty 1820 °C. Pro koncentrace Al_2O_3 ve slitině větší než 68 % začíná krystalizovat α-fáze Al_2O_3 tzv. korund. Jedná se o sklovitou krystalickou strukturu s vysokým bodem tání. Ve slitině s těmito koncentracemi se začíná tvořit eutektikum složené z krystalů mullitu a korundu. Tato struktura odpovídá struktuře vysoce hlinitanových cementů, jejichž žáruvzdornost dosahuje hodnot vyšších jak 1700 °C. Vzhledem k malému obsahu oxidu vápenatého nevzniká u těchto cementů po prohřátí nad teploty 500 °C volný oxid vápníku. V betonech vytvářených z hlinitanových cementů se používá výhradně umělého

kameniva. Kvalitní umělá žáruvzdorná ostřiva mohou být tvořena chromitem, magnesitem, slinutým mullitem, slinutým nebo taveným korundem. Poměr mezi pojivem a kamenivem činí 18 % pojiva a 82 %kameniva. Vhodné směsi pro koncepci žárobetonových zásobníků jsou tvořeny s hlinitanového cementu jako pojiva a chromitu nebo elektro taveného korundu. Objemová hmotnost těchto žárobetonů dosahuje výše až 3000 $kg.m^{-3}$a odolnost proti žáru 1370 až 1670 °C. Ostřivo z elektro taveného korundu zaručuje délkové změny do 0,1 %. Z těchto důvodů jsou žárobetony vytvářené z hlinitanových cementů vhodné pro koncepce vysokoteplotních solárně tepelně akumulačních zásobníků. Pro tuto koncepci je vyhovující i malá délková roztažnost.

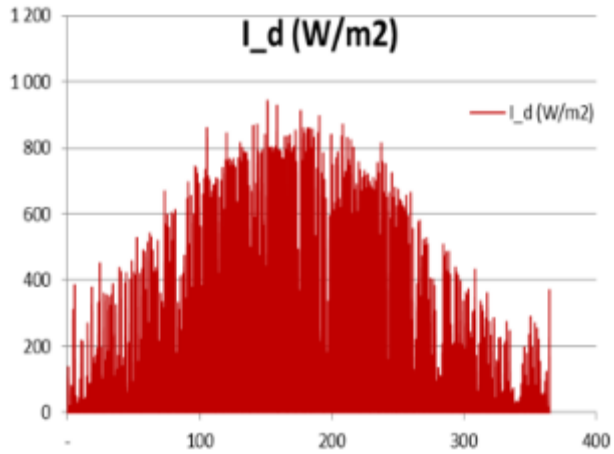
Cílem této práce je výzkum fyzikálních a mechanických vlastností komerčních směsí pro žáropevné betony vytvářených z hlinitanových cementů za vysokých teplot.

Jako představitele řady směsí jsem volil žárobetony hutné. V prvé řadě bylo nutné pro identifikaci fyzikálních vlastností zvoleného žáruvzdorného betonu a pro dynamiku jeho chování v tepelně zatížených oblastech, vytvořit model zásobníkového jádra, na kterém budou probíhat zátěžové testy. Dynamika chování zásobníkového jádra představuje jeho nabíjení a vybíjení energií, vyvolaném požadavky na její denní spotřebu. Nabíjení zásobníku je zabezpečováno čerpáním solární energie během ročního období. Jeho vybíjení je vyvoláváno spotřebou energie stavebních objektů, nutnou k docílení požadované tepelné pohody. Z těchto důvodů je nutné provést roční bilanci slunečního osvitu, nutného pro nabíjení zásobníku za spolupůsobení ztrát tepla vzhledem k odběru vyvolanému vybíjením. Pro modelování dynamiky chování zásobníku byl vybrán stavební objekt v katastru Bohutice a získána roční bilance slunečního svitu v téže lokalitě. Z výše uvedených vstupních údajů byla vyhodnocena denní potřeba energie zásobující sledovaný objekt a s tím související minimální výkon zásobníku a jeho teplota v zimním období tak, aby bylo možné zabezpečit jeho tepelnou pohodu.

8 Bilance potřeby energie pro docílení tepelné pohody objektu.

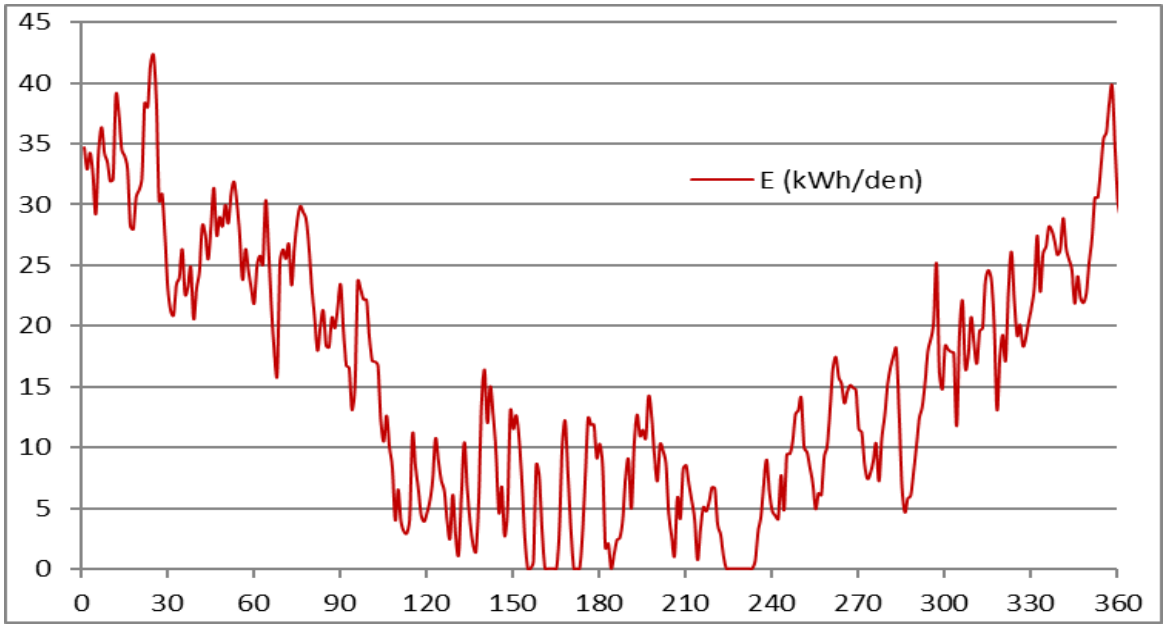
Objem tepelného zásobníku musí být stanoven tak, aby byl schopen naakumulovat množství energie, které je schopné pokrýt spotřebu jejího průběžného čerpání během roku. Množství energie, nutné pro pokrytí tepelných potřeb konkrétního objektu pro docílení tepelné pohody, je možné určit výpočtem, jehož vstupy tvoří roční rozložení intenzity slunečního ozáření objektu, dále geometrické parametry objektu, jeho zeměpisná poloha, postavení vzhledem ke světovým stranám, velikost objektu, dislokace místností a požadavky na vnitřní tepelnou pohodu. Výpočtem jsou určeny hodnoty průměrné denní spotřeby energie a minimální teplota zásobníku. Tyto hodnoty jsou výchozí pro výpočet výkonu zásobníku. Základní myšlenka řešení denních potřeb energie pro uspokojení tepelné pohody bydlení spočívá v následující úvaze. Obytné stavení je ohraničené nosným obvodovým zdivem, které je postaveno na základech. Stavení může být podsklepené nebo nepodsklepené. Jednotlivá podlaží jsou oddělená stropní anebo podlahovou konstrukcí. Místnosti uvnitř stavby jsou ohraničeny přepážkami. Stavení má prostory chodeb a schodišť. Stavba je shora ohraničena střechou, která je plochá nebo jestliže má stavení půdní prostor, pak je provedení střechy sedlové. Každá vnitřní plocha včetně stropů je osazena omítkou. Rovněž tak vnější obvodové zdivo je pokryto vnější omítkou. V některých místnostech budovy se topí, jiné vytápěny nejsou. Každá z vnitřních místností vykazuje požadavek na tepelnou pohodu. Tato je dána teplotou místnosti a vnitřní relativní vlhkostí. Energii, která musí splňovat požadavky tepelné pohody, je nutné do objektu dodat. Tepelnou energii do obytných prostorů dodává sluneční záření anebo v případě jejího nedostatku vytápěním fosilními palivy anebo formou alternativních zdrojů. Jednotlivé vnitřní prostory objektu, které mají různou teplotu, se tepelně ovlivňují. Tak vzniká velmi složitý systém sdílení a přenosů tepla, závislý na venkovní teplotě, tedy na časově závislém slunečním toku. Celkově vzato je ovlivněn lokalitou umístění stavebního objektu, na jeho poloze vzhledem ke světovým stranám, a zvláště pak konstrukcí stavby. Parametry stavby (rozměry místností, rozměry a tloušťky ohraničujících stěn a stropů, jejich materiály), tepelná pohoda jednotlivých místností objektu, situační umístění stavby a roční časový průběh vnějších teplot se jako vstupní proměnné zavedou do programu. Výše popsaná problematika byla realizována na rodinném domku v Bohuticích. Situační plánek daného stavení a schéma interních a externích tepelných toků jsou vykresleny na obrázku 14. Na obrázku 15 je znázorněn diagram intenzity slunečního svitu během dlouhodobého ročního sledování v situované oblasti.

Obr. 14. *Schéma tepelných toků při řešení budovy jako tepelného systému [autor]*



Obr. 15. *Intenzita slunečního osvitu v situované oblasti [autor]*

Výpočetním programem „Energie“ byl vytvořen datový soubor denní potřeby tepelné energie E_{di} v závislosti na denních průměrných teplotách T_{ei} během roku. Denní potřeba energie v kWh pro vytápění tohoto obydlí je dokumentována diagramem na obrázku 16.



Obr. 16. *Průběh potřeby energie v kWh/den referenčního objektu v průběhu roku [autor]*

Diagram znázorňuje časovou funkci denní potřeby energie v kWh na vytápění pro zajištění tepelné pohody modelového rodinného domku v Bohuticích v průběhu roku.

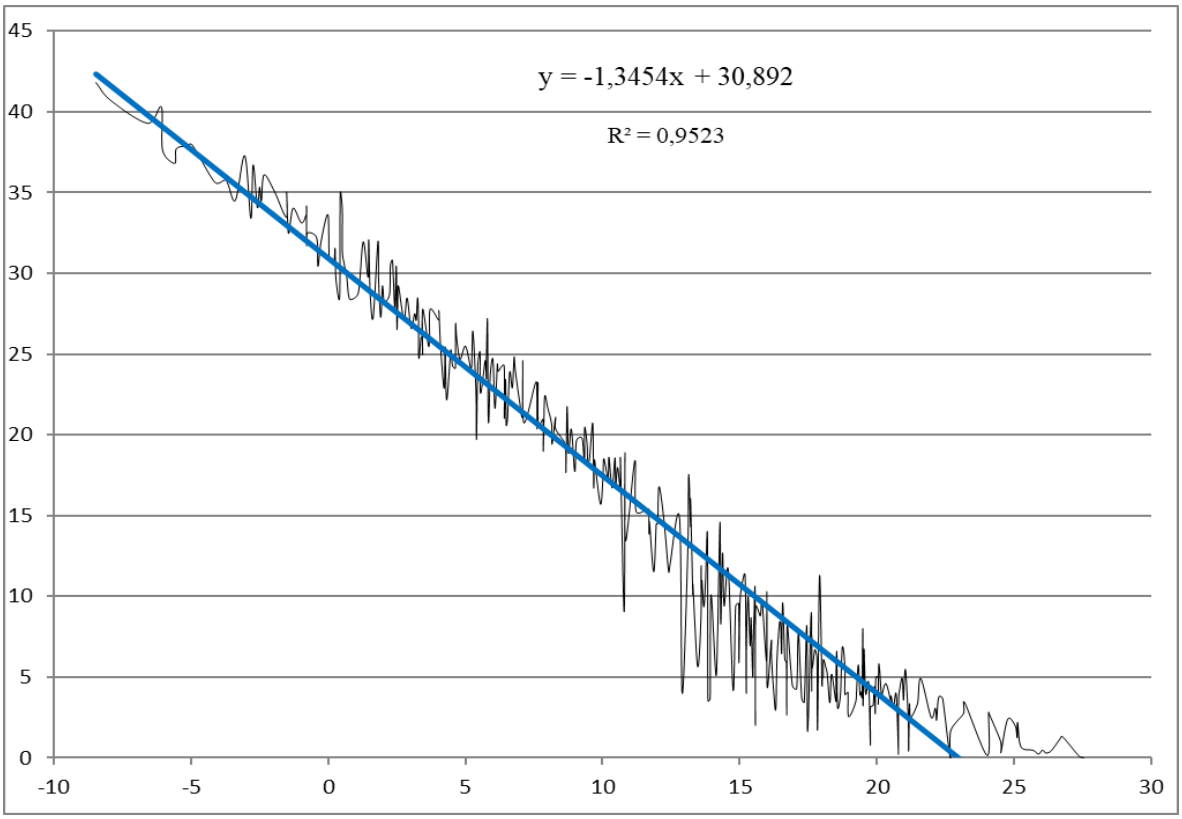
$$E_{di}=f(t_{di}) \tag{47}$$

Sestupným seřazením spotřeby tepelné energie podle denních teplot ovzduší získáme charakteristiku, která zobrazuje její nárůst s klesající teplotou. Pro regresní analýzu bylo

nejvhodnější použití lineární funkce, což je patrné z průběhu této uspořádané funkční závislosti znázorněné na obrázku 17. Závislost na tomto obrázku znázorňuje nárůst potřeby tepelné energie na venkovní teplotě, která se pohybuje v prostoru obce Bohutice v průměru od 30 °C do mínus 10 °C. Teploty odpovídají průměru několikaletého sledování ročních teplot v této lokalitě. Hodnoty byly získány od ústavu metrologie v Brně.

Na základě regresní analýzy je možné trend růstu denní potřeby energie vyjádřit lineární aproximační funkcí ve tvaru:

$$E_{di}^{*}=A+B.T_{di}, \tag{48}$$



Obr. 17. *Uspořádaný soubor závislost potřeby energie referenčního objektu v kWh/den na roční teplotě [autor]*

ve které koeficienty *A* a *B* představují koeficienty lineární regrese. Jejich hodnoty jsou řešeny minimalizací součtu rozdílu čtverců hodnot aproximační funkce od hodnot reálně naměřených. Hledáme tedy takové koeficienty, které vyhovují minimu následující funkce *G*:

$$G = \frac{d}{dA}\sum_{i=1}^{365}(E_{di} - T_{di})^2 = 0 \tag{49}$$

$$G = \frac{d}{dB}\sum_{i=1}^{365}(E_{di} - T_{di})^2 = 0 \tag{50}$$

Minimalizaci této funkce řeší podmínka prvních derivací výše uvedeného rozdílů čtverců dle koeficientů regrese. Lineární regresí spočívající v interpolaci funkce metodou nejmenších čtverců můžeme tuto grafickou závislost vyjádřit jako lineární funkci energie v závislosti na denní teplotě. Chyba interpolace činí hodnotu 0,952 kWh den^{-1}. Závislost má následující tvar:

$$E = 30{,}886 - 1{,}3449t_e \tag{51}$$

Problém je zpracován v systému MS Office Excel 2010. Systém řeší koeficienty regrese, výběrový průměr a směrodatnou odchylku setříděného souboru. Výsledky výpočtů jsou následující:

T_s 15,732 °C

σ_s 3,35 °C

Na základě hodnoty výběrového průměru a počtu stupňů volnosti pro daný průměr, zjistíme prostřednictvím t-Studentova rozdělení pravděpodobnosti pravostranný odhad na hladině spolehlivosti 95 %. Hodnota pro výše uvedenou pravděpodobnost činí:

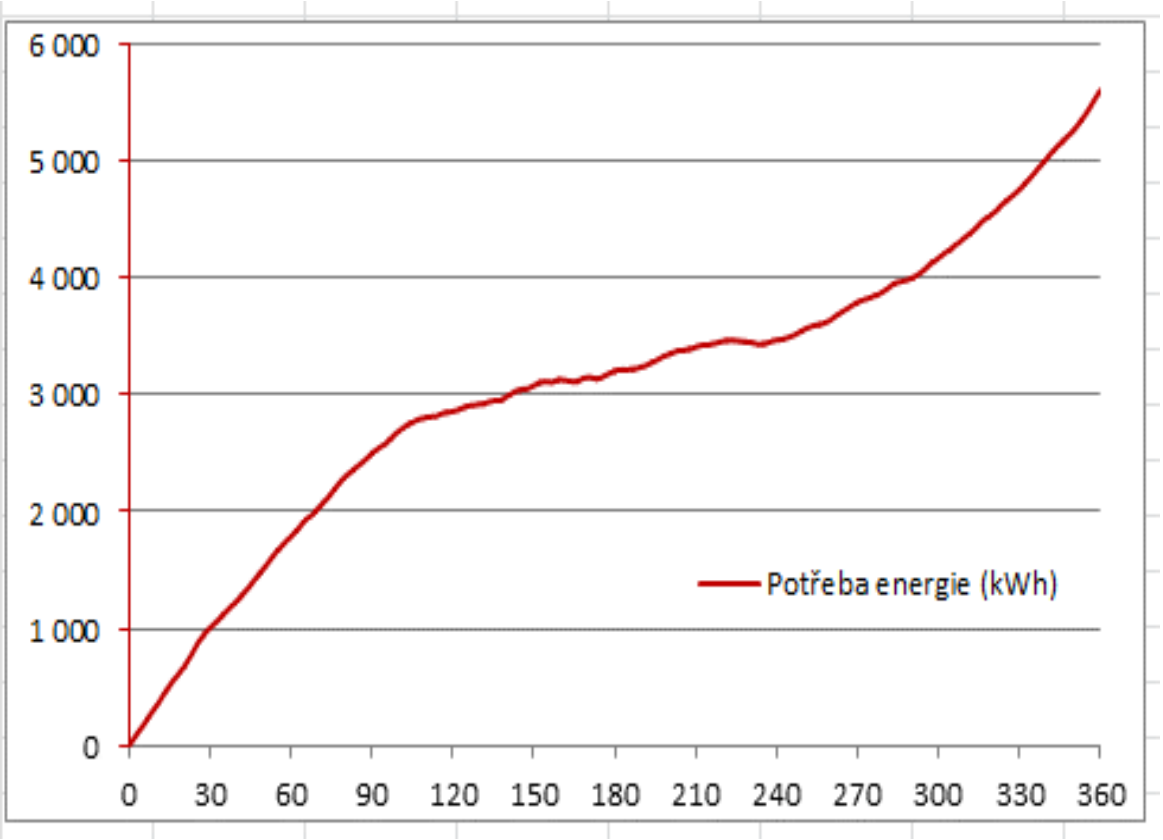
$$P_p(\Delta T \leqq 3{,}35) = 0{,}974621$$

Pak střední hodnota denní spotřeby energie vyplývá ze střední hodnoty teploty v průběhu roku, její směrodatné odchylky a pravděpodobnosti jejího výskytu na hladině spolehlivosti 95 %. Střední hodnota spotřeby denní energie činí tedy částku:

$$E^* = 37{,}7 \text{ kWh}$$

Distribuční funkce celkové spotřeby roční tepelné energie v kWh pro sledovaný objekt je znázorněna diagramem na obrázku 18. Nultý den v grafu potřeby energie začíná prvním únorem a končí koncem ledna následujícího roku. Z diagramu je zřejmé, že největší potřeba energie je v zimním období v průběhu měsíců ledna a února. Vypočtené hodnoty potřeby energie vyplývají ze statistického sledování ročního dlouhodobého sledování slunečního záření, lokality umístění objektu, a nakonec ze stavební konstrukce a požadavků na její tepelnou pohodu. Z výpočtů, realizujících potřeby dotací energie pro obytný dům v lokalitě Bohutice vyplývají základní údaje pro stanovení parametrů solárního termálního vysokokapacitního zásobníku. V prvé řadě je patrné, že objem zásobníku pro dané vstupní podmínky nemůže být libovolný. Zásobník velkého objemu se působením toku tepelné energie získané slunečním ozářením v průběhu roku nemůže nabíjet na hodnoty potřebné pro pokrytí jejich potřeb pro vytvoření tepelné pohody. Naproti tomu malý objem zásobníku nestačí svým výkonem pokrýt požadované potřeby pro zajištění tepelné pohody. Hodnoty velikosti zásobníku pro zabezpečení tepelné pohody rodinného domku v lokalitě Bohutice vycházely jednak z potřeby tepelné energie pro její zajištění a parametrů stavební konstrukce žárobetonového zásobníku.

Materiál použitý ve výpočtech reálného zásobníku byl převzat z podkladů firmy Průmyslová keramika, spol. s r.o. Rájec Jestřebí. Parametry pro výpočet objemu zásobníku byly převzaty z materiálového listu hutného žárobetonu s hydraulickou vazbou typu ŽÁROBET 1750-TAB. Předpokladem pro výpočet byl předpokládaný denní pokles teploty zásobníku o 6 °C, vlivem čerpání tepelné energie. Parametry pro výpočet zásobníku pro obytné stavení v Bohuticích jsou stanoveny v odstavci 8.1 této práce a výpočet proveden v systému Excel 2010. Výsledky šetření jsou uvedeny na obrázku 19.



Obr. 18. *Průběh součtové spotřeby tepelné energie referenčního objektu během roku [autor]*

8.1 Parametry senzibilního zásobníku tepla ze žáruvzdorného betonu

Tepelný akumulační zásobník je určen pro zásobení energie pro parní turbínu. Z důvodu udržení naakumulované tepelné energie musí pracovat v teplotním pásmu od 280 do 800 °C. Pro parní turbínu s výkonem 5 kW je nutné udržovat teplotu přehřáté páry v mezích od 280 do 350 °C. Zásobník musí být schopen svoji energii dodávat tak, aniž se sníží jeho teplota pod dolní hranici po dobu 24 hodin. Dobíjení energie do zásobníku probíhá během denních hodin. Tepelná energie akumulovaná zásobníkem se obnovuje slunečním zářením. Záření je přiváděno na vstupní tepelný výměník zabudovaný do žárobetonového tělesa. Těleso zásobníku, umístěné například v zemi pod úrovní terénu, je nutné izolačně oddělit od okolního prostředí.

Velikost objemu tělesa akumulačního zásobníku je možné určit z množství tepla, které zásobník musí pojmout, dále z tepelného rozpětí udržované zásobníkem a z tepelných vlastností materiálu, z něhož je zásobník zhotoven. Velikost objemu je možno vypočítat z rovnice (1). Tepelný objem zásobníku Q je určen z potřeb energií, kterou musí během 24 hodin pokrýt.

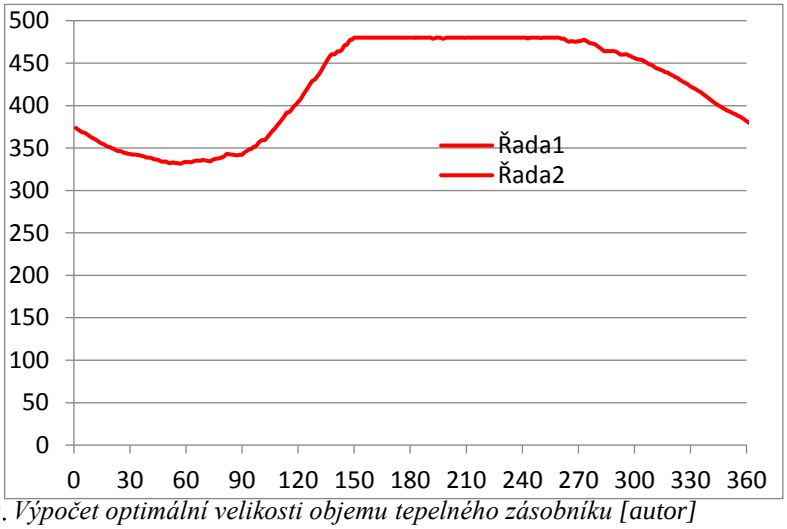
$$Q = \eta P q . t_P \qquad (52)$$

Zásobník je ustaven na podloží ze žáruvzdorného betonu. Prostor mezi zásobníkem a vnějším pláštěm musí být vyplněn izolačním materiálem. V reálné konstrukci betonového zásobníku jsou zality ocelové výměníky sloužící jednak k přenosu tepla k nabíjení zásobníku a jednak k převádění tepelné energie ke spotřebičům. Velikost objemu reálného zásobníku pro pokrytí potřeb tepelné pohody v lokalitě Brno sídlo Bohutice je dán výpočtem vyplývajícím z potřeby denní tepelné energie. Optimální rozměry tohoto zásobníku vycházejí z fyzikálních konstant použitého žárobetonu. Výpočet je proveden v Excelu a jeho výsledky jsou demonstrovány na obrázku 19. Je proveden pro účinnost přenosu záření 100 %, dále pro koncentraci slunečního záření Fresnelovými lupami o ploše 80 m^2. Při tomto ozáření dosáhne minimální teplota zásobníku v zimním období hodnoty 331,5 °C (cca 26. února). Měrná tepelná kapacita žárobetonu a jeho hustota jsou pro daný výpočet zvoleny takto

$$c = 960 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$
$$\rho = 3000 \text{ kg.m}^{-3}.$$

Poloměr žárobetonového válcového jádra vyjde výpočtem na hodnotu 2,5 m. Zásobník je volen tak, že jeho výška se rovná průměru. Ve výpočtech je vyčíslen i objem zásobníku. V zásobníku je mimo požadovaný odběr tj. 37,7 kWh/den počítány i ztráty Δt = 10,3.K/den. Regulace oteplení zásobníku je v letním období předpokládaná na horní omezení ve výši 480 °C. Celková tepelná kapacita zásobníku tohoto objemu obnáší 282,74 MJ. Teploty zásobníku v časovém průběhu ročního období jsou znázorněny na obrázku 19.

E=	37,7	kWh	=	135,63391	MJ	účinnost =	80,00%	
						S=	80	m^2
r=	2,5	m						
h=	5	m						
V=	98,17	m3				**min=**	**331,5**	**°C**
m =	294,52	tun				dne	**26.2**	
ro=	3000	kg/m3						
c=	960	J/kg.K						
C=	282,74	MJ	78,54	kWh				
Δt =	0,5	K/den						
zatížení=	147,15	kN/m^2						



Obr. 19. *Výpočet optimální velikosti objemu tepelného zásobníku [autor]*

Nosičem tepla je v případě aplikace parní turbíny přehřátá vodní pára. Přehřátou páru je nutné vyrobit v zařízení zabudované uvnitř anebo vně betonového zásobníku. Pára vytvořená zásobníkem bude sloužit jako reverzibilní výměník tepla mezi zásobníkem a ocelovým výměníkem. Konstrukcí topného zařízení, a celého okruhu, potřebného pro oběh parní turbíny se tato práce nezabývá. Z hlediska zkoušek vlastností žárobetonového zásobníku si není možné dovolit zhotovení tepelného úložiště velikosti, vypočtené pro danou lokalitu. Pro provádění ověření chování tepelného zásobníku byla zvolena jeho velikost cca 11x objemově menší. Pracovní teploty, kterými je tento vzorek zatěžován, volím 550 °C až 650 °C. Ohřev zásobníku je simulován elektrickým proudem napětím 230 V a výkonu 3200 W. Jako topné těleso je užíván kanthalový drát průměru 2 mm, navinutý uvnitř žárobetonového jádra ve vzdálenosti 150 mm od středu zásobníku. Průměr a výška zásobníku jsou 500 mm. Objem zásobníku činí 0,393 m^3. Uvnitř žárobetonového jádra jsou zabudovány dva snímače teploty. První z nich leží ve vzdálenosti 170 mm od středu. Druhý je umístěn na obvodu zásobníku tj., ve vzdálenosti 250 mm od jeho středu. Pro posouzení izolačního obalu zásobníku je třetí snímač umístěn na vnějším obvodu izolačního obalu. Snímače teploty slouží ke sledování šíření teploty a tím

i tepla v objemovém prostoru zásobníku. Teplota je snímána v průběhu ohřevu a chladnutí. Z její velikosti je usuzováno na chování zásobníku z hlediska jímání tepla a jeho tepelné setrvačnosti při nezatíženém přirozeném ochlazování. Průběh teplot je sledován při zahřívání a ochlazování zásobníku obaleného několika vrstvy izolačních vrstev.

8.2 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 obalu.

8.2.1 Izolační obal zásobníku

Izolační obal zásobníku je možné provést z materiálů, které vykazují nízkou hodnotu tepelné vodivosti λ, takže vysokého tepelného odporu. Ze známých materiálu přicházejí do úvahu následující:

První varianta:

obal akumulačního jádra primární-Promaglaf HTI	tl. 2×20 mm,
obal akumulačního jádra sekundární Slatted	tl 1×20 mm,
perlitový zásyp	tl. 350 mm,
izolační rohož Isover	tl. 100 mm,
plášť ocelový plech pozinkovaný	tl 1 mm.

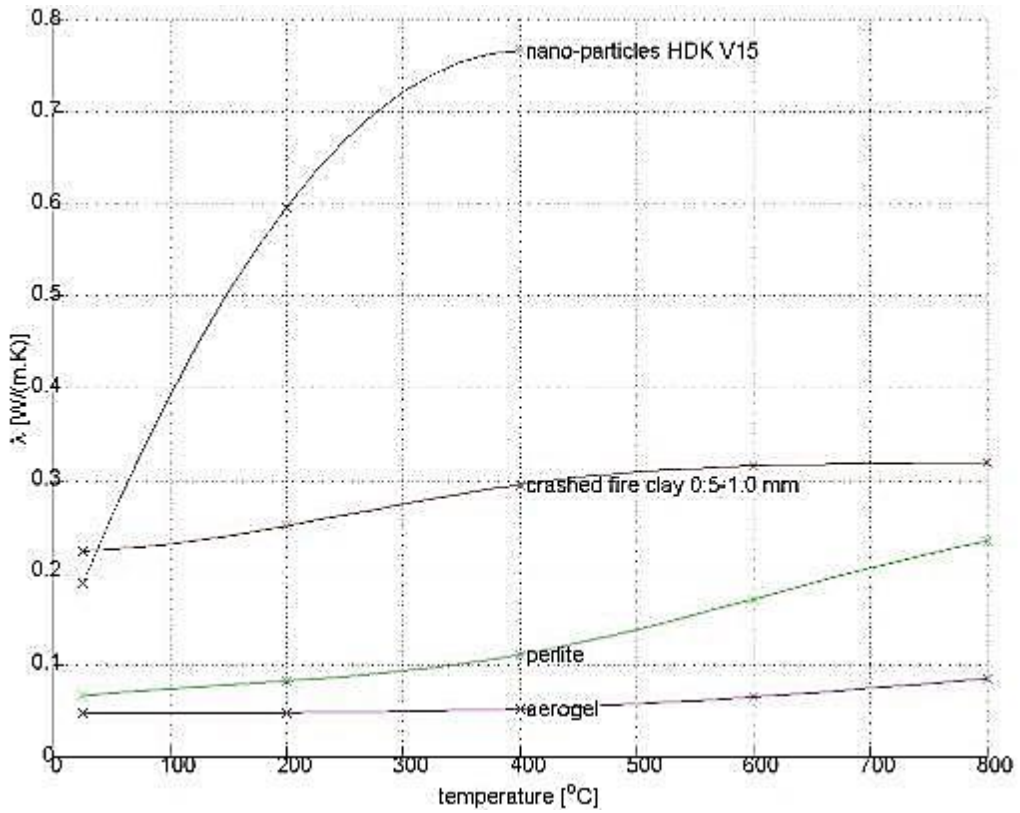
Druhá varianta:

obal akumulačního jádra primární-Promaglaf HTI	tl. 2x20mm,
obal akumulačního jádra sekundární Slatted	tl. 1x20mm,
zásyp Free Flow	tl. 190mm,
izolační rohož Rockwool	tl. 160mm,
plášť ocelový plech pozinkovaný	tl- 1mm.

Třetí varianta:

zásyp akumulačního jádra Free Flow	tl. 350 mm,
ocelový kontejner plech nerez	tl- 2 mm,
obal kontejneru Slatted	tl. 20 mm,
vnější obal Promaglaf	tl. 25 mm,

PROMAGLAF-HTI jsou rohože z vysokoteplotního skleněného vlákna na bázi oxidu křemičitého, vápenatého a hořečnatého s klasifikační teplotou 1200 °C. Hlavní výhodou materiálu PROMAGLAF-HTI je jeho odolnost vůči vysokým teplotám. Klasifikační teplota 1200 °C zaručuje, odolnost materiálu takovému zatížení jako je například komínový požár. Proto má materiál PROMAGLAF-HTI mnohem vyšší užitnou hodnotu než např. produkty z minerální vlny. U těchto produktů dochází k degradaci již při mnohem nižších teplotách. Rohož z výše uvedeného materiálu je díky vhodnému chemickému složení „biorozpustná“. Proto nemá žádné dlouhodobě nepříznivé účinky na zdraví člověka. Izolační materiály Slatted jsou v podstatě rohože z materiálu Promaglaf zašité do žáruvzdorného plátěného obalu na bázi azbestu. Ustavení zásobníku, řeším uložením tělesa na podložce z izolačního žárobetonu, jejíž velikost vyplývá z pevnostních výpočtů. Izolační materiál bude nutné volit na základě chování jeho teplotní vodivosti, která se se zvyšující teplotou zvyšuje. Charakteristiky tepelné vodivosti v závislosti na teplotě některých izolačních materiálů jsou znázorněny na obrázku 20. Měření bylo prováděno v rámci příspěvku [2]. Izolačního materiálu Free Flow používám v první a druhé variantě zásobníkových systému jako zásypový materiál, kterým je ve variantě třetí perlit. Perlit se v podstatě liší od materiálu AEROGEL nepatrným zvýšením hodnoty tepelné vodivosti, která se projeví jako jisté zvýšení úniku tepla uloženého v zásobníkovém jádru.



Obr. 20. *Přehled vodivostních charakteristik vybraných izolačních materiálů podle [2]*

Z diagramů na obrázku 20 je zřejmé, že nejlepší chování izolačních vlastností látek v průběhu zvyšování teplot mají materiály typu AEROGEL. Pro naše účely doporučujeme jako hlavní izolační obal použít materiálu perlit. Izolaci AEROGEL, jejíž obchodní název je Free Flow, využívám jako vnitřní izolační zásyp zásobníkových systémů první a druhé varianty. Perlit jako izolační materiál je používán do izolačních žáruvzdorných betonů. Jeho fyzikální vlastnosti jsou popsány v tabulce 9 a chemické složení chemické je uvedeno v tabulce 10.

Tabulka 9:Přehled fyzikálních vlastností perlitu

	Zrnitost [mm]	Objemová hmotnost	Tepelná vodivost	Klasifikační teplota	Tvrdost dle Mohse	Mineralogické složení
Perlit	mm	$kg.m^{-3}$	$W.kg^{-1}K^{-1}$	°C		
	0,1 až 2	120	0,08	1090	1,5 až 3	amorfní alumosilikát

Konečný návrh izolace bude proveden až po výsledcích výpočtů, měření a zkoušek celého energetického zásobovacího komplexu. Perlit byl testován za zvýšených teplot a jeho chování v prostředí se zvýšenou teplotou je uvedeno v grafu na obrázku 20.

Tabulka 10: Přehled o chemickém složení perlitu

	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	Fe_2O_3	K_2O+Na_2O
Perlit	%	%	%	%	%	%
	min. 66	max. 18	5	max. 3	min. 6,6	8

8.2.2 Materiál pro tepelné akumulační zásobníkové jádro

Jak již bylo předem uvedeno, jedná se o zásobník založený na technologii akumulace senzibilního tepla. Pásmo teplot, ve kterých zásobník z hlediska požadavků na pokrytí akumulované energie pracuje, se pohybuje v rozsahu 280 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 měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost. Jedním z materiálů, vyhovujícím z hlediska požadovaných fyzikálních vlastností, se jeví žárupevný beton. Některé fyzikální vlastnosti materiálů, vhodných pro návrh akumulačního zásobníku, jsou uvedeny v tabulce 7. Z těchto materiálů byl pro zkoušky vybrán materiál ŽÁROBET 1750-TAB. Materiál je specifikován jako hutný žáruvzdorný beton s hydraulickou vazbou. Stavebním materiálem je tabulární oxid hlinitý. Klasifikační teplota betonu vyrobeného z této směsi dosahuje hodnoty 1750 °C. Vysoká odolnost proti žáru je dána chemickým složením, ze kterého je patrný obsah oxidu hlinitého, díky němuž je zajištěna odolnost proti žáru. Jedná se tedy o vysoce hlinitý žáruvzdorný materiál. S přihlédnutím k binárnímu diagramu SiO_2-Al_2O_3 se jedná o strukturu obsahující krystaly mullitu a korundu. Z hlediska chemického složení obsahuje žáruvzdorný beton ŽÁROBET 1750-TAB 0,3 % oxidu křemičitého, 0,1 % oxidu železitého a 0,3 % oxidu vápenatého. Spotřeba materiálů pro zhotovení konstrukce činí 2,95 $t.m^{-3}$ a spotřeba záměsové vody 6 až 7 litrů na 100 kg hmoty. Objemová hmotnost výše uvedeného materiálu se při 100 °C pohybuje ve výši minimálně 2930 $kg.m^{-3}$. Vysoká objemová hmotnost zabezpečuje při stejných objemech akumulačních zásobníků načerpání vyššího množství tepla. Rovněž tak i tepelná vodivost, která je vzhledem jiným žáruvzdorným betonovým směsím velká, zabezpečuje dobrý přenos tepla do celého objemu zásobníku

Z technického listu žáruvzdorného betonu, zobrazeného v tabulce 11, je patrná vysoká klasifikační teplota. Má rovněž i značnou objemovou hmotnost a objemovou tepelnou kapacitu a rovněž i poměrně vhodnou tepelnou vodivost.

Tabulka 11 Technický list žáruvzdorného betonu ŽÁROBET 1750-TAB

průmyslová keramika

Průmyslová keramika, spol. s r.o.
Spešovská 627
CZ 679 02 RÁJEC-JESTŘEBÍ
☎ ++420-516 432 197,516 432 251,516 433 831
Fax ++420-516 432 273
e-mail: prumker@prumker.cz
http: www.prumker.cz

ŽÁROBET 1750-TAB

TYP / TYPE / TYPE OF PRODUCT	SUROVINOVÁ BÁZE / ROHSTOFFBASIS / MAIN RAW MATERIAL BASE	VAZBA / BINDUNGSART / TYPE OF BOND
hutný žárobeton / dichter Feuerbeton / dense castable	tabulární oxid hlinitý / Tabulartonerde / tabular alumina	hydraulická / hydraulisch / hydraulic

VŠEOBECNÉ ÚDAJE / ALLGEMAINE ANGABEN / GENERAL DATA

KLASIFIKAČNÍ TEPLOTA / KLASSIFIZIERUNGSTEMPERATUR / CLASSIFICATION TEMPERATURE	°C	1750	ZRNITOST / KÖRNUNG / GRAIN SIZE	mm	0 - 6
SPOTŘEBA MATERIÁLU / MATERIALBEDARF / MATERIAL REQUIRED	t/m³	2,95	OBRUSNOST (ČSN EN ISO 16282) / ABRIEB / ABRASION RESISTANCE	cm³	
SPOTŘEBA VODY / ANMACHWASSERBEDARF / WATER REQUIRED	L / 100 kg	6,0-7,0	ÚNOSNOST V ŽÁRU (ČSN EN ISO 1893) / DRUCKFEUERBESTÄNDIGKEIT / REFRACTORINESS-UNDER-LOAD	°C	min. 1620

CHEMICKÉ SLOŽENÍ / CHEMISCHE ANALYSE / CHEMICAL ANALYSIS (%)

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO		
96	0,3	0,1	3,1		

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI / FYZIKALISCHE EIGENSCHAFTEN / PHYSICAL PROPERTIES (ČSN EN 1402-6)

TEPLOTA VÝPALU / BRANDTTEMPERATUR / TEST TEMPERATURE °C	OBJEMOVÁ HMOTNOST / ROHDICHTE / BULK DENSITY kg.m⁻³	PEVNOST V TLAKU / KALTDRUCKFESTIGKEIT / COLD CRUSHING STRENGTH MPa	TRVALÉ DÉLKOVÉ ZMĚNY / BLEIBENDE LIN. LÄNGEÄNDERUNG / PERMANENT LINEAR CHANGE %	ZDÁNLIVÁ PÓROVITOST / OFFENE POROSITÄT / APPARENT POROSITY %
110	min. 2930	min. 50		
800	min. 2830	min. 55	max. -0,1	22
1500	min. 2800	min. 75	max. +0,8	23

TEPELNÁ VODIVOST / WÄRMELEITFÄHIGKEIT / THERMAL CONDUCTIVITY (ČSN EN ISO 8894-1)

400	600	800	1000			°C
2,85	2,48	2,30	2,29			W.m⁻¹.K⁻¹

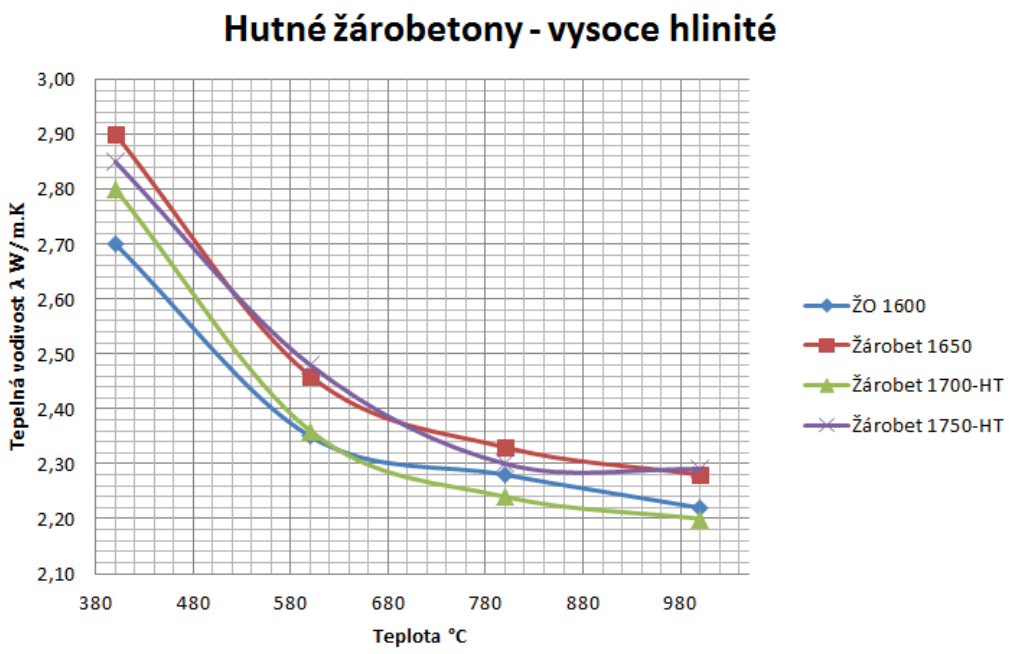
OSTATNÍ ÚDAJE / BLEIBENDE ANGABEN / THE OTHERS INFORMATION

INSTALACE:	VERARBEITUNGSTECHNIK:	METHOD OF PLACEMENT:
vibrování	Vibration	vibrating

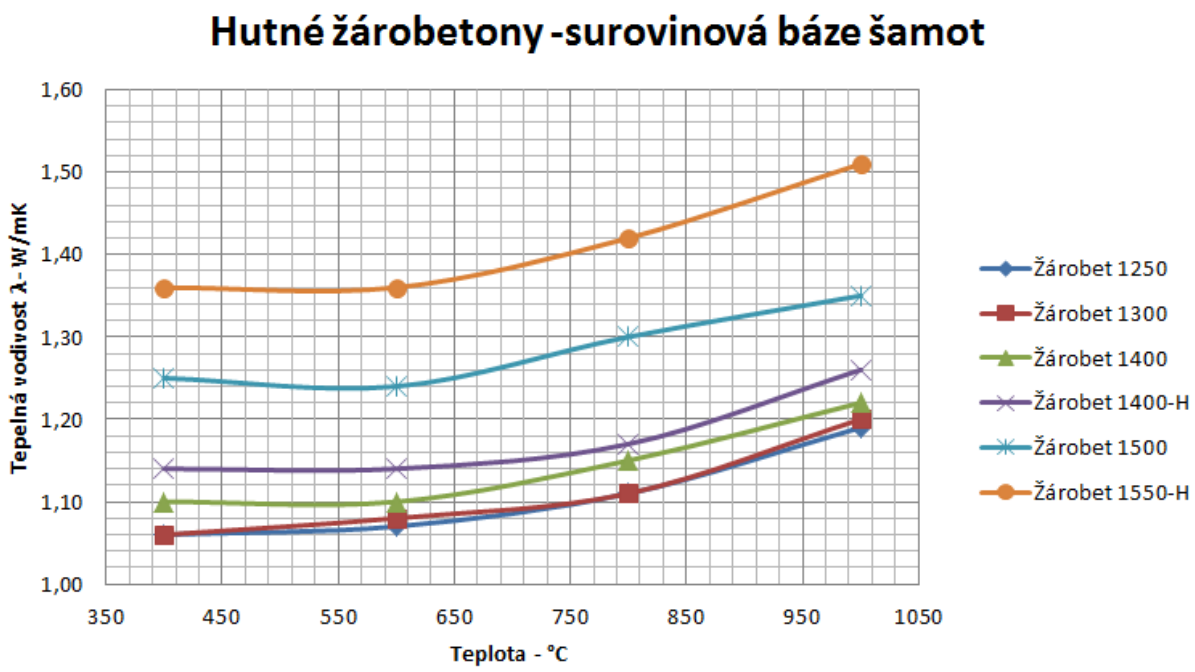
BALENÍ: 25 kg pytle SKLADOVATELNOST: 6 měsíců POUŽITÍ: hutné žárobetonové vyzdívky pro vysoké teploty použití	VERPACKUNG: 25 kg Säcke LAGERFÄHIGKEIT: 6 Monate VERWENDUNG: dichter Feuerbeton für allgemeine Verwendung bis 1750°C auf der Basis Tabulartonerde	PACKING: 25 kg bags STORAGE LIFE: 6 months TYPICAL APLICATIONS: dense castable linings exposed to high temperature

vydáno: 5/8/2010
01/022

Závislosti tepelné vodivosti žárobetonových směsí, z produkce společnosti Průmyslová keramika Rájec-Jestřebí, na pracovní teplotě jsou znázorněny na obrázcích 21 a 22.

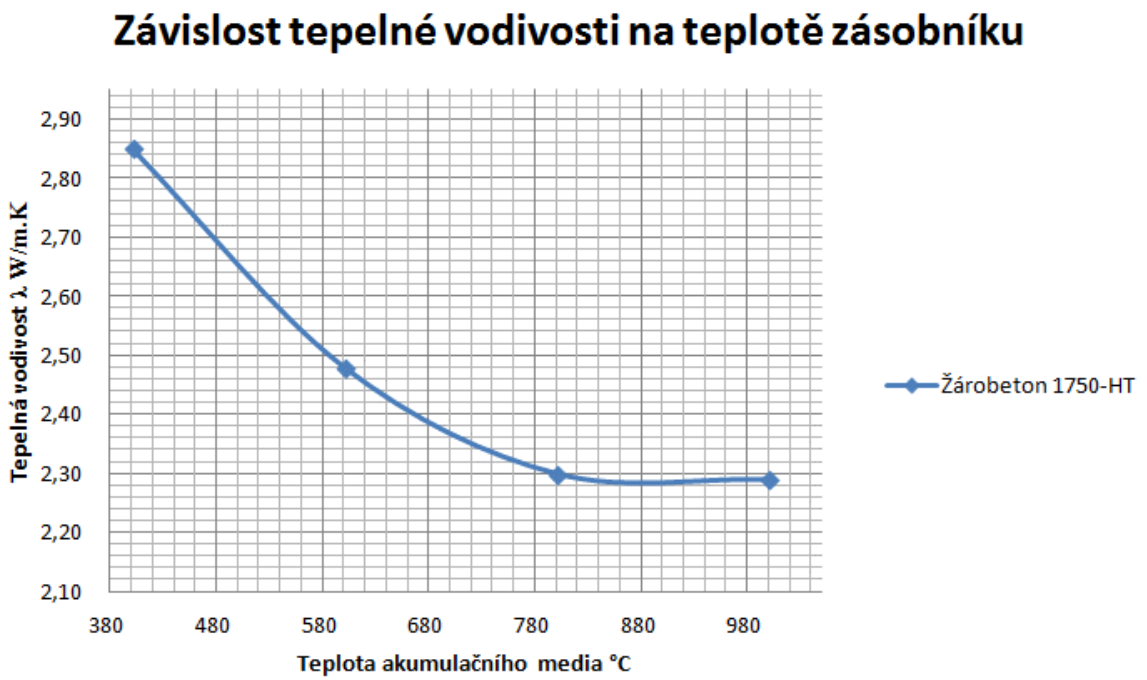


Obr. 21. *Průběh závislosti součinitele tepelné vodivosti na teplotě pro vysoce hlinitanové betony[autor]*



Obr. 22. *Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě pro nízko hlinitanové betony [autor]*

Ze závislostí tepelné vodivosti na teplotě je patrné jejich chování. U vysoce hlinitanových betonů tepelná vodivost s rostoucí teplotou klesá, kdežto u betonů s nižším obsahem Al_2O_3 narůstá. Znamená to, že při vyšších teplotách výrobků zhotovených z vysoce hlinitanových betonů bude šíření tepla horší než u skupiny druhé. V případě volby materiálů pro zásobníková jádra dávám přednost volbě materiálu, s přihlédnutím na výši jeho tepelné vodivosti. Tím jsou materiály vysoce hlinité. Závislost tepelné vodivosti na teplotě je pro vybraný druh žáruvzdorného betonu, sloužícího pro modelové zkoušky zásobníkových systémů, vyobrazena grafem na obrázku 23.

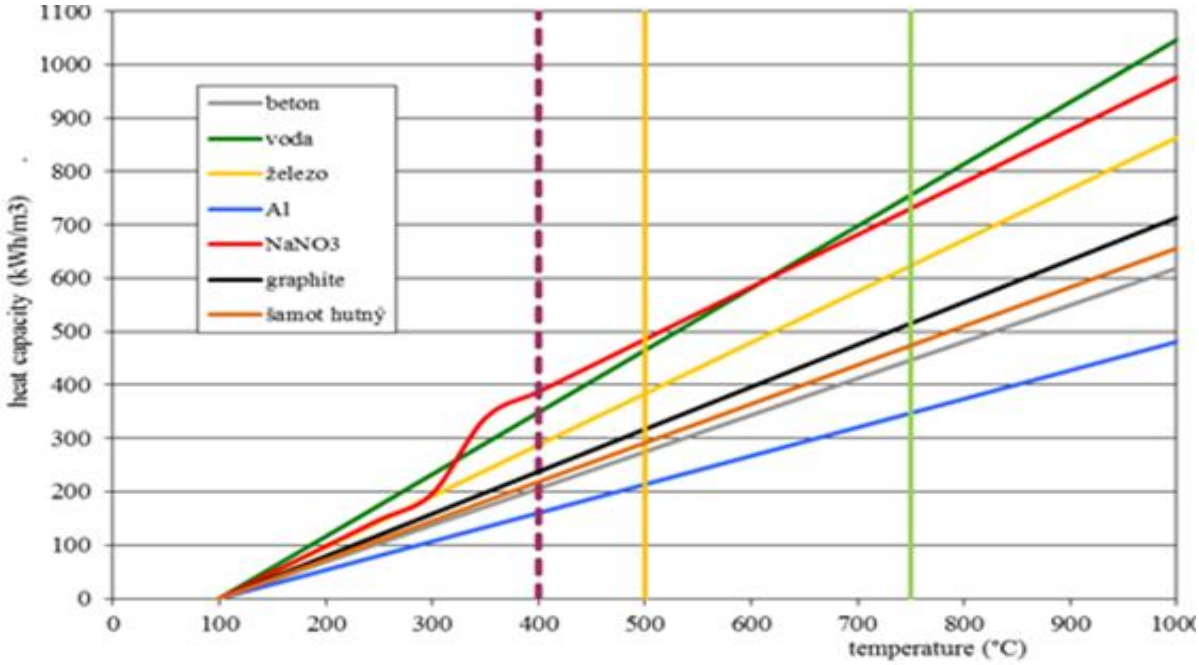


Obr. 23. *Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě – vysoce hlinitanový beton 1750-HT [autor]*

Z funkční závislosti tepelné vodivosti na teplotě akumulačního media je zřejmé, že její hodnota s rostoucí teplotou klesá. Materiál zásobníku se stává méně teplotně vodivým. Pokles vodivosti je pravděpodobně způsobený vysokým procentem oxidu hlinitého (až 98 %), což ve srovnání s betony nízce hlinitými potvrzuje skutečnost tohoto tvrzení. Domnívám se, že pravděpodobně existuje hranice, daná chemickým složením žárobetonové směsi, hlavně obsahem oxidu hlinitého, která má vliv na konstantní teplotně nezávislou tepelnou vodivost. Tuto hypotézu z důvodu nedostatku vzorkového materiálu nemohu potvrdit. Problém spočívá v otázce vhodného složení cementového pojiva a stavebního kameniva betonové směsi.

8.2.3 Tepelný akumulační zásobníkový systém

Chování zásobníku jako celku, to je žárobetonového úložného jádra a jeho izolačního obalu, je nutné popsat z hlediska sdílení tepla formou fyzikálně matematických závislostí. Celá soustava z hlediska přenosů a sdílení tepla se chová jako soustava s nestacionárním vedením tepla



Obr. 24. *Závislost objemové tepelné kapacity na teplotě pro různé druhy materiálů [12]*

dodaným formou solárního záření do vnitřní části zásobníkového jádra. Dynamika soustavy spočívá v jejím nabíjení vstupní energií a vybíjením v důsledku jejího odběru. Zásobník musí být dimenzován tak, aby přijímaná energie byla větší než energie odebíraná. Vzhledem k řešení matematických závislostí vedení tepla, kterými je systém popsán, je vhodné řešit dynamiku jeho chování metodou konečných prvků ve vhodném výpočetním systému. Důležitou fyzikální konstantu při tepelně akumulačních výpočtech tvoří tepelná a teplotní vodivost. Tyto veličiny se s rostoucí teplotou mění. Průběhy závislostí změn součinitelů tepelných vodivostí na teplotě jsou pro žáruvzdorné nízko hlinitanové betony znázorněny na obrázku 22 a pro řadu betonů vysoce hlinitanových na obrázku 21. Diagram na obrázku 24 uvádí závislosti tepelné kapacity na teplotě některých materiálů používaných ve stavebnictví. V tomto případě slouží jako porovnání hodnot objemových tepelných kapacit a jejich závislosti na teplotě.

K provádění výpočtu se nabízí výpočetní systém ANSYS. V prvé řadě je doporučeno prověření zásobníkového systému jako systému nezatíženému, tedy bez odběru tepelné energie a prověřit tak dynamiku jeho nabíjení a vybíjení. Tímto způsobem je možné ověřit jednak vhodnost žáruvzdorného betonu pro rychlé nabití a vhodnost izolačního obalu při jeho vybíjení. Proces nabíjení zásobníku je simulován vnitřním vytápěním elektrickým proudem prostřednictvím kanthalového odporového drátu. Vybíjení je realizováno přerušením ohřevu. V obou případech je sledována doba nabíjení a vybíjení. Vhodnost zásobníkového systému je dána rychlostmi nabíjení (vysoká) a při jeho ochlazování (nízká). Rychlost vybíjení charakterizuje tepelnou setrvačnost a ukazuje na izolační vrstvení zásobníkového systému. Nabíjení a vybíjení zásobníkového izolovaného systému bylo realizováno na modelu, umístěném ve firmě Alumistr

v Hrušovanech. Na základě zvolené geometrie zásobníkového jádra a izolačního obalu a jim odpovídajících materiálů, byla proměřována při energetickém vstupu rychlost nabíjení a při jeho vypnutí rychlost vybíjení. Po ověření chování zásobníku nezatíženého odběrem je nutné provést jeho chování při zatížení. Opět jsou vyhodnocovány charakteristiky nabíjení a vybíjení ale do hry vstupuje trvalý odběr energie. Jako zdroj odběru energie je do zásobníkového jádra zabudován výměník tepla, který dynamicky energii předává jak při nabíjení tak i při vybíjení zásobníku. Chování systému je možné popsat rovnicemi pro vedení tepla. Pro řešení je uvažována třírozměrná oblast Ω v základním kartézském euklidovském prostoru R^3. Tato oblast je ohraničena hranicí $\partial\Omega$. Hranici $\partial\Omega$ je možné nahradit dvěma disjunktními množinami Γ a Θ. Dále je uvažován časový interval I. Nechť uvnitř oblasti Ω se nachází zdroj tepelné energie Q_x. Pak chování celého systému s hlediska přenosu tepla lze v kartézské soustavě popsat rovnicí (6). Aby bylo možné nalézt jednoznačné řešení, je nutné zavést počáteční a okrajové podmínky. Počáteční podmínky stanovují stav oblasti v čase $t = 0$. Okrajové podmínky určují buďto průběh teplot podél hranice $\partial\Omega$ anebo tepelné toky $q(x,t)$ normálou hranice. Počáteční podmínka je určena vztahem (40). Dirichletova okrajová podmínka je dána vztahem (41) a podmínka Neumannova závislostí (42). Pro určení jednoznačného řešení diferenciální rovnice (6) je tedy nutné znát průběh počátečních teplot v čase $t=0$, průběh teplot na hranicích oblasti Ω a v případě Dirichletových podmínek funkci tepelných toků $q(x,t)$. Pro případ řešení přenosů tepla v souřadnicích cylindrických má Fourierova rovnice tvar (7) s proměnnými r a z daných vztahy (53) a (54).

$$r \in (R1;R2) \tag{53}$$

$$z \in (0;L) \tag{54}$$

Pro jednoznačné řešení je nutné zavést počáteční a okrajové podmínky. Vzhledem k obtížnosti analytického řešení diferenciálních rovnic je použito numerického řešení metodou konečných prvků. Pro řešení je použita buďto Ritzova metoda, nebo metoda konečných diferencí anebo metoda Galerkinova. Algoritmus jedné z výše uvedených metod je zpracován v systému ANSYS, který s dostatečnou přesností řeší přenos tepla v případech jeho nestacionárního vedení.

9 Ověření chování modelů zásobníkových systémů

V této části práce definuji modely zásobníkových systémů. Zásobníkový systém představuje kompletní soustavu, sloužící k akumulaci tepelné energie. Sestává ze zásobníkového jádra, zhotoveného ze silikátového materiálu, sloužícího k akumulaci tepelné energie a tepelně izolačního obalu. Izolační obal musí mít takové vlastnosti, aby bezpečně zabránil možnému úniku tepla. Modely zásobníkových systémů tedy charakterizuji jako komplety sestavené z akumulačního jádra a tepelně izolačního obalu.

9.1 Modely zásobníkových systémů

Pro ověření chování zásobníkových systémů v nezatíženém stavu byly navrženy tři varianty řešení, lišící se pouze druhem izolačního obalu. Akumulační jádra u všech variant byla provedena ze stejného žáruvzdorného materiálu. Pro případ ověření systému byl zvolen materiál ŽÁROBET 1750 TAB dodaný firmou Průmyslová keramika, spol. s r. o. Rájec-Jestřebí. Zásobník s vloženým ohřevným systémem byl rovněž v této firmě zhotoven.

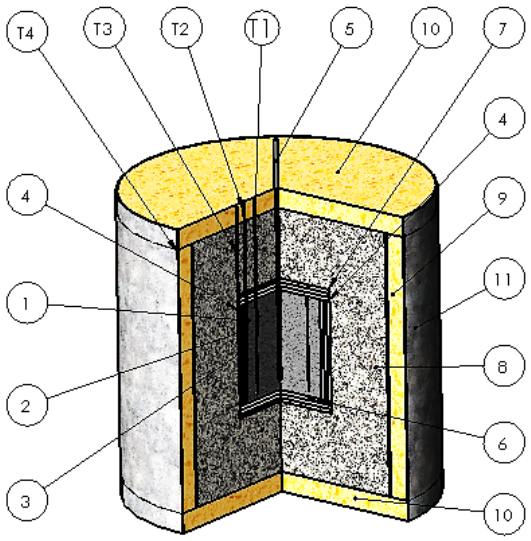
. *První varianta*, schematicky znázorněná na obrázku 25 sestává z následujících částí:

žárobetonového izolovaného jádra verze 1 znázorněného na obrázcích 26 a 27,

izolačního perlitového zásypu tloušťky 340 mm,

izolačního obalu s vlákniny Isover tloušťky 100 mm,

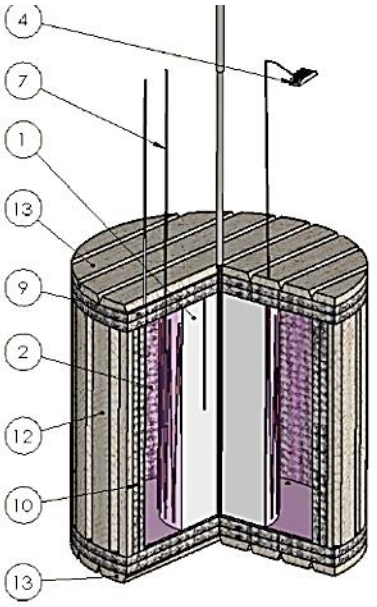
nosného kontejneru z pozinkovaného plechu tloušťky 0,8 mm.



Č. POL	POPIS	KS
1	ŽÁROBETON	1
2	IZOL. OBAL PROMAGLAF	1
3	IZOL. OBAL PROMAGLAF	1
4	IZOL. OBAL SLATTED	1
5	NOSIČ ZÁSOBNÍKU	1
6	IZOLACE PROMAGLAF DNA	4
7	IZOLACE SLATTED H	2
8	PERLITOVÝ ZÁSYP	1
9	IZOLACE VNĚJŠÍ VÁLCOVÁ	1
10	IZOLACE ISOVER VNĚJŠÍ	2
11	PLECHOVÝ OBAL	1

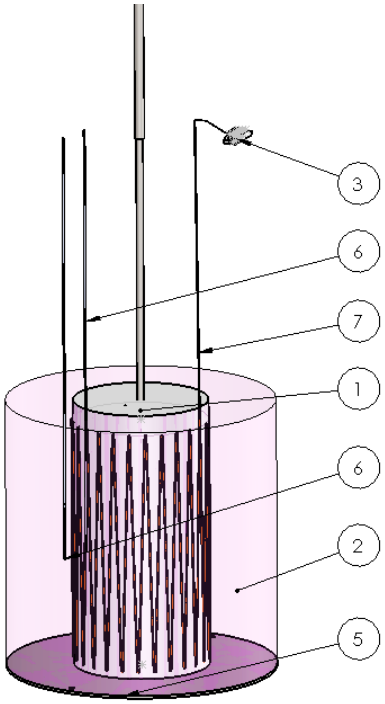
T4 VENKOVNÍ TEPLOTA T3 TEPLOTA OKRAJE IZOLACE
T2 TEPLOTA OKRAJE ZÁSYPU T2 TEPLOTA VNITŘKU ZÁSYPU

Obr. 25. *Zkušební model zásobníkového systému první varianty [autor]*



Č. POL	POPIS	KS
1	BETONOVÉ JÁDRA VNITŘNÍ	1
2	BETONOVÉ JÁDRA VNĚJŠÍ	
4	SVORKOVNICE 4xM4	1
7	TERMOČLÁNKY T1, T2	2
8	IZOLACE SIBRAL	2
10	IZOLACE OBVODU SIBRAL	1
11	IZOLACE OBVODU SIBRAL	1
12	IZOLACE OBVODU SIBRAL	1
13	IZOLACE OVBODU SLATTED	2
14	IZOLACE DNA SLATTED	1

Obr. 26. *Zásobníkové jádro1. varianty se zabudovaným elektrickým ohřevem a izolačním obalem Slatted [autor]*



Č. POL	POPIS	KS
1	VNITŘEK JÁDRA	1
2	VENEK JÁDRA	1
3	SVORKOVNICE 4xM4	1
4	DNO SVAŘENEC	1
5	DNO SVAŘENEC	1
6	TERMOČLÁNKY T1, T2	2
7	DNO SVAŘENEC	1

Obr. 27. *Zásobníkové jádro verze 1 bez izolačního obalu [autor]*

Druhá varianta, schematicky znázorněná na obrázku 28 sestává z následujících částí:

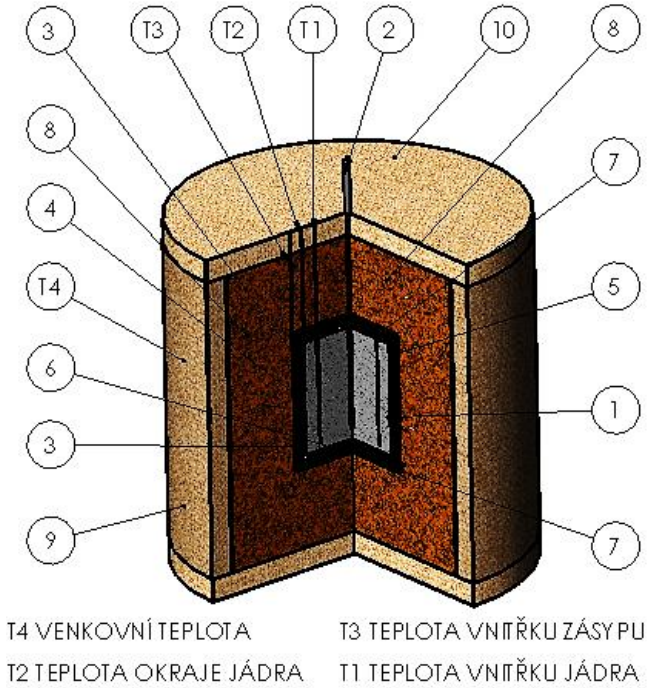
železobetonového izolovaného jádra verze 1 na obrázku 26,

izolačního zásypu Free Flow tloušťky 280 mm,

izolačního obalu z vlákniny Rockwool tloušťky 160 mm,

nosného kontejneru z pozinkovaného plechu tloušťky 0,8 mm.

Obr. 28. *Zkušební model zásobníkového systému druhé varianty [autor]*



Č. POL	POPIS	KS
1	ŽÁROBETON	1
2	NOSIČ ZÁSOBNÍKU	1
3	IZOL. OBAL PROMAGLAF	1
4	IZOL. OBAL PROMAGLAF	1
5	IZOL. OBAL SLATTED	1
6	IZOLACE PROMAGLAF DNA	4
7	IZOLACE SLATTED H	2
8	FREEFLOW ZÁSYP	1
9	IZOLACE ROCKWOOL	1
10	IZOLACE ROCKWOOL	2

Třetí varianta, schematicky znázorněná na obrázku 29 sestává z následujících částí:

železobetonového izolovaného jádra verze 1 na obrázku 26 a 27,

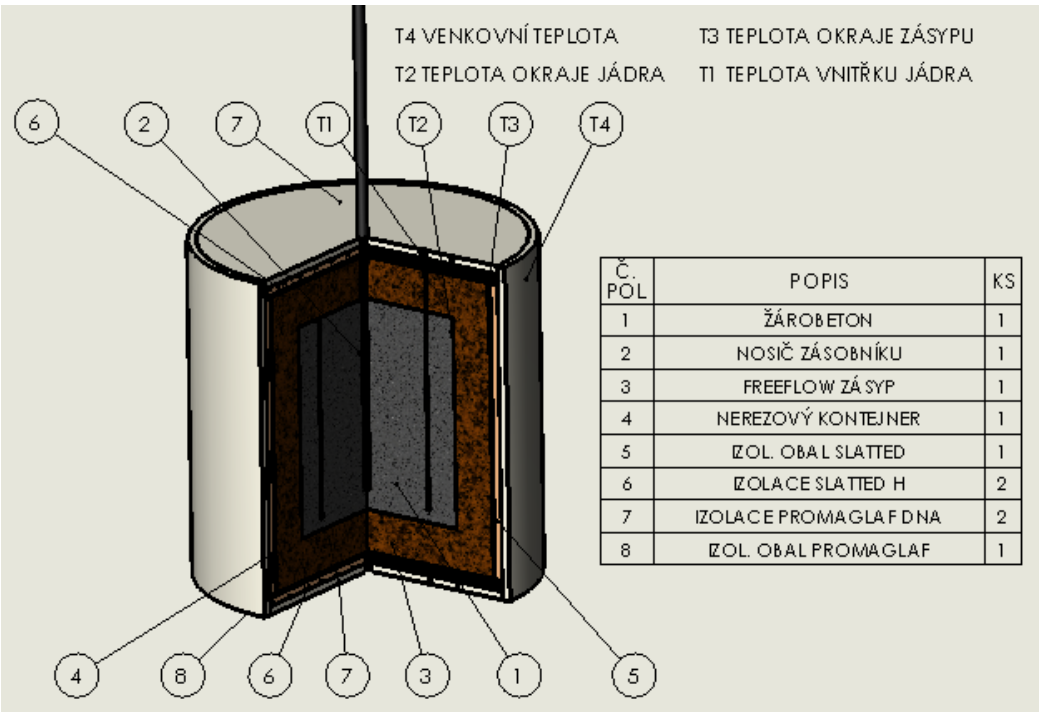
izolačního zásypu Free Flow tloušťky 100 mm,

nosný kontejner z plechu nerez tloušťky2 mm,

izolačního obalu Promaglaftl. 2×20 mm,

izolačního obalu Slattedtl. 20 mm.

Válcové žárobetonové izolované jádro se zabudovaným systémem vnitřního vytápění a dvěma čidly T1 a T2 pro měření teploty. Čidla jsou lokalizovaná tak, že čidlo T1 je umístěno 175 mm a čidlo T2 250 mm od středu jádra. Průměr zásobníku je zvolen 500 mm a jeho výška 500 mm. Volba válcového zásobníku s rovností výšky a průměru byla záměrná, neboť čtvercový válec má nejmenší plochu. Vnitřní vytápění pro simulaci ohřevu zásobníku tvořilo vinutí z kanthalového drátu o průměru 2,15 mm. Ohřev zásobníku je navržen na teplotu 650 °C. Dodávaný výkon do zásobníku činí 3000 W. Tato hodnota je stanovena tak, aby odpovídala výkonu potřebnému pro pokrytí požadované spotřeby tepelné energie pro objekt Bohutice ve výši 37,7 kWh/den a část energie pro výrobu energie elektrické.



Č. POL	POPIS	KS
1	ŽÁROBETON	1
2	NOSIČ ZÁSOBNÍKU	1
3	FREEFLOW ZÁSYP	1
4	NEREZOVÝ KONTEJNER	1
5	IZOL. OBAL SLATTED	1
6	IZOLACE SLATTED H	2
7	IZOLACE PROMAGLAF DNA	2
8	IZOL. OBAL PROMAGLAF	1

Obr. 29. *Zkušební model zásobníkového systému třetí varianty [autor]*

Izolační obal jádra tvoří zevnitř dvě dvacetimilimetrové vrstvy izolace Promaglaf a jedna dvacetimilimetrová vrstva materiálu Slatted. Centrem jádra je zabetonovaná nosná ocelová tyč z materiálu Roxor průměru 20 mm. Uspořádání jádra pro všechny tři varianty zásobníkových systémů je stejné. Varianty se od sebe liší vnějším izolačním obalem. Výpočty modelů zásobníkového jádra jsou zpracovány v MS Office Excel v tabulkách 12 a 13. Rozdíl mezi zásobníkovým jádrem verze 1 izolovaným a zásobníkovým jádrem verze 2 bez izolace spočívá pouze v tom, že toto jádro je ohříváno stejným způsobem jako jádro izolované, ale pouze nemá izolační obal, jak znázorňuje schématické zobrazení na obrázku 28. Zásobníkového jádra druhé verze je použito u třetí varianty zásobníkového systému. Výpočet tohoto jádra je totožný s výpočtem jádra s izolací.

Tabulka 12: Výpočet topného odporového tělesa [autor]

VÝPOČET TOPNÉHO ODPOROVÉHO TĚLESA

Volené hodnoty

Hodnoty $T_H, T_D, K_{T1}, K_{T2}, K_T, \rho_0$, z tabulek

	PARAMETRY				
	Název	označení	vlastnost	hodnota	jedn
	Požadovaný ohřev	$T_{požad}$	teplota ohřevu	700	°C
Měrný el. odpor ρ_0	Materiál tělesa	KANTHAL A	měr.el odp. ρ	1,390	μWm
Teplota z tabulek T_D	800	K_{T1}	tepl. součinitel	1,029	
Teplota z tabulek T_H	1000	K_{T2}	tepl. Součinitel	1,034	
Teplota interp $T_{požad}$	700	K_T	tepl. Součinitel	1,02650	
		a	korekč. činitel ρ	0,000049	K^{-1}
		ρ_K	ρ korigované	1,436315	
		P_T	výkon tělesa	3000	W
		U	napájecí napětí	220	V
		R_T	odpor tělesa	16,1333	Ohm
		R_K	Korigovaný odpor	15,7168	Ohm
	Volený průměr tělesa	D_R	Volený průměr	1,5	mm
	Průřez tělesa	S_R	Průřez	1,767	mm^2
	Proudová hustota	σ_I	Hustota	4	A/mm^2
	Betonový válec-základ	D_{beton}	Průměr	250	mm
	výška	H_{beton}	Výška	500	mm
	podíl výšky závitu	p_Z	procento	95	%

	VYPOČTENÉ HODNOTY				
Nevhodné	~~Délka ohřevného tělesa~~	~~L z tabulek~~	~~vypočtená délka~~	~~10 477,89~~	~~mm~~
Používaná	Délka ohřevného tělesa	$L=R*S/\rho$	vypočtená délka	19 336,93	mm
	Proud tělesem	I_T	proud	14,00	A
	Přívodní Cu drát	S_d	průřez	3,50	mm_2
		d	průměr drátu	2,11	mm
	Betonový válec-ohřev				
	obvod válce	O_{beton}	obvod	785,40	mm
	výška závitu	V_Z	výpočet	475,00	mm
	počet závitů na L zaokrohl	n	počet závitů	21,00	závitů
	rozteč závitů na obvod	t_Z	rozteč	37,00	mm
	roztečný úhel	α_Z	úhel	16,36	°

Tabulka 13: Výpočet objemu a ohřevu modelu zásobníku v Hrušovanech [autor]

ŽÁROBETONOVÝ ZÁSOBNÍK - VÝPOČET				
Fyzikální vlastnosti žárobetonu	Vlastnost	Beton		Jedn.
	Teplota ohřevu	650		°C
	Hustota 20°C	3000		kg/m^3
	Tepelná kapacita c_p	900		$k.J.K^{-1}kg^{-1}$
	Teplota výchozí	20		°C

		Jedn.	Beton		Jedn.
Průměr zásobníku	Hodnoty volené	mm	D_B	500	mm
Průměr ohřevu		mm	D_O	250	
Výška zásobníku		mm	H_B	500	mm
Výška odpor. vinutí		mm	H_{ZB}	450	mm
Hmotnost	Hodnoty vypočtené	kg	m_B	294,375	kg
Teplo ohřevu		J	Q_o	166 911	kJ
Čas ohřevu		hod	τ	15,45	hod
Dodaný výkon		W	P_W	3	kW
Napětí volíme		V	U	220	V
Typ ohř. Drátu		KANTHAL			
Měrný odpor		$\mu\Omega m$	ρ	1,4363148	$\mu\Omega m$
Průměr drátu		mm	d	2,11	mm
Délka drátu		mm	L	19 337,00	mm
Průměr návinu		mm	DO	250	mm
Výška návinu		mm		475	mm
počet závitů			n	21,00	
Rozteč závitů		mm	t_z	37,00	mm

Z výpočtů v *tabulkách 12 a 13* vyplývají následující závěry. Model zásobníkového jádra zvolených rozměrů, (používaný všech uvažovaných variantách) bude výkonem 3 kW vyhřívánna teplotu 650 °C, které teoreticky docílí za 15,5 hodiny. Výpočet předpokládá absolutní izolaci akumulačního jádra. Prakticky ale z jádra uniká tepelná energie, jejíž množství je určeno složením izolačního obalu. Naměřením času, při kterém je zásobník nabit na nastavenou teplotu a srovnáním s časem vypočteným, je možné uvažovat na ztráty tepla, které unikají do vnějšího prostředí. Ztráty tepelné akumulace zásobníku jsou přímo závislé na zvolených izolačních obalech.

Izolační obaly první varianty jsou zvoleny z izolačního perlitového zásypu tloušťky 340 mm, dále izolačního obalu z vláknité rohože Isover tloušťky 100 mm a poslední nosnou vrstvu tvoří kontejner z pozinkovaného plechu tloušťky 0,8 mm. Hodnoty teplot v kontejnerovém obalu se měří teplotním čidlem PT1000 označeným T3 na vnitřním průměru zásypu patrné z obrázku 26 a čidlem stejného typu na venkovní části plechového kontejneru. Měřená data jsou registrována přístrojem AHLBORN. Časové intervaly měření jsou po 5 sekundách. Měří se hodnoty na všech čtyřech čidlech v zásobníku a na okraji izolačního obalu, dokud hodnoty teplota na čidle T1 nedocílí hodnoty 650 °C. Poté je přívod energie vypnut. Měření pokračuje tak dlouho, dokud teplota při chladnoucím zásobníku na stejném čidle nedocílí hodnoty cca 280 °C.

Výše této teploty byla stanovena jako kritická pro ohřev přehřáté páry, jejíž hodnota může být horní hranicí pro expanzi ve vysokotlakém stupni parní turbíny. Kritériem výběru jsou opět výše dob ohřevu a chladnutí systému.

Izolační obaly druhé varianty jsou navrženy z izolačního zásypu Free Flow tloušťky 280 mm, dále izolačního obalu z vlákniny Rockwool tloušťky 160 mm a poslední nosná vrstva je opět tvořena kontejnerem z pozinkovaného plechu tloušťky 0,8 mm. Akumulační jádro v této variantě je používáno stejné jako u varianty první. Tvar těchto zásobníkových systémů je válcový o rozměrech průměr 1500 mm a výška 1500 mm. Měřící teplotní čidla typu PT1000 jsou umístěna stejným způsobem jako u varianty první. Systém je zobrazen na obrázku 28.

V modelu dle třetí varianty zásobníkového systému je využito neizolovaného akumulačního jádra, které je obsypáno 100 mm vrstvou materiálu Free Flow. Jádro včetně zásypu je uloženo v nerezovém kontejneru, vyrobeném z plechu tloušťky 2 mm. Kontejner je obalen 40 mm vrstvou izolačního materiálu Promaglaf a 20 mm vrstvou izolačního materiálu Slatted. Teplotní čidla jsou v systému rozmístěna stejně jako v předchozích případech, ale vzhledem k velikosti třetí varianty jsou vzdálenosti čidel v izolačním obalu blíže středu. Tvar zásobníku třetí varianty je opět válcový. Jeho průměr i výška dosahují hodnot 794 mm. Systém je zobrazen na obrázku 29. Časové hodnoty nabíjení a vybíjení budou různé u všech tří verzí zásobníkových systémů. Porovnáním teplotních charakteristik jednotlivých variant zásobníkových systémů je vybrána ta varianta izolačního obalu, která má největší rychlost docílení požadované teploty a největší setrvačnost na teplotách chladnutí. Kritériem výběru pro první přiblížení volby složení zásobníkového systému jsou tedy doby jejich náběhu a chladnutí.

9.2 Testovací pracoviště pro sledování tepelného zatížení zásobníku.

Pro testování chování zásobníkových systémů první všech navržených variant bylo zvoleno prostředí firmy Alumistr, spol. s r.o. v Hrušovanech. Sledování si vyžádalo vytvoření nosné konstrukce, která byla schopna udržet zatížení o hmotnosti 1300 kg. Nosná konstrukce sestávala z podpěrných stojanů se zaručenou statickou stabilitou, na kterých bylo ukotveno podélné ráhno z profilu TR OBD 100×200 mm. Tetovaný objekt byl zavěšen uprostřed ráhna. Jádro zásobníkových systémů bylo vyrobeno ze stejného materiálu pro všechny tři testované varianty zásobníkových systémů. Výroba tří jader byla zhotovena ve firmě Průmyslová keramika spol. s r.o. Rájec-Jestřebí podle konstrukčního návrhu zpracovaného na stavební fakultě v Ústavu technologie stavebních hmot v Brně. Zásobníkové jádro bez izolačního obalu, znázorněného na obrázku 27, bylo navrženo s následujícími rozměry:

průměr jádra 500 mm, výška jádra 500 mm.

Uvnitř jádra ve vzdálenosti 180 mm bylo na daném průměru provedeno topné vinutí. Do tohoto místa bylo umístěno čidlo měřící okamžitou teplotu modelu. Jádra byla obalena příslušnými izolačními vrstvami, charakterizujícími danou variantu testování. Vedení termočlánků a vodičů přívodu topného výkonu byly taženy podél ráhna a vyvedeny do měřícího víceúčelového přístroje AHLBORN. Nabíjení energií bylo sledováno měřící rozbočkou, na které byl zaznamenáván a uložen okamžitý proud v ampérech, napětí ve voltech a příkon ve wathodinách. Zařízení bylo umístěno ve venkovní garáži, kde teplota místnosti přibližně odpovídala teplotě venkovní. Měření bylo zahajováno v 6 hod ráno a trvalo přibližně 50 až 80 hodin. Napájení topného drátu se vypínalo po dosažení teploty cca 650 °C. Data ze všech zabudovaných čidel snímal přístroj AHLBORN. Získaná data byla přenesena do počítače a transformovaná do datového souboru ve formátu xlsx. V software Excel byly pro jednotlivé soubory z různých variant zásobníkových systému zpracovány do grafické podoby. Výsledky testování teplotních průběhů pro jednotlivé varianty jsou uvedeny v následujících kapitolách.

9.2.1 Zkoušky tepelného zatížení a ochlazování zásobníku první varianty

Vzorek dle první varianty byl výkonově zatížen ohřevem na teplotu 650 °C. Data snímaná přístrojem AHLBORN v textové podobě, byla transformována do excelovského formátu a graficky a vyhodnocena na obrázku 30. Měření bylo spuštěno 23. 12. 2013 ve 3,00 hod ráno. Počáteční okolní teplota byla naměřena ve výši 12 °C. Maximální teplotu na úrovni 620 °C zásobník docílil dne 23. 12. 2013 ve 13 hod 53 min. Náběh na uvedenou teplotu činil 16 hod 53 min (16,88 hod). Tato doba je větší než teoreticky vypočtená z dodávaného elektrického výkonu. Disproporce výpočtu ukazuje na únik tepla izolačním obalem. Teoreticky vypočítaný čas ohřevu na teplotu 620 °C činí 15,45 hod (*viz tabulka 13 řádek Čas ohřevu*). Ztrátu tepla je možné přibližně odhadnou následujícím výpočtem. Dodávaný topný výkon 3 kW běžel do ztráty dobu

$$t_{ztraty} = 16{,}88 - 15{,}45 = 1{,}43 \text{ hodin} \tag{61}$$

Za tuto dobu se ztratila hodnota tepla ve výši $Q_{ztráty}$

$$Q_{ztraty} = P\ t_{ztraty} = 3 \times 1{,}43 = 4{,}29 \text{ kWh} \tag{62}'$$

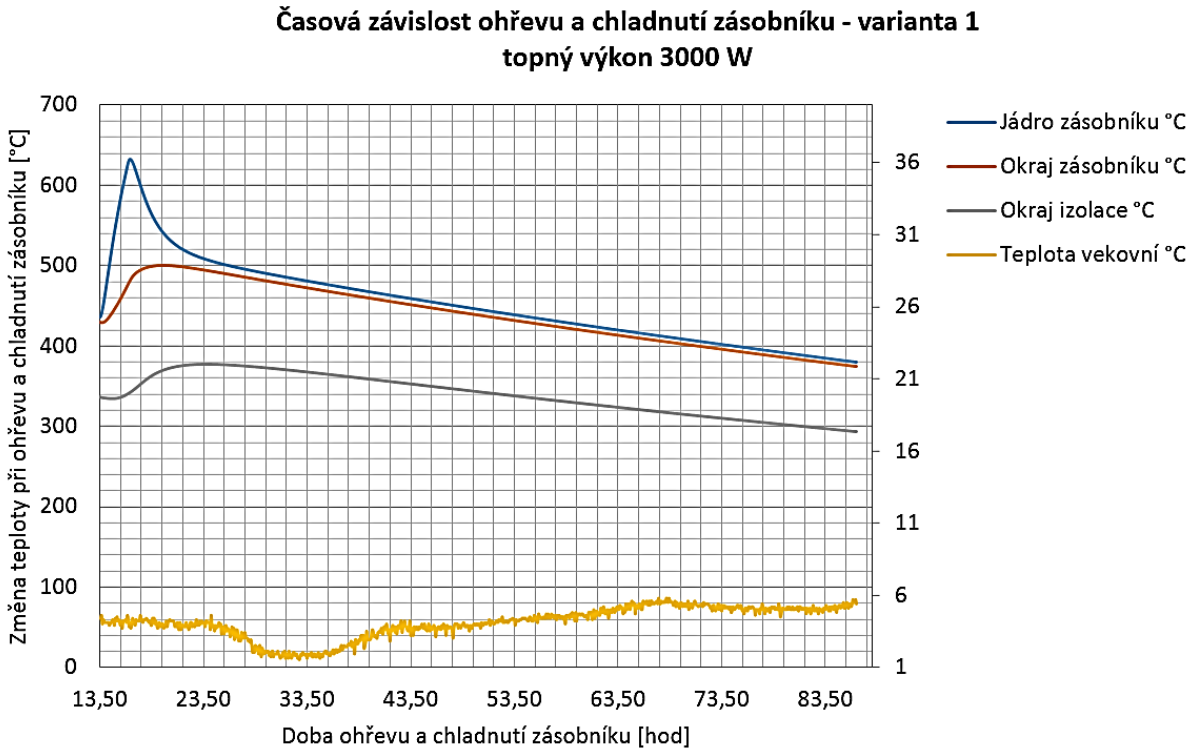
Celkový tepelný výkon spotřebovaný pro ohřátí zásobníku na teplotu 620 °C představuje část ve výši:

$$Q_{celk} = P\ t_{celk} = 3 \times 16{,}88 = 50{,}64 \text{ kWh} \tag{63}$$

Tepelné ztráty izolací v případě zásobníkového systému první varianty představují hodnotu:

$$Q_{proc} = \frac{Q_{ztraty} \times 100}{Q_{celk}} = \frac{4{,}29 \times 100}{50{,}64} = 8{,}47\ \% \tag{64}$$

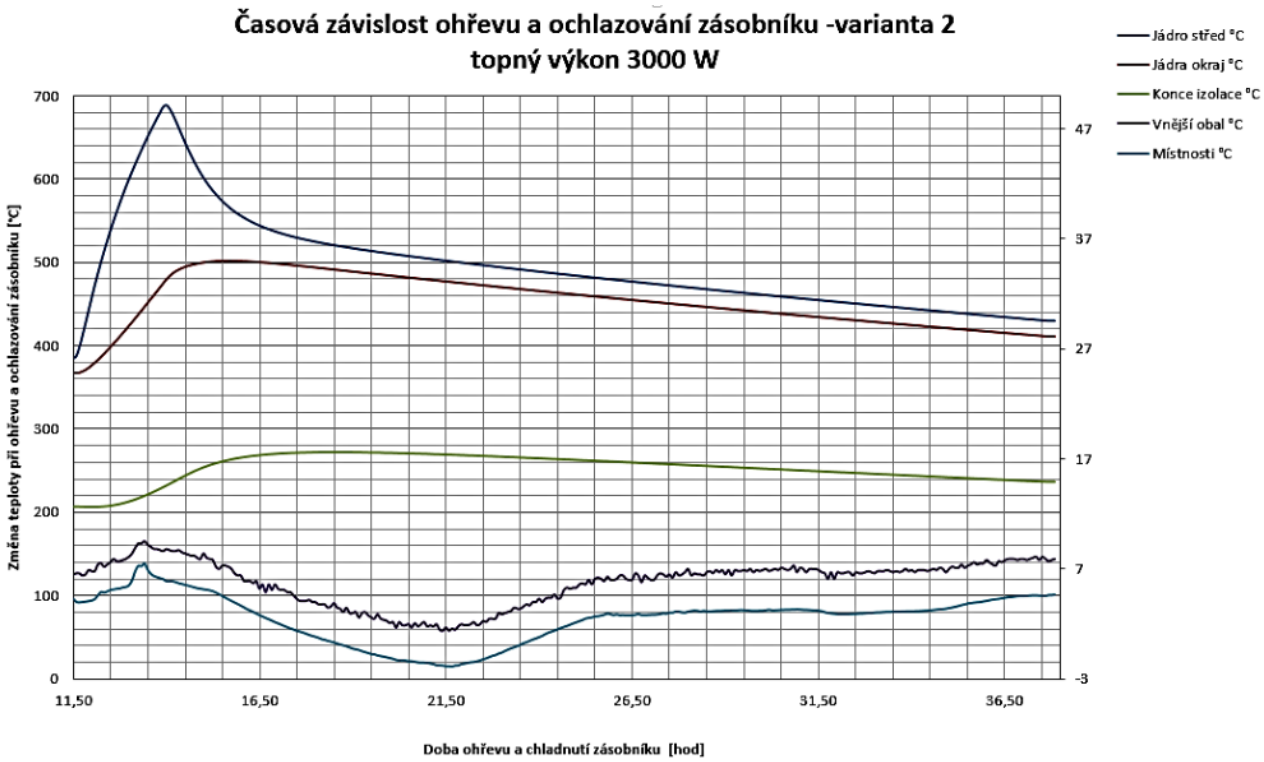
Tato procentuální částka může sloužit jako kritérium pro optimální volbu jedné z variant zásobníkových systémů. Vzhledem k tomu, že každá z variant se liší pouze izolačním obalem, pak toto kritérium je měřítkem jeho kvality.



Obr. 30. *Časová závislost změny teploty při ohřevu a chladnutí systému dle první varianty [autor]*

9.2.2 Zkoušky tepelného zatížení a ochlazování zásobníku druhé varianty

Vzorek dle této varianty byl výkonově zatížen ohřevem na teplotu 680 °C. Data snímaná přístrojem AHLBORN v textové podobě, byla transformována do formátu xlsx a graficky vyhodnocena na obrázku 31. Měření bylo spuštěno 15. 1. 2014 v 06,00 hod ráno. Počáteční okolní teplota byla naměřena 6,5 °C. Maximální teploty 685 °C zásobník docílil dne 15. 2. 2014 ve 14 hod 30 min. Doba náběhu na uvedenou teplotu činila 14 hod 53 min (16,93 hod). Tato doba je opět větší než doba teoreticky vypočítaná (viz tabulka 12) z dodávaného elektrického výkonu, a může být měřítkem úniku tepla zabudovaným izolačním obalem.



Obr. 31. *Časová závislost změny teploty při ohřevu a chladnutí systému dle druhé varianty[autor]*

Ztrátu tepla je možné rovněž jako v předchozím případě přibližně odhadnou následujícím výpočtem. Dodávaný topný výkon 3 kW vytopil zásobník na teplotu 688 °C. Teoreticky platí:

$$\tau_2 = \frac{685 \times 15{,}45}{650} = 16{,}28\ hod \tag{65}$$

tedy běžel do ztráty dobu $t_{ztráty}$

$$t_{ztráty} = 16{,}93 - 16{,}28 = 0{,}65 \text{ hodin} \tag{66}$$

Za tuto dobu se izolací ztratila hodnota tepla ve výši $Q_{ztráty}$

$$Q_{ztráty} = P \times t_{ztraty} = 3.0{,}65 = 1{,}95 \text{ kWh} \tag{67}$$

Celkový tepelný výkon spotřebovaný pro ohřátí zásobníku na teplotu 688 °C představuje část ve výši

$$Q_{celk} = P \times t_{celk} = 3.16{,}35 = 49{,}05 \text{ kWh} \tag{68}$$

Tepelné ztráty izolací v případě zásobníkového systému druhé varianty představují

$$Q_{proc} = \frac{Q_{ztraty} \times 100}{Q_{celk}} = \frac{1{,}95 \times 100}{49{,}05} = 3{,}97\ \% \tag{69}$$

Z výsledků je zřejmé, že zásobníkový systém druhé varianty s žárobetonovým izolačním jádrem ze stejného materiálu jako ve variantě první má lepší izolační vlastnosti. Izolaci ovlivňuje

izolační zásyp z materiálu Free Flow, který je vyroben na bázi kyseliny křemičité, charakterizované velmi nízkou hodnotu tepelné vodivosti λ. Díky tomuto zásypovému obalu je únik tepla ze zásobníkového systému druhé varianty menší vzhledem k systému varianty první. O kvalitě izolačního obalu rovněž vypovídá teplotní rozdíl mezi středem a okrajem jádra při ochlazování, dále rozdíl teplot v izolačním zásypovém prostoru (cca 160 °C) a nakonec i doba ochlazování.

9.2.3 Zkoušky tepelného zatížení a ochlazování zásobníku třetí varianty

Zásobníkový systém třetí varianty byl zvolen jako systém s menšími objemy izolačních materiálů. Zde byla ověřována vlastnost tloušťky izolačních vrstev. Složení izolačních vrstev bylo voleno téměř shodně s vrstvami použitými ve druhé variantě modelu zásobníkových systémů. Vrstva materiálu Free Flow byla přibližně 52 % vzhledem k vrstvě ze stejného izolačního materiálu jako v případě druhé varianty. Rozdíl spočíval pouze v tom, že akumulační jádro bylo tímto zásypem obaleno a jako celek uzavřeno v kontejneru z ocelového nerezového plechu tloušťky 3 mm. Venkovní uzávěr systému byl vytvořen ze dvacetimilimetrových vrstev izolačních tkanin Slatted a Promaglaf. Vliv složení izolačního obalu se projevil mírným zhoršením izolačního odporu, tak je patrné z výsledků zkoušky.

Měření bylo spuštěno 1. 6. 2014 v 06,00 hod ráno. Počáteční okolní teplota činila 13 C. Maximální teplotu 688 °C docílil zásobník dne 15. 2. 2014 v 15 hod 30 min. Doba náběhu na uvedenou teplotu činila 17 hod (16,93 hod). Tato doba je opět větší než teoreticky vypočtená z dodávaného elektrického výkonu. Zvýšení doby ohřevu je opět způsobeno prostupem tepla izolačním obalem. Tepelné ztráty je možné přibližně odhadnou následujícím výpočtem. Dodávaný topný výkon 3 kW ohřál zásobník na teplotu 610 °C teoreticky za dobu τ_2, danou následujícím vztahem:

$$\tau_2 = \frac{610 \times 15{,}45}{650} = 14{,}49 \text{ hod} \tag{70}$$

tedy běžel do ztráty dobu:

$$t_{ztraty} = 16{,}93 - 14{,}49 = 2{,}44 \text{ hodin} \tag{71}$$

Za tuto dobu se izolací ztratila hodnota tepla ve výši:

$$Q_{ztraty} = P \times t_{ztraty} = 3 \times 2{,}44 = 7{,}32 \text{ kWh} \tag{72}$$

Celkový tepelný výkon spotřebovaný pro ohřátí zásobníku na teplotu 688 °C představuje část ve výši:

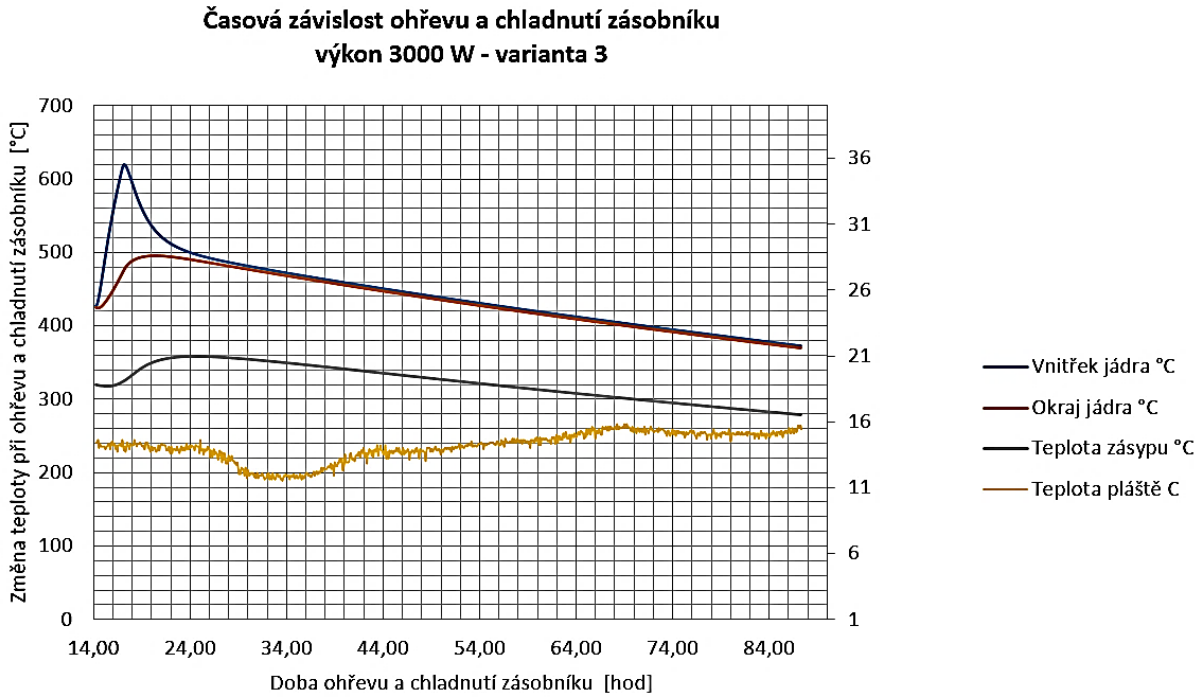
$$Q_{celk} = P \times t_{celk} = 3 \times 16{,}35 = 49{,}05 \text{ kWh} \tag{73}$$

Tepelné ztráty izolací v případě zásobníkového systému třetí varianty představují hodnotu:

$$Q_{proc} = \frac{Q_{ztraty} \times 100}{Q_{celk}} = \frac{7{,}32 \times 100}{49{,}05} = 14{,}92\ \% \tag{74}$$

Závislost průběhu teplot při ohřevu a chladnutí zásobníku třetí varianty je patrná z diagramu na obrázku 32. Tento typ zásobníkového systému prokazatelně vyjádřil vliv slabších vrstev izolačních obalů, i když byl použit kvalitní zásypový materiál (tloušťka vrstvy cca 50 % vzhledem ke druhé variantě). Ze všech průběhů je patrný rozdíl teplot měřených v bezprostřední blízkosti tepelného zdroje, kterým je zabudovaný kanthalový drát a okrajem zásobníkového jádra. Rozdíl je zapříčiněn relativně malou teplenou vodivostí žáruvzdorných betonů vzhledem k vodivostem vody nebo kovů.

Ze všech prověřovaných variantních typů zásobníkových systémů je prokazatelně nejlepší varianta zásobníků využívající v dostatečné tloušťce vrstvy kvalitní zásypový materiál na bázi oxidu křemičitého, vápenatého a hořečnatého. Tomuto výběrovému kriteriu odpovídá provedení izolačního obalu testovaného ve druhé variantě. Tepelné ztráty izolačním obalem v této verzi činí 3,74 %, tedy minimální hodnotu.



Obr. 32. *Časová závislost změny teploty při ohřevu a chladnutí systému dle třetí varianty [autor]*

Další část práce je zaměřena na dynamické modelování odvodem tepla zatíženého zásobníkového systému. V případě tvorby zatíženého výpočetního modelu je nutné počítat s jeho reálnými rozměry, s úměrně rozloženým izolačním systémem vzhledem k původně

stanoveným izolačním obalům a jejich geometrii. Vstupními parametry tohoto modelu jsou údaje energie, kterou je možné během ročního období získat ze slunečního záření a jejich účinek pro zajištění tepelné pohody bydlení.

10 Numerické modelování dynamického chování zásobníku v prostředí výpočetního systému ANSYS

Numerické modelování dynamického chování zásobníku nám nejblíže 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 byla geometricky a materiálově zadána do výpočetního systému, který při daném externím tepelném výkonu řešil metodou konečných prvků nestacionární procesy ohřevu a chladnutí v závislosti na dodávce a odběru tepelné energie.

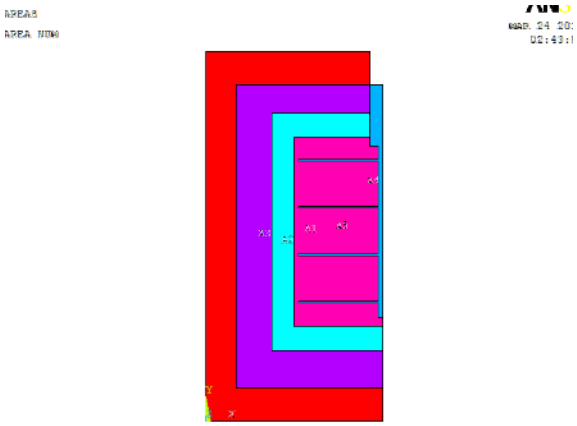
10.1 Řešené součásti a vnitřní vazby tepelného systému

Výpočetní prostředí softwarového systému ANSYS řeší v prvé řadě problematiku nezatíženého 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:

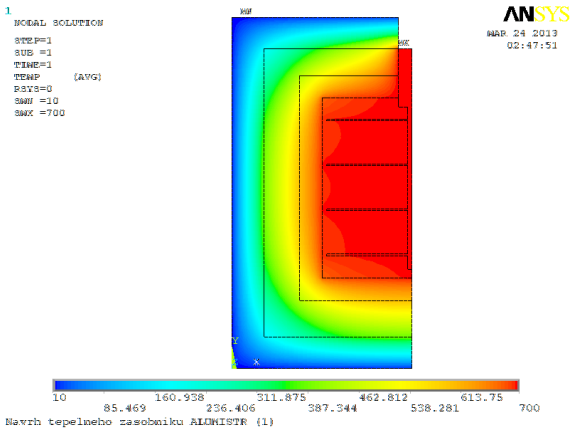
- akumulační schopnost tepelného zásobníku,
- ztrátový tepelný tok / tepelný odpor izolačního opláštění zásobníku,
- dimenzování vnitřního měděného rámu,
- dimenzování pohltivého povrchu pro absorpci solární energie ze světlovodů,
- ověření pohotovosti pro čerpání potřebného tepelného výkonu parní turbínou,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

V rámci předběžných výpočtů energetické bilance válcového tepelného akumulačního zásobníku jsme provedli ověření rozložení teplotních polí při nabíjení vybíjení zásobníku. Výsledky simulací jsou zobrazeny na obrázcích 33 až 39. Na obrázku 33 je dokumentována skladba kompletního zásobníkového systému. V zásobníkovém jádru je zabudován tepelný převodník, sloužící jednak k přejímání externí tepelné energie a jednak k rovnoměrnému rozvodu tepla po celém objemu jádra. V praxi je tento zásobník realizován spirálně šroubovitou nerezovou trubicí, kterou proudí voda, jež se podél cesty zásobníkem mění v páru. Na obrázcích 34 (ve 2D) *a* 37 (ve 3D) jsou znázorněna teplotní pole plně nabitého zásobníku.

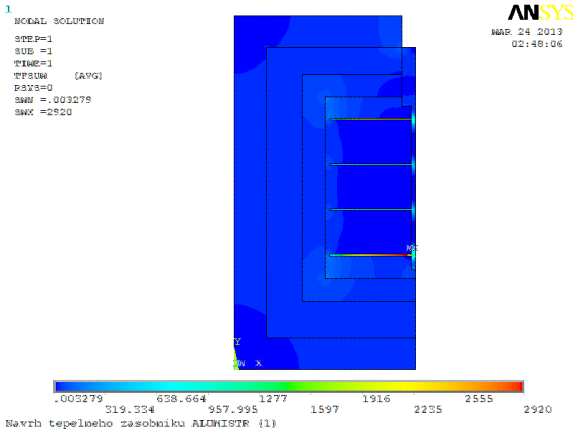
Válcový tepelný zásobník s tepelně-izolačním pláštěm

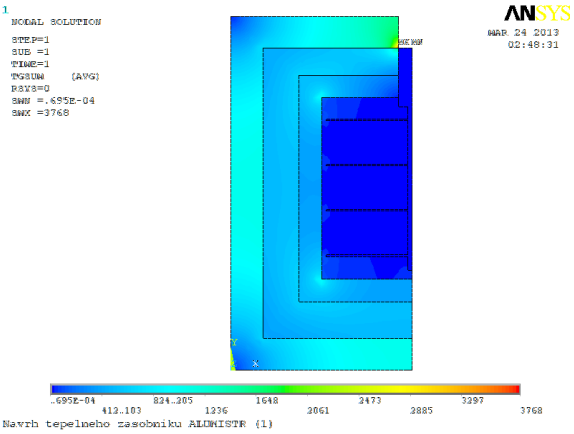


Obr. 33. *Skladba modelu zásobníku sestává z tepelně izolačního pláště (na modelu červený), z perlitového izolačního zásypu (modrá barva), obalového nátěru tělesa zásobníku (bleděmodrá barva), žárobetonového tělesa akumulátoru (fialová barva) a měděného výměníku tepla (vnitřní stromeček).*

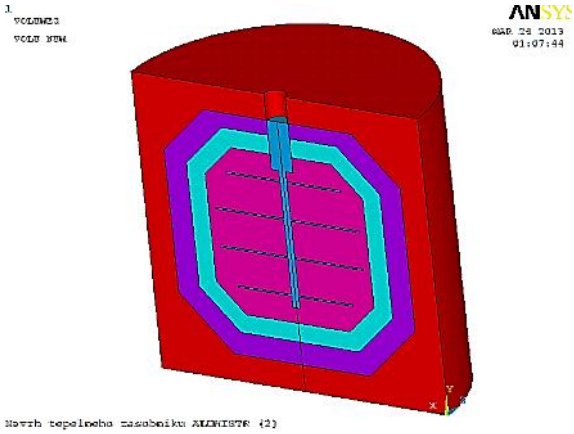


Obr. 34. *Teplotní pole nabitého zásobníku. Ze situace na obrázku je patrné rozložení teplotního pole v rámci dvourozměrného modelu. Teplota klesá od střední části k okrajům.*

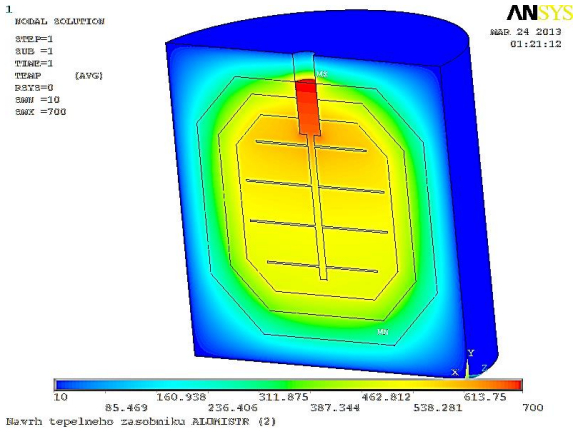




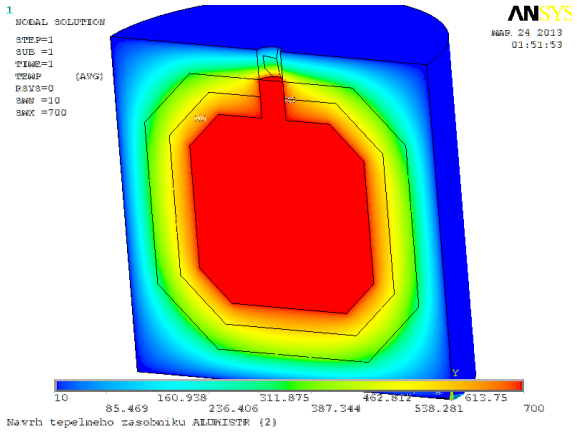
Obr. 35. *Rozložení tepelných toků ve stavu nabitého a vybitého zásobníku (Stacionární proces)*



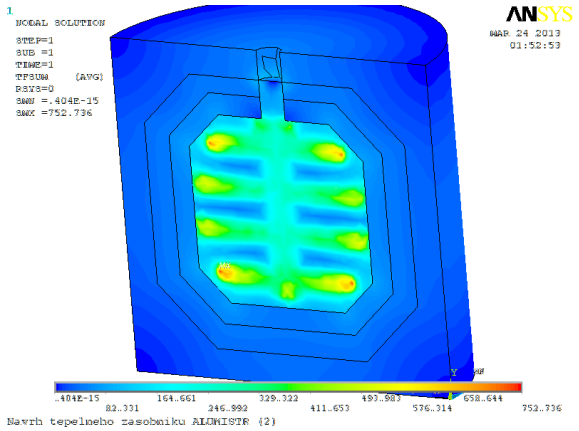
Obr. 36. *Schéma řezu zásobníkem*



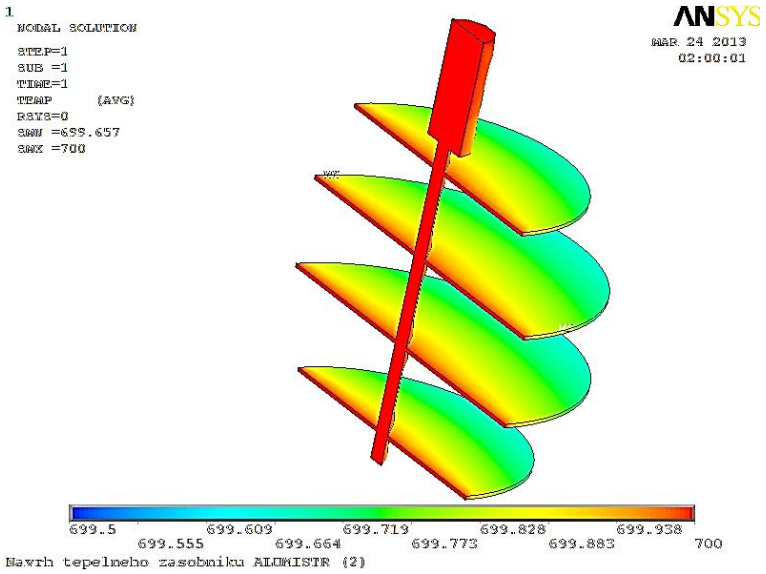
Obr. 36a Teplotní stav na začátku nabíjení zásobníku



Obr. 37. *Teplotní stav plně nabitého zásobníku*



Obr. 37a Vyobrazení tepelných toků při chladnutí zásobníku



Obr. 38. *Teplotní stav tepelného převodníku při nabíjení zásobníku*

Obrázek *35* demonstruje model rozložení tepelných toků ve stavu nabitého a vybitého zásobníku, v tomto případě byl výpočet proveden na dvourozměrném modelu. Pro modelování skutečných procesů a rozložení teplotního gradientu byla vypracována simulace rozložení teplot třírozměrného modelu. Výsledky výpočtů v různých stavech tepelného zásobníku jsou uvedeny na obrázcích 36 až 38. Obrázek 36 znázorňuje prázdný vybitý zásobník, neobsahující žádné naakumulované teplo. Obrázek 36 a znázorňuje začátek procesu nabíjení zásobníku. Výrazně červená barva signalizuje největší ohřev na vstupu tepelného převodníku. Za určitou dobu je působením externí energie zásobníkové jádro plně nabito.

Nabití zásobníku bez odběru energie je počítačově sytou červenou barvou patrné z obrázku 37. Z tohoto obrázku je patrný vliv izolačního obalu, který při simulaci je zbarven modře. Sytá červená barva popisuje teplotu cca 700 °C. Modrá barva znamená teplotu cca 10 °C.

Obrázek *37 a* zobrazuje simulaci chladnoucího zásobníku. Z obrázku je patrná převaha modré barvy izolačního obalu a barevné efekty tvořené bleděmodrou barvou zásobníkového jádra a

zelenou až žlutou barvou tepelného převodníku. Obrázek 38 znázorňuje řez fiktivním převodníkem tepla zalitého do žárobetonového jádra. Ve výpočtech jsou použity předběžné návrhy materiálů, které mohou být použity pro konstrukci zásobníku. Pro simulační procesy bylo pro zásobníkové jádro použito materiálů ŽÁROBET 1750-TAB, který je produktem firmy Průmyslová keramika Rájec-Jestřebí. Tato firma nabízí pro účely aplikací konstrukce akumulačního jádra materiál hutnější, definovaný jako hutný žáruvzdorný beton, se středním obsahem hlinitanového cementu a surovinovou magnetitivou bází. Klasifikační teplota tohoto materiálu představuje výši 1200 °C, což je dostačující pro použití při aplikacích akumulačních jader. Chování dalších druhů žáruvzdorných produktů firmy Průmyslová keramika Rájec-Jestřebí je z hlediska jejich tepelných fyzikálních vlastností 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 ověřované ve firmě Alumistr spol. s r.o. v Hrušovanech. Hodnoty tepelné a teplotní vodivosti pro materiál ŽÁROBET 1750-TAB byly použity z tabulky 11.

11 Měření tepelných charakteristik žárupevných materiálů

Žáruvzdorné materiály používané pro aplikaci konstrukcí akumulátorových jader senzibilních zásobníků musí splňovat požadavky, definované v kapitole 3 této dizertační práce. Cílem této části práce je ověření tepelných charakteristik některých vybraných materiálů v závislosti na zvýšených teplotách metodou topného drátu s použití techniky upraveného přístupu.

11.1 Upravený přístup metody topného drátu

Upravený přístup metody měření teplených charakteristik metodou topného drátu [30] 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 měřícího pracoviště. Výpočetní metoda využívá srovnání analytického řešení Fourierovy rovnice nestacionárního vedení tepla srovnávaného metodou nejmenších čtverců s výsledky časových vzorků teplot získaných měřením. Systém je vyhodnocován programem WIRD [36] [41] v prostředí softwarového balíku MATLAB. 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 nepřímo prostřednictvím měnících se teplot v prostoru vzorku, které je způsobeno šířením tepelné vlny vyvolané výkonem průchodem proudu topným drátem. Pro rozložení teploty ve vzorku je použitelný klasický analytický vzorec (8), kde výraz exponenciálního integrálu Ei je vyjádřen vztahem (9). Podle (8) je možné odvodit (10). Ukazuje se, že teplota T vyhovuje evoluční parciální rovnici vedení tepla bez vnitřních zdrojů pro osově souměrnou úlohu, opatřená počáteční podmínkou teploty v čase t_0, a okrajovými podmínkami Dirichletova a Neumannova typu. Odvozením této rovnice se zabývá [25] v kap. 9 nebo v [5] kap. 3. Po rozvoji exponenciálního integrálu do nekonečné řady, vynecháním Euler-Mascheroniho konstanty, dostáváme ze vztahu (22) limitním přechodem r blížící se k 0 zprava vztah (23) a dosazením za β (24) a β_a (25) vztah pro T v analytickém tvaru vyjádřeným závislostí (26). Předpokládejme, že nyní máme experimentálně naměřené hodnoty T^* teplot na množině $R_+ \times R_+$. Zaveďme funkci $F(\lambda,\alpha)$ dle (27). V této funkci se vyskytuje skalární součin v Lebesgeuově prostoru funkcí integrovatelných ve druhé mocnině na množině kladných reálných čísel. Minimu této funkce pak odpovídají hledané hodnoty λ a α. Realizace této metodiky řešení evolučních rovnic je podrobně popsána ve stati 6.4 této práce. Zde index a u změřené teploty identifikuje její vyčíslení v čase t_a. Odtud je již možné vypočítat hodnotu λ. Předpokládejme nyní, že hodláme vypočítat hodnotu α z druhého nezávislého experimentu. Tato se liší pouze o měření

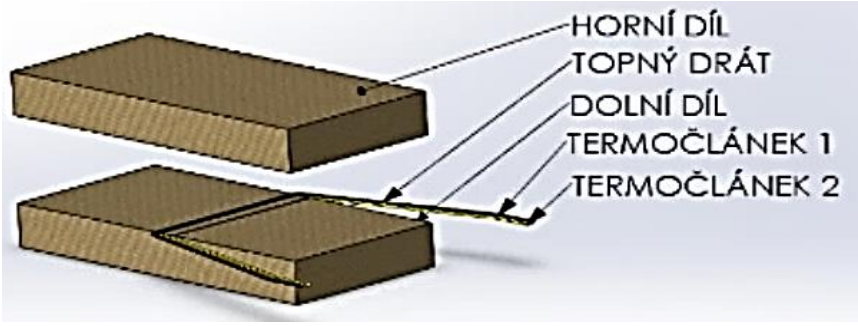
na vzdálenosti d. Pak namísto původní hodnoty α můžeme v rovnici (27), (32), (33) uvažovat ve funkci F novou proměnnou $b = \frac{d^2}{(4\alpha)}$. Pak výpočtová rovnice dostává tvar (34). Iteračním postupem je možné vyhodnotit minimum funkce (27) postupem popsaným v 6.4. Hodnoty tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity jsou na základě této metodiky zpracovány programem WIRD v softwarovém balíku MATLAB 7.

11.2 Konfigurace měřícího pracoviště.

Měřící pracoviště bylo lokalizováno na stavební fakultě pod záštitou katedry materiálového inženýrství v Brně. Měření probíhalo v upravené laboratorní peci o výkonu 3 kW. Rozměry komory topné pece představovaly následující hodnoty:

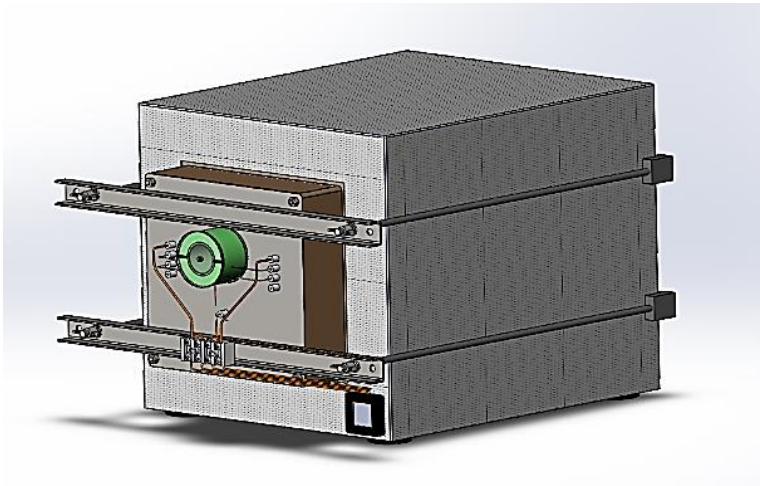
šířka komory	200 mm,
výška komory	250 mm,
hloubka komory	350 mm.

V důsledku těchto rozměrů bylo nutné používat vzorky o maximálním rozměru žárobetonové tvarovky 230 x 115 x 70 mm. Do komory pece byl vkládán upravený vzorek, dle obrázku 39, ustavený na měřícím 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. Přípravek se s uloženým vzorkem a zabudovaným měřícím a topícím systémem vkládal do pece po odmontování originálních dveří. Konstrukce přípravku byla k peci uchycena prostřednictvím čtyř šroubových tyčí M8, opřených jejich pevnou částí o zadní stěnu komory. Čelo měřícího přípravku bylo přitlačeno k přední stěně pece dvěma přítlačnými lištami prostřednictvím šroubových tyčí a uzavřeno křídlovými maticemi. Konstrukční provedení měřícího přípravku je zobrazeno na obrázku 41.



Obr. 39. *Upravený vzorek s vloženým topným drátem a termočlánky[autor]*

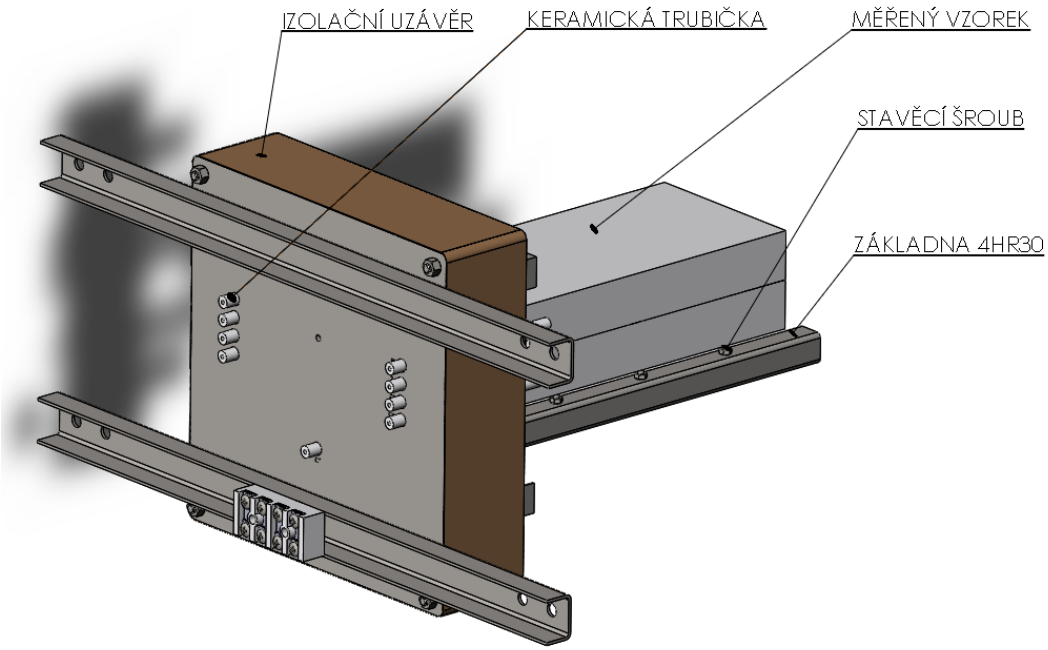
Žárobetonová tvarovka 250×125×70 mm je rozříznutá na dvě poloviny rozměrů 250×115×35 mm, (na obrázku 39 jsou popsány jako horní a dolní díl měřeného vzorku), mezi něž jsou vloženy topný drát a měřící termočlánky. Topný drát je proveden z kanthalového pásku rozměru 0,7×0,1 mm délky 115 mm a je uložen příčně do tvarovky ve vzdálenosti 125 mm od jejího čelního okraje. Měřící systém je tvořen následujícími komponentami. V prvé řadě obsahuje upravenou laboratorní pec znázorněnou na obrázku 40. Úprava pece spočívá ve vyjmutí původních dvířek a jejich nahrazení ustavujícím přípravkem, který realizuje izolační uzávěr. Přípravek sestává z izolačního uzávěru pece tloušťky 50 mm, vyloženého vrstvou sibralu.



Obr. 40. *Úprava pece 3000 W pro měření metodou topného drátu [autor]*

Čelem uzávěru procházejí do prostoru pece keramické trubičky, sloužící k vyvedení vodičů a vývodů z termočlánků, tak aby eliminovaly jejich vzájemný dotek. K zadní části izolačního uzávěru je připevněna základna, sloužící k uložení měřeného vzorku. Základna je tvořena dvěma profily L30. Z důvodu minimálního kontaktu měřeného vzorku se základnou jsou na přírubách profilu zabudovány aretační stavěcí šrouby, zajišťující nastavení jeho vertikálního

usazení. Keramickými trubičkami (devět vývodů) ukotvenými v izolačním uzávěru je možné protáhnout až čtyři od sebe odizolované vodiče. V případě měření je jich využito sedm a to pro dva termočlánky (šest trubiček), měřících teplotu v lokalitách 3 a 15 mm od topného drátu, jedna pro měření teploty okolního prostředí vzorku a dvě pro přívody napájení topného drátu. Provedení měřícího přípravku je patrné z obrázku 41



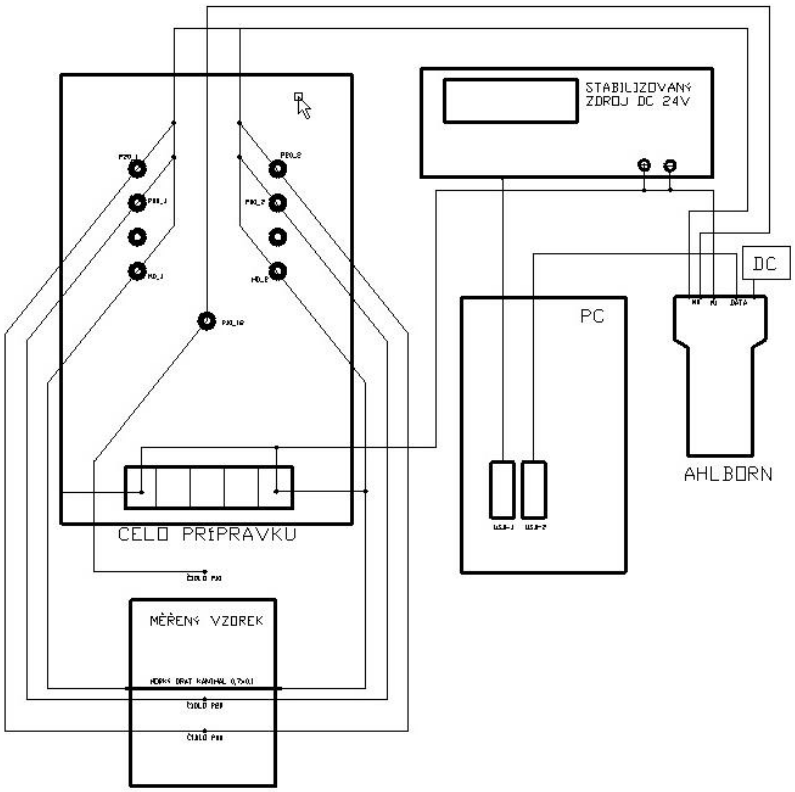
Obr. 41. *Model měřícího přípravku [autor]*

Další komponentou měřícího systému je stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí. Parametry zdroje jsou následující:

maximální stejnosměrné napětí	24 V,
maximální výkon zdroje	100 W.

Stabilizovaný zdroj v systému slouží k dodávce stejnosměrného výkonu do topného drátu, který je veličinou vyvolávající tepelný proces, šířící se v čase hmotou zkoumaného vzorku. Tepelný efekt je nepřímo vyhodnocován změnou teplot v jistých lokacích vzorku měřicím přístrojem. Schéma zapojení jednotlivých komponent měřícího systému aplikovaného pro měření závislosti tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě je znázorněno na obrázku 42. Měřící systém, sloužící k vyhodnocení tepelné vodivosti silikátových materiálů za zvýšených teplot, je složen z následujících komponent: V prvé řadě je to prostředí zabezpečující ohřev na sledované teploty, kterým je výše popsaná laboratorní pec. Dalším prvkem pracoviště je řízený stabilizovaný napěťový zdroj o výkonu 100 W.

Přístroj umožňuje nastavení hodnot proudu, napětí a jim odpovídajícímu výkonu v rozsahu 0 až 24 V s přesností na 100 mV. Zdroj je řízen programem PEC [40] hodnotami nastavenými ve zdrojovém programu. Stabilizovaný zdroj napájí po dobu 800 sekund topný drát dodávající vzorku, vyhřátému na sledovanou teplotu, dávku zvolené tepelné energie. Působením tepla dodávaného výkonem z liniového zdroje je vyvoláno jeho šíření, které je možné charakterizovat prostorovou změnou teploty. Změna teploty zkoumaného vzorku v okolí liniového zdroje, charakterizující tepelnou vlnu, je časově závislá jednak na hodnotě dodávaného výkonu a na vzdálenosti od zdroje. Teoreticky je možné tvrdit, že při vypnutí výkonu liniového zdroje nastane vyrovnání teplot s teplotou prostředí po nekonečně dlouhé době. Jak již bylo řečeno, časové působení výkonu je omezeno na dobu 800 sekund. Po této době je zdroj vypnut a dalších 800 sekund nastává ochlazování okolí liniového zdroje na teplotu aktuálního prostředí. Vzhledem k výše uvedeným okolnostem se teplota vzorku v okolí liniového zdroje vzhledem ke krátké době chladnutí nevyrovná s teplotou prostředí. Časový průběh náběhu teplot při ohřevu a jejích pokles při vypnutí výkonu jsou dostatečnými podklady pro vyhodnocení tepelné 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.



Obr. 42. *Schéma zapojení komponent měřícího systému metodou topného drátu [autor]*

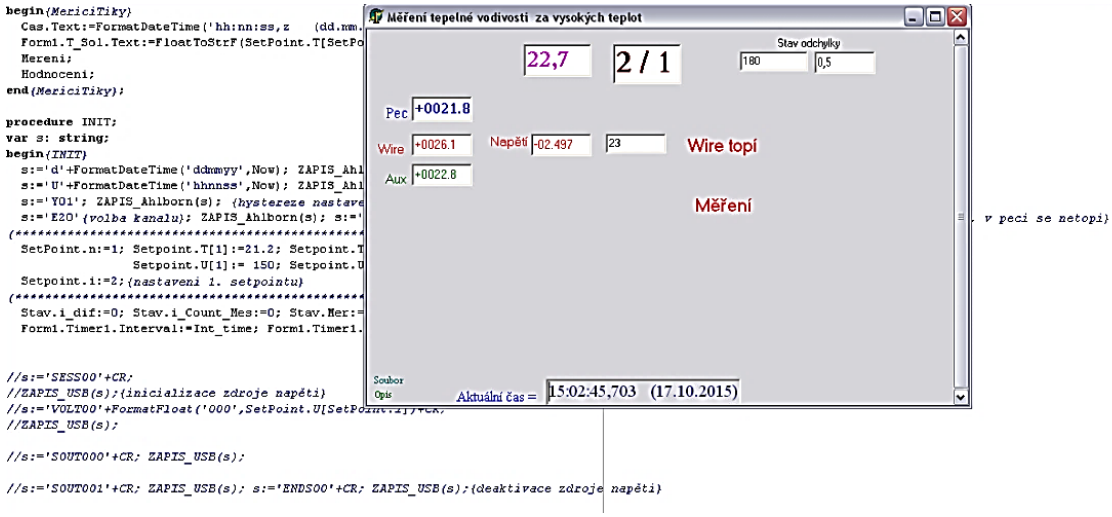
V měřícím systému jsou zabudovány tři termočlánky, z nichž dva jsou lokalizovány na měřeném vzorku a třetí v prostředí pece. Termočlánky umístěné na vzorku jsou uloženy v jeho ose ve vzdálenostech 3 a 15 mm od liniového zdroje. Časový průběh ohřevu a ochlazování je po dobu měřícího cyklu po čtyřech sekundách snímán přístrojem AHLBORN. V této době je rovněž zaznamenávána časová změna teploty stabilizovaného prostředí. Termočlánky jsou zapojeny do svorek přístroje. Na obrázku 42 je znázorněno schéma zapojení systému. Liniový zdroj, představující topný drát, je napájen napětím cca 4 V. Výkon topného drátu se realizuje napětím, přiváděným ze svorek označených HD_1 a HD_2 na svorky + a − stabilizovaného zdroje 24 V. Velikost napětí je nastavena řídícím programem. Řízení zdroje je provedeno komunikačním kabelem vyvedeným z rozhraní USB_1. Časování měření teplot na vzorku a v peci je rovněž řízeno počítačem. Řízení vzorkování je prováděno komunikačním kabelem z rozhraní PC USB-2 na datové svorky přístroje AHLBORN. Kontakty čidla ve schématu označeném P00, ležícím ve vzdálenosti 3 mm od liniového zdroje, jsou vyvedeny na svorky P00_1 a P00_2 a odtud na příslušný vstup 00 přístroje. Kontakty čidla ve schématu označeném P20, ležícím ve vzdálenosti 15 mm od liniového zdroje, jsou vyvedeny na příslušný vstup 20 přístroje. Další kontakty, ve schématu označené P10_12, měřící teplotu prostředí, jsou přivedeny na odpovídající vstupy přístroje. Přístroj je napájen stejnosměrným napětím 6 V z dodaného externího zdroje. Měření je spuštěno v okamžiku, kdy hodnota teploty prostředí je stabilizována na nastavené závislostní teplotě. Uspořádání pracoviště pro měření upravenou metodou topného drátu je zobrazeno na obrázku 43. V levé části pohledu se nachází laboratorní pec o výkonu 3 kW. Dveře pece jsou nahrazeny měřícím přípravkem, na kterém je uložen zkoumaný vzorek. Uložení měřeného vzorku na přípravku je zobrazeno na obrázku 44. V prostřední části pohledu je v pozadí umístěn řídící počítač. Na horní části počítače je uložen stabilizovaný zdroj 24 V DC. V popředí leží měřicí přístroj AHLBORN, zaznamenávající časové průběhy nestacionárních teplotních změn zkoumaného objektu. V pravé části pohledu je uložen monitor PC, který zobrazuje okamžitý stav měření.

Praktickou realizaci uložení topného drátu mezi dvě části měřených tvarovek a jejich vložení do měřícího přípravku znázorňuje obrázek 44. Tvarovky jsou položeny na nosných profilech L tak aby jejich kontakt s plochou profilu byl z hlediska přenosu tepla do konstrukce minimální. To je zajištěno dosedacími stavitelnými šrouby se závitem M5. Mezi tvarovky a nosnými profily je vložena vrstva materiálu izolačního vlny. Na obrázku 45 je zřejmé uložení topného drátu a termočlánků registrujících teploty ve stanovených místech tak aby nedocházelo k jejich vzájemnému kontaktu.

Obr. 43. *Fotografie kompletního měřícího pracoviště součinitele tepelné vodivosti a tepelné kapacity za žáru [autor]*

Obr. 44. *Fotografie měřicího přípravku s uloženým vzorkem [autor]*

Obr. 45. *Detail umístění vývodů termočlánků a přívodu proudu na topný drát [autor]*



Obr. 46. *Vzhled windows-okna s nastavenými parametry, v pozadí řídící program měření.[autor]*

Okamžité údaje sledovaného procesu jsou zaznamenávány na obrazovce monitoru. Demonstrace sledování údajů na monitoru počítače je zřejmé z obrázku 46. Sledované údaje jsou zapisovány do formuláře s názvem *Měření tepelné vodivosti za vysokých teplot*. Program PEC [40] pro řízení procesu a komunikace s okolím byl vypracován v systému DELPHI a je majetkem fakulty stavebního inženýrství. Programem je monitorován proces (návěští Měření), dále pak stav dodávky energie topnému drátu (návěští Wire topí). V horní části formuláře je modře zaznamenána počáteční teplota prostředí pece (22,7 °C), před zahájením měření změn okolí topného drátu dodávkou energie. Program umožňuje sledování až šesti přednastavených procesů měření, charakterizovaných počáteční ustálenou teplotou. Počet přednastavených procesů a aktuálně používaný cyklus jsou zobrazovány v horní střední části formuláře (hodnota

2/1 znamená první cyklus ze dvou přednastavených). V levé horní části formuláře je možné odečíst stav průměrné odchylky teplot (0,5 °C) v čase ustalování (180 sek). Podél levého okraje formuláře jsou zaznamenávány vzorky okamžitých teplot prostředí (Pec +0021.0), teplota okolí 3 mm od topného drátu (návěští Wire +0026.1 °C), teplota okolí 15 mm od topného drátu (návěští Aux +0022.8 °C). V dolní části formuláře je monitorován aktuální čas procesu od zahájení měření a aktuální datum.

11.3 Příprava vzorků pro měření

Zaměření této dizertační práce spočívá ve výzkumu vlastností silikátových materiálů za účelem jejich použití pro vysoce teplotních solárních akumulačních zásobníků tepla. Tato okolnost vedla k prozkoumání chování některých vybraných silikátových materiálů možných pro realizaci tepelných zásobníků za zvýšených teplot. Pro zkoumání jsem vybral dva druhy šamotů a dva druhy hutných žáruvzdorných betonů. 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:

- vysušení vzorků od absorbované vlhkosti,
- vyhodnocení objemové hmotnosti.

Vysoušení všech druhů vzorků probíhalo v sušící peci za teploty 110 °C po dobu 48 hodin. Tímto zásahem byla odstraněna voda absorbovaná v pórovité struktuře vzorků. Po ukončení vysoušení byly vzorky odstaveny v klimatizované místnosti a po třech hodinách chladnutí bylo provedeno jejich změření a zvážení. Na základě údajů o objemu a hmotnosti vzorků byla stanovena jejich objemová hmotnost. Vyhodnoceni objemové hmotnosti je pro vybrané druhy silikátových materiálů uvedeno v tabulce 14.

Tab. 14 Měření objemové hmotnosti ověřovaných vzorků silikátových materiálů [autor]

MĚŘENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI							teplota	20 °C
							tlak	1000 mbar
Vzorek č.	Název	délka	šířka	výška	Objem	Hmotnost	Měrná hmotnost	
		mm	mm	mm	m^{-3}	kg	kg m^{-3}	
vz_OH10-1927	Šamot	114,740	89,920	32,817	0,000339	0,64588	1907,60	
vz_OH02-1944	Šamot	114,540	89,983	32,831	0,000338	0,65313	1930,16	
vz_OH02-1987	Šamot	114,570	85,133	33,268	0,000324	0,64062	1974,26	
vz_SLIQ	směs MgO	145,200	107,020	26,425	0,000411	1,20300	2929,67	
TermBet	Žárobeton	115,100	90,100	32,700	0,000339	0,92000	2712,94	
MeBet	Žárobeton	115,300	89,950	32,800	0,00034	1,15700	3401,18	

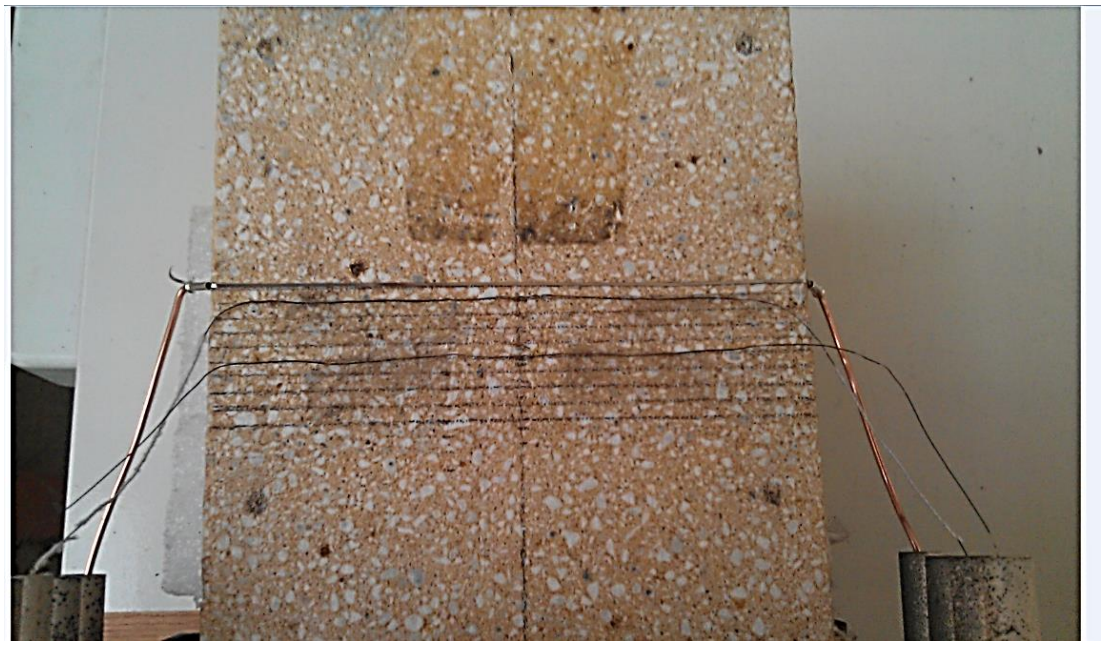
Do tabulky je zahrnut vzorek vyrobený na základě materiálové báze oxidu hořečnatého, který byl měřen, ale do výsledků dizertační práce zahrnuji, pouze finální výsledky, neboť se jedná o materiál, jehož použití vede k vysokým pořizovacím nákladům. Průběh a výsledky měření tohoto materiálu je možné nalézt ve [33]. Důležitým faktorem identifikace jednotlivých vzorků je jejich chemické složení. Z rozboru 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. 15.

Tab. 15 Chemické složení výběru vhodných žáruvzdorných silikátových směsí [32] [15]

DRUHY MĚŘENÝCH VZORKŮ											
Vzorek č.	Název	Složení materiálu									
		složka	%	složka	%	složka	%	složka	%	složka	%
vz_OH10-1927	Šamot	Al_2O_3	34,00	SiO_2	58,00	Fe_2O_3	2,50	CaO	0,25	TiO_2	
vz_OH02-1944	Šamot	Al_2O_3	38,00	SiO_2	58,00	Fe_2O_3	2,00	CaO	0,35		
vz_OH02-1987	Šamot	Al_2O_3	41,00	SiO_2	53,00	Fe_2O_3	1,30	MgO	2,00	TiO_2	1,50
vz_SLIQ	směs MgO	Al_2O_3	0,20	SiO_2	0,50	Fe_2O_3	0,50	CaO	2,20	MgO	96,00
Mebet	žárobeton	Al_2O_3		SiO_2		Fe_2O_3		CaO		MgO	
TermBet	žárobeton	Al_2O_3	7,00	SiO_2	40,00	Fe_2O_3	8,50	CaO	5,50	MgO	35,00

Chemické složení zvolených materiálů jsem získal od dodavatelů šamotových výrobků. Vzorky šamotových tvarovek dodala firma P-D Refractories, a.s. se sídlem Velké Opatovice. Rozměry tvarovek byly provedeny v rozměrech 250 mm délka, 125 mm šířka a70 mm výška. Základním stavebním materiálem byly žáruvzdorný jíl vazný typ B1 (Skalná) a žáruvzdorný jíl vazný typ MM (Borovany). 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 zásobníků postavených na bázi senzibilních akumulačních komponent. Tvarovky žáruvzdorných betonů dle normy ČSN ISO 5091-1 Pravoúhlé tvarovky rozměrů 250×125×70 mm dodala společnost Průmyslová keramika, spol. s r.o. sídlem v Rájci-Jestřebí. Chemické složení reprezentačních vzorků dodala výše uvedená společnost. S ohledem na velikost komory zkušební pece bylo nutné provést úpravu všech vzorků. Šamotové tvarovky byly upraveny na rozměry 250×125×35 mm. Úprava spočívala v jejich výškovém rozpůlení na dvě části tak, aby je bylo možné překlopit na sebe. Do dělící roviny byly vkládány měřící termočlánky a liniový vodič, který je zdrojem energie pro metodu měření topným drátem. Liniový zdroj přívodu energie byl realizován kanthalovým drátem o rozměru 0,2×0,7 mm délky 125 mm. Přívod elektrické energie k topnému drátu je vytvořen nerez svařovacím drátem průměru 2 mm. Hodnotu napájecího napětí zajišťoval stabilizovaný zdroj 24 V DC. Takto upravený pár dělené tvarovky bylo možné uložit do měřícího přípravku a zahájit ohřev vzorku na sledovanou teplotu. Vzdálenosti alokovaných míst od liniového zdroje 3 a 15 mm potřebné pro vyhodnocení tepelné vodivosti λ a objemové tepelné vodivosti κ jsou patrné z obrázku 47 a 48.

Obr. 47. *Detail dělící roviny tvarovky s rozložením přívodu energie a měřících termočlánků [autor].*



Obr. 48. *Pohled na uložení liniového kanthalového zdroje a termočlánků v dělící rovině tvarovky [autor].*

11.4 Stabilizace a ustálení teploty vzorků s teplotou prostředí

Proces měření tepelných fyzikálních veličin v závislosti na teplotě se provádí v prostředí s přednastavenou závislostní teplotou. Teplota prostředí je řízena 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 pěti hodin. Doba ustalování teplot u kaolinitických nízce hlinitých šamotů se pohybovala od 4 do 4,5 hodin. První ze vzorků, MEBET ACU-M, je typu hutného žáruvzdorného betonu se středním obsahem cementu s hydraulickou vazbou. Surovinovou bázi tvoří magnetit. Druhý vzorek, TERMBET OL12, je rovněž typ hutného žárobetonu s vazbou hydraulickou. Je postaven na surovinové bázi tvořenou olivínem. Klasifikační teploty obou materiálu se pohybují ve výši 1200 °C. Doba ustalování materiálu MEBET na teploty prostředí 400 až 80

0 °C se pohybovala od 2 do 3 hodin. Časy ustalování hutného žárobetonu na bázi magnetitu a olivínu jsou u obou teplot prostředí přibližně stejné. Po ustálení teplot měřených vzorků na požadovanou výši bylo možné postupně přistupovat k provádění měření tepelných fyzikálních veličin teplotně závislých. Z výsledků měření byly zpracovány charakteristiky veličin λ a κ, jako funkce teplot. Tyto charakteristiky jsou důležitými fyzikálními hodnotami použitelnosti pro konstrukci jak tepelných senzibilních zásobníků tepelné energie, tak i jiných konstrukčních celků, pracujících v oblastech vysokých teplot.

11.5 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti vybraných silikátových směsí.

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. Měřící termočlánek sloužící ke sledování teploty pece pro účely měření, byl umístěn pod střed měřeného vzorku. Vlivem prostupu tepla čelním zákrytem měřícího přípravku nastává situace, jejímž důsledkem je změna teplotního gradientu, projevující se poklesem teplot od zadní stěny pece. Pokles byl zaznamenán v průběhu náběhů na měřící teplotu u všech vzorků. Vykazuje hodnoty až 15 °C. To ale nic nemění na kvalitě výsledků měření. Předpoklad spočívá hlavně v udržení konstantní teploty vzorku v oblastech měření. Tato teplota musí být stabilizována. Její měření po době ustálení prokázaly tuto okolnost. Při vyhodnocování výsledků chování měřeného vzorku je jeho počáteční teplota použita jako základní pro výpočet. Pro odstranění anebo snížení přestupu tepla čelní částí komory pece by bylo vhodné použít pec přesnější a zákrytovou desku přípravku vyrobit z materiálu s dostatečně vysokým tepelným odporem a nízkým koeficientem prostupu tepla.

11.5.1 Měření teplotní závislosti tepelné vodivosti kaolinitických šamotů.

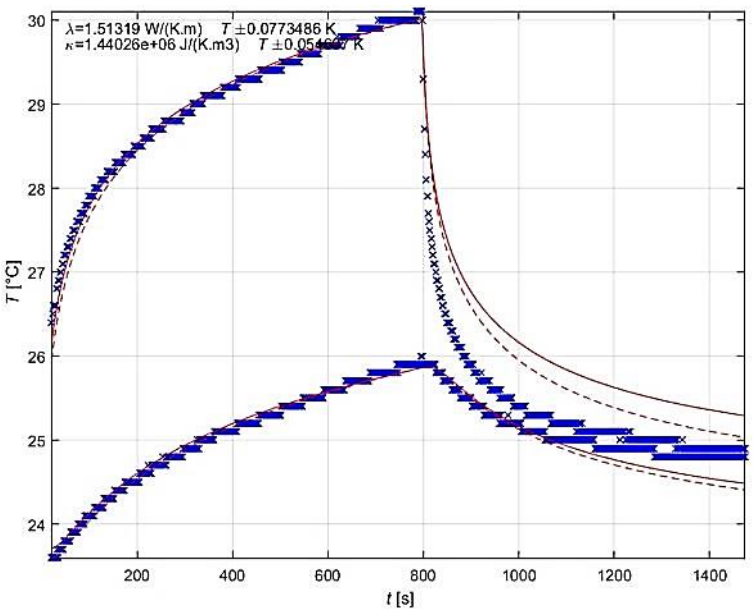
Pro ověření funkčnosti měření upraveným přístupem metody topného drátu, jsem provedl kontrolu měření metodou horké desky na přístroji Isomet 2014, který vyhodnotí požadovanou veličinu při teplotách v okolí 20 °C. Výsledky měření šamotových vzorků jsou uvedeny v tabulce 16. Uvedené vlastnosti vzorků šamotových výrobků, ověřované na přístroji Isomet se při teplotách v okolí 24 °C se poměrně přesně shodly s výsledky prvních zkoušek tepelné a objemové vodivosti získaných upravenou metodou topným drátem. Z tabulky 16 je zřejmé, že hodnoty λ se mění v intervalu od 1,477 do 1,936 W m^{-1} K^{-1}. Z dalších sledování jsem vyřadil vzorek OH-1944, neboť při první zkoušce měření na teplotě 200 °C se vlivem vysokého topného výkonu do topného drátu rozpadnul.

Tab. 16 Měření tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity κ metodou horké desky [autor]

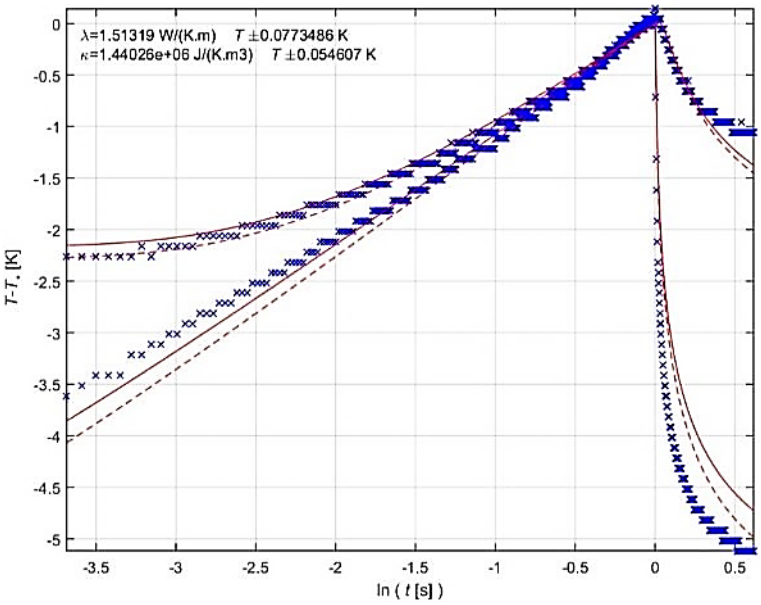
Jednotky	OH-1927				OH-1944				OH-1987			
	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Střední hodnota	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Střední hodnota	Měření č.1	Měření č.2	Měření č.3	Střední hodnota
λ [W/m.K]	1,4770	1,4774	1,4770	**1,4771**	1,6564	1,6352	1,6535	**1,6484**	1,9271	1,9448	1,9386	**1,9368**
c.ρ [J/m^3.K]	1,7524E+06	1,7523E+06	1,7514E+06	**1,7520E+06**	1,7947E+06	1,8234E+06	1,8073E+06	**1,8085E+06**	1,9621E+06	1,9433E+06	1,9410E+06	**1,9488E+06**
t [°C]	24,1	23,98	23,71	**23,9**	24,5	24,49	24,41	**24,5**	24,5	24,44	24,21	**24,4**
ρ [kg/m^3]				**1908,0**				**1930,0**				**1975,0**
c [J/kg.K]				**918,3**				**937,0**				**986,7**

11.5.1.1 **Měření tepelné vodivosti kaolinitického šamotu – vzorek č. OH 1927.**

Měření při teplotě 24 °C. Vzorek, šamotová tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, je vyroben z kaolinitického šamotu, jehož základní chemické složení tvoří 58 % oxid křemičitý a 34 % oxid hlinitý. Výrobce udává typ OPATES S III-KP [16]. Tvarovka je upravená půlením na rozměry 250×115×35 mm. Takto upravená, je v páru vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Uložení tvarovek, polohy měřících termočlánků a topného drátu je stejné pro všechna následující měření a jsou znázorněna na obrázcích 48 a 49. Před zahájením ohřevu činila teplota vnitřku komory pece 25 °C. Následné měření bylo řízeno programem PEC, zpracovaném v systému DELPHI 7. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud o hodnotě 0,93 A o napětí 2,5 V. vyvolávající topný výkon 2,37 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenávána měřicím přístrojem AHLBORN a předána k dalšímu zpracování. Výsledky měření teplot ohřevu a chladnutí oblastí vzdálených 3 mm a 15 mm od topného drátu jsou pro výpočet závislostí λ a κ při teplotě vloženy do programu WIRD [41] jako vstupní hodnoty v upraveném textovém formátu. Textový formát je uložen v poli o 800 řádcích se sloupci *čas [s], T(3 mm) [°C], T(15 mm)[°C], (P) [W m^{-1}]*. Zadání vstupních údajů, získaných měřením následujících experimentů je do programu WIRD zavedeno ve stejném textovém formátu. První závislost, vyhodnocená programem, je vykreslená grafem na obrázku 49. Demonstruje časovou změnu ohřevu a chladnutí vzorku vlivem dotace tepla dodaného topným drátem. Druhý graf, vypracovaný na obrázku 50 představuje konvergenci iteračních pochodů při změnách lambda k minimu funkce (27). Základem iteračních pochodů v programu je zadání odhadu počáteční hodnoty tepelné vodivosti. První přiblížení této veličiny je v programu voleno λ = 1,5 W.m^{-1}.K^{-1}. Program vyžaduje rovněž měrnou objemovou hmotnost ρ a počáteční teplotu prostředí T_0. Požadované hodnoty jsou do programu zadány jednak z měření teplot prostředí a údaje z tabulky 14. Iterační pochody vycházející z prvotní volby hodnoty lambda představují 3 až 6 kroků do ustálení její konečné hodnoty. Pro vyhodnocení následných měření na vyšších teplotách je používána stejná filozofie zadání vstupních hodnot (ρ, λ, T_0) pro vyhodnocení iterací. Předpokladem je konvergence rozdílů nejmenších čtverců teplot, vycházejících z hodnoty analyticky vypočtené a experimentálně ověřené. Diagram iterací hodnot lambda je patrný z grafu na obrázku 50. Diagramy vyhodnocující konstanty λ a κ při teplotě 23 °C jsou pro vzorek OH-1927 vyznačeny na obrázcích 49 a 50.



Obr. 49. *Záznam dat průběhu změn teplot vyhodnocený v programu Wird.[autor]*



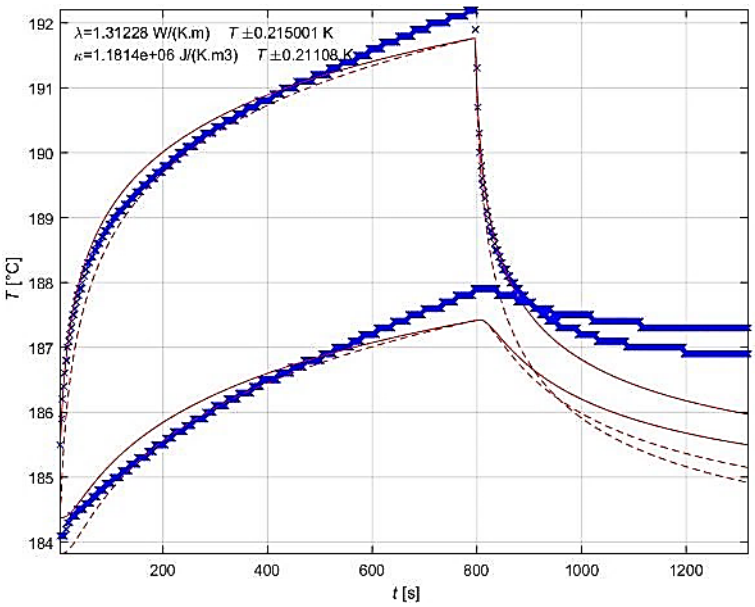
Obr. 50. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor].*

Pro výpočet hodnot tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity je nutné přepočítat výkon pouštěný do topného drátu na výkon na W m^{-1}. Z vyhodnocení výpočtů provedených programem WIRD jsou patrné fyzikální veličiny. Hodnota tepelné vodivosti λ, nabývá velikosti 1,518 $W.K^{-1}.m^{-1}$, a je vypočítána s přesností ±0,077 K. Objemová tepelná kapacita je programem vyhodnocena na $1{,}45.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,055 K. Hodnoty jsou srovnatelné s hodnotami vygenerovanými metodou horké desky, takže mohu konstatovat, že upravená metoda topného drátu je použitelná.

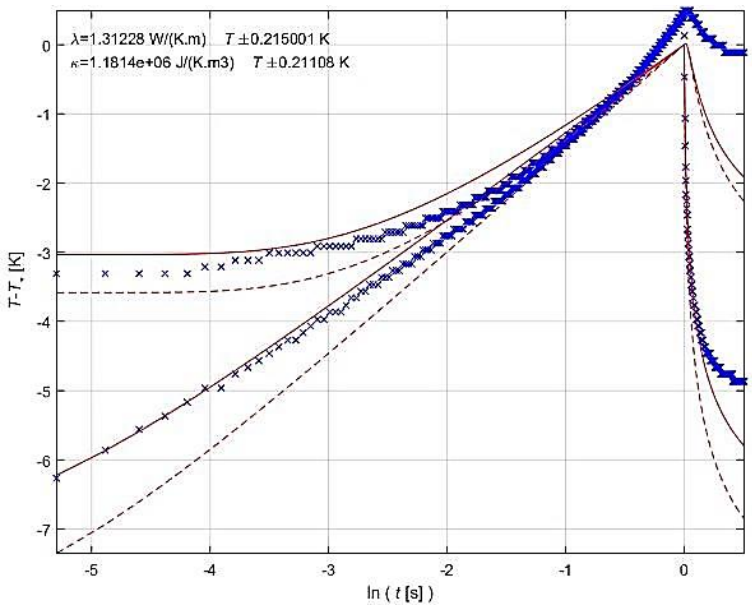
Měření při ***teplotě 200 °C.*** Vzorek, šamotová tvarovka, rozměrů 250×115×70 mm, stejného složení jako tvarovka při předchozím měření. Na termostatu laboratorní pece jsem nastavil teplotu 200 °C. Teplota vzorku se ustálila na 187 °C. Měření bylo opět řízeno programem PEC, zpracovaném v systému DELPHI 7. V programu byly nastaveny parametry pro sledování průběhu změn teplot, které představovaly jednak počet měřících oblastí teplot *n*, dále hodnotu sledované teploty prostředí *T1* a velikost dodávaného výkonu, charakterizovaného dávkovým napětím v desetinách voltu. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=187; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=25; {napětí v 0,1 V}.

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud o hodnotě 0,93 A při napětí 2,5 V. vyvolávající topný výkon 2,37 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána měřícím přístroje AHLBORN. Vyhodnocení tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity upravenou metodou topného drátu bylo na základě těchto dat zpracováno programem WIRD v matematickém softwarovém balíku MATLAB 7. První diagram vyobrazený na obrázku 51, zpracovaný programem, demonstruje závislost změny teplot ve vymezených lokalitách 3 a 5 mm od topného drátu v závislosti na čase. Druhý graf, na obrázku 52, vyjadřuje konvergenci iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27)



Obr. 51. *Záznam dat průběhu změn teplot vyhodnocený v programu Wird.[autor]*



Obr. 52. *Průběh konvergence iterací hodnot □ a □ v programu Wird [autor].*

Z vyhodnocení výpočtů provedených programem jsou patrny fyzikální následující veličiny. Hodnota tepelné vodivosti λ nabývá velikosti 1,31 $W.K^{-1}.m^{-1}$ a je vypočítána s přesností ±0,215 K. Veličina objemové tepelné kapacity nabývá hodnoty 1,181 10^6 J $K^{-1}m^{-3}$.

Měření při teplotě 450 °C. Vzorek šamotová tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, stejného složení jako při předchozím měření. Termostat laboratorní pece byl nastaven na teplotu 470 °C. Teplota vzorku se ustavila na hodnotě 445 °C. Programem byly nastaveny parametry pro sledování průběhu změn teplot, které představovaly, jako v předchozím případě, jednak počet měřících oblastí teplot *n*, dále hodnotu sledované teploty prostředí *T1*, a velikost dodávaného výkonu, charakterizovaného velikostí napětí v desetinách voltu. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

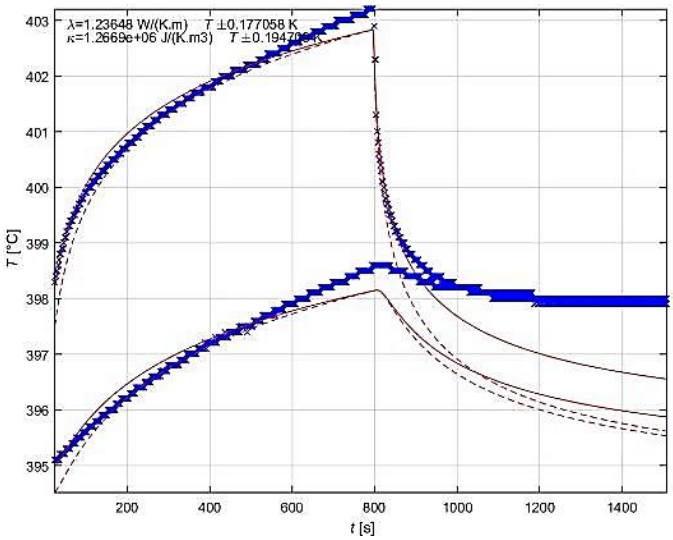
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=472; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=25; {napětí v 0,1 V}.

Hodnota parametru *T[1]* byla nastavena dle naměřené teploty na čidle 1, jak definuje *SetPoint [T1]*. Po dobu 800 vteřin se do topného drátu zaváděl proud 0,93 A o napětí 2,5 V, vyvolávající topný výkon 2,37 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu zaznamenával měřicí přístroj. Ze záznamu dat vyhodnocených při dodávce energie liniovým vodičem o výkonu 21,8 W/m jsou patrné náběh teploty tvarovky v okolí 3 a 15 mm po dobu 800 sekund. Odtud je také zřejmý jejich pokles opět po dalších 800 sekund.

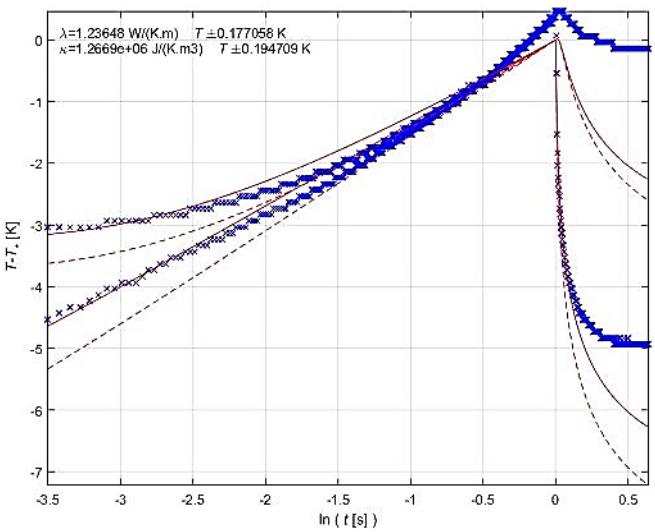
Vyhodnocení tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity upravenou metodou topného drátu bylo zpracováno programem WIRD v matematickém softwarovém balíku

MATLAB 7. Výsledky výpočtu, zpracované programem, jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. První závislost na obrázku 53 demonstruje závislost změny teploty v lokalitách 3 a 5 mm od topného drátu v závislosti na čase. Druhý graf představuje konvergenci iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27).

Teplotní spád během růstu a poklesu teplot je ukazatelem tepelné a teplotní vodivosti. Identifikací teplotní vodivosti upraveným přístupem jsou vyčísleny její hodnoty a hodnoty objemové tepelné kapacity κ, která je součinem objemové hmotnosti a měrné tepelné kapacity. Funkci κ je využito k vyčíslení tepelné kapacity (4) experimentálně posuzovaného materiálu. Hodnoty tepelné vodivosti a funkce κ jsou zřejmé z následujících obrázků. Obrázek č. 54 představuje rozdíl teplot experimentálně naměřených od teplot analyticky vypočtených v důsledku iterací hodnot lambda k minimu funkce (27). Z vyhodnocení výpočtů provedených programem WIRD jsou patrny fyzikální veličiny a to hodnota λ, nabývající velikosti 1,23 $W.K^{-1}.m^{-1}$, vypočítána s přesností ±0,164 K.



Obr. 53. *Záznam dat průběhu změn teplot vyhodnocený v programu Wird.[autor]*



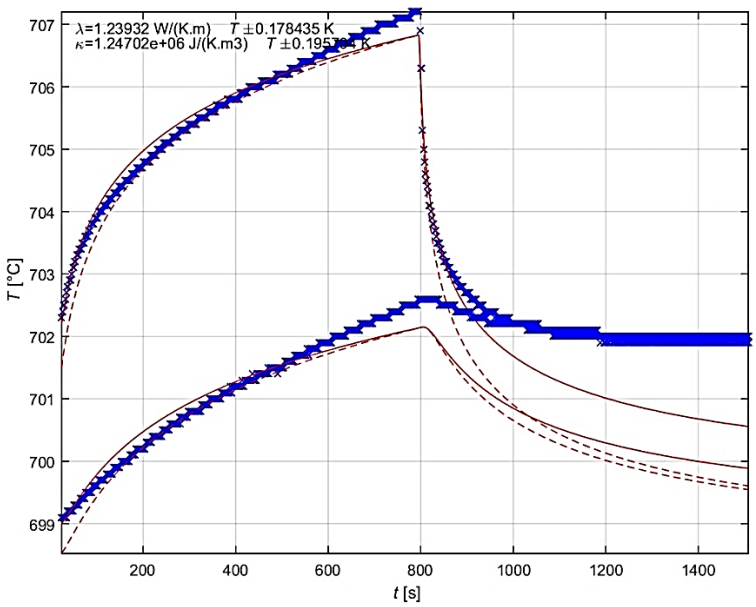
Obr. 54. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor].*

Objemová tepelná kapacita je programem vypočtena na 1,34.10^{6} J.K^{-1}.m^{-3} s přesností teploty ±0,185 K. Srovnáním hodnot naměřených při teplotě 450 °C s hodnotami na teplotě měření předchozí je patrný pokles tepelné vodivosti a nárůst objemové tepelné kapacity. Mohu tvrdit, že změny fyzikálních veličin nemají v této oblasti podstatný význam.

Měření při teplotě 700 °C. Vzorek šamotová tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, stejného složení jako při předchozím měření. Na termostatu laboratorní pece jsem nastavil teplotu 720 °C. Vzorek se v důsledku prostupu tepla čelem pece ohřál na teplotu 697 °C. V programu PEC byly nastaveny parametry pro sledování průběhu změn teplot, které představovaly jednak počet měřících oblastí teplot *n*, dále hodnotu sledované teploty prostředí *T1* a velikost dodávaného výkonu, charakterizovaného dávkovým napětím v desetinách voltu. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

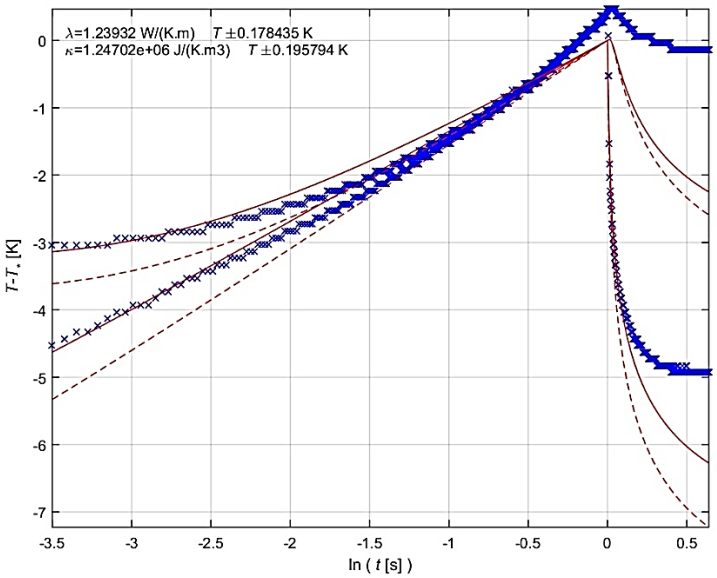
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=697; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=26; {napětí v 0,1 V}.

Hodnota parametru *T [1]* byla nastavena dle hodnoty teploty na čidle 1 dle teploty ustáleného vzorku. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,1 A o napětí 2,6 V, vyvolávající topný výkon 2,86 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána měřicím přístrojem a předána k dalšímu zpracování. Vyhodnocení tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity upravenou metodou topného drátu bylo na základě těchto dat zpracováno programem WIRD v matematickém softwarovém balíku MATLAB 7.



Obr. 55. *Záznam dat průběhu změn teplot vyhodnocený v programu Wird [autor]*

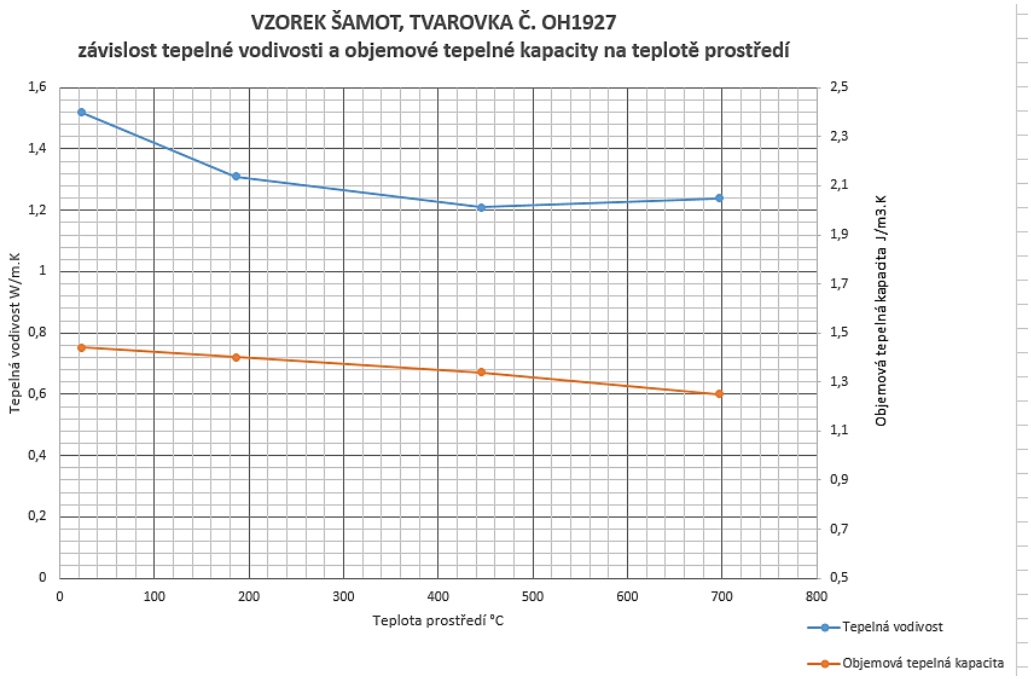
Výsledky zpracování jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. Změny teplot v okolí topného drátu v definovaných lokalitách 3 a 15 mm demonstruje graf na obrázku 55. Druhý graf na obrázku 56 představuje průběh konvergence iteračních pochodů při změnách lambda k minimu funkce (27). Z vyhodnocení výpočtů provedených programem WIRD jsou patrné fyzikální veličiny tepelné vodivosti λ a objemové tepelné kapacity κ. Hodnoty těchto veličin vypočítané programem jsou vypsány v levém horním rohu obou grafů.



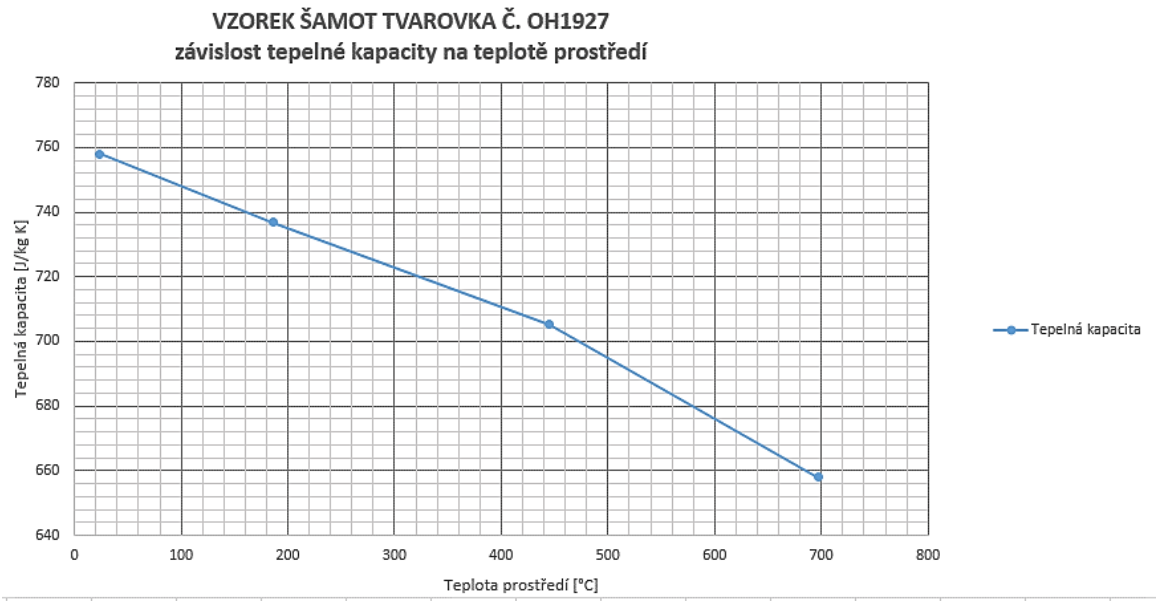
Obr. 56. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor].*

Hodnota λ, nabývá velikosti 1,24 $W.K^{-1}.m^{-1}$, a je vypočítána s přesností ±0,178 K. objemová tepelná kapacita obnáší hodnotu $1{,}25.10^{6}$ $J\,K^{-1}\,m^{-3}$. Z experimentálních vyhodnocení fyzikálních veličin tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity pro aktuální teploty je možné stanovit závislost jejich hodnot při teplotě. Pro šamotový vzorek č. OH1927 je tato závislost patrná na následujících obrázcích.

Z grafů na obrázcích 57 a 58 je zřejmý pokles jak tepelné vodivosti, tak i objemové tepelné kapacity s rostoucí teplotou. Hodnotu tepelné kapacity, která je pro naše účely potřebná k vyhodnocení vhodnosti silikátových směsí potažmo ke sledované třídě šamotů je možné z funkce κ vyčíslit hodnotu tepelné kapacity úpravou vztahu (4). Graf na obrázku 58 dokumentuje závislost tepelné kapacity při teplotě. Klesající hodnota měrné tepelné vodivosti šamotu vzorek č. OH 1927 není pro účely aplikace stavby senzibilního zásobníku příliš vhodná, neboť počáteční výpočet jeho objemu by měl vycházet z nejnepříznivějších podmínek, to znamená z minimální její hodnoty.



Obr. 57. *Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity vzorku č. OH 1927 na teplotě prostředí [autor].*



Obr. 58. *Závislost tepelné kapacity na teplotě prostředí vzorku č. OH 1927 [autor]*

11.5.1.2 **Měření tepelné vodivosti kaolinitického šamotu – vzorek č. OH 1987.**

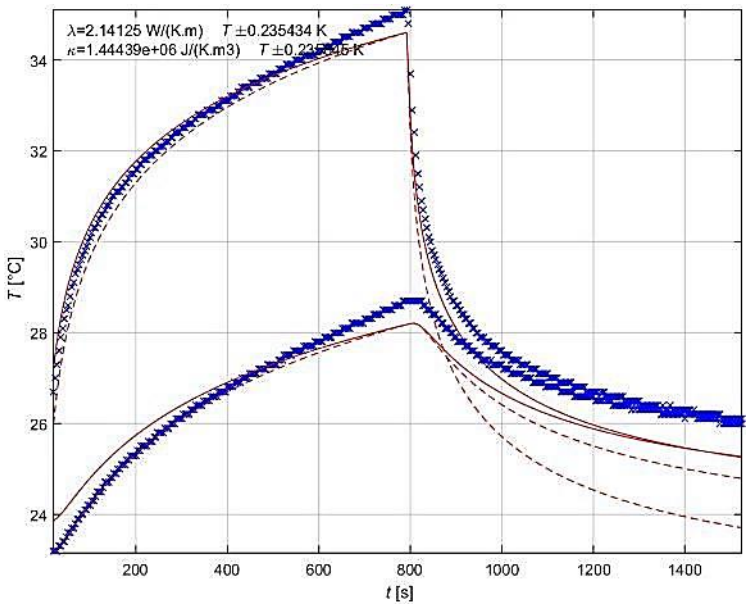
Měření teplotních závislostí tohoto druhu materiálu probíhalo na stejném měřícím systému jako měření vzorku předchozího. Tvarovka byla rozpůlením upravena na rozměry 250×115×35 mm, následovně vysušena při teplotě 110 °C. Po vychladnutí byla v páru vložena do měřícího přípravku. Pro získání závislosti změn fyzikálních veličin týkajících se tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity proběhlo měření na teplotách 24 °C, 200 °C, 500 °C a 800 °C. Vyhodnocení sledovaných fyzikálních veličin bylo provedeno upravenou metodou topného drátu [29], [30], [31].

Měření při teplotě 24 °C. Vzorek šamotová tvarovka rozměrů 250×115×70 mm je vyroben z kaolinitického šamotu, jehož základní složení sestává z 53 % oxidu křemičitého a 41 % oxidu hlinitého. Výrobce udává typ OPATES SCH 60 [8]. Upravený pár tvarovek byl vložen do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Teplota vnitřku komory dosahovala hodnoty 23 °C. Měření bylo řízeno programem PEC, zpracovaném v systému DELPHI 7. Nastavené hodnoty parametrů pro sledování průběhu změn teplot představovaly jednak počet měřících oblastí teplot *n*, dále hodnotu sledované teploty prostředí *T1*, a velikost dodávaného výkonu, charakterizovaného napětím v desetinách voltu. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=23; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

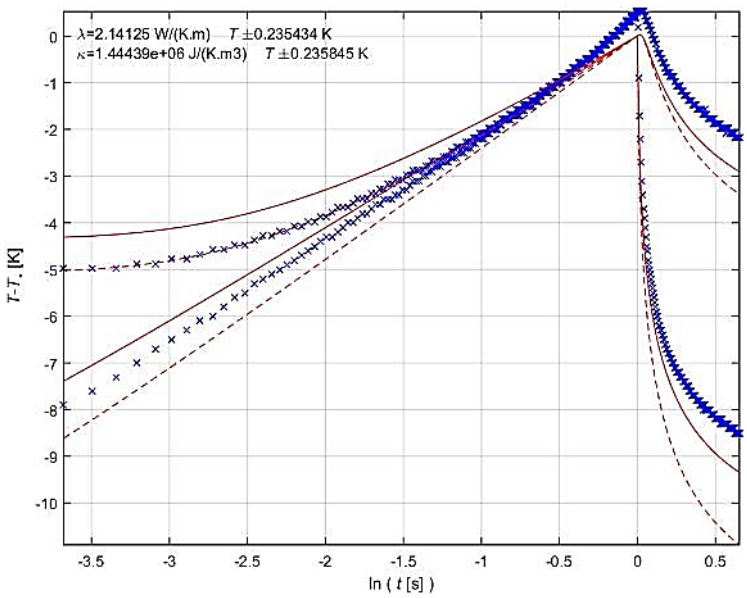
Hodnota parametru *T [1]* byla nastavena dle hodnoty teploty na čidle 1 v okolí měřeného vzorku. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 4 A o napětí 4,5 V, vyvolávající

topný výkon 6,3 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána přístrojem a předána k dalšímu zpracování. Výsledky měření ohřevu a chladnutí lokálních oblastí jsou pro výpočet a vyhodnocení závislosti na teplotě vloženy jako vstupní hodnoty do programu WIRD, jehož výstupem je obraz transformací teplot a iteračních pochodů funkce lambda k minimu funkce (27). První závislost, vykreslená grafem na obrázku 59, demonstruje časovou změnu ohřevu a chladnutí vlivem dotace tepla dodaného topným drátem. Druhý graf, vypracovaný na obrázku 60 představuje konvergenci iteračních pochodů při změnách lambda k minimu funkce (27). Základem iteračních pochodů v programu je zadání odhadu počáteční hodnoty tepelné vodivosti. První přiblížení této veličiny je v programu voleno $\lambda = 1{,}5\ W.m^{-1}.K^{-1}$. Program vyžaduje rovněž měrnou objemovou hmotnost ρ a počáteční teplotu prostředí. Požadované hodnoty jsou do programu zadány jednak z měření teplot prostředí a údajů z tabulky 14. Iterační pochody, vycházející z prvotní volby hodnoty lambda, představují několik kroků do ustálení její konečné hodnoty. Výsledky výpočtů jsou znázorněny v levém horním rohu na obrázcích 59 a 60.



Obr. 59. *Záznam dat průběhu změn teplot vyhodnocený v programu Wird [autor]*

Z vyhodnocení výpočtů provedených programem jsou patrné fyzikální veličiny jako hodnota λ nabývající velikosti 2,141 $W.K^{-1}.m^{-1}$. Je vypočítána s přesností ±0,235 K. Funkce κ, je programem vyhodnocena na $1{,}444.10^{6}\ J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,235K.



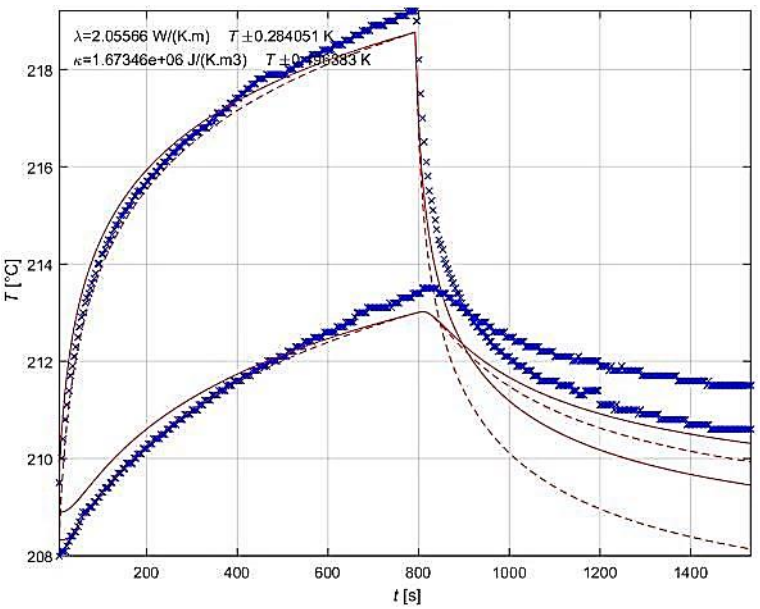
Obr. 60. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

Měření při teplotě 200 °C. Vzorek, měřená šamotová tvarovka, má pro tuto hodnotu teplot stejné složení jako tvarovka pro předchozí měření. Upravená, byla stejným způsobem jako pro všechna měření vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Teplota vnitřku komory byla naměřena 25 °C. Termostat pece jsem nastavil na 220 °C. Pec s uloženým vzorkem nabíhala na teplotu přibližně 3 hodiny. Teplota vzorku se ustálila na hodnotě 205 °C. Řídícím programu PEC byly nastaveny parametry pro sledování průběhu změn teplot jako v předchozích případech. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

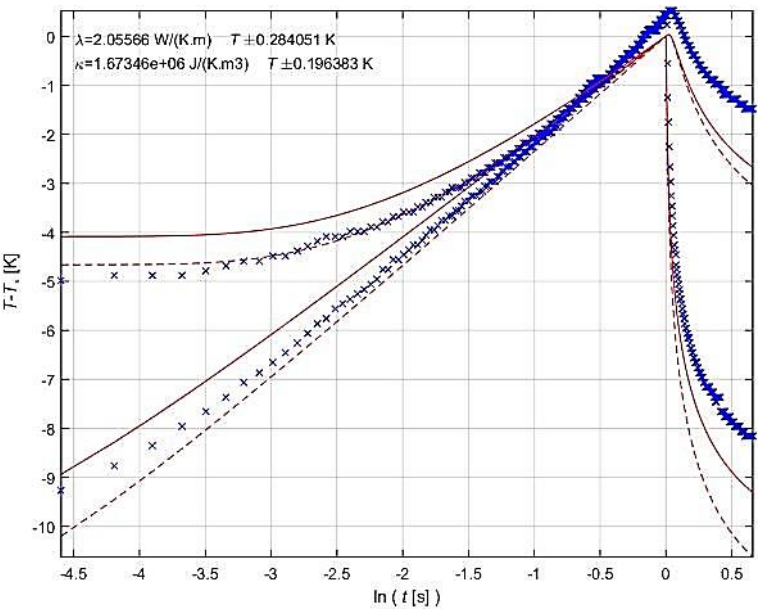
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=205; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,4 A o napětí 4,5 V, vyvolávající topný výkon 6,3 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána přístrojem.

Vyhodnocení tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity upravenou metodou topného drátu bylo na základě těchto dat zpracováno programem WIRD. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. První, zobrazenou grafem na obrázku 61, demonstruje časovou změny teploty ve vymezených lokalitách 3 a 15 mm od topného.



Obr. 61. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*



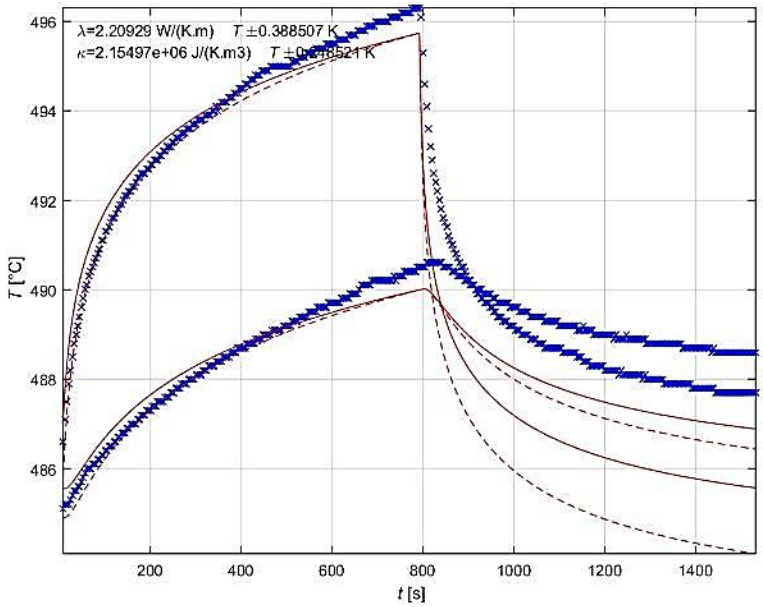
Obr. 62. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

Druhá závislost, vyjádřená grafem na obrázku 62, představuje výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27). Z vyhodnocení experimentu sledujícího změnu hodnoty tepelné vodivosti λ na teplotě je patrné, že vodivost na této teplotě nepatrně narůstá. Výsledek výpočtu je znázorněn v levém horním rohu výše uvedených grafů. Z vyhodnocení provedených programem při teplotě 205 °C nabývá tepelná vodivost λ, hodnoty 2,05 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,284 K. Funkce κ, představuje $1{,}67.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty 0,19 K.

Měření při teplotě 500 °C. Vzorek, šamotová tvarovka rozměrů 250×125×70 mm, je stejného složení jako vzorek užitý v předchozím experimentu. Upravená a rozpůlená byla vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Teplota vnitřku komory před zahájením ohřevu byla naměřena 24,5 °C. Termostat pece byl nastaven na 500 °C. Pec s uloženým vzorkem nabíhala na teplotu přibližně 3 hodiny. Teplota vzorku se za tuto dobu ustálila na hodnotě 480 °C. Měření bylo řízeno programem PEC. Programem byly nastaveny parametry pro sledování průběhu teplotních změn při dodávce výkonu topným drátem. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

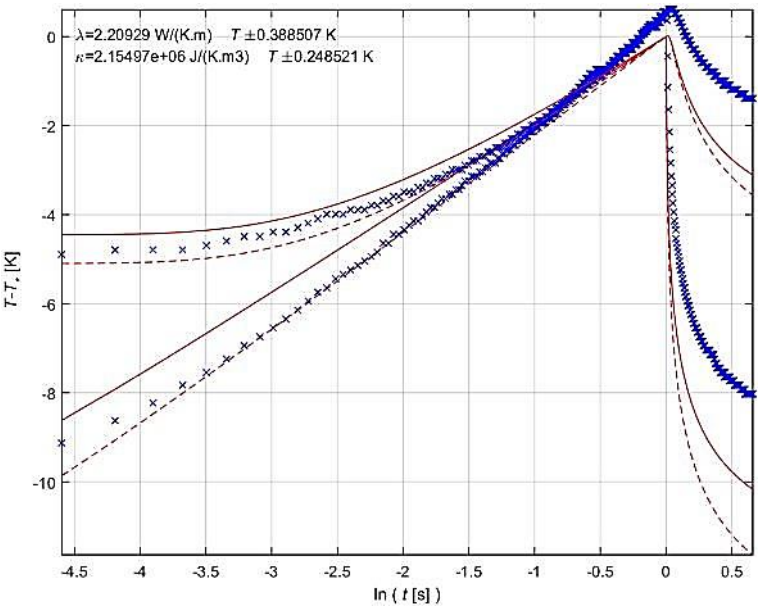
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=485; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Hodnota parametru *T [1]* byla nastavena dle hodnoty teploty na čidle 1 v okolí testované tvarovky. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,27 A o napětí 4,5 V, vyvolávající topný výkon 5,73 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu, zaznamenaná přístrojem jsou dále zpracována programem WIRD.



Obr. 63. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*

Výsledky, výpočtů, jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. První závislost, graf na obrázku 63, demonstruje časovou závislost změny teplot ve vymezených lokalitách.



Obr. 64. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

Graf na obrázku 64 představuje konvergenci iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu bodu funkce (27). Z vyhodnocení experimentů sledujících změny hodnot tepelné vodivosti λ na teplotě je zřejmé, že hodnoty vodivosti na této teplotě jsou nepatrně vyšší než hodnoty na teplotě základní. Z vyhodnocení provedených programem vyplývají hodnoty fyzikální veličiny λ, nabývající velikosti 2,2 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,38 K. Funkce κ, je vyhodnocena na $2{,}15.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$ s přesností 0,25 K.

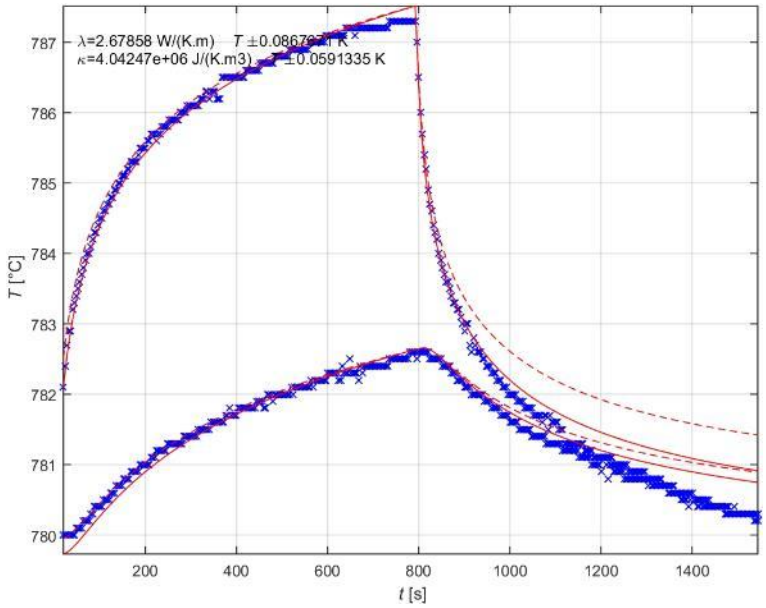
Měření při teplotě 785 °C. Vzorek, šamotová tvarovka rozměrů 250×125×70 mm, je vložena v páru do přípravku stejným způsobem jako v předchozích experimentech. Teplota vnitřku komory před zahájením ohřevu činila 24,5 °C. Termostat pece byl nastaven na 800 °C. Pec s uloženým vzorkem nabíhala na teplotu přibližně 3 hodiny. Teplota vzorku se ustálila na hodnotě 785 °C. Měření řídil program PEC. Nastavené parametry pro sledování průběhu změn teplot představovaly tak jako ve všech předchozích měřeních stejné atributy jako v předchozích měřeních. Segment této části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=785; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,34 A o napětí 4,5 V, vyvolávající topný výkon 5,91 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána přístrojem a předána k úpravě textového formátu pro vstupní údaje výpočetního programu. Na základě těchto dat bylo provedeno vyhodnocení tepelné vodivosti a

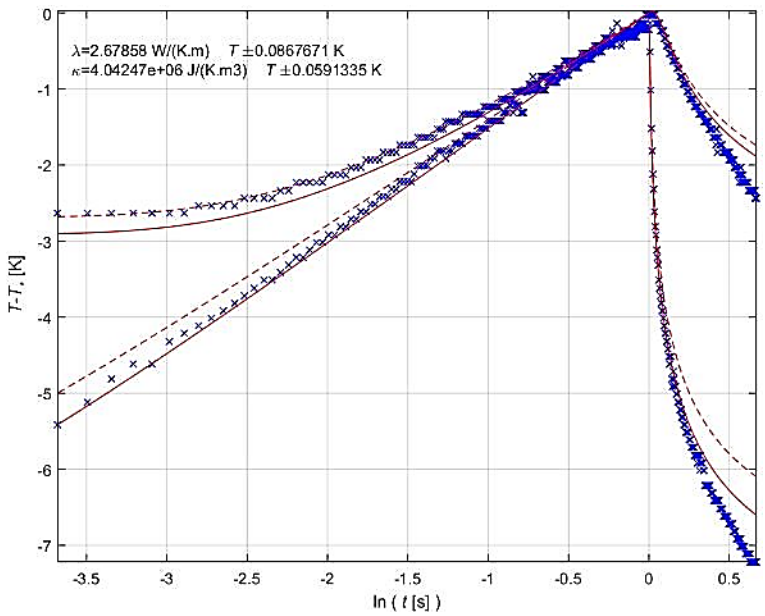
tepelné objemové kapacity. Zpracování výsledků upravenou metodou topného drátu zabezpečil opět program WIRD. Výsledky řešení jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. První závislost, demonstrována na obrázku 65, vyjadřuje časové změny teploty ve vymezených lokalitách. Z grafu je zřejmá diference rozsahu teplot při vypnutí budícího výkonu topným drátem v časovém okamžiku 800 sekund. Tato diference činí asi 5 °C.

Graf na obrázku 66 zobrazuje konvergenci iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27). Z vyhodnocení experimentu sledujícího změnu hodnoty tepelné vodivosti λ na teplotě je patrné, že hodnoty vodivosti na této teplotě se s rostoucí teplotou zvyšují. Z výpočtů provedených programem WIRD na této teplotě vyplývá jednak hodnota veličiny λ, nabývající hodnotu 2,68 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,086 K a dále funkce κ, která je vyhodnocena na 4,042 10^6 $J.K^{-1}.m^{-3}$ s přesností 0,059 K.



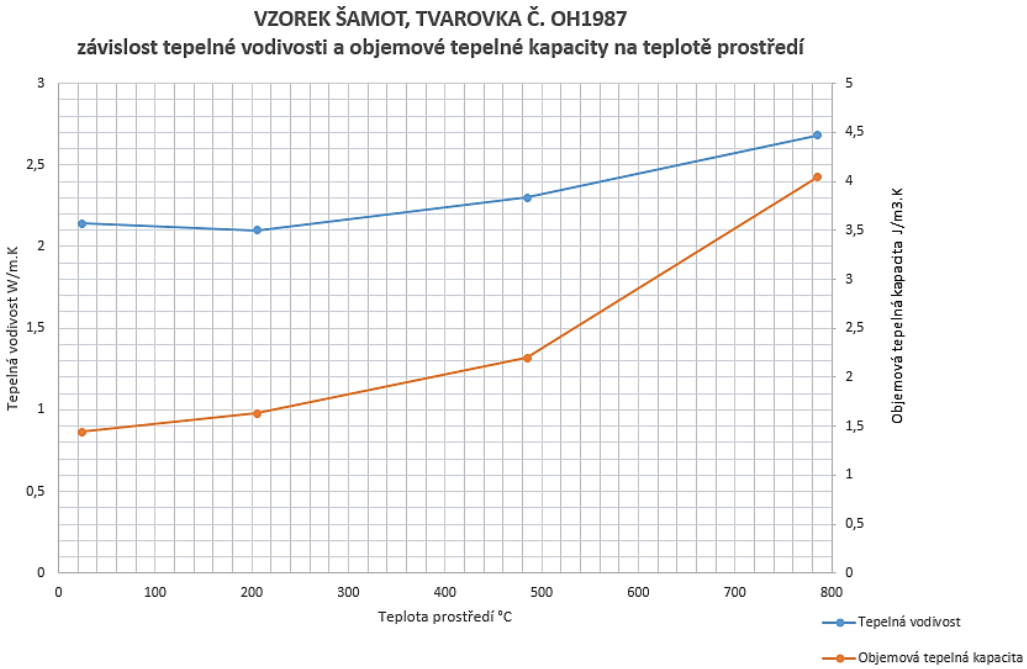
Obr. 65. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*

Výsledky výpočtů jsou vypsány v levém horním rohu obou grafů. Z experimentálních vyhodnocení fyzikálních veličin lambda a kapa pro aktuální teploty je možné stanovit závislost jejich hodnot na teplotě.



Obr. 66. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

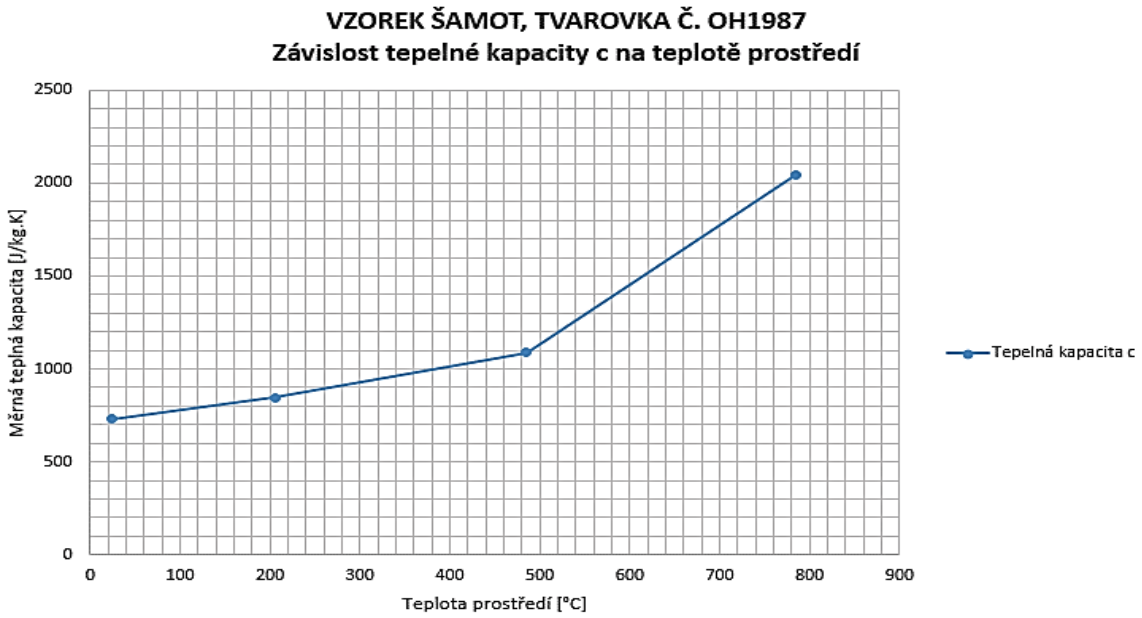
Pro šamotový vzorek č. OH1987 materiálu OPATES SCH 60 je tato závislost patrná z obrázku 67.



Obr. 67. *Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity vzorku č. OH 1987 na teplotě prostředí [autor]*

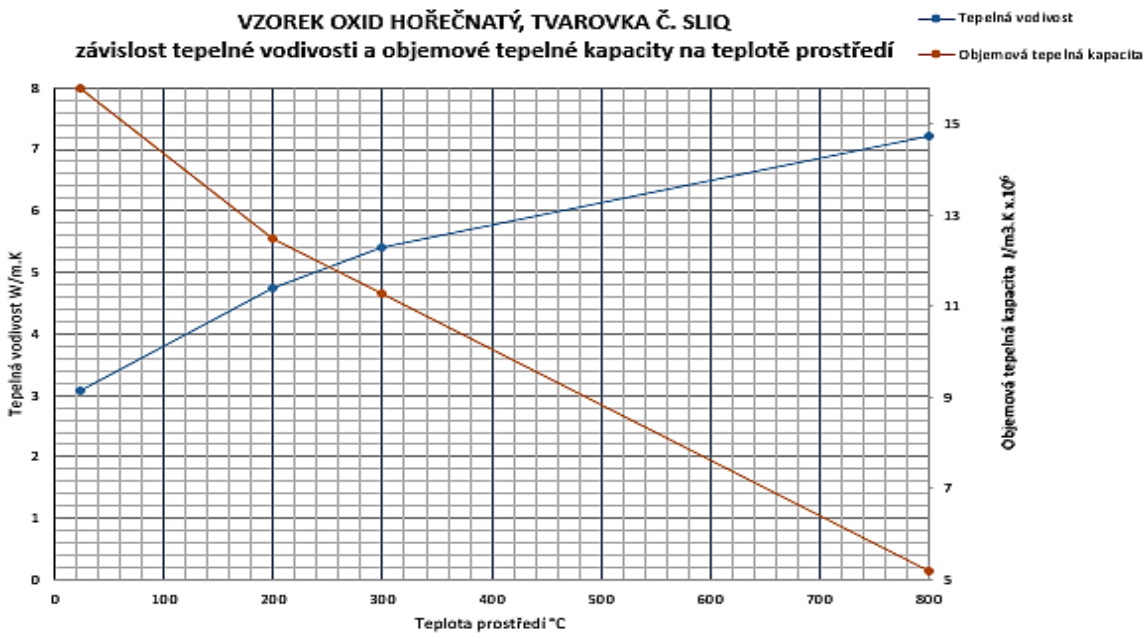
Z tohoto grafu je zřejmý růst jak tepelné vodivosti, tak i objemové tepelné kapacity s rostoucí teplotou. Hodnotu měrné tepelné kapacity, která je pro naše účely potřebná k vyhodnocení vhodnosti silikátových směsí pro aplikace senzibilních zásobníků, potažmo ke sledované třídě

šamotů, je možné určit z hodnoty objemové tepelné kapacity κ úpravou vztahu (4). Graf na obrázku 68 dokumentuje závislost měrné tepelné kapacity na teplotě.

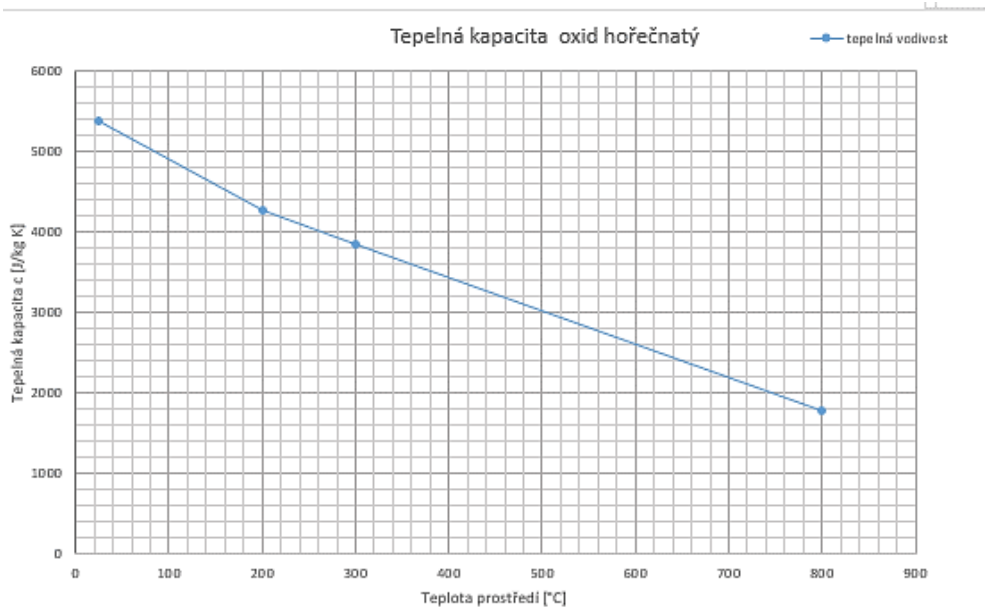


Obr. 68. *Závislost tepelné kapacity na teplotě prostředí vzorku č. OH 1987 [autor].*

Vzhledem k porovnání fyzikálních vlastností, týkajících se známých žárobetonových materiálů a vzorků kaolinitických šamotů mohu konstatovat, že z hlediska jak tepelné kapacity, tak i tepelné vodivosti, vyznačující se nižší objemovou hmotností, tepelnou kapacitou a teplotní vodivostí, nejsou tyto materiály příliš vhodné pro konstrukci tepelných zásobníků. Toto tvrzení je možné prokázat zkouškami na šamotech s odlišným chemickým složením, a to výběrem s řady od 23 % do 43 % Al_2O_3, představujících škálu nízko hlinitých šamotů. Srovnáním výsledků měření tepelných vodivostí na šamotových vzorcích mohu konstatovat, že narůstání tepelné vodivosti s rostoucí teplotou, kterou vykazuje chemické složení vzorku č. OH 1987, je pro použití v oblastech senzibilních zásobníků z hlediska šíření tepla výhodnější. V rámci tohoto projektu jsem provedl ověření na materiálu, jehož nosná báze je tvořena oxidem hořečnatým. Fyzikální vlastnosti tohoto materiálu s ohledem na jeho použitelnost pro konstrukci senzibilních zásobníků převyšují vlastnosti šamotových materiálů. Chemické složení tohoto materiálu obsahuje až 96 % oxidu hořečnatého. Objemová hmotnost dociluje výše 2990 $kg.m^{-3}$. Měrná tepelná kapacita a tepelná vodivost těchto materiálů je poměrně vysoká. Proto jsem další experiment zaměřil na prověření závislosti tepelné vodivosti a tepelné kapacity materiálů postavených na této bázi.



Obr. 69. *Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity vzorku SLIQ [autor]*



Obr. 70. *Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity vzorku SLIQ [autor]*

Zkoušky tohoto materiálu prokázaly jeho výhodnost jako aplikaci jeho využití pro stavbu senzibilních zásobníků. Z hlediska konstrukce ale je nutné podotknout, že tento materiál není možné používat jako litý. Je nutné předem zpracovat bloky, ze kterých bude zásobník složen. Tato okolnost se projeví jako stavba zásobníku s vysokým stupněm obtížnosti. Předchozí obavy prokázaly zkoušky švédské vývojové firmy v Hrušovanech, která po zralé úvaze o ekonomičnosti a náročnosti stavby zásobníku z materiálu na bázi oxidu hořečnatého jeho použití zamítla. V této práci podávám pouze finální výsledek zkoušky vykazující změny tepelné

vodivosti a objemové tepelné kapacity zmíněného materiálu. Grafy v obrázcích 69 a 70 znázorňují změny tepelné vodivosti a tepelné kapacity na růstu teploty. Podklady pro vyhodnocení finálních závislostí tepelných konstant na teplotě je možné nalézt ve [33].

11.5.2 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 žáruvzdorné betony se středním obsahem hlinitanového cementu s hydraulickou vazbou. Vysoká objemová hmotnost těchto materiálu byla docílena přidáním magnetitu a oxidu železitého do základního kameniva. V prvním případě probíhalo měření betonu s označením TERMBET. Tvarovky obou druhů materiálu dodala firma Průmyslová keramika spol. s r.o. Rájec-Jestřebí.

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

Jedná se o hutný žáruvzdorný beton s hydraulickou vazbou použitelný do prostředí se zvýšenou teplotou [34]. Základní surovinovou bázi tvoří olivín. Objemová hmotnost tohoto materiálu dosahuje při teplotě 110 °C hodnoty 2700 kg m^{-3}. Klasifikační teplota materiálu činí 1200 °C. Chemické složení tvoří 7 % oxidu hlinitého, 40 % oxidu křemičitého, 8,5 % oxidu železitého, 5,5 % oxidu vápenatého a 35 % oxidu hořečnatého. Odolnost proti vysokým teplotám zabezpečuje poměrně značný podíl oxidu křemičitého. Vysoké procento oxidu hořečnatého opět zabezpečuje poměrně vyšší hodnotu tepelné kapacity. Vnější pohled na strukturu tohoto materiálu se jeví jako struktura kompaktní, hladká a jemně zrnitá. Tepelné fyzikální vlastnosti byly ověřovány za teplot v oblastech 24, 200, 400, 600 a 800 °C.

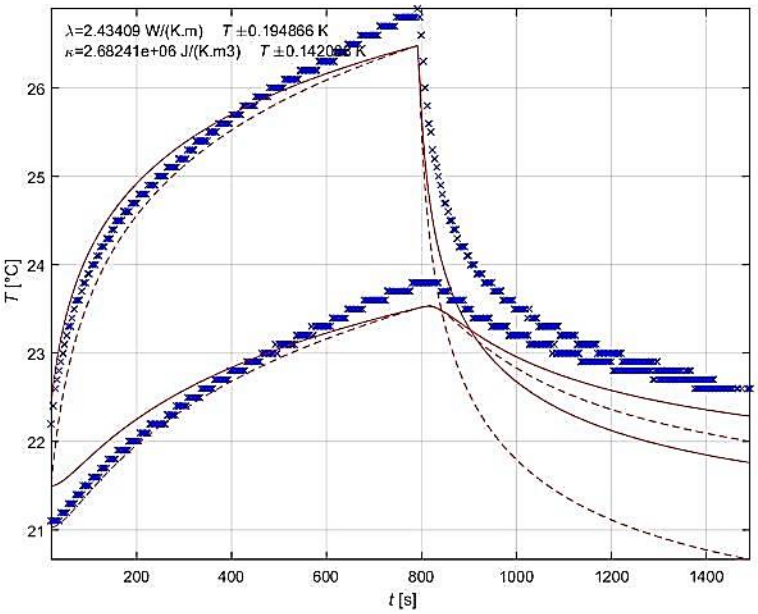
Měření při teplotě 21 °C. Vzorek představuje tvarovku rozměrů 250×115×70 mm. Je vyrobena jako vypálený žáruvzdorný beton, jehož chemické složení je určeno v úvodním odstavci. Tvarovka byla upravena na rozměry 250×115×35 mm. V páru nad sebou byla vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Měřící sondy pro vyhodnocení lokálních oblastí okolí topného drátu byly uloženy mezi stykové části upravených tvarovek. Teplota vnitřku komory se před zahájením sledování pohybovala v okolí 21 °C. Měření bylo řízeno programem PEC a nastavené parametry představovaly stejné atributy jako v předchozích měřeních. Segment řídící části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=21; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

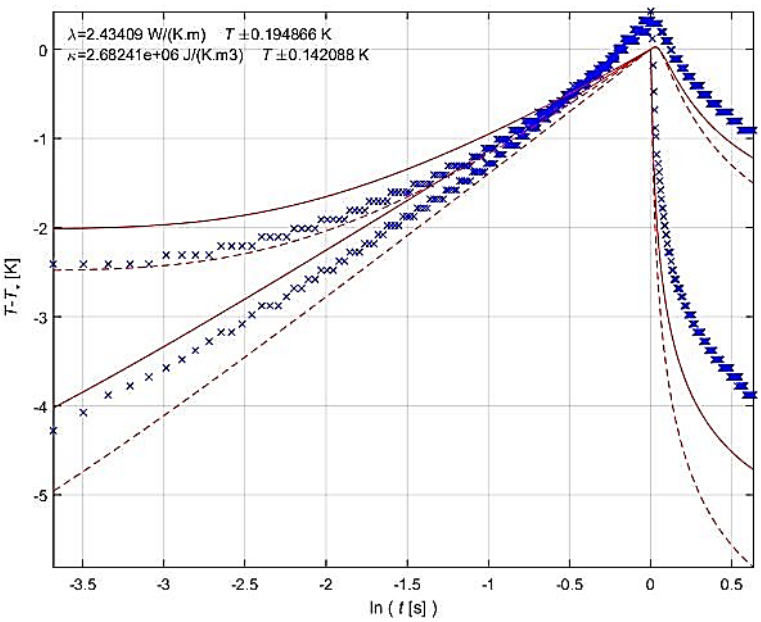
Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,12 A o napětí 4,5 V, vyvolávající topný výkon 5,05 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon odstaven a dalších 800 vteřin

lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána přístrojem AHLBORN. Vyhodnocení tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity bylo zpracováno upravenou metodou topného drátu. Řešení bylo zpracováno programem WIRD. Vstupní údaje do programu byly připraveny stejným způsobem jako v předešlých pozorováních.

Výsledky zpracování jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. První závislost vyjádřená na obrázku 71 demonstruje závislost časových teplotních změn, ve sledovaných lokalitách vyvolaných dodávkou topného výkonu. Druhý graf představuje výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27). Diagram iterací pro vzorek TermBet je vyznačen na obrázku 72. Z výpočtů realizovaných programem WIRD vyplývá jednak hodnota fyzikální veličiny λ, nabývající velikosti 2,434 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,194 K. Dále pak funkce κ, která je vyhodnocena na $2{,}68.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,142 K.



Obr. 71. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*



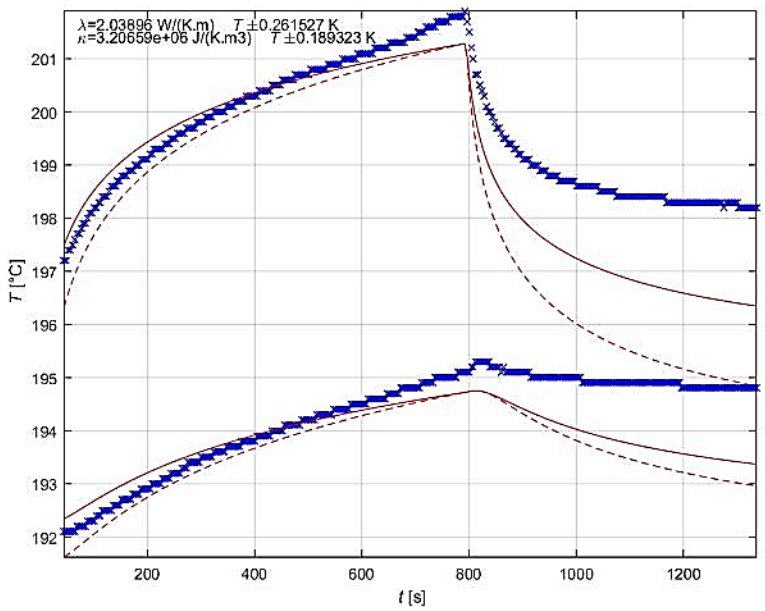
Obr. 72. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

Hodnoty tepelných fyzikálních veličin zobrazuje program v levém horním rohu příslušných diagramů.

Měření při teplotě 200 °C. Tvarovka upravená na rozměry 250×115×30 mm, používaná při předchozím měření, byla stejným způsobem vložena do měřícího přípravku a s tímto uložena do komory pece. Měřící sondy pro vyhodnocení teplot lokálních oblastích okolí topného drátu byly vloženy mezi stykové části upravených tvarovek. Počáteční teplota vnitřku komory byla před zahájením měření vyhodnocena na 21 °C. Termostat pece byl nastaven na 200 °C. Teplota vzorku se po čtyřech hodinách ustálila na 192 °C. Proces měření řídil program PEC, zpracovaný v systému DELPHI 7. Segment řídící části programu je zaznamenán na následujícím řádku.

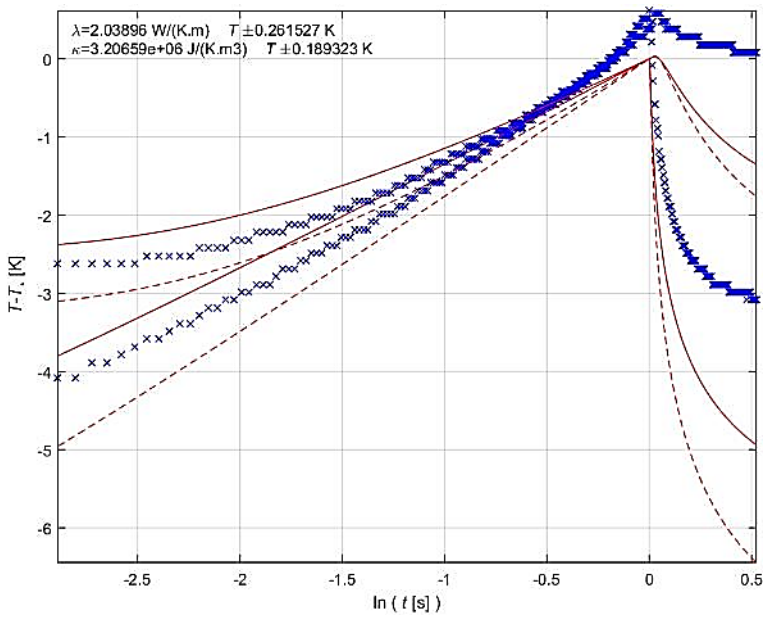
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=192; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

V okamžiku stabilizace teploty vzorku byl spuštěn program a zahájen cyklus měření. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 0,89 A o napětí 4,5 V, vyvolávající lokální topný výkon 4 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon odstaven a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teplot, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu jsou předána ke zpracování vstupních údajů pro výpočetní program. Vyhodnocení tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity upravenou metodou topného drátu bylo zpracováno programem WIRD. Výsledky výpočtů jsou zobrazeny ve formě dvou grafických závislostí získaných programem.



Obr. 73. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*

První graf, na obrázku 73, demonstruje časovou závislost teplotních změn ve vymezených lokalitách. Graf na obrázku 74 zobrazuje výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27).



Obr. 74. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

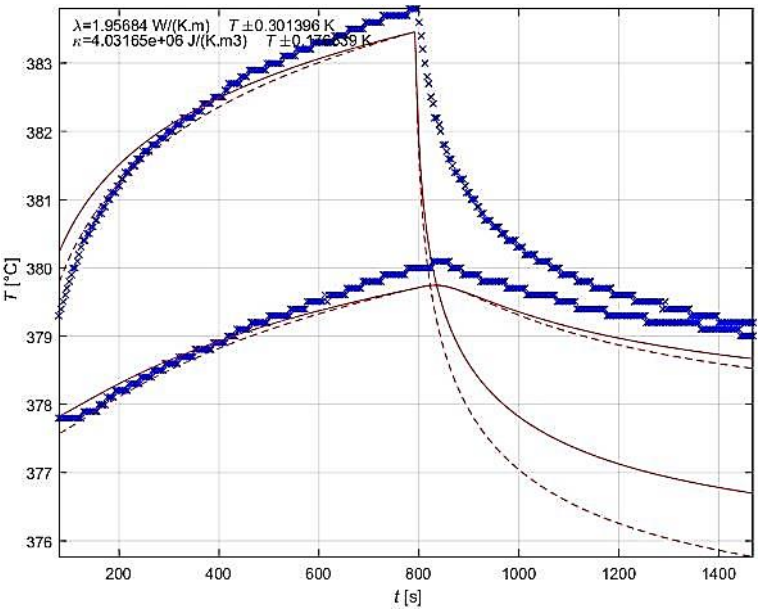
Z vyhodnocení provedených programem WIRD na teplotě 192 °C vyplývá jednak hodnota fyzikální veličiny λ, nabývající velikosti 2,04 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,26 K. Dále pak funkce κ, která je programem vyhodnocena na $3{,}20.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,19 K.

Z hodnot stanovených měřením vyplývá, že hodnota tepelné vodivosti lambda se na tomto intervalu snižuje. Hodnoty tepelných fyzikálních veličin jsou zobrazeny programem v levém horním rohu příslušných grafů.

Měření při teplotě 400 °C. Tvarovka upravená na rozměry 250×115×35 mm, používaná pro předchozí měření, byla v páru stejným způsobem vložena do měřícího přípravku a s tímto uložena do komory pece. Měřící sondy pro vyhodnocení lokálních oblastí okolí topného drátu byly vloženy mezi stykové části upravených tvarovek. Teplota vnitřku komory byla před zahájením měření vyhodnocena na 21 °C. Termostat pece byl nastaven na 390 °C. Teplota vzorku se po čtyřech hodinách ustálila na hodnotě 377 °C. Proces sledování řídil program PEC, jehož parametry byly nastaveny stejným způsobem jako v předchozích měřeních. Segment řízení programu byl nastaven na hodnoty v následujícím řádku.

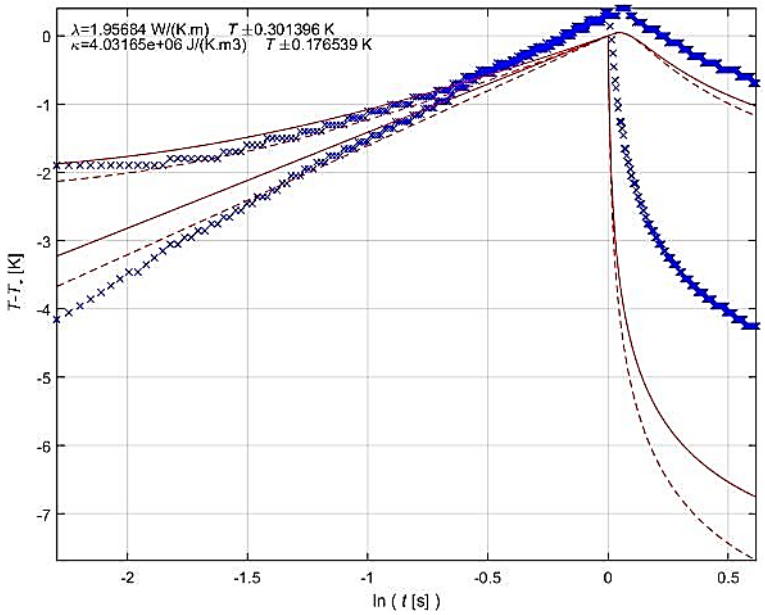
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=377; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

V okamžiku ustálení teploty vzorku byl spuštěn program a zahájen cyklus měření. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 0,87 A o napětí 4,5 V vyvolávající lokální topný výkon 3,95 W. Poté program topný výkon odstavil a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla.



Obr. 75. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*

Data změny teplot, měřených ve stanoveném okolí zaznamenaná přístrojem, byla upravena do přípustné formy pro výpočetní program. Vyhodnocení tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity upravenou metodou topného drátu bylo zpracováno programem WIRD.



Obr. 76. *Průběh konvergence iterací hodnot λ a κ v programu Wird [autor]*

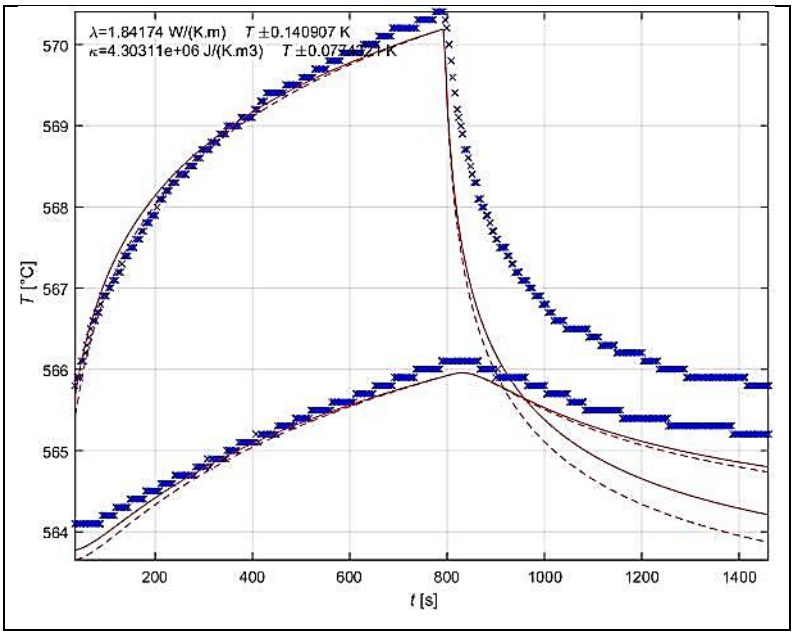
Graf na obrázku 75 demonstruje časové změny teploty ve vymezených lokalitách. Z diagramu na tomto obrázku je zřejmý rozdíl teplot, po ukončení cyklu zahřívání topným drátem ve vzdálenostech 3 a 15 mm od tepelného zdroje. Diference teplot v uvedených lokalitách, získaná výkonem 3,95 W ukazuje na vyšší hodnoty tepelného odporu a tím i nižší hodnotě tepelné vodivosti. Toto snížení je patrné u teplot vzorku v oblasti teplot 400 °C. Druhý graf, vypracovaný na obrázku 76, demonstruje výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách λ k minimu funkce (27). V obou grafech jsou v levém horním rohu vyznačeny hodnoty tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity. Z vyčíslení, provedených programem na teplotě 377 °C, vyplývá hodnota fyzikální veličiny λ, nabývající velikosti 1,95 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,3 K. Funkce κ, je programem vyčíslena na $4{,}03.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$ s přesností teploty ±0,17 K. Z hodnot stanovených měřením vyplývá, že hodnota tepelné vodivosti se na teplotě 377 °C vzhledem k teplotě předchozí nepatrně snižuje.

Měření při teplotě 600 °C. Tvarovka upravená na rozměry 250×115×35 mm, používaná pro předchozí měření, byla vložena do měřícího přípravku a uložena do komory pece. Teplota vnitřku komory před zahájením měření byla vyhodnocena na 21 °C. Termostat pece byl nastaven na 590 °C. Teplota vzorku se po pěti hodinách ustálila na hodnotě 564 °C. Proces měření byl řízen programem PEC. Segment části programu pro řízení procesu byl na této teplotě zaznamenán následovně:

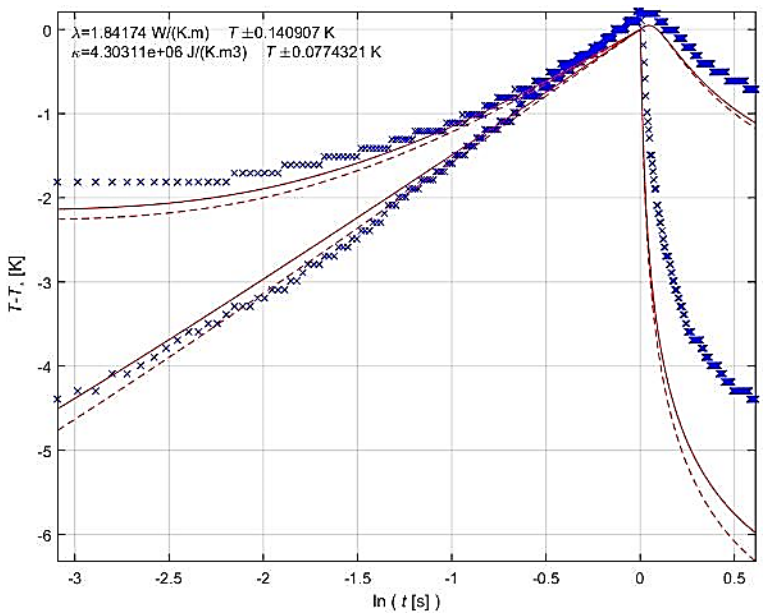
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=564; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 0,89 A o napětí 4,5 V. vyvolávající lokální topný výkon 4,02 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla zaznamenána měřícím přístroje a předána k úpravě vstupních údajů vyžadovaných výpočetním programem.

Vyhodnocení tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity získané upravenou metodou topného drátu bylo zpracováno programem WIRD. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. Graf na obrázku 77 demonstruje časové teplotní změny v lokalitách 3 a 15 mm od topného drátu. Druhý graf, na obrázku 78 demonstruje na výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách lambda, k minimu funkce (27).



Obr. 77. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*



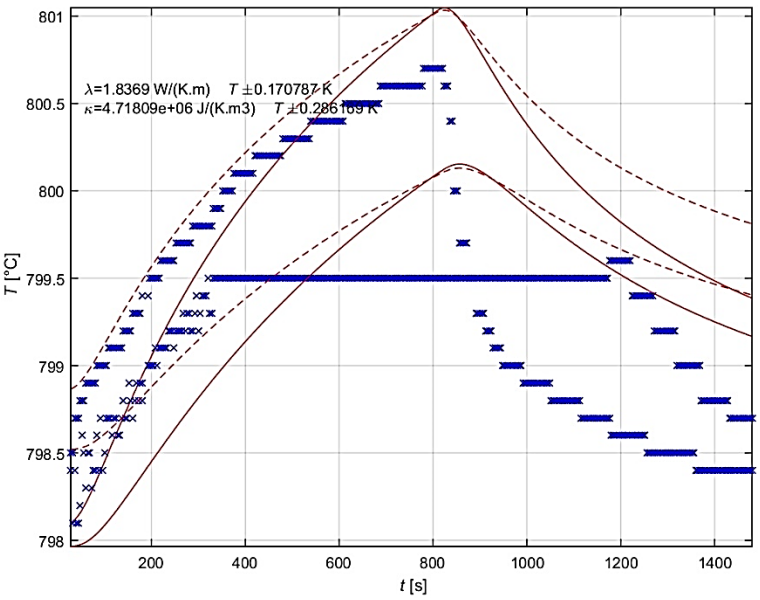
Obr. 78. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku TermBet OL-12 v programu Wird [autor]*

Hodnoty tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity jsou vypsány v levém horním rohu diagramů. Z vyhodnocení provedených programem na teplotě 565 °C vyplývá hodnota fyzikální veličiny λ, která nabývá velikosti 1,84 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,141 K. Funkce κ, nabývá výše $4{,}30.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,077 K. Z výpočtů a měření je možné vypozorovat, snížení tepelné vodivosti vzhledem k jejím hodnotám získaným na předchozí teplotě.

Měření při teplotě 800 °C. Tvarovka upravená na rozměry 250×115×35 mm, používaná pro předchozí měření, byla vložena do měřícího přípravku a uložena do komory pece. Naměřená teplota vnitřku komory před provedením experimentu vykázala hodnotu 21 °C. Termostat pece jsem nastavil na 800 °C. Proces měření byl řízen programem PEC. Segment řídící části programu pro měření hodnot na teplotě 797 °C byl upraven následovně:

SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=797; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Teplota prostředí a vzorku v peci se ustavila za 5 hodin na hodnotě 798 °C. V tomto okamžiku program zahájil cyklus měření. Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 0,88 A o napětí 4,5 V. vyvolávající lokální topný výkon 3,96 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Naměřená data představující změny teploty měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byla upravena na vhodnou textovou formu, přístupnou výpočetnímu programu.

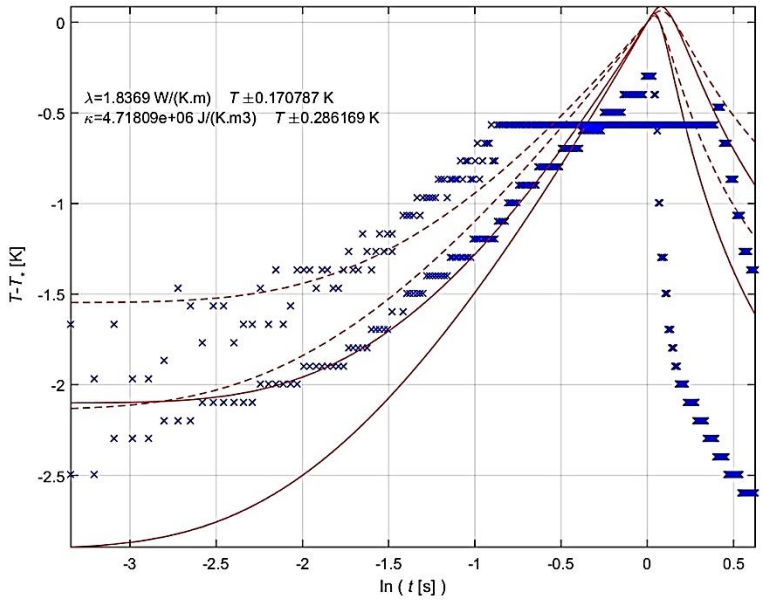


Obr. 79. *Záznam časového průběhu změn teplot vyhodnocený v programu WIRD [autor]*

Vyhodnocení tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity získané upravenou metodou topného drátu bylo zpracovány programem WIRD. Výsledky výpočtů jsou zobrazeny formou dvou grafických závislostí. Graf na obrázku 79 demonstruje závislosti změny teplot ve vymezených lokalitách v závislosti na čase. Druhý graf na obrázku 80 zobrazuje konvergenci iteračních pochodů při změnách tepelné vodivosti λ, k minimu funkce (27).

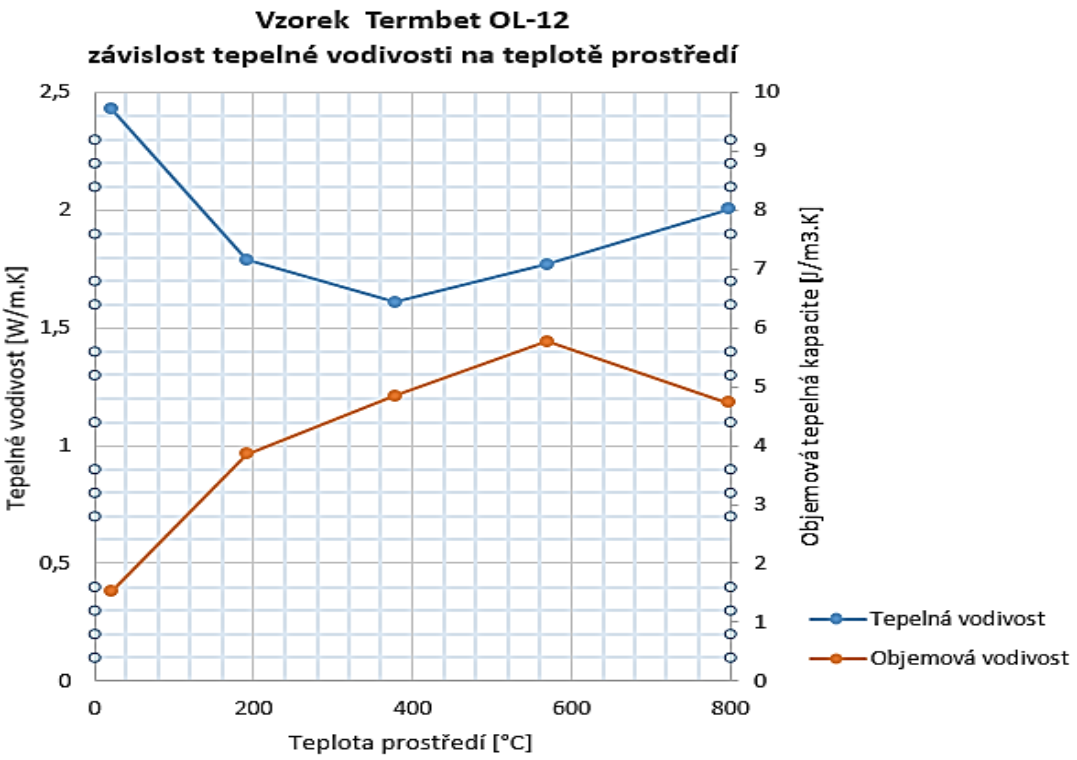
Vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v levém horním rohu příslušných diagramů. Z výpočtů provedených programem WIRD na teplotě 797 °C vyplývá hodnota fyzikální veličiny λ, nabývající velikosti 1,83 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,17 K. Funkce κ, je vyhodnocena na $4{,}72.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,286 K. Z hodnot tepelné vodivosti, stanovených měřením na této teplotě, vyplývá její nepatrný pokles vzhledem k hodnotám předchozím.

Z experimentálních vyhodnocení fyzikálních veličin tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity pro aktuální teploty je možné stanovit pro vzorek žáruvzdorného betonu TermBet OL 12 jejich teplotní závislost.



Obr. 80. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku TermBet OL-12 v programu Wird [autor]*

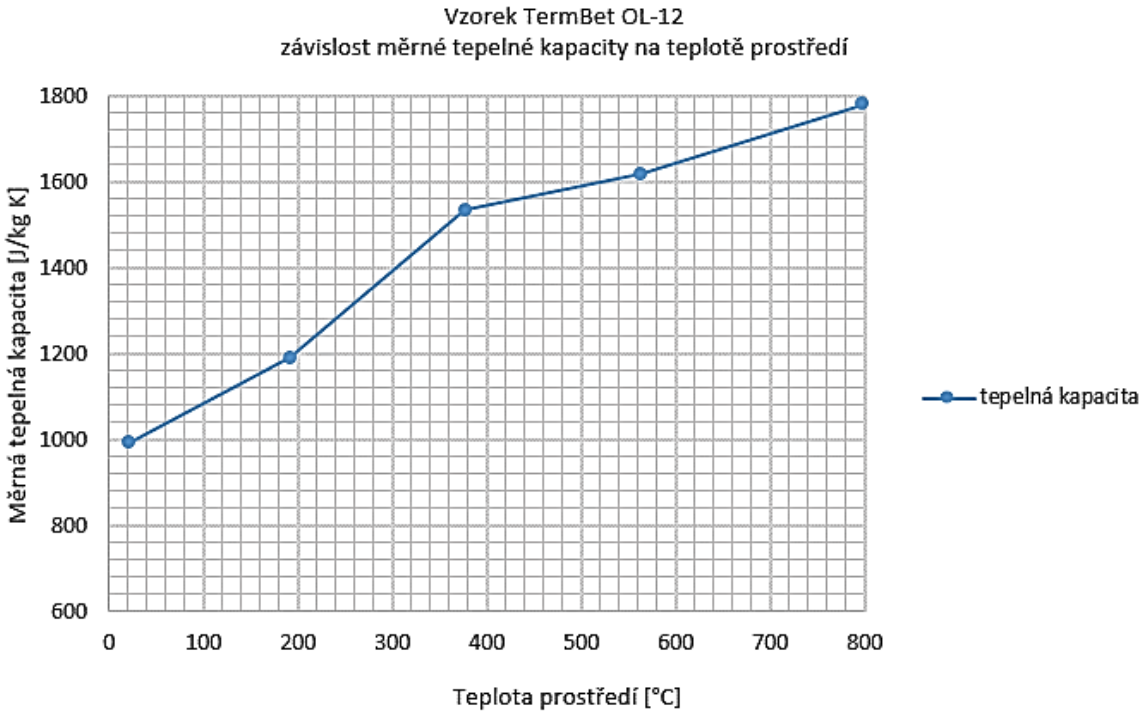
Diagram na obrázku 81 ukazuje teplotní závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity. Zkoumání závislostí tepelných fyzikálních veličin na teplotě byla ve všech měřeních omezena na hranici 800 °C.



Obr. 81. *Závislost tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě [autor]*

Na diagramu je patrný pokles tepelné vodivosti a nárůst objemové tepelné kapacity s rostoucí teplotou. Pro vzorek na surovinové bázi olivín je z diagramu na obrázku 82 zřejmá rostoucí závislost měrné tepelné kapacity s teplotou.

Tepelnou kapacitu je možné z objemové tepelné kapacity, kterou počítá program WIRD ve výsledcích, vyčíslit pomocí vztahu (4). V tomto případě je nutné uvažovat se objemovou roztažností γ, která pro betonové směsi se pohybuje ve výši 3×10^{-5} m^3 K^{-1}. Závislost tepelné kapacity na teplotě je zřejmá z následujícího grafického vyobrazení.



Obr. 82. *Závislost měrné tepelné kapacity na teplotě [autor]*

Z grafu na obrázku 82 je zřejmý růst měrné tepelné kapacity do hodnot 1800 J kg^{-1} K^{-1}. Tato okolnost znamená výhodu pro užívání tepelných akumulátorů, u kterých se teplota ohřevu pohybuje v oblastech 200 °C až 500 °C. Jsou schopny akumulovat za vyšších teplot větší množství tepelné energie při stejných objemech.

11.5.4 Měření teplotní závislosti a tepelné vodivosti žárobetonu MEBET ACU-M

Jedná se o hutný žáruvzdorný beton se středním obsahem cementu s hydraulickou vazbou použitelný do prostředí s teplotou do 1200 °C [35]. 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. Přidáním drcené magnetitové rudy do základní směsi je získán žárobeton s objemovou hmotností 3400

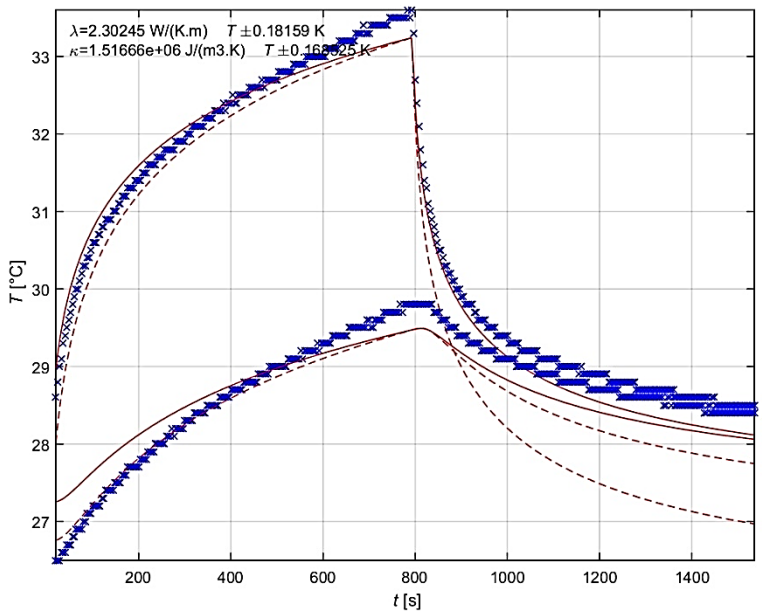
kg m^{-3}. Klasifikační teplota tohoto materiálu činí 1200 °C. Chemické složení je charakterizováno 28 % Al_2O_3, 21 % SiO_2, 55 % Fe_3O_4 a 5 % CaO [35]. Odolnost proti vysokým teplotám zabezpečuje poměrně značný podíl oxidu křemičitého. Vysoké procento Fe_3O_4 opět zabezpečuje vysokou hodnotu objemové hmotnosti. Vnější pohled na vzhled tohoto materiálu se jeví jako kompaktní, hladký a jemně zrnitý. Tepelné fyzikální vlastnosti, jako tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita byly ověřovány za teplot 24, 200, 400, 600 a 800 °C. Pro vyhodnocení tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity bylo opět využito upraveného přístupu metody topného drátu.

Měření při teplotě 26 °C. Vzorek představuje tvarovku rozměrů 250×115×70 mm. Je vyrobena jako vypálený žáruvzdorný beton. Chemické složení vzorku bylo popsáno v kap. 11.5.4. Tvarovka byla upravena na rozměry 250×115×35 mm, vysušena za teploty 110 °C a poté chladla v klimatizované místnosti. Za účelem měření byla vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Teplota vnitřku komory před zahájením měření činila 26 °C. Průběh měření byl řízen programem PEC. Segment části programu nastavující časování, teploty, napětí na topném drátu a velikost proudu má následující podobu:

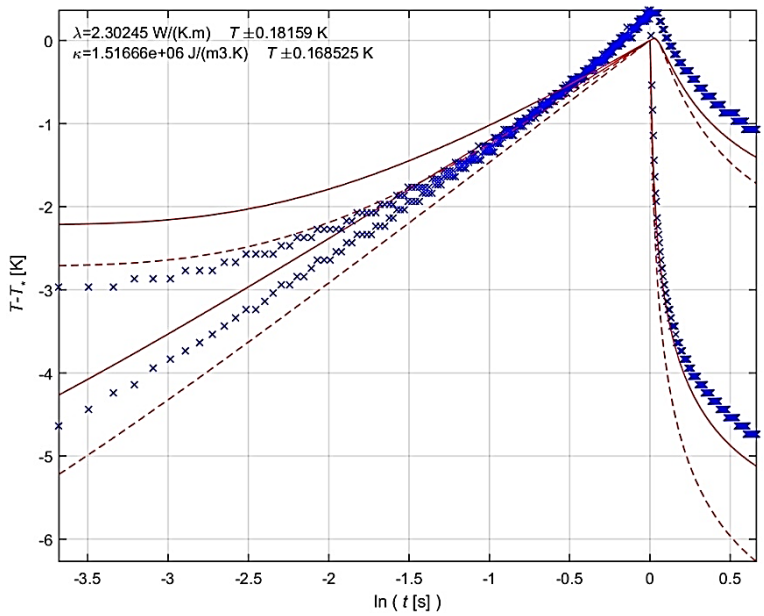
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=26; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,23 A o napětí 4,5 V. vyvolávající topný výkon 5,5 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data představující změny teploty, měřené v lokálním okolí 3 a15 mm od topného drátu byla transformována do datového souboru, vyžadovaného výpočetním programem. Výpočet vycházející z upravené metody topného drátu zajišťoval program WIRD.

Graf na obrázku 83 demonstruje časovou změnu teplot v lokalitách 3 a 15 mm od topného drátu. Druhý graf na obrázku 84 zobrazuje výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách lambda k minimu funkce (27). Hodnoty vypočtené objemové tepelné kapacity a tepelné vodivosti jsou zobrazeny v levém horním rohu diagramů. Z vyhodnocení a výpočtů provedených programem WIRD na teplotě 24 °C vyplývá hodnota fyzikální veličiny λ, nabývající velikosti 2,3 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,181 K. Funkce κ, je vyhodnocena na $1{,}51.10^6$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,168 K. Porovnáním veličin lambda u vzorků Term Bet a MEBET na stejné teplotě můžeme konstatovat, že jejich hodnoty jsou přibližně stejné.



Obr. 83. *Záznam dat měření vzorku MEBET ACU-M upravenou metodou TD [autor]*

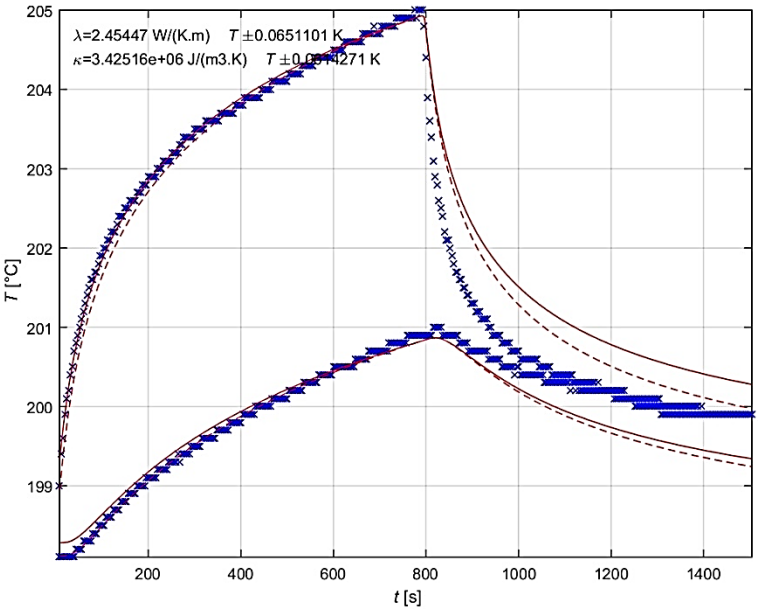


Obr. 84. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku MEBET ACU-M v programu Wird [autor]*

Měření při teplotě 200 °C. Vzorek, tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, použitá pro měření na teplotě 200 °C, je souhlasná s tvarovkou s předchozího měření. Upravená je vkládána do měřícího přípravku stejným způsobem jako při předešle. Pro toto měření činila výchozí teplota vnitřku komory 26 °C. Termostat pece byl nastaven na 200 °C. Měření započalo po ustálení teplot vzorku, která po čtyřech hodinách činila 199 °C. Segment části programu s nastavenými hodnotami průběhu měření měl následující podobu:

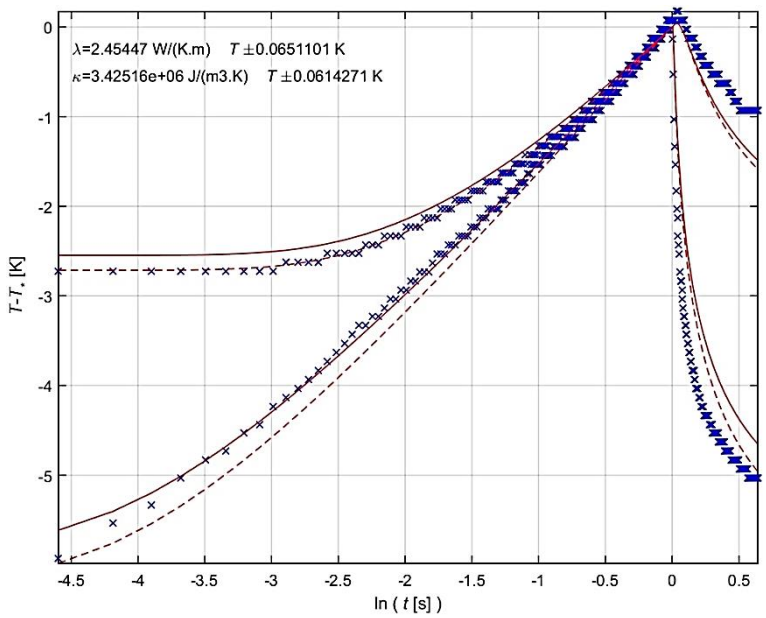
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=199; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po spuštění procesu měření byl po dobu 800 vteřin do topného drátu zaváděn proud 1,16 A o napětí 4,5 V. vyvolávající topný výkon 5,2 W. Filozofie měření spočívala ve stejné metodice jako měření v předešlých případech. Data zaznamenaná přístrojem byla transformována do datového souboru vhodného pro následný výpočetní program zpracovávající vyžadované fyzikální veličiny.



Obr. 85. *Záznam dat měření vzorku MEBET ACU-M upravenou metodou TD [autor]*

Výsledky výpočtu jsou zobrazeny formou dvou aplikací. Graf na obrázku 85 demonstruje časovou závislost teplotních změn ve vymezených lokalitách 3 a 15 mm od topného drátu. Graf na obrázku 86 zobrazuje výsledek konvergence iteračních pochodů při změnách veličin lambda, k minimu funkce (27). Výsledky výpočtů získaných výpočetním programem WIRD jsou zobrazeny v levém horním rohu obou diagramů.



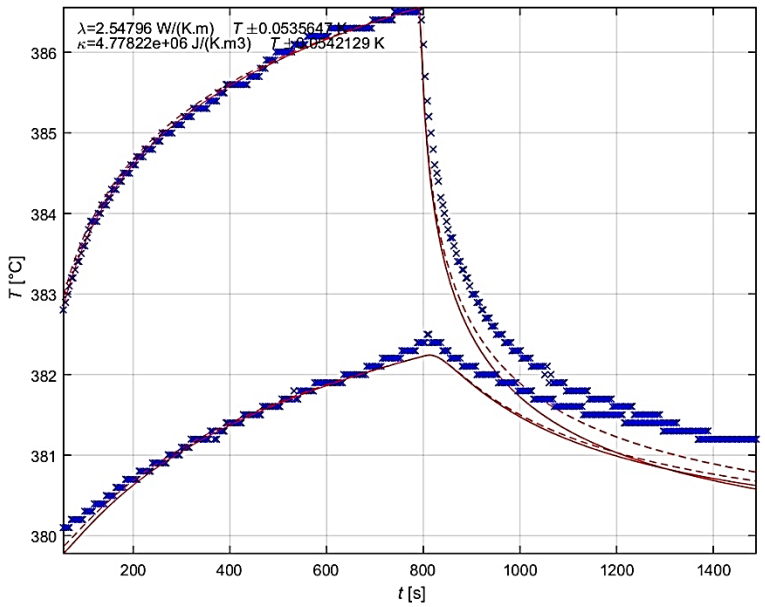
Obr. 86. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku MEBET ACU-M v programu Wird [autor]*

Hodnota fyzikální veličiny λ, nabývá velikosti 2,45 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,065 K. Funkce κ, činí 3,42 e6 $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,061 K. V případě měření na teplotě vyšší než předchozí, ukazují fyzikální veličiny na jejich nárůst. Růst tepelné vodivosti při zvýšených teplotách má příznivější vliv na šíření tepla prostorem hmoty tělesa zhotoveného z daného materiálu.

Měření při teplotě 400 °C. Vzorek je opět tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, použitá z předchozího měření. Upravená stejným způsobem jako předešle je vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Pro toto měření výchozí teplota vnitřku komory činila 26 °C. Termostat pece byl nastaven na hodnotu 400 °C. Měření započalo po ustálení teploty vzorku na hodnotě 382 °C a bylo řízeno programem PEC. Segment řízení cyklů měření této části programu měl následující podobu:

SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=382; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

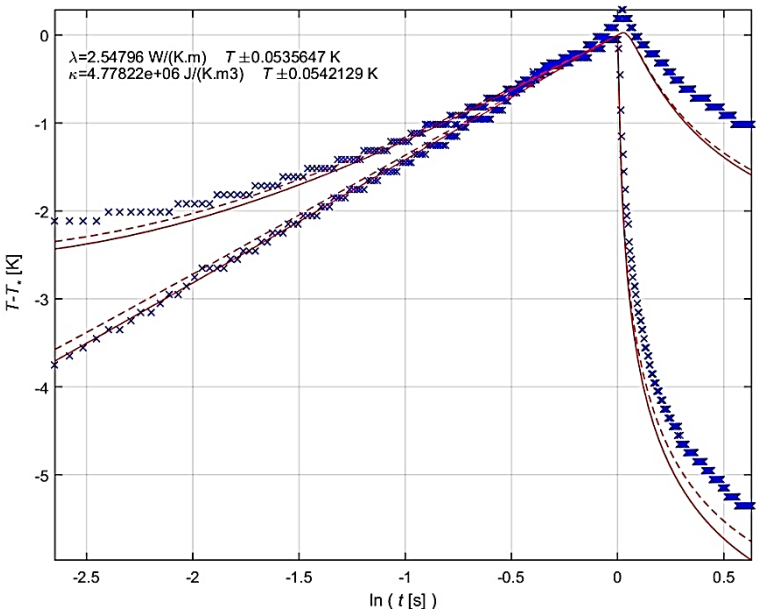
Při zahájení měření byl po dobu 800 vteřin do topného drátu zaváděn proud 1,2 A o napětí 4,5 V, vyvolávající topný výkon 5,1 W. Změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu, vyhodnocené měřicím přístrojem, byly upraveny do datového formátu, přístupného pro výpočetní program, vyhodnocující teplotně proměnné tepelné fyzikální veličiny. Na základě těchto dat řešil program WIRD vyhodnocení tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity.



Obr. 87. *Záznam dat měření vzorku MEBET ACU-M upravenou metodou TD [autor]*

Graf na obrázku 87 demonstruje časovou závislost změn teplot ve vymezených lokalitách. Tato měření prokázala opětný nárůst tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě.

Tento úkaz je zřejmý téměř ve všech druzích silikátových směsí. Diagram na obrázku 88 demonstruje závislost výsledku iteračních pochodů změn tepelné vodivosti konvergujících k minimu funkce (27).



Obr. 88. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku MEBET ACU-M v programu Wird [autor]*

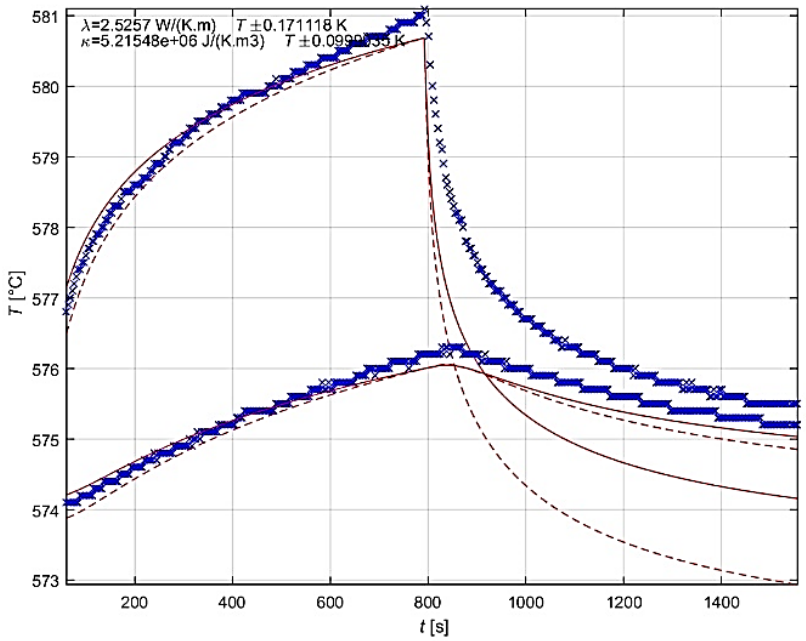
V obou grafech jsou v levém horním rohu vyznačeny hodnoty tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity. Z vyčíslení, provedených programem WIRD na teplotě 382 °C, vyplývají následující hodnoty tepelných fyzikálních veličin. Hodnota veličiny λ, nabývá velikosti 2,54 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,053 K. Funkce κ, je vyčíslena na $4{,}77.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,054 K. V tomto případě je opět patrný nárůst tepelné kapacity.

Měření při teplotě 600 °C. Vzorek je opět tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, použitá s předchozích měření. Upravená, je vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Před zahájením měření činila výchozí teplota vnitřku komory 24 °C. Termostat pece byl nastaven na 600 °C. Měření započalo po ustálení teploty vzorku na hodnotě 575 °C. Průběh měření byl řízen programem PEC. Segment části řízení měl následující podobu:

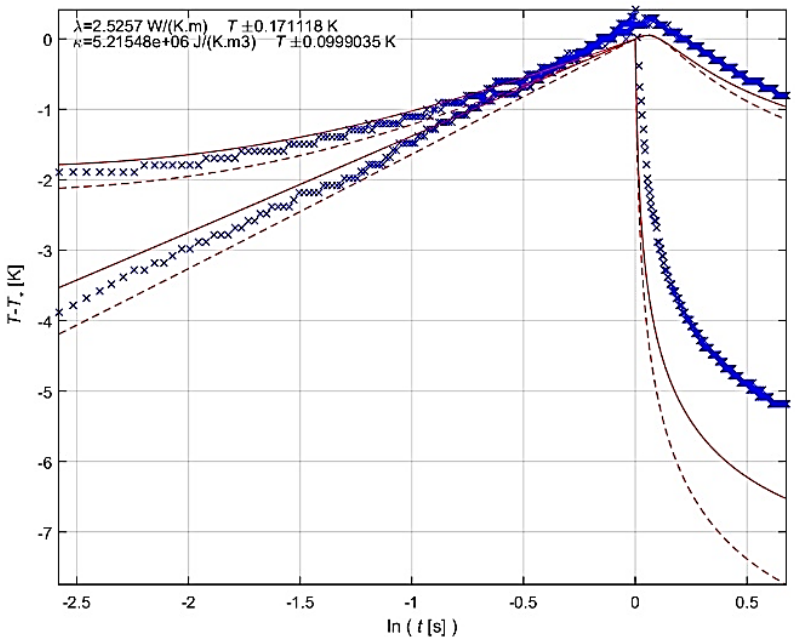
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=575; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,2 A o napětí 4,5 V. vyvolávající topný výkon 5,1 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Data, představující změny teplot měřené v lokálních okolích topného drátu, zaznamenaná přístrojem, byla upravena do vhodného textového formátu tak jako v předchozích případech.

Vyhodnocení tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity upravenou metodou topného drátu bylo zpracováno programem WIRD. Graf na obrázku 89 demonstruje závislosti změny teploty ve vymezených lokalitách 3 a 15 mm od topného drátu v závislosti na čase, transformované výpočetním programem. Druhý graf na obrázku 90, vyhodnocený z dat průběhu změn teplot v lokálních oblastech okolí topného drátu podložený měřením znázorňuje výsledek konvergence iteračních pochodů vypočtených jako řešení funkce (27) konvergující k nulovému bodu. Hodnoty tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity jsou zobrazeny v horním levém rohu tohoto diagramu. Tato měření prokázala opětný nárůst tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě. Hodnota tepelné vodivosti je na této teplotě opět vzhledem k měření na teplotě cca 400 °C vyšší. Nárůst sledovaných fyzikálních veličin je zřejmý z výsledků výpočtu znázorněných na levém horním okraji výše uvedených grafů.



Obr. 89. *Záznam dat měření vzorku MEBET ACU-M upravenou metodou TD při teplotě 575 °C [autor]*



Obr. 90. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku MEBET ACU-M v programu Wird [autor]*

..

Z vyhodnocení a výpočtů zpracovaných programem WIRD, provedených na této teplotě, vyplývá jednak hodnota fyzikální veličiny λ, která nabývá velikosti 2,52 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,17 K. Funkce κ, vykazuje částku $5{,}21.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,1 K.

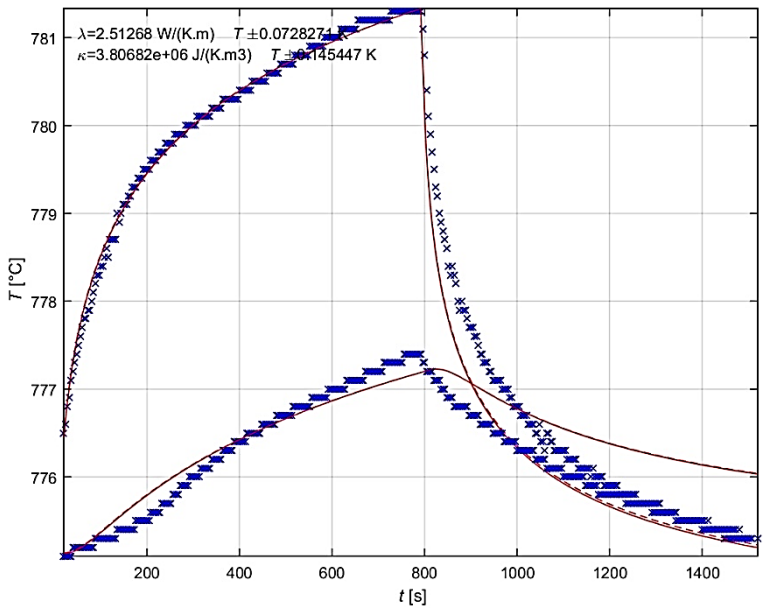
Hodnoty nárůstu tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity v oblastech teplot do 600 °C mají velice příznivý vliv na aplikaci tohoto druhu materiálu pro jeho využití v konstrukcích senzibilních tepelných zásobníků. K tomu se k dobru přidá i vysoká objemová hmotnost, která při konečné aplikaci tepelného akumulátoru vede ke snižování jeho hmotnosti.

Měření při teplotě 800 °C. Vzorek tvarovka rozměrů 250×115×70 mm, použitá s předchozích měření, je vložena do měřícího přípravku při normální teplotě prostředí. Pro toto měření činila výchozí teplota vnitřku komory 25 °C. Termostat pece byl nastaven na 800 °C. Měření započalo po ustálení teploty vzorku na hodnotě 773 °C. Měřící cykly řídil program PEC. Segment řízení programu měl následující podobu:

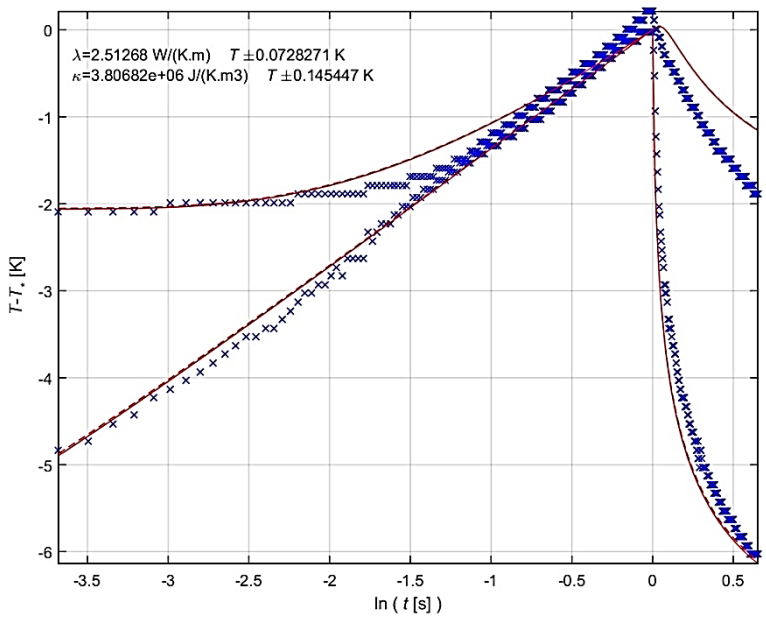
SetPoint.n:=1; SetPoint.T[1]:=773; {teploty °C} Setpoint.U[1]:=45; {napětí v 0,1 V}

Po dobu 800 vteřin byl do topného drátu zaváděn proud 1,12 A o napětí 4,5 V, vyvolávající topný výkon 5,05 W. Po uplynutí této doby byl topný výkon vypnut a dalších 800 vteřin lokální oblast chladla. Časové změny teploty, měřené v okolí 3 a 15 mm od topného drátu byly zaznamenány přístrojem a upraveny do datového souboru vhodného pro následné řešení výpočetním programem. Vyhodnocení tepelné vodivosti a tepelné objemové kapacity upravenou metodou topného drátu bylo zpracováno programem WIRD. Výstupem programu byly dvě formy grafických záznamů. Graf na obrázku 91 demonstruje časovou závislost změn teplot ve vymezených lokalitách 3 a 15 mm od topného. K získání hodnot tepelné vodivosti a kapacity je opět využita metoda iterace změn jejich hodnot vedoucí k minimu funkce (27). Program řeší tuto závislost metodou nejmenších čtverců experimentálně naměřené hodnoty vzhledem k analyticky vyjádřené závislosti (8), která představuje fundamentálním řešení Fourierovy rovnice (7). Minimální hodnotu funkce (27) tedy nulovou hodnotu její derivace (37) hledá ve všech předchozích případech metodou regula falsi.

Časová závislost iterací rozdílů teplot analyticky vypočtených a hodnot vyhodnocených experimentem je znázorněna na obrázku 92. Hodnota tepelné vodivosti je na této teplotě opět vzhledem k měření na teplotě cca 575 °C vyšší. Změna sledovaných fyzikálních veličin je zřejmá z výsledků výpočtu znázorněných na pravém horním okraji grafů na obrázcích 92 a 93. Z vyhodnocení provedených výpočetním programem na teplotě 773 °C vyplývá jednak

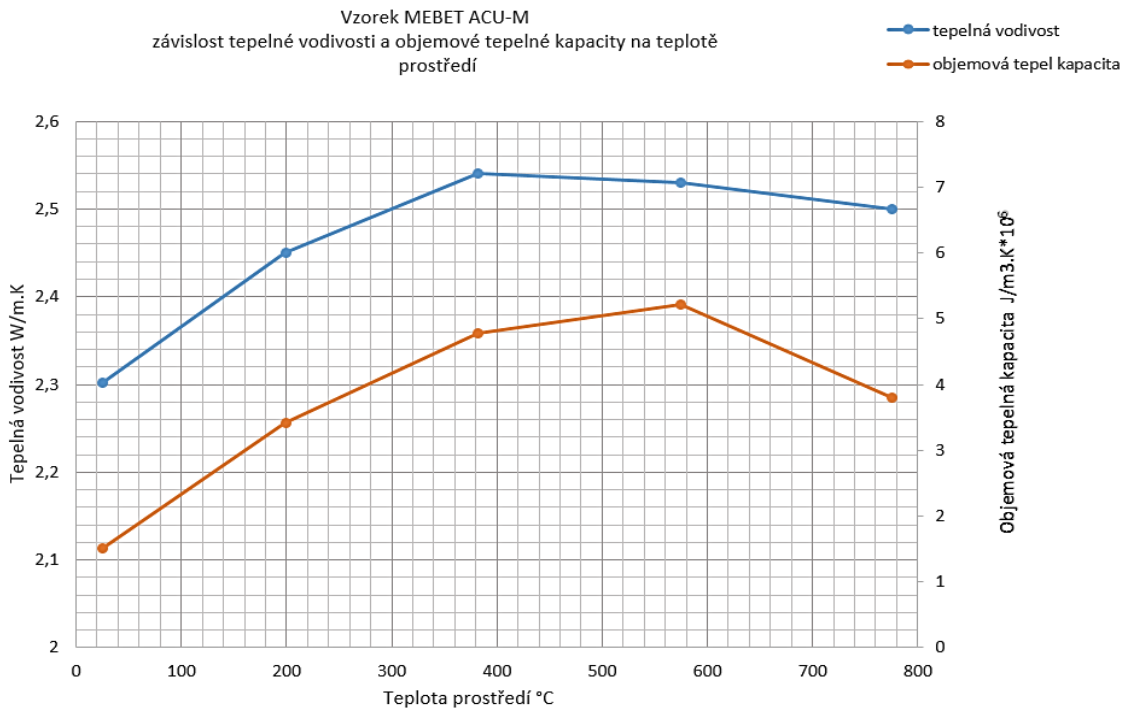


Obr. 91. *Záznam dat měření vzorku MEBET ACU-M upravenou metodou TD [autor]*

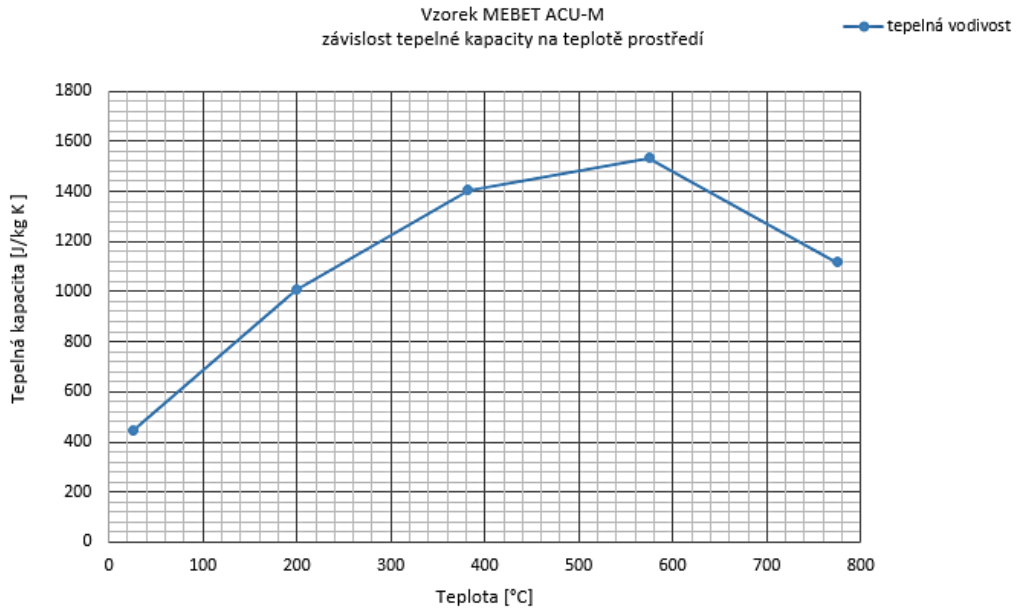


Obr. 92. *Výsledek konvergence iterací λ a κ vzorku MEBET ACU-M v programu Wird [autor]*

hodnota fyzikální veličiny λ, která nabývá velikosti 2,51 $W.K^{-1}.m^{-1}$, s přesností teploty ±0,072 K. Dále funkce κ, vykazující částku $3{,}80.10^{6}$ $J.K^{-1}.m^{-3}$, s přesností teploty ±0,145 K. Grafy na obrázcích 93 a 94 demonstrují vliv teploty na změny tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity materiálu MEBET-ACU-M.



Obr. 93. *Změna tepelné vodivosti a objemové tepelné kapacity na teplotě [autor]*



Obr. 94. *Změna měrné tepelné kapacity na teplotě [autor]*

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

Cílem dizertační práce byl výzkum vlastností silikátových materiálů s hlediska jejich využití pro realizaci senzibilních vysoce kapacitních a vysoce teplotních zásobníků. Za tímto účelem byly pro studium vybrány představitelé šamotových silikátových směsí a žárobetonů odolávajícím teplotám v oblasti nad 800 °C. Klasifikačními ukazateli vhodnosti používání zvolených materiálů byly hodnoty tepelné vodivosti a tepelné kapacity. Senzibilní zásobníky tepelné energie jsou určeny k její akumulaci v prostředí tzv. ostrovních systémů. Ukládaná energie je v případech ostrovních systémů čerpána ze slunečního záření. Senzibilní zásobník musí být schopen dodávat stavebnímu objektu takový tepelný výkon, kterým se v jeho prostorech udržuje požadované mikroklima. Denní potřeba dodávky energie během klimatického roku je znázorněna v diagramu v obrázku 16. Střední hodnota spotřeby denní energie pro příkladně uvedené stavení představuje částku 37,7 kWh den^{-1}. Výpočet zásobníku spočívá ve zjištění jeho teplotního průběhu, zejména minimální teploty během klimatického roku při uvažovaném denním odběru energie. Zásobník je zásobován teplem z oslunění v průběhu klimatického roku.

Senzibilní tepelný zásobník energie, instalovaný v referenčním obytném objektu v Bohuticích, slouží pro zásobování energiemi rodinného domku, byl proveden výpočet průběhu teploty. Materiál, použitelný pro tento zásobník, byl stanoven jako žáruvzdorný beton typu ŽÁROBET 1750-TAB. Vstupními údaji pro výpočet byly objemová hmotnost, tepelná kapacita, okamžitý dodávaný tepelný 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 teplotu 475 °C. Zásobník o rozměrech válce o průměru 3 m a výšce rovněž 3 m nabitý letním ohřevem na kapacitu 29,1 GJ, dosáhl nejnižší tepelné kapacity dne 20. února teploty 13,4 GJ při teplotě 220 °C.

Kapacita zásobníku a jeho dynamické chování závisí na hodnotě tepelné kapacity stavebního materiálu a jeho objemové hmotnosti. Důležitým faktorem při akumulaci energií je rovněž i jeho tepelná vodivost. Čím je tepelná vodivost stavební hmoty zásobníku vyšší, tím je i průběh vyrovnávání teplot bude rychlejší. Pracovní teploty zásobníku se pohybují v rozmezí teplot 200 °C až 500 °C. V této oblasti musíme hledat materiál s příznivými hodnotami měrné kapacity a tepelné vodivosti. Výsledky měření představitelů šamotů a žáruvzdorných betonů jsou uvedeny v tabulce 17. Hodnoty v tabulce jsou uspořádány jednak podle druhu testovaného

materiálu, který je v tabulce vyznačen jako *Typ*. Jednotlivé druhy materiálu jsou v této tabulce krátce popsány. 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 onačením ZB1. Jedná se o vzorek žárobetonu s označením TERMBET. V dalších řádcích tabulky je uveden typ ZB2, který označuje vzorek žárobetonu MEBET. V posledním řádku tabulky se uvádí typ s označením SQ, který 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.

Souhrnné výsledky měření představitelů silikátových materiálů jsou vyobrazeny v diagramech na obrázcích 95 a 96. Z vyhodnocení jsem vypustil materiál s vysokým obsahem oxidu hořečnatého, neboť cenově je tento materiál nesrovnatelný s materiály žárobetonových směsí. Porovnáním hodnot tepelné vodivosti v teplotním intervalu 200 °C až 500 °C se jeví nejvhodnějším materiálem typ ZB2 s označením žárobeton MEBET ACU-M. Rovněž jeho výhodu spatřuji i v hodnotě tepelné kapacity, která s rostoucí teplotou v oblasti do 500 °C rovněž narůstá.

Tabulka 17 Souhrn výsledků měření vybraných představitelů silikátových směsí [autor]

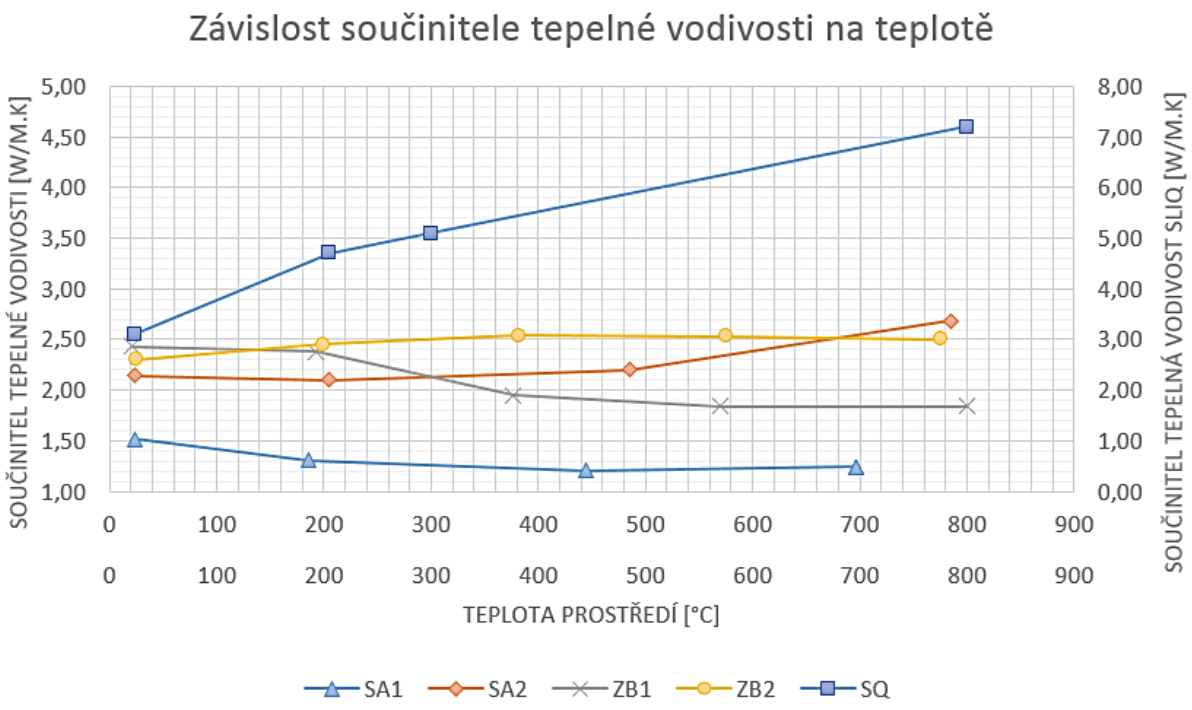
Typ	*Symbol*	*I*	*II*	*III*	*IV*	*V*	ρ *kg.m*$^{-3}$
SA1	t °C	23,5	186	445		697	1 907
	λ W.m^{-1} K	1,52	1,31	1,21		1,24	
	c J kg^{-1} K	758	739	711		666	
SA2	t °C	24	205	485	785		1 974
	λ W.m^{-1} K	2,14	2,1	2,20	2,68		
	c J kg^{-1} K	730	846	1089	2046		
ZB1	t °C	21	192	377	564	798	2 713
	λ W.m^{-1} K	2,43	2,38	1,95	1,84	1,84	
	c J kg^{-1} K	993	1191	1535	1619	1781	
ZB2	t °C	25	200	382	575	775	3 401
	λ W.m^{-1} K	2,30	2,45	2,54	2,53	2,50	
	c J kg^{-1} K	445	1005	1405	1532	1118	
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		

Vzhledem k hodnotě objemové hmotnosti obou srovnávaných materiálů tedy doporučuji použít pro akumulační jádro solárních senzibilních zásobníků materiál s větší objemovou hmotností,

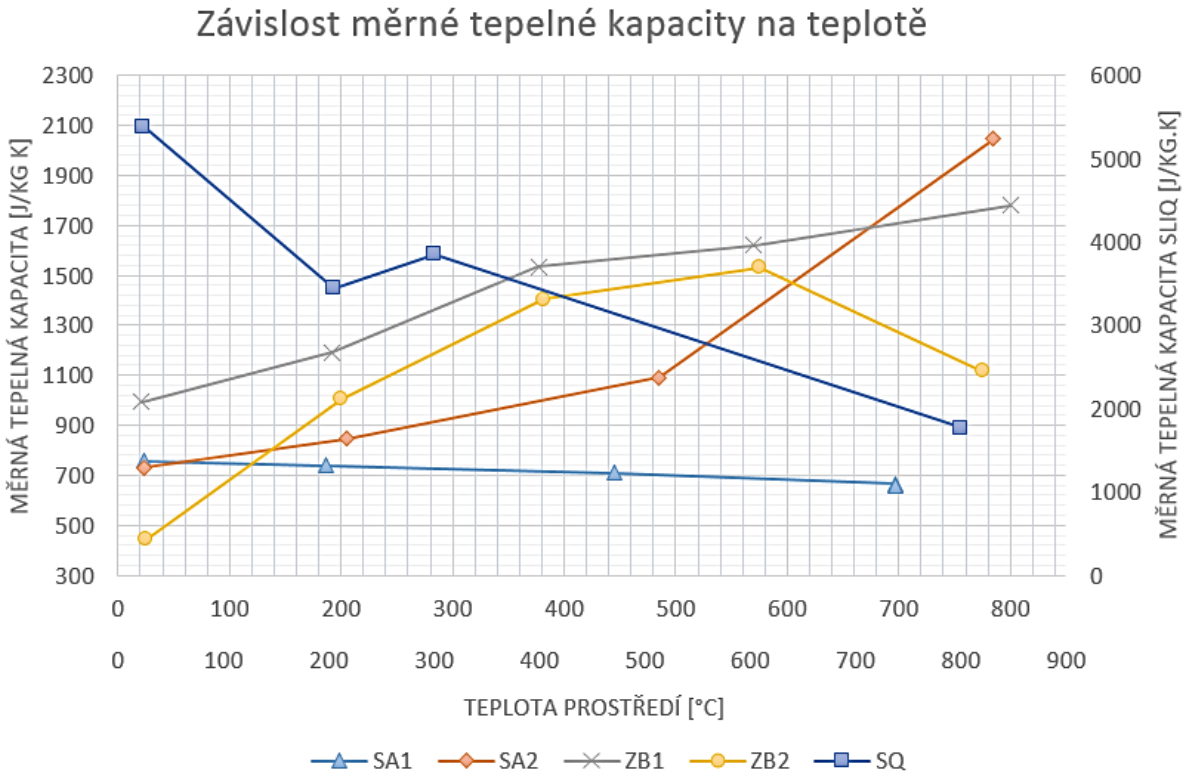
konkrétně materiál s označení MEBET ACU M, i na úkor jeho nižší hodnoty tepelné vodivosti. Vzhledem k objemové hmotnosti tohoto materiálu bude jeho objem 1,25× menší než velikost zásobníku z materiálu TERMBET.

Optimální volbou použitého materiálu, z hlediska všech zvolených kritérií, je materiál s označením MEBET ACU-M. Parametry senzibilního zásobníkového systému při použití izolačních vrstev druhé varianty (viz závěr kap.9.2.3), ověřovaných zkouškami ve firmě ALUMISTR, se docílí požadovaného efektu, týkajícího se zejména 1minima úbytku tepelné energie.

Podrobné řešení tepelných ztrát naakumulované energie při použití optimálně zvolených materiálů zásobníkového systému nejsou v této práci provedeny. Jejich přibližný odhad je řešen v kapitole 9. Přesný výpočet uvedeného problému vede k optimalizaci volby výše teploty vyhřátí zásobníkového jádra vzhledem k jeho tepelné vodivosti a teplotě výstupního media potřebného pro docílení minimálního denního úbytku vyvolaného spotřebou energie.



Obr. 95. *Změna součinitele tepelné vodivosti na teplotě [autor]*



Obr. 96. *Změna měrné tepelné kapacity na teplotě [autor]*

13 Závěr

V rámci dizertační práce jsem se zaměřil na řešení problematiky dlouhodobé akumulace tepelné energie získané ze Slunce. Jde o využívání obnovitelného zdroje energie, které nemá téměř žádný dopad na životní prostředí. Tato problematika vede k návrhu tzv. ostrovních systémů. V těchto případech vyvstává potřeba nasbíranou energii uskladnit a později využívat. Myšlenka uložení sluneční energie vedla k možnosti stavby akumulačních zásobníkových systémů tepelné energie.

Pro aplikace připadají v úvahu dva druhy akumulačních systémů, a to senzibilní zásobník a systém s latentním ukládáním energie. V rámci řešení problematiky jsem se zaměřil na využití senzibilního zásobníku tepla vyrobeného ze silikátových materiálů pracující v oblasti pracovních teplot 200 °C do 800 °C. Vývoj ostrovních systémů využívající solární zásobník je v současné době v počátcích.

Některé údaje a poznatky uvedené v této práci mohou být dále dodatečně upřesněny. Poslední zkoušky a ověření experimentálního chování zásobníkového systému u firmy ALUMISTR v Hrušovanech ukazují na nutnost volby vhodné pracovní teploty jádra. Konstrukčně je model studovaného zásobníkového systému proveden tak, že v žárobetonovém jádru je uložena kovová trubice, která slouží jako parní generátor, ve které se v průběhu průtoku akumulační hmotou jádra mění skupenství vody z kapalného na plynné, tedy v páru. Tato je zdrojem energie pro roztočení parní turbíny. Praktické modelové zkoušky na prototypu zásobníku ukázaly, že při teplotě jádra cca 130 °C může tato přeměna probíhat pouze krátkou dobu. Poté jádro na této teplotě není schopno dodávat vodě energii potřebnou ke skupenské proměně. Tato okolnost je způsobena hodnotou tepelné vodivosti materiálu jádra, která neumožňuje při relativně nízkých teplotách zásobníku dostatečně rychle poskytnout tepelný výkon pro ohřev průtočného media. Důležitým omezujícím faktorem je tedy rychlost šíření tepla hmotou zásobníku, jak již dříve bylo uvedeno ohledně požadované tepelné vodivosti. Bude tedy nutné ještě provést řadu zkoušek, nejen sledování tepelných vlastností použitých materiálů, ale rovněž i určení vhodné teploty, na kterou by měl být zásobník sluneční energií nahřátý. Z toho vyplývá možnost řešit problém optimalizační metodou spočívající v minimalizaci teploty ohřevu zásobníku v závislosti na jeho velikosti, tepelné kapacitě i tepelné vodivosti. Důležitými faktory budou i další parametry, zejména otázka bezpečnosti parního systému, deformace a zatížení tělesa zásobníku vzhledem k rozdílným objemovým změnám betonu vnitřního výměníku tepla aj. Současně bude nutné se zaměřit i na jeho mechanickou konstrukci zahrnující jednak regulaci vstupního tepelného toku a dodávky energie podle potřeby na její využití. Tento problém

v konečné fázi zahrnuje komplexní energetickou bilanci vztaženou na celý energetický systém, jednak příjmu energie, její akumulaci i charakteristice odběru. Tato oblast problematiky však vybočuje z rámce zadání mé disertační práce.

14 Přílohy

V přílohách k dizertační práci uvádím k nahlédnutí programy řešící jednak řízení procesu měření vzorků tj. program PEC, zpracovaném v systému DELPHI a program pro vyhodnocení tepelných fyzikálních veličin s názvem WIRD, zpracovaný v systému MATLAB.

14.1 Opis programu PEC

```
unit Pec_u;

interface

uses IniFiles, DateUtils, Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,Graphics, Controls, Forms, Dialogs, Menus, ExtCtrls, StdCtrls, Ahlborn_Serial, USB_Serial;


type TForm1 = class(TForm)

   Timer1: TTimer;

   Cas: TEdit;

   Soubor: TLabel;

   Varovani: TLabel;

   Opis: TLabel;

   T_Pec: TEdit;

   T_Wire: TEdit;

   T_aux: TEdit;

   PID_Stav: TEdit;

   Label1: TLabel;

   Label2: TLabel;

   Label3: TLabel;

   T_Sol: TEdit;

   U_Wire: TEdit;

   Label4: TLabel;

   Label5: TLabel;

   L_Hotovo: TLabel;

   Difer: TEdit;

   L_Mereni: TLabel;

   Count_Mes: TEdit;

   L_Wire_topeni: TLabel;

   Set_Poi: TEdit;

   procedure FormCreate(Sender: TObject);

   procedure MericiTiky(Sender: TObject);
```

```
    procedure Close(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
    private{Private declarations}
     Port_USB: TSerial;
     Port_Ahlborn: TSerial;
    public{Public declarations}
  end;
type ty_T=record Cas: TDateTime; T_pec, T_wire, T_aux, U_wire: real; end;
     ty_SetPoint=record n, i: byte; T, U: array[1..12] of real; end;
     ty_Stav=record Mer, Wire_topi: boolean;
                    Dif: array[1..5] of real;
                    Cas_mereni_Begin: TDateTime;
                    i_Count_Mes, i_dif: integer;
            end;
const CR=#13; LF=#10; CRLF=CR+LF;
      f_vy_t='Ahlborn.smt';
      Int_time=2000; {interval mezi merenim [msec]}
      Int_Save=30; {pocet intervalu Int_time mezi odecty}
var Form1: TForm1;
    vy: TextFile;
    T: ty_T;
    SetPoint: ty_SetPoint;
    Stav: ty_Stav;
implementation{$R *.dfm}
procedure ZAPIS_USB(var s: string);
function POSLI(s: string):boolean; var i: byte;begin{ODESLI}for i:=1 to length(s) do Form1.Port_USB.WriteByte(ord(s[i])); sleep(25); POSLI:=true; end{ODESLI};
function PRIJMI(var s: string):boolean; var b: byte;
begin{PRIJMI} b:=0; s:=''; while b<>13{=CR} do begin Form1.Port_USB.ReadByte(b); s:=s+chr(b); end; sleep(25); PRIJMI:=true; end{PRIJMI};
begin{ZAPIS_USB} POSLI(s); PRIJMI(s); end{ZAPIS_USB};
procedure ZAPIS_Ahlborn(var s: string);
function POSLI(s: string):boolean; var i: byte;begin{ODESLI}for i:=1 to length(s) do Form1.Port_Ahlborn.WriteByte(ord(s[i])); sleep(20); POSLI:=true; end{ODESLI};
function PRIJMI(var s: string):boolean; var b: byte; begin{ODESLI} b:=0; s:=''; while b<>3 do begin Form1.Port_Ahlborn.ReadByte(b); s:=s+chr(b); end; sleep(20); PRIJMI:=true; end{ODESLI};
begin{ZAPIS_Ahlborn} POSLI(s); PRIJMI(s); end{ZAPIS_Ahlborn};
procedure MERENI;
var s: string;
```

```
procedure VYPREPARUJ(s:string; var s_Text: string; var h: real);{s=označení kanálu; s_Text=hodnota text; h=hodnota numeric}
var s_: string;
   j: integer;
begin{VYPREPARUJ}
  s_:=s;
  s:='M'+s; ZAPIS_Ahlborn(s);
  s:='p'; ZAPIS_Ahlborn(s);
  delete(s,1,Pos(s_+':',s)+3);
  s_text:=copy(s,1,Pos(' ',s)-1);
  val(s_text,h,j);
end{VYPREPARUJ};
begin{MERENI}
  T.cas:=Now;
  VYPREPARUJ('01',s,T.U_wire); Form1.U_wire.Text:=s;
  VYPREPARUJ('00',s,T.t_aux); Form1.T_aux.Text:=s;
  VYPREPARUJ('20',s,T.t_wire); Form1.T_Wire.Text:=s;
  VYPREPARUJ('10',s,T.t_pec); Form1.T_Pec.Text:=s;
end;{MERENI}
procedure Hodnoceni;
function ZAPIS_UDAJE_DO_FILE(s: string): boolean; begin assign(vy,s); if FileExists(s) then append(vy) else rewrite(vy);  writeln(vy,SecondSpan(T.Cas,Stav.Cas_mereni_Begin):8:3,'  ',  T.T_pec:5:1,'  ',T.T_wire:5:1,' ',T.T_aux:5:1,' ',T.U_wire:6:3); close(vy); ZAPIS_UDAJE_DO_FILE:=true; end;
var s: string;
   i: byte;
   odch: real;
begin{Hodnoceni}
  if Stav.Mer then BeGin
                inc(Stav.i_Count_Mes); Form1.Count_Mes.Text:=IntToStr(Stav.i_Count_Mes);
                ZAPIS_UDAJE_DO_FILE(IntToStr(Setpoint.i)+'.set');
                if Stav.i_Count_Mes<400 then ( if not Stav.Wire_topi then begin
                                                Stav.Wire_topi:=true;
                                                Form1.L_Wire_topeni.Caption:='Wire                topí';
Form1.L_Wire_topeni.Font.Color:=clRed;
                                                s:='SOUT000'+CR; ZAPIS_USB(s);
                                               end {zapne WIRE-topeni}
                                )
                            else ( if Stav.Wire_topi then beGIn
```

```
                                        Form1.L_Wire_topeni.Caption:='Wire                    netopí';
Form1.L_Wire_topeni.Font.Color:=clGreen;
                                        Stav.Wire_topi:=false;    s:='SOUT001'+CR;    ZAPIS_USB(s);
s:='ENDS00'+CR; ZAPIS_USB(s);{deaktivace zdroje napěti}
                                        eND
                              );
            if Stav.i_Count_Mes>800 then bEgin Stav.Mer:=false;
                              Stav.i_Dif:=0; for i:=1 to 5 do Stav.Dif[i]:=0;
                              s:='E20';    ZAPIS_Ahlborn(s);    s:='f3';    ZAPIS_Ahlborn(s);    s:='R-20';
ZAPIS_Ahlborn(s);{deaktivace alarmu v Ahlborn}
                              s:='E20'; ZAPIS_Ahlborn(s); s:='C09'; ZAPIS_Ahlborn(s);{vypne funkci alarmu
v Ahlborn}
                              if    SetPoint.i<SetPoint.n    then    inc(SetPoint.i)    else    begin
Form1.L_Hotovo.Visible:=true; Form1.Timer1.Enabled:=false; end;
                              eNd;
          EnD
        else bEGin
            inc(Stav.i_Dif); Form1.Difer.Text:=IntToStr(Stav.i_Dif);
            if Stav.i_Dif=1 then begin
                        Stav.i_Count_Mes:=0;
                        Form1.Set_Poi.Text:=IntToStr(SetPoint.i)+' / '+IntToStr(SetPoint.n);
                        Form1.L_Mereni.Caption:='Ustalování                    teplot';
Form1.L_Mereni.Font.Color:=clGreen;
                        Form1.L_Wire_topeni.Caption:='Wire                    netopí';
Form1.L_Wire_topeni.Font.Color:=clGreen;
                        s:='E20'; ZAPIS_Ahlborn(s);
                        Str(SetPoint.T[SetPoint.i]:3:1,s); s:='L'+s+CR; ZAPIS_Ahlborn(s);
                        s:='E20';    ZAPIS_Ahlborn(s);    s:='f3';    ZAPIS_Ahlborn(s);    s:='R20';
ZAPIS_Ahlborn(s);
                      end;
            if (Stav.i_Dif mod 30)=0 then begin
                          Stav.Dif[5]:=Stav.Dif[4];  Stav.Dif[4]:=Stav.Dif[3];  Stav.Dif[3]:=Stav.Dif[2];
Stav.Dif[2]:=Stav.Dif[1]; Stav.Dif[1]:=T.T_wire-SetPoint.T[SetPoint.i];
                          odch:=0;    for    i:=1    to    5    do    odch:=odch+abs(Stav.Dif[i]);
Form1.PID_Stav.Text:=FloatToStrF(odch,ffFixed,4,1);
                          { Stav.i_Dif:=160; odch:=2; }
                          if (Stav.i_Dif>150) and (odch<10.0{odhad odchylky}) then begin
                                                Form1.L_Mereni.Caption:='Měření';
Form1.L_Mereni.Font.Color:=clRed;
                                                Stav.Mer:=True;    Stav.i_Count_Mes:=0;
Stav.Wire_topi:=false;
```

```
                                                                    s:='SESS00'+CR;
ZAPIS_USB(s);{inicializace zdroje napěti}

s:='VOLT00'+FormatFloat('000',SetPoint.U[SetPoint.i])+CR; ZAPIS_USB(s);
                                                                    Stav.Cas_mereni_Begin:=Now;
                                                                  end;
                                    end;
                  eND;
end{Hodnoceni};
procedure TForm1.MericiTiky(Sender: TObject);
begin{MericiTiky}
  Cas.Text:=FormatDateTime('hh:nn:ss,z   (dd.mm.yyyy)',Now);
  Form1.T_Sol.Text:=FloatToStrF(SetPoint.T[SetPoint.i],ffNumber,6,1);
  Mereni;
  Hodnoceni;
end{MericiTiky};
procedure INIT;
var s: string;
begin{INIT}
  s:='d'+FormatDateTime('ddmmyy',Now); ZAPIS_Ahlborn(s);
  s:='U'+FormatDateTime('hhnnss',Now); ZAPIS_Ahlborn(s);
  s:='Y01'; ZAPIS_Ahlborn(s); {hystereze nastavena na 1 digit}
  s:='E20'{volba kanalu}; ZAPIS_Ahlborn(s); s:='C09'{vymazani nastaveni alarmu}; ZAPIS_Ahlborn(s);{Vypne
nastaveni ALARMU Ahlborn, v peci se netopi}
(*****************************************************************************************)
  SetPoint.n:=3; Setpoint.T[1]:=100; Setpoint.T[2]:=200; Setpoint.T[3]:=472.2;{teploty °C}
              Setpoint.U[1]:=150;  Setpoint.U[2]:=150;  Setpoint.U[3]:=150; {napěti se udava v desetinach voltu}
  Setpoint.i:=3;{nastaveni 1. setpointu}
(*****************************************************************************************)
  Stav.i_dif:=0; Stav.i_Count_Mes:=0; Stav.Mer:=false;
  Form1.Timer1.Interval:=Int_time; Form1.Timer1.Enabled:=True;
end{INIT};
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
begin{FormCreate}
  try
    Port_USB:=TSerial.Create({Port}4,{BaudRate}9600);{stabilizovany zdroj}
   except
    on E: Exception do begin
```

```
      Application.MessageBox(PChar(E.Message),'Cokoliv',MB_ICONHAND);
      Application.Terminate;
    end;
  end;
  try
    Port_Ahlborn:=TSerial.Create({Port}3,{BaudRate}9600);{centrala AHLBORN}
   except
    on E: Exception do begin
      Application.MessageBox(PChar(E.Message),'Cokoliv',MB_ICONHAND);
      Application.Terminate;
    end;
  end;
  Form1.DoShow;
  INIT;
end{FormCreate};
procedure TForm1.Close(Sender: TObject; var Action: TCloseAction);
var s: string;
begin{Close}
  if Application.MessageBox('Fakt chceš zaklopit program?',
                        'Sorry vole, běží měření, myslíš to fakt vážně?', MB_YESNO) <> 6
     then Action:=caNone else Action:=caFree;
   s:='E20'; ZAPIS_Ahlborn(s); s:='f3'; ZAPIS_Ahlborn(s); s:='R-20'; ZAPIS_Ahlborn(s);{deaktivace alarmu v Ahlborn}
   s:='E20'; ZAPIS_Ahlborn(s); s:='C09'; ZAPIS_Ahlborn(s);{vypne funkci alarmu v Ahlborn}
   Port_Ahlborn.Destroy();
  s:='ENDS00'+CR; ZAPIS_USB(s);{deaktivace zdroje napěti}Port_USB.Destroy();
end;{Close}
end.
```

14.2 Opis programu WIRD

```
% wird (C) J.V.31.1.2016
% hot-wire identification of thermal conductivity and capacity
tos=1e-8;     % tolerance for relative error between sensors
itm=200;      % maximal # of curve fittinge loops
locL=0;       % # of first ignored values in heated part
locR=0;       % # of last  ignored values in heated part
kocL=0;       % # of first ignored values in unheated part
```

```
kocR=0;       % # of last  ignored values in unheated part
wQ=.75;       % weight of identification results from heated part [0,1]
prn=0;        % print iterations (yes/no)
acc=1;        % shift experimental values (to reduce bad accuracy)
d=.003;       % 0.0063; % position of 1.sensor
ds=.015;      % 0.0189; % position of 2.sensor
Qmeas=1;
%Qmeas=4.4*1000/115; %/.21;% length related to averaged thermal power
Lam=1.5;      % estimate of thermal conductivity
Rho=1907;     % material density
C=1000.;      % thermal capacity per unit volume (estimate)
Kap=Rho*C;    % thermal capacity per unit mass   (estimate)
Alp=Lam/Kap;  % thermal diffusivity              (estimate)
To=770;     % 200; % temperature level
% data input
d2=[(d/2)^2 (ds/2)^2];
nam=[]; while isempty(nam), nam=input('data file: ','s'); end
fid=fopen(strcat(nam,'.dat'),'r');
[buf len]=fscanf(fid,'%g %g %g %g',inf);
if len<4, disp('bad input data'), keyboard; end
t0=buf(1:4:end-3); T0=buf(2:4:end-2)-buf(2); Ts0=buf(3:4:end-1)-buf(3); Q0=buf(4:4:end);
n0=length(t0); Qm=max(Q0)*.1;
locQ=find(Q0>Qm);                                                    n=length(locQ); n1=n+1;
kocQ=find(~Q0(n1:end)&T0(n1:end)>T0(end)&Ts0(n1:end)>Ts0(end))+n;                kocQ=[kocQ(1)-1;kocQ];
m=length(kocQ);
t=t0(locQ); T=T0(locQ); Ts=Ts0(locQ); Ql=Q0(locQ); Q=sum(Ql)/n*Qmeas;
u=t0(kocQ); U=T0(kocQ); Us=Ts0(kocQ);
fprintf(1,'\n%d records found, ',n0); fclose(fid);
Qpi=Q/(4*pi); k=locQ(1); if locL<k, locL=k; end
tl=t-t(k-1); ul=u-t(k-1);       locL=max([locL k]); tQ=tl(end);
locQ=find(~T|~Ts);              locL=max([locL locQ(end)]);
locQ=find(U-U(end)&Us-Us(end)); kocR=min([kocR kocQ(end)]); kocL=max([kocL 1]);
clear buf T0 Ts0 U0 Us0 locQ t0 Q0
% computational data choice
if max([locL locR])>n|max([kocL kocR])>m, error('bad data choice setting'); end
n1=n+1; locL=locL+1; locR=n-locR; %loc=fix(n/2);
      kocL=kocL+1; kocR=m-kocR;
```

```
t=tl(locL:locR); T0=T(locL:locR); Ts0=Ts(locL:locR); len=length(t); Ql0=Ql(locL:locR);
u=ul(kocL:kocR); U0=U(kocL:kocR); Us0=Us(kocL:kocR); ken=length(u);
fprintf(1,'%d+%d applied\n',length(t),length(u));
T=T0; Ts=Ts0; U=U0; Us=Us0; ut=u-tQ; loc=length(T);
clear T0 Ts0 U0 Us0
% mean value of thermal power
Ta=T(loc); Tsa=Ts(loc); ta=t(loc);
P=sum(Ql0)/len;
w=abs(Ql0-P)./max(max(Ql0)-P,P-min(Ql0)); low=[]; d=.05;
while isempty(low), d=d+d;
 w1=zeros(len,1); low=(w<d); w1(low)=1-w(low).^d; end
d=sum(w1); if ~d, w1=ones(len,1); d=len; end
Q=w1'*Ql0/d;
Q=Q*Qmeas; Ql=Ql*Qmeas; Ql0=Ql0*Qmeas; P=P*Qmeas;
% check thermal power stability
figure, win=gcf; % Fig.Q
plot(tl,Ql,'b',tl(locL:locR),Ql(locL:locR),'r',...
   [tl(1) tl(end)],[Q Q],'c',  [tl(locL) tl(locR)],[Q Q],'m',...
   [tl(1) tl(end)],[P P],'c--',[tl(locL) tl(locR)],[P P],'m--');
axis tight; hold on; grid on; zoom on
plot(tl(locL:locR),Ql0,'r');
xlabel('{\it t} [s]');
ylabel('{\it Q} [W]');
text(3,Q,sprintf('   %g W',Q));
print('-djpeg100',strcat(nam,'Q.jpg')); pause(3); close(win);
Qpi=Q/(4*pi); a=Qpi/Lam;
% estimate of thermal conductivity and diffusivity - heated part
ti=1./t; tai=1/ta;
Log=log(t/ta); Logs=ti-tai; Log2=Log'*Log; Logs2=Logs'*Logs;
d2t=d2(1)*ti; d2ta=d2(1)*tai; d2ts=d2(2)*ti; d2tsa=d2(2)*tai;                    % Taylor: Euler-Mascheroni
expi=expint(d2t /Alp)-expint(d2ta /Alp); a=(T -Ta -a*(expi-Log))'          *Log /Log2;  Lam=Qpi/a;     %       -log(B)
expi=expint(d2ts/Alp)-expint(d2tsa/Alp); b=(Ts-Tsa-a*(expi-(d2ts-d2tsa)/Alp))'*Logs/Logs2; Alp=a*d2(2)/b; %+    (B)
%                                                    - (B)^2/(2.2!) + (B)^3/(3.3!) - ...
expi=expint(d2t /Alp)-expint(d2ta /Alp); Tm =Ta +a*expi;
expi=expint(d2ts/Alp)-expint(d2tsa/Alp); Tsm=Tsa+a*expi;
```

```
erd=[sqrt(sum((Tm-T).^2)/len) sqrt(sum((Tsm-Ts).^2)/len)];

fmt='\n#%d''%03d: lam=%g, alp=%g, kap=%g, err=[%g,%g] dev=[%g,%g]';

fprintf(1,fmt,0,1,Lam,Alp,Kap,Inf,Inf,erd);

if acc, c=sum(Tm -T) /len; Tm =Tm -c;

      c=sum(Tsm-Ts)/len; Tsm=Tsm-c; end

LamQ=Lam; AlpQ=Alp; a=Qpi/Lam;

% estimate of thermal conductivity and diffusivity - uheated part

ui=1./u; uti=1./ut;

Kog0=log(u/ta); Kog=Kog0-log(ut); Kogs=(ui-tai)-uti; Kog2=Kog'*Kog; Kogs2=Kogs'*Kogs;

d2u=d2(1)*ui; d2ut=d2(1)*uti; d2us=d2(2)*ui; d2uts=d2(2)*uti; % Taylor: Euler-Mascheroni

expi=expint(d2u /Alp)-expint(d2ta /Alp)-expint(d2ut /Alp); a=(U -Ta -a*(expi-Kog))'                    *Kog /Kog2;
Lam=Qpi/a;

expi=expint(d2us/Alp)-expint(d2tsa/Alp)-expint(d2uts/Alp);                    b=(Us-Tsa-a*(expi-(d2us-d2tsa-
d2uts)/Alp))'*Kogs/Kogs2; Alp=a*d2(2)/b;

%

expi=expint(d2u /Alp)-expint(d2ta /Alp)-expint(d2ut /Alp); Um =Ta +a*expi;

expi=expint(d2us/Alp)-expint(d2tsa/Alp)-expint(d2uts/Alp); Usm=Tsa+a*expi;

erd=[sqrt(sum((Um-U).^2)/len) sqrt(sum((Usm-Us).^2)/len)];

fprintf(1,fmt,0,2,Lam,Alp,Kap,Inf,Inf,erd);

if acc, c=sum(Um -U) /len; Um =Um -c;

      c=sum(Usm-Us)/len; Usm=Usm-c; end

Lam=Lam-(Lam-LamQ)*wQ; Alp=Alp-(Alp-AlpQ)*wQ;

LamX=Lam; AlpX=Alp;

% evaluation of thermal conductivity and diffusivity - heated & unheated part

it=0; err=Inf; rep=1; lam=Lam; alp=Alp;

while rep, it=it+1;

 lam0=lam; alp0=alp; a=Qpi/lam0;

 expi=expint(d2t /alp0)-expint(d2ta /alp0); a=(T -Ta -a*(expi-Log))'            *Log /Log2;  lam=Qpi/a;

 expi=expint(d2ts/alp0)-expint(d2tsa/alp0); b=(Ts-Tsa-a*(expi-(d2ts-d2tsa)/alp0))'*Logs/Logs2; alp=a*d2(2)/b;

 lamx=lam; alpx=alp; a=Qpi/lamx;

 expi=expint(d2u /alpx)-expint(d2ta /alpx)-expint(d2ut /alp0); a=(U -Ta -a*(expi-Kog))'                    *Kog /Kog2;
lam=Qpi/a;

 expi=expint(d2us/alpx)-expint(d2tsa/alpx)-expint(d2uts/alp0);                    b=(Us-Tsa-a*(expi-(d2us-d2tsa-
d2uts)/alpx))'*Kogs/Kogs2; alp=a*d2(2)/b;

 lam=lam-(lam-lamx)*wQ;  alp=alp-(alp-alpx)*wQ; a=Qpi/lam;

%

 erx=[abs(lam-lam0)/LamQ abs(alp-alp0)/AlpQ]; err=norm(erx); kap=lam/alp;

 expi=expint(d2t /alp)-expint(d2ta /alp); Tn =Ta +a*expi;
```

```
 expi=expint(d2ts/alp)-expint(d2tsa/alp); Tsn=Tsa+a*expi;
 if acc, c=sum(Tn -T) /len; Ta =Ta -c; Tn =Tn -c;
        c=sum(Tsn-Ts)/len; Tsa=Tsa-c; Tsn=Tsn-c; end
 erd=[sqrt(sum((Tn-T).^2)/len) sqrt(sum((Tsn-Ts).^2)/len)]; rep=(err>tos)&(it<itm);
 if prn|~rep, fprintf(1,fmt,1,it,lam,alp,kap,erx,erd); end;end
% show results
res=sprintf('=%g W/(K.m)', lam); Res1=strcat('   \lambda',res);
res=sprintf('=%g J/(m3.K)',kap); Res2=strcat('   \kappa', res);
res=sprintf('%g K',erd(1));      Ers1=strcat('   {\it T} \pm ',res);
res=sprintf('%g K',erd(2));      Ers2=strcat('   {\it T} \pm ',res);
Res1=strcat(Res1,Ers1); Res2=strcat(Res2,Ers2);
for k=0:1,                                    if k, a=Qpi/lam;      else alp=AlpX; a=Qpi/LamX; end
 expi=expint(d2t /alp)-expint(d2ta /alp);                 if k, Tn =Ta +a*expi; else Tm =Ta +a*expi; end
 expi=expint(d2ts/alp)-expint(d2tsa/alp);                 if k, Tsn=Tsa+a*expi; else Tsm=Tsa+a*expi; end
 expi=expint(d2u /alp)-expint(d2ta /alp)-expint(d2ut /alp); if k, Un =Ta +a*expi; else Um =Ta +a*expi; end
 expi=expint(d2us/alp)-expint(d2tsa/alp)-expint(d2uts/alp);   if   k,   Usn=Tsa+a*expi;   else   Usm=Tsa+a*expi;
end;end
dT =T -Ta;  dTs =Ts -Tsa; dU =U -Ta;  dUs =Us -Tsa; % blue points     (input)
dTn=Tn-Ta;  dTsn=Tsn-Tsa; dUn=Un-Ta;  dUsn=Usn-Tsa; % red full curves   (new)
dTm=Tm-Ta;  dTsm=Tsm-Tsa; dUm=Um-Ta;  dUsm=Usm-Tsa; % red dashed curves (old)
%
figure, win=gcf; ax=[t;u];      % Fig.A
plot(ax,[T; U] +To,'bx',ax,[Tm; Um] +To,'r--',ax,[Tn; Un] +To,'r'); axis tight; hold on; grid on; zoom on
plot(ax,[Ts;Us]+To,'bx',ax,[Tsm;Usm]+To,'r--',ax,[Tsn;Usn]+To,'r');
xlabel('{\it t} [s]'); ylabel('{\it T} [°C]');
loc=min(t);   loc1=max(T);   loc2=(loc1-min(T))/20;      loc1=loc1+To;   text(loc,loc1-loc2,Res1);   text(loc,loc1-
loc2*2,Res2);
print('-djpeg100',strcat(nam,'A.jpg')); pause(3); close(win)
%
figure, win=gcf; ax=[Log;Kog0]; % Fig.B
plot(ax,[dT; dU] ,'bx',ax,[dTm; dUm] ,'r--',ax,[dTn; dUn] ,'r'); axis tight; hold on; grid on; zoom on
plot(ax,[dTs;dUs],'bx',ax,[dTsm;dUsm],'r--',ax,[dTsn;dUsn],'r');
xlabel('ln ({\it t} [s] )'); ylabel('{\it T-T_{\rm*}} [K]');
loc=min(Log); loc1=max(dT); loc2=(loc1-min(dT))/20; text(loc,loc1-loc2,Res1); text(loc,loc1-loc2*2,Res2);
print('-djpeg100',strcat(nam,'B.jpg')); pause(3); close(win)
```

Citovaná a studovaná literatura

Knihy časopisy konferenční příspěvky a internetové odkazy.

[1]. Departmant of Mechanical Engineering, Kun Shan University 949, Da-Wan Road, Yung Kung City, Tainan Hsien 710, Taiwan, ROC Thermal Energy Storage Laboratory, School of Energy & Environmental Studies, Khandwa Road Campus, Devi Ahilia University, Indore 452017, India.
Dostupné na:
https://vignette.wikia.nocookie.net/solarcooking/images/e/ea/Review_of_Thermal_Storage.pdf/revision/latest?cb=20150704215933

[2]. Jarošová, P., Šťastník, S., Vala, J., *Identification of thermal conductivity of powdery insulation materials*, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 602 00, Veveří 95

[3]. Šot, F., Šťastník, S., Vala, J., *Modelling of the thermal heat storage*, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 602 00, Veveří 95, *Maltoviny 2014*

[4]. Roubíček, T., *Nonlinear Partial Differential Equations with Applications* (Birkhäuser,2005).

[5]. Vala, J., On the computational identification of temperature-variable characteristics of heat transfer, *Applications of Mathematics*, Proceedings of International Conference, Mathematical Institute AS CR Prague, 2013, p. 215-224.

[6]. Phase change energy storage, Dostupné na: http://www.rgees.com/technology.php#pcm, (cit.10.2013).

[7]. Solární elektrárna ostrovního domu, *Schéma ostrovního systému*, http://www.ostrovnidum.cz/index.php?s=texty&o=fve_ostrovni_system.

[8]. Technický list, SCH 60, http://www.pd-refractories.cz/cs/pdf/162

[9]. Lach, V., Teoretické základy výroby pálených stavebních látek, Keramika II, Vysoké učení technické, v Čs redakci VN MON 1989.

[10]. Buddhi, D., Sawhney, R.L., In: *Proceedings on thermal energy storage and energy conversion*, 1994

[11]. Davies, M.,G., *Building Heat Transfer* (Wiley,J., & Sons, 2004).

[12]. Costa, M., Buddhi, D., Oliva, A., Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage systém with enhanced heat conduction. *Energy Convers Manage* 1998;39(3/4):319-30

[13]. Solární experti, *Jak funguje ostrovní fotovoltaický systém*, https://www.solarniexperti.cz/jak-funguje-ostrovni-off-grid-fotovoltaicky-system/, (cit.3.2015).

[14]. Enerfin s.r.o., *Ostrovní fotovoltaické systémy*, http://www.enerfinplus.cz/ostrovni-systemy.html/, (cit.1.2016).

[15]. Nevřivová, L., Speciální keramika, *Žáruvzdorné materiály,* VUT Brno, Fakulta stavební, 1992

[16]. Materiálový list, S III-KP, http://www.pd-refractories.cz/vyrobni-program/287-siii-kp

[17]. Wen, Sheffled J.,W., O´Dell, M.,P.,. *Analytical and experimental investigation of meltingheat transfer*. J Thermophys 1989;3:330-9

[18]. Bermúdez de Castro,A., *Continuum Thermomechanics* (Birkhäuser, 2005).

[19]. Carslaw, H.S., and Jaeger, J.,C., *Conduction of Heat in Solids* (Clarendon Press Oxford,1959).

[20]. Černý et al. Complex Systems and Methods for Directed Design and Assessment of Functional Properties of Building Materials *Assessment and Synthesis of Analytical Data and Construction of the System* (Czech Technical University in Prague, 2010).

[21]. Davies, G., *Building Heat Transfer* (Wiley,J., & Sons, 2004).

[22]. Isakov, V., *Inverse Problems for Partial Differential Equations* (Springer, 2006).
[23]. Šťastník, S., Vala, J. and Kmínová, H., Identification of thermal technical characteristics from the measurement of non-stationary heat propagation in porous materials, *Kybernetika* Vol. 43 (2007), p. 561-576.
[24]. Vala, J.,: Least-squares based technique for identification of thermal characteristics of building materials, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*. Vol. 5 (2011), p. 126-134.
[25]. Bochev, P.B. a Gunzburger, M.D., *Least-Squares Finite Element Methods*. Springer, New York, 2009.
[26]. Dohnalová, L., Trhlíková I. a Zmeškal, O., Temperature dependence of thermal parameters of building materials. Proceedings of *Thermophysics* in Podkylava (Slovakia), Slovak Academy of Sciences, Bratislava, 2013, str. 194-207.
[27]. ČSN EN ISO 8894-1: Žáruvzdorné materiály – *Stanovení tepelné vodivosti*. ÚNMZ, Praha, 2011.
[28]. Gutierrez, E. Miravete, *Conduction Heat Transfer*. Hartford University, 2006.
[29]. Vala, J. a Jarošová, P., Identification of thermal characteristics of building materials at high temperatures. Proceedings of *Integrity, Reliability and Failure of Mechanical Systems* in Funchal (Madeira), University of Porto, 2013, paper #2033, 23 str.
[30]. Vala, J., Šťastník, S., Jarošová, P., *Identifikace tepelných charakteristik stavebních materiálů metodou topného drátu.* Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně, *Maltoviny 2013.*
[31]. Vala, J., Least-squares based technique for identification of thermal characteristics of building materials, *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation* Vol. 5 (2011), p. 126-134.
[32]. Průmyslová keramika, *Technické listy*, Průmyslová keramika spol. s r.o., Rájec-Jestřebí, http://www.prumker.cz/, (cit.1.2016).
[33]. Šťastník, S.,Vala, J., Šot, F., *Physical properties of selected silicates for long-term heat container*, *v časopisu,* Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně.
[34]. TermBet, Průmyslová keramika, spol. s r.o., Rájec-Jestřebí, *Technický list,* http://www.prumker.cz/, (cit.1.2016).
[35]. MEBET, Průmyslová keramika, spol. s r.o., Rájec-Jestřebí, *Technický list,* http://www.prumker.cz/, (cit.1.2016).
[36]. Vala, J., Šot, F., *Hot-wire identification of thermal conductivity and capacity*, Wird, J.V.31.1.2016, Fakulta stavební Vysoké učení technického v Brně, katedra matematiky
[37]. Taylor, H.,F.,W., *Cement chemistry*, London: Academic Press, 1990.
[38]. Módní trendy solárních systémů v roce 2015, *Akumulátory, Hybridní systémy pro řízení spotřeby, Solární mobilní systémy*, https://www.solarniexperti.cz/modni-trendy-solarnich-panelu-v-roce-2015/,(cit.5.2015)
[39]. *Solární elektrárny*, http://www.solarnielektrarny.cz/sites/default/files/images/ostrovni-fve-b.jpg (cit.5.2015)
[40]. Šťastník. S, Šot, F, *Program PEC*, VUT Brno, Fakulta stavební, 2016
[41]. Vala, J., Šot, F. *Program WIRD*, VUT Brno, Fakulta stavební, 2016

Technické normy

ČSN EN 12475 Rozdělení žáruvzdorných materiálů, ÚNMZ Praha, 1999.

ČSN EN 1402 Rozdělení netvarových žáruvzdorných výrobků, ÚNMZ Praha,

ČSN EN ISO 8894-1 Žáruvzdorné materiály Stanovení tepelné vodivosti – Část 1: Metoda topného drátu, ÚNMZ Praha, 2011.

ČSN ISO 5019-1 Žáruvzdorné tvarovky pravoúhlé, Rozměry část-1, ÚNMZ Praha, 1994.

Seznam použitých zkratek, značení a symbolů

Seznam použitých zkratek

SA1	Šamot 1, vzorek č. OH 1927	DCC	ZB ztekucený
SA2	Šamot 2, vzorek č. OH 1987	RCC	ZB se středním obsahem cementu
ZB1	Žárobeton typ TERMBET OL-12	MCC	ZB se středním obsahem cementu
ZB2	Žárobeton typ MEBET ACU-M	LCC	ZB s nízkým obsahem cementu
SQ	Slitina s obsahem MgO typ SLIQ	ULCC	ZB s velmi nízkým obsah. cementu
DC	Žárobeton hutný (ZB-žárobeton)	NCC	ZB bezcementový
HBC	ZB s hydraulickou vazbou		
CBC	ZB s chemickou vyzbou		

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotka	Název proměnné
a_m	J kg^{-1}	Latentní teplo
c_{sp}	J kg^{-1} K^{-1}	Měrná tepelná kapacita tuhé fáze
c_{ep}	J kg^{-1} K^{-1}	Měrná tepelná kapacita tekuté fáze
c	J kg^{-1}K^{-1}	Měrná tepelná kapacita
c_p	J kg^{-1} K^{-1}	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
d	m	Symbol pro obecnou polohu poloměru od topného drátu
dT	K	Přírůstek teploty
E_{di}	kWh d^{-1}	Průběžná denní potřeba energie
F		Regresní funkce závislosti teploty na času
$F(\lambda,\alpha)$		Skalární součin rozdílu teplot – obecná definice
Δh	mol	Látkové množství
h	m	Vzdálenost šíření teplotní vlny v objemu tělesa
I	A	Proud protékající topným drátem
L	m	Aktivní délka topného drátu
L^2		Lebesgueuv prostor funkcí integrovatelných ve 2. mocnině
m	kg	Hmotnost

m_t	kg	Hmotnost tuhé fáze
P	W	Výkon na topném drátu
P_w	W m^{-1}	Výkon dodávaný do topného drátu vztažený na 1 metr
q		Mechanický ekvivalent tepla
$q(x,t)$	J	Tepelný tok kolmo k hranicí δΩ v čase t
Q	J	Tepelný obsah hmoty
Q_{zi}	J	Interní tepelný zdroj v systému R_+
Q_{ze}	J	Externí tepelný zdroj
$Q_{\rho\varphi}$	J	Interní tepelný zdroj ve sférickém souřadnicovém systému
$\Delta Q(t)$	J	Přírůstek tepla v čase t
r	m	Vzdálenost čidla teploty bližšího k topnému drátu
r_1	m	Vzdálenost čidla teploty vzdálenějšího od topného drátu
R	m	Vzdálenost mezi měřícími termočlánky
R_+		Kladné hodnoty souřadnic v oblasti reálných čísel
R^3		Eukleidovský třírozměrný prostor v oblasti reálných čísel
t	sek	Čas
t_a	sek	Počáteční čas dodávky energie do topného drátu
t_i	sek	Doba *i*-tého měření
t_p	sek	Doba dodávky potřebného výkonu
T	°C	Teplota
T_{di}	°C	Denní teplota okolí
T_e	°C	Průměrná teplota okolí během ročního období
T_f	K	Konečná teplota akumulace
T_i	K	Počáteční teplota akumulace
T_m	K	Teplota fázové přeměny
T_s	°C	Výběrový průměr teplot
U	V	Napětí na topném drátu
$W^{1,2}$		Sobolevovův prostor funkcí integrovatelných ve druhé mocnině s první spojitou derivací
$W(r,t)$		Váhová funkce
X		Vektor souřadnic v R^3
x, y, z	m	Souřadnice kartézského souřadnicového systému (R_+)
α	m^2 s^{-1}	Součinitel teplotní vodivosti

Γ		Podmnožina množiny Ω
$\delta\Omega$		Hranice množiny Ω
η		Účinnost napájecího zařízení
τ	sek	Doba působení tepelné energie
κ	J m^{-3} K^{-1}	Objemová tepelná kapacita (ρ*c)
λ	W m^{-1} K^{-1}	Tepelná vodivost
λ_i	W m^{-1} K^{-1}	Tepelná vodivost v čase t_i
ν		Normálový vektor k hranici δΩ
ρ	kg m^{-3}	Objemová hmotnost
$\Psi(r,t)$		Přípustná integrovatelná funkce spojitá na druhé derivaci
Ω		Podprostor prostoru R^3
φ	rad	Souřadnice ve sférickém prostoru – úhel průvodiče
$\varphi(r,t)$		Přípustná integrovatelná funkce spojitá na druhé derivaci
σ_s	°C	Směrodatná odchylka teplotního průběhu
∇		Hamiltonův operátor $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$
Δ		Lapalceuv operátor $\Delta = (\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2})$

Seznam značení používaných v silikátových hmotách

C	CaO	Oxid vápenatý	A	Al_2O_3	Oxid hlinitý
S	SiO_2	Oxid křemičitý	M	MgO	Oxid hořečnatý
F	Fe_2O_3	Oxid železitý	K	K_2O	Oxid draselný
N	Na_2O	Oxid sodný	H	H_2O	Voda
	Cr_2O_3	Oxid chromitý		ZrO_2	Oxid zirkoničitý

C_3S	Trikalciumsilikát (alit)	C_2S	Dikalciumsilikát (belit)
C_3A	Trikalciumaluminát	C_4AF	Broenmillerit
$Ca(OH)_2$	Hydroxid vápenatý	C-S-H gel	Afwillit