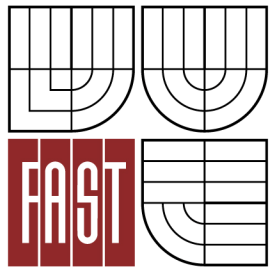


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

OVĚŘENÍ TEPELNĚ-IZOLAČNÍ VLASTNOSTI TERMOREFLEXNÍCH FÓLIOVÝCH IZOLACÍ

VERIFICATION OF THERMAL-INSULATION PROPERTIES OF THE REFLECTIVE FOIL MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PETR ŠOT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. STANISLAV ŠŤASTNÍK, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | N3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607T020 Stavebně materiálové inženýrství |
| Pracoviště | Ústav technologie stavebních hmot a dílců |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|--|---|
| Diplomant | Bc. Petr Šot |
| Název | Ověření tepelně-izolační vlastnosti termoreflexních fóliových izolací |
| Vedoucí diplomové práce | prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. |
| Datum zadání diplomové práce | 31. 3. 2013 |
| Datum odevzdání diplomové práce | 17. 1. 2014 |
| V Brně dne 31. 3. 2013 | |

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

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

Podklady a literatura

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

Kupilík, V., Závady a životnost staveb, GRADA Publishing 1999

Halahyja, M., Stavebná tepelná technika, akustika a osvetlenie, ALFA Bratislava 1986

Firemní literatura tepelně-reflexních izolací (DAPE, LUPOTHERM aj.)

Zásady pro vypracování

Novodobé tepelné izolace vynikají zvýšenou účinností a nižší materiálovou náročností při výrobě oproti jiným tepelným izolantům používaných ve stavbách. V současné době jsou zkoumány tzv. termoreflexní izolace, jejichž použitím lze dosahovat menší celkové tloušťky izolační vrstvy.

V této souvislosti proveďte:

- 1) analýzu tepelného šíření izolačními vrstvami termoreflexních izolací a popiště jevy související s mechanismem šíření tepla termoreflexním souvrstvím, případně vymezte míru projevu jednotlivých složek šíření tepla,
- 2) pro ověření tepelně-izolačního účinku využijte vhodného stacionárního měřidla nebo jeho úpravy tak, aby bylo možné prokázat tepelný odpor souvrství vzhledem k poloze zabudování tepelné izolace ve stavbě,
- 3) porovnejte experimentální výsledky měření na vzorcích vybraných termoreflexních izolantů, zejména s ohledem na účinnost vnitřních vzduchových izolačních vrstev,
- 4) vymezte podmínky pro použití termoreflexních izolantů ve stavbách.

V obsahu diplomní práce by mělo být provedeno zhodnocení použitelnost novodobých termoreflexních izolací při zabudování ve stavbě za podmínek klimatu ČR.

Předepsané přílohy

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá ověřením tepelně-izolační vlastnosti termoreflexních foliových izolací. Teoretická část práce je věnována problémům energetické náročnosti budov, problematice šíření tepla materiálem, pojmy potřebnými pro studium termoreflexních tepelných izolací a experimentálními metodám pro stanovení tepelně-izolačních vlastností izolantů. V další části je kapitola doplněna přehledem nejrozšířenějších izolačních materiálů používaných ve stavebnictví. Závěr kapitoly je věnován popisu termoreflexního souvrství a analýzou tepelného šíření izolačními vrstvami termoreflexní tepelné izolace.

První kapitola praktické části práce je věnována použití termoreflexní tepelné izolace ve stavbách. Druhá kapitola je věnována návrhu, sestavení a cejchování měřicího zařízení, které využívá metody chráněné teplé komory. Ta je deklarována jako závazný způsob zjištění tepelně-izolační schopnosti termoreflexních tepelných izolací. Vyvinuté měřicí zařízení umožňuje zjištění sledované vlastnosti v libovolném směru šíření tepla. Měření součinitele prostupu tepla se věnuje třetí kapitola praktické části. Tato kapitola obsahuje i popis použitých vzorků pro měření součinitele prostupu tepla. Ve čtvrté kapitole praktické části jsou uváděny výsledky měření součinitele prostupu tepla na vybraných vzorcích termoreflexních foliových izolací. Uvádí se charakteristika součinitele prostupu tepla jednotlivých vzorků, závislost součinitele prostupu tepla na poloze vzorku v měřicím zařízení a doporučení vhodného použití vzorku ve stavbě pro klimatické podmínky České republiky. Práci uzavírá kapitola porovnání a vyhodnocení všech vzorků s praktickými doporučeními.

Abstract

The master's thesis deals with verification of thermal insulating property of thermoreflexion foil insulations. The theoretical part of thesis focuses on the energy demand of buildings, the problems of heat transfer material, terms required for study of thermoreflexion thermal insulation and experimental methods for determination of thermal insulating properties of insulators. In the next part the chapter is accompanied by an overview of the most common insulation materials which used in construction. The last part of teoretical part is devoted to the description of thermoreflexion formation and analysis of the spread of thermal insulating layers of thermoreflexion thermal insulation.

The first part of thesis is devoted to the use of thermoreflexion therm insulation in buildings. The second part of thesis is devoted to the design, assembly and calibration of the measuring

device that uses a method of protected warm chamber. It is declared as a binding method of detection of the heat transfer performance of thermoreflexion thermal insulation. The developed measuring device allows detection of endpoints in some direction of propagation of heat. Measurement of heat transfer coefficient devoted the third part of practical part. This part contains a description of the samples used for the measurement of the heat transfer coefficient. In the fourth chapter of the practical part are presented the results of the heat transfer coefficient measurements on selected samples of thermoreflexion foil insulation. It is shown the characteristic of heat transfer coefficient of individual samples, the dependence of the heat transfer coefficient on the position of the sample in the measuring device and the recommendation of an appropriate use of sample in the works for the climatic conditions of the Czech republic. The work concludes the chapter of comparing and evaluating of all samples with practical recommendations.

Klíčová slova

Šíření tepla, vedení, proudění, sálání, kondukcce, konvekce, radiace, emisivita, reflexe, energetická náročnost, tepelná izolace, průsvitnost materiálu, vzduchová mezera, termoreflexní souvrství, hliníková folie, bublinová folie, Reynoldsovo číslo, energie, černé těleso, šedé těleso, infračervené záření, součinitel tepelné vodivosti, tepelný odpor, součinitel prostupu tepla.

Keywords

Heat transfer, conduction, convection, radiation, conduction, convection, radiation, emissivity, reflection, energy demand, thermal insulation, material translucency, air gap, thermoreflex formation, aluminum foil, bubble foil, Reynolds number, energy, black body, gray body, infrared radiation, thermal conductivity, thermal resistance, heat transfer coefficient.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Petr Šot *Ověření tepelně-izolační vlastnosti termoreflexních fóliových izolací*. Brno, 2013. 99 s., 6 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc..

Prohlášení

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

V Brně dne 14.1.2014

.....

podpis autora

Bc. Petr Šot

Poděkování

Děkuji svojí rodině, bez které by tato práce určitě nevznikla. Dále chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. RNDr. Ing. Stanislavovi Šťastníkovvi, CSc. a RNDr. Ing. Františkovi Šotovi za vynikající a kvalitní odborné vedení, konzultace, korekce, připomínky a spolupráci při vypracování mé diplomové práce.

| | |
|--|-----|
| 6.3. Tepelný odpor vytvořených souvrství | 94 |
| Závěr | 96 |
| Seznam použitých zdrojů..... | 97 |
| Seznam použitých zkratek a symbolů..... | 98 |
| Seznam příloh | 99 |
| Přílohy..... | 100 |

Úvod

Neustále se zvyšující nároky na tepelně izolační nároky materiálů a ekologii, vedou výrobce k výrobě materiálů s nízkou energetickou náročností při výrobě a vysokou tepelně izolační účinností. Rostoucí ceny energií, ale nově i požadavky zákonů nutí už i uživatele k řešení problémů s šířením tepla. Úniky tepla u novostaveb lze částečně vyřešit vhodně zvoleným tepelně izolačním obvodovým zdívem. Avšak u rekonstrukcí či v jakékoliv míře energeticky úsporných domech je problém šíření tepla daleko komplikovanější. K tepelně izolačnímu zdivu je pak nutné volit tepelnou izolaci. Běžné izolační materiály, jako jsou například minerálně vláknité materiály či pěnové materiály, jsou však limitovány svou tloušťkou. Proto se na trhu objevují nové druhy izolačních materiálů a nové způsoby řešení izolace stavebních objektů.

Mezi materiály, které se v poslední době a nevelké míře objevují na stavebních objektech, či alespoň částech stavebních konstrukcí, lze zařadit přírodní materiály, vakuové izolace, aerogelové izolace a termoreflexní foliové izolace. Vakuové a aerogelové izolace se v praxi vyskytují daleko méně než přírodní materiály. Je to způsobeno hlavně jejich vysokou cenou. Termoreflexní tepelné izolace jsou používány také v minimální míře a to hlavně v zahraničí. Proto se v této práci zaměřím na ověření tepelně izolačního účinku právě termoreflexních tepelných izolací.

Cíle práce

- Analýza tepelného šíření izolačními vrstvami termoreflexních tepelných izolací, popis jevů souvisejících s mechanismem šíření tepla v termoreflexním souvrství a vymezení míry projevu jednotlivých složek šíření tepla,
- výroba stacionárního měřidla pro ověření tepelně izolačního účinku termoreflexních tepelných izolací v různých polohách, které simulují polohu zabudování ve stavbě,
- porovnání experimentálních výsledků měření na vzorcích vybraných termoreflexních tepelných izolací,
- vymezení podmínek použití termoreflexních izolantů ve stavbách.

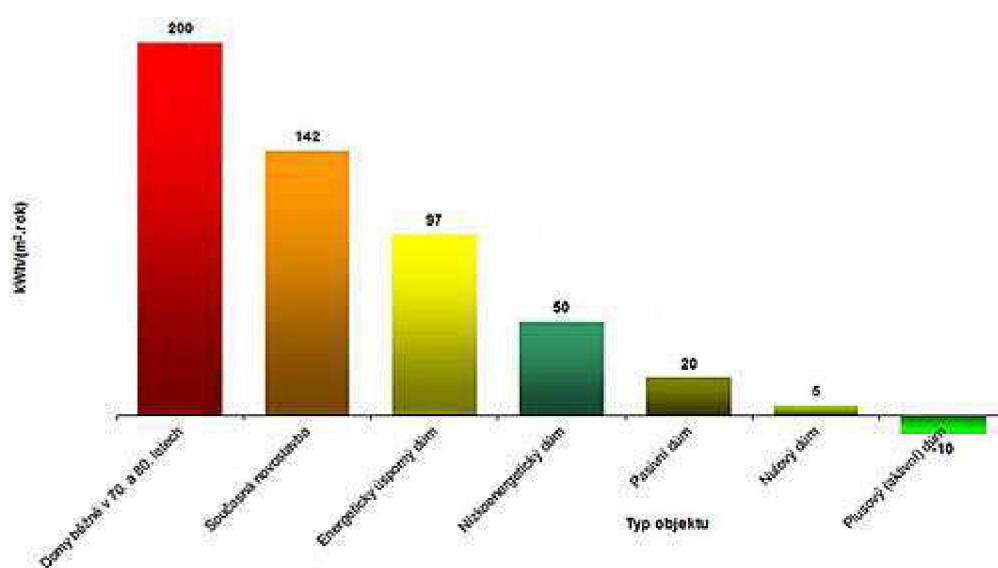
1. Kapitola I

1.1. Energetická náročnost stavebních objektů

Energie se promítají do všech odvětví každodenního života a každý z nás se v průběhu dne setkává s energií v některé ze svých podob. Stále se zvyšující ceny energií, obchod s emisními povolenkami nové výrobní technologie a postupy vedou jak výrobce, tak i spotřebitele k řešení problému s energetickou náročností daných produktů. Na spotřebu energií lze narazit jak při těžbě surovin potřebných pro výrobu budoucího produktu, při zpracování surovin, výrobě produktu, tak i při distribuci a užívání daného produktu. Z tohoto pohledu lze uživatele energií rozdělit na dvě skupiny. První skupinou jsou výrobci a druhou skupinou jsou samotní uživatelé daných produktů. Výrobci se snaží dodávat na trh pokud možno kvalitní produkty při využití co nejmenšího množství výrobní energie a s tím související co nejnižší cenou. Uživatelé naopak kupují dané produkty většinou za co nejnižší ceny a očekávají od nich maximální úsporu energií a s tím související maximální cenovou úsporu. Tento trend vede jak výrobce, tak i některé uživatele k řešení optimalizačních úloh, orientovaných na spotřebovanou energii.

Při stavbě jakéhokoliv stavebního objektu je třeba vzít v úvahu následné, třeba i jen občasné, využívání objektu lidmi. Proto je třeba zajistit budoucím uživatelům tzv. tepelnou pohodu. K vytvoření tepelné pohody v prostředí je třeba zajištění určitého teplotního a vlhkostního rozmezí.

Graf 1 - Měrná roční spotřeba energie na vytápění rodinného domu [13]

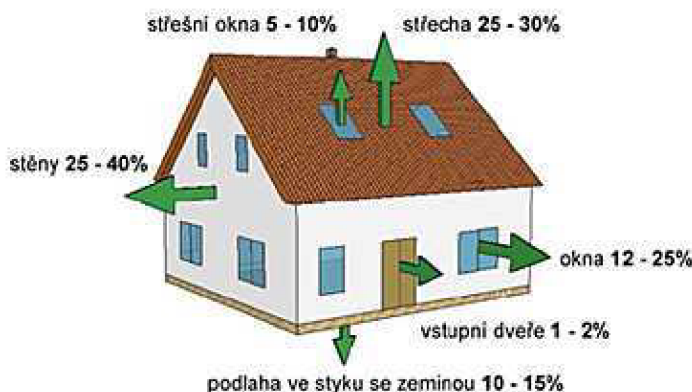


Z grafu je zřejmý trend snižování energetické náročnosti na vytápění rodinných domů. Vysoká energetická náročnost pro rodinné domy postavené v sedmdesátých a osmdesátých

TEORETICKÁ ČÁST

letech dvacátého století je v současné době snižována použitím izolačních materiálů. Zateplování budov podporují i některé instituce a za určitých podmínek nabízejí finanční výpomoc spojenou se snížením energetické náročnosti objektu. Z grafu je zřejmá i více než čtvrtinová úspora energií na vytápění rodinného domu u současných novostaveb. Některé rodinné domy však nabízejí i menší než doporučenou energetickou náročnost (nejen na vytápění). V těchto případech lze hovořit o energeticky úsporných domech, nízkoenergetických domech, pasivních domech, nulových domech a aktivních domech, které dokonce energii vyrábějí.

S energetickou bilancí stavebních objektů však nesouvisí jen vytvoření tepelné pohody. Energetická bilance stavebního objektu zahrnuje jak příjem, tak výdej veškerých energií spojených s užíváním tohoto stavebního objektu. Uvedený obrázek zobrazuje procentuelní množství úniků energií u rodinného domu z osmdesátých let dvacátého století.



Obr. 1 – Přibližné procentuelní vyjádření energetických úniků tepla ze stavebního objektu [2]

Z obrázku je zřejmé, že největší úniky tepla jsou realizovány prostupem stěnami. Druhý největší podíl na ztrátu (nebo i příjem) energie má střeška.

Jak příjem, tak i výdej energií, lze u stavebních objektů ovlivnit výběrem použitých materiálů a výrobků pro stavbu. Materiály hutné, s vysokou objemovou hmotností, tepelnou energii propouští snadněji a rychleji než materiály lehké, s nízkou objemovou hmotností. V obou případech však lze použít i tepelnou izolaci, která prostup tepla konstrukcí ještě zpomalí. Izolační materiály dokáží při tloušťce několika centimetrů nahradit tepelně izolační vlastnosti obvodového zdiva o tloušťce 450 mm. Tohoto efektu lze v praxi využívat a vytvářet tak objekty s velmi nízkou energetickou náročností. Zároveň není třeba, k dosažení nízkoenergetického objektu, používat stavební prvky o velkých tloušťkách, které jsou z části nahrazovány tepelnými izolacemi. Využití tepelných izolací vede také ke snižování hmotnosti stavebních objektů. Spotřeba energií má za následek i spotřebu přírodních zdrojů.

TEORETICKÁ ČÁST

Z uvedených důvodů je od 1.1.2013 účinná změna zákona č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve smyslu změnového znění pod č. 318/2012 Sb., která výrazně změnila a upřesnila stávající pohled na problematiku hospodaření s energií. Zákon řeší především následující oblasti a stanovuje některá opatření pro zvyšování hospodárnosti užití energie a povinnosti fyzických a právnických osob při nakládání s energií, pravidla pro tvorbu Státní energetické koncepce, Územní energetické koncepce a Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných a druhotných zdrojů energie; požadavky na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie, požadavky na uvádění spotřeby energie a jiných hlavních zdrojů na energetických štítcích výrobků spojených se spotřebou energie, požadavky na informování a vzdělávání v oblasti úspor energie a využití obnovitelných a druhotných zdrojů. K zákonu se vydává soubor prováděcích vyhlášek, které rozpracovávají jednotlivé oblasti zákona a upřesňují způsob jejich provádění. Jedná se o následující vyhlášky:

- Vyhláška č. 78/2013 Sb., o energetické náročnosti budov, která nahrazuje vyhlášku č. 148/2007 Sb.,
- Novela vyhlášky o kontrole kotlů a rozvodů tepelné energie, která nahradí vyhlášku č. 276/2007 Sb.,
- Novela vyhlášky o kontrole klimatizačních systémů, která nahradí vyhlášku č. 277/2007 Sb.,
- Vyhláška č. 480/2012 Sb., o energetickém auditu a posudku, která nahradila vyhlášku č. 213/2001 Sb.,
- Vyhláška o energetických specialistech a osobě oprávněné provádět instalaci zařízení vyrábějící energii z OZE, která nahradí zkušební řád, části vyhlášek 148/2007, 213/2001, 276/2007 a 277/2007 Sb.,
- Novela vyhlášky o vydání stanovisek k SŘ, ÚŘ, ÚPD, ÚP, RP, která novelizuje vyhlášku č. 195/2007 Sb.,
- Nová vyhláška č. 441/2012 Sb., o stanovení minimální účinnosti užití energie při výrobě elektřiny a tepelné energie, která nahradila vyhlášku č. 349/2010 Sb. [4]

1.1.1. Průkaz energetické náročnosti budovy

Průkaz energetické náročnosti budovy hodnotí budovu z hlediska spotřeby energie. Průkaz energetické náročnosti budovy nesmí být starší než 10 let a stavebník, vlastník budovy nebo společenství vlastníků jednotek, je povinen jej přiložit k dokumentaci, dle [16], v těchto případech:

TEORETICKÁ ČÁST

- při výstavbě nových budov nebo při větších změnách dokončených budov,
- při užívání budovy orgánem veřejné moci od 1. července 2013 s celkovou energeticky vztažnou plochou větší než 500 m²,
- při užívání budovy orgánem veřejné moci v případě, že pro ni nastala povinnost zajistit zpracování průkazu energetické náročnosti budovy,
- při prodeji budovy nebo ucelené části budovy,
- při pronájmu budovy.

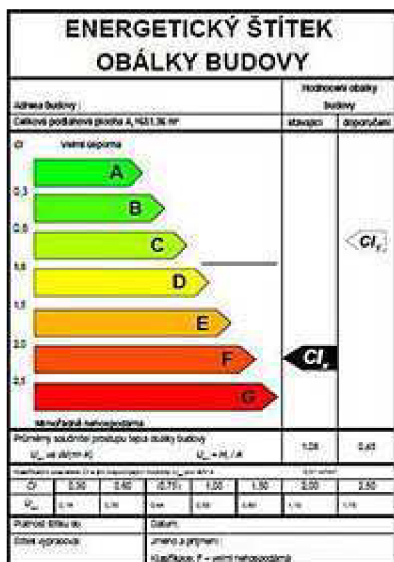


Obr. 2 – Ukázka průkazu energetické náročnosti budovy

Energetický průkaz vychází z výpočtu podle metody stanovené prováděcím právním předpisem a obsahuje informace o energetické náročnosti budovy. Energetická náročnost budovy zahrnuje dodané energie potřebné na vytápění, větrání, chlazení, klimatizaci, přípravu teplé vody a osvětlení při jejím standardním užívání. Součet těchto energií za jeden rok, tzv. celková roční bilance, je pak vyjádřen v GJ na průkazu energetické náročnosti budovy. Průkaz energetické náročnosti budovy je vyjádřen grafickým protokolem, ve kterém je uvedena i klasifikace do sedmi tříd rozdělených pomocí písmen A až G. Jednotlivé třídy jsou od sebe odděleny danými hranicemi.

1.1.2. Energetický štítek obálky budovy

Energetický štítek obálky budovy hodnotí budovu s ohledem na její tepelně technické vlastnosti. Tepelně technické vlastnosti budovy jsou deklarovány pomocí průměrného součinitele prostupu tepla. Energetický štítek obálky budovy není na rozdíl od průkazu energetické náročnosti budovy vyžadován k dokumentaci pro stavební řízení. Energetický štítek budovy může vypracovat specialista pro metodiku výpočtu. Podobně jako průkaz



Obr. 3 – Energetický štítek obálky budovy

Charakteristika energeticky významných údajů ochlazovaných konstrukcí

| Ochlazovaná konstrukce | Plocha A (m ²) | Součinitel (činitel) prostupu tepla U (Σλ _i , G + ΣY _i) [W/(m ² ·K)] | Požadovaný (doporučený) součinitel prostupu tepla U _s (U _{req}) [W/(m ² ·K)] | Činitel tepelné redukce b | Měrná ztráta konstrukce prostupem tepla H _t = A · U · b [W/K] |
|------------------------|----------------------------|--|--|---------------------------|--|
| Obvodová stěna | 1 804,7 | 1,19 | () | 1,00 | 2 145,2 |
| Střecha | 1 117,0 | 0,69 | () | 0,63 | 417,5 |
| Podlaha | 1 051,4 | 2,03 | () | 0,41 | 868,7 |
| Okenní výplň | 277,7 | 2,21 | () | 1,15 | 707,1 |
| Tepelné vazy | | | () | | 425,1 |

Obr. 4a – Ukázka části protokolu k energetickému štítku

Stanovení prostupu tepla obálky budovy

| | | |
|---|-----------------------|---------|
| Měrná ztráta prostupem tepla H _t | W/K | 4 663,7 |
| Průměrný součinitel prostupu tepla U _{em} = H _t / A | W/(m ² ·K) | 1,07 |
| Výchozí požadavek na průměrný součinitel prostupu tepla podle čl. 5.3.4 v ČSN 730540-2 pro rozmezí t _{in} od 18 do 22 °C | W/(m ² ·K) | 0,35 |
| Doporučený součinitel prostupu tepla U _{em,rec} | W/(m ² ·K) | 0,26 |
| Požadovaný součinitel prostupu tepla U _{em,N} | W/(m ² ·K) | 0,35 |

Obr. 4b – Ukázka části protokolu k energetickému štítku obálky budovy

energetické náročnosti budovy, je energetický štítek obálky budovy vyjádřen grafickým protokolem a rozdělen do sedmi klasifikačních tříd A až G. Jednotlivé klasifikační třídy jsou dané normou požadovanou hodnotou průměrného součinitele prostupu tepla. Další součástí energetického štítku obálky budovy je protokol, popisující objekt z hlediska tepelného chování.

1.1.3. Nízkoenergetický dům

Nízkoenergetický dům se vzhledově nijak neliší od obyčejných domů. Poznává se až ze stavebního projektu domu. Měl by splňovat několik základních znaků:

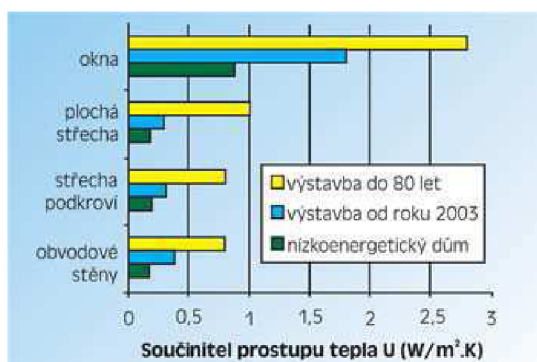
- kompaktní tvar bez zbytečných výčnělků,
- nadstandardní tepelné izolace,
- regulace vytápění využívající tepelné zisky,
- strojní větrání s rekuperací tepla,
- spotřeba tepla na vytápění je max. 50 kWh/m² za rok. [3]

Z těchto požadavků je zřejmé, že pro stavbu nízkoenergetického domu je třeba velmi kvalitně zpracovat projektovou dokumentaci domu. V projektové dokumentaci bychom měli najít zmínky o orientaci objektu ke světovým stranám, použitých materiálech jak pro výstavbu, tak pro izolace, vhodných výplních otvorů a například i o zdrojích tepla.

Doporučuje se objekt orientovat tak, aby byla stěna s nejvíce prosklenou plochou orientována na jih. Tvar objektu by měl být pokud možno geometricky co nejjednodušší, tzn. bez výčnělků v podobě balkonů, teras a podobně. Jedním ze základních prvků nízkoenergetického

TEORETICKÁ ČÁST

domu jsou důkladné tepelné izolace v tloušťce 200 - 300 mm. Izolovány musí být nejen venkovní zdi, ale i vnitřní konstrukce mezi vytápěným a nevytápěným prostorem (garáž, sklep, půda aj.). Rovněž i podlahy a stěny přilehlé k terénu musí mít důkladnou tepelnou izolaci. [3] Okna u nízkoenergetických domů slouží nejen k proslunění, ale i k solárním ziskům. Jelikož je prosklení nízkoenergetických domů velké, je třeba volit kvalitní okna. V dnešní době můžeme narazit na velkou škálu vyráběných oken.



Obr. 5 - Porovnání staveb z hlediska součinitele prostupu tepla [2]

Pro nízkoenergetické domy jsou vhodná okna s izolačními dvojskly, nejlépe trojskly, která jsou ještě pokovená. Pokovení skla zajistí propuštění slunečního záření do domu, avšak propuštění slunečního záření zpět do venkovního prostoru je zabráněno.

1.1.4. Pasivní dům

Pasivní dům je z hlediska finančního a architektonického daleko náročnější než nízkoenergetický dům. Problematiku pasivních domů v této práci nebudu rozebírat, protože se jedná o daleko složitější systém než je nízkoenergetický dům a jeho popis by si vyžádal velkou část z této práce. Jen pro orientaci čtenáře zmíním roční spotřebu tepla na vytápění, která musí být nižší než 15 kWh/m². Z tohoto kritéria je jasné, že uspořádání pasivního domu musí být daleko propracovanější než nízkoenergetický dům, který má mít spotřebu tepla na vytápění menší než 50 kWh/m².

1.1.5. Blower-door

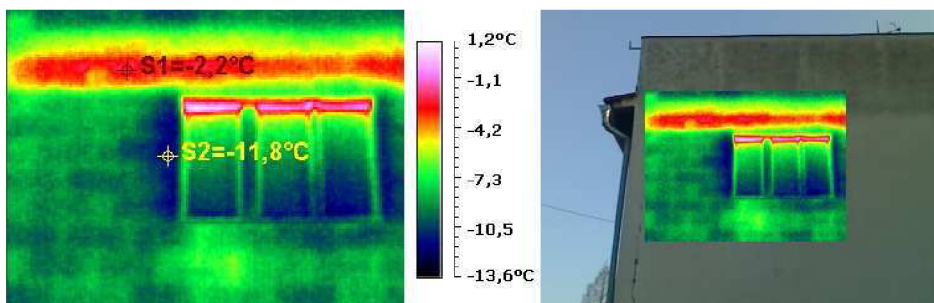
Pomocí zkoušky Blower-door, neboli zkoušky těsnosti budovy, můžeme zjistit, jak kvalitně je objekt zpracován. V případě nekvalitního zpracování objektu dojde k vytvoření netěsností a spár (např. u výplní otvorů), kterými pak může do objektu pronikat vzduch či vlhkost z venkovního prostředí, popř. unikat teplo z vnitřního prostředí. Při provádění zkoušky je nutno zajistit uzavření všech otvorů v objektu (okna, dveře, komínové průduchy). Dále se do vstupních dveří umístí ventilátor, který zajistí vytvoření přetlaku vzduchu v objektu. Vstupní dveře s ventilátorem se utěsní folií. Podle toho, kolik vzduchu musí ventilátor dodat za určitého tlakového rozdílu, se zjistí těsnost. Požadavek pro nízkoenergetické domy je těsnost

TEORETICKÁ ČÁST

$n_{50,N} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$. To znamená, že za rozdílu tlaků 50 Pa (stav účinku větru o rychlosti asi 30 km/h) se během jedné hodiny vymění 60 % vnitřního objemu testovaného prostoru. Test je vhodné provádět dvakrát. [3]

1.1.6. Termografická kamera

Další možností, jak posoudit kvalitu zpracování budovy, je využití termokamery. Pomocí termografické kamery je možno zjistit tepelné mosty, kterými dochází k tepelným ztrátám. Tepelné mosty mohou vzniknout nekvalitním provedením tepelné izolace, nekvalitním provedením spojů na konstrukci, použitím rozdílných materiálů nebo nekvalitním provedením konstrukce. Termografická kamera je schopna vizualizovat infračervené záření vysílané objektem formou tzv. termogramu.



Obr. 6 – Ukázka termogramu pořízeného na vyfotografované části stavby [12]

Termogram je omezen nejnižší a nejvyšší teplotou měřeného objektu. Teplotnímu rozdílu se přiřadí barevná škála, podle které se dají ostatní teploty odečíst. Případné tepelné mosty pak odhalí výrazný barevný přechod na termogramu. Termokameru je vhodné použít při výrazném rozdílu teplot vnitřního a venkovního prostředí. Čím větší je teplotní rozdíl, tím výrazněji jsou vidět případné tepelné mosty na objektu. U stavebních objektů se doporučuje používat termokameru v období od října do dubna.

1.1.7. Závislost součinitele prostupu tepla na tloušťce izolantu

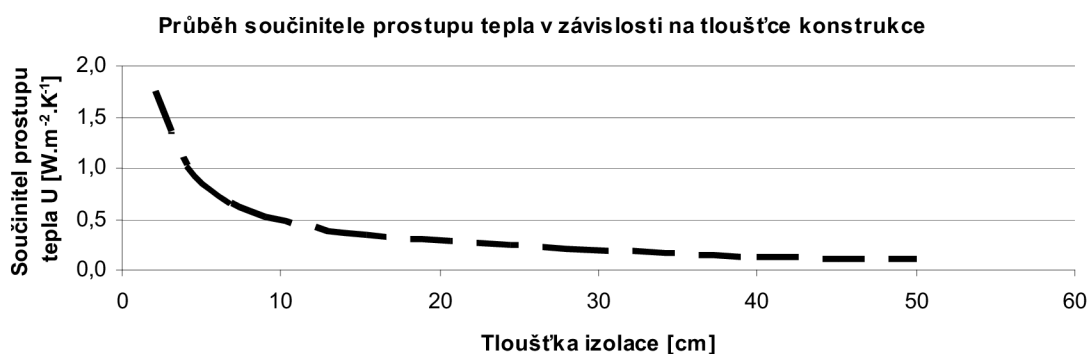
V praxi se tepelné ztráty vyjadřují pomocí fyzikální veličiny součinitele prostupu tepla U , který vyjadřuje, kolik tepla bude procházet konstrukcí o ploše 1 m^2 při teplotním spádu mezi vnitřním a vnějším prostředím 1 K . Z vyjádření je zřejmé, že pokud chceme dosáhnout větších tepelných úspor, potřebujeme k tomu materiály s nízkým součinitelem prostupu tepla U .

Součinitel prostupu tepla U je závislý na tloušťce materiálové vrstvy použité k izolování. Čím nižší hodnotu součinitele prostupu tepla požadujeme, tím větší vychází aplikační tloušťka izolačního materiálu. Závislost součinitele prostupu tepla byla vyjádřena na příkladu v [1]:

TEORETICKÁ ČÁST

Závislost součinitele prostupu tepla U [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$] na tloušťce konstrukce d [m], přičemž se uvažuje součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,05$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]. V uvedeném grafu je patrný výrazný pokles hodnoty součinitele prostupu tepla U při tloušťce tepelné izolace do 100 mm. Poté součinitel prostupu tepla klesá s rostoucí tloušťkou tepelné izolace pomaleji a v oblasti tloušťky přesahující 350 mm se mění už jen velmi málo. Z tohoto příkladu je zřejmé, že tloušťky tepelné izolace nad 35 cm ztrácí ekonomický význam, protože součinitel prostupu tepla se mění jen nevýznamně.

Graf 2 – Průběh součinitele prostupu tepla v závislosti na tloušťce konstrukce [1]



Tento případ platí pouze pro tepelnou izolaci se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda = 0,05$ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]. Pro jiné součinitele tepelné vodivosti se situace odlišuje a tloušťka může být jiná.

1.2. Šíření tepla

Šíření tepla neboli také přenos energie, představuje proces probíhající v jakémkoliv prostředí, ve kterém existují místa s rozdílnými teplotami. Mezi místy s rozdílnými teplotami vzniká teplotní spád a teplo se zde šíří z místa z vyšší teplotou do místa s nižší teplotou. Tím dochází k vyrovnání teplot v prostředí. Šíření tepla mezi místy s rozdílnou teplotou můžeme označit jako tepelnou výměnu. Tepelná výměna může probíhat jak v pevných látkách, kapalinách, tak i plynech. Liší se pouze způsobem přenosu tepla mezi místy s rozdílnou teplotou. Existují tři způsoby šíření tepla:

- vedení (kondukce),
- proudění (konvekce),
- sálání (radiace).

1.2.1. Šíření tepla vedením

Šíření tepla vedením probíhá hlavně v pevných látkách. Teplo se tímto způsobem může šířit i v kapalinách a plynech, avšak jen v případě, že v prostředí nenastane proudění. Pevné látky

TEORETICKÁ ČÁST

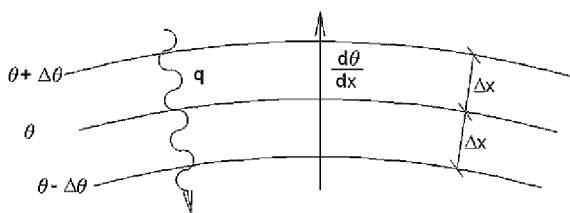
lze rozdělit dle intenzity tepelného toku na tepelné vodiče a tepelné izolanty. Šíření tepla v pevných látkách je zajištěno všesměrným, neuspořádaným pohybem částic. Jednotlivé částice do sebe při tomto pohybu narážejí a předávají si kinetickou energii. Tento děj trvá tak dlouho, dokud nedojde k vyrovnání teplot v prostředí a ustálení pohybu částic. Ve stavební praxi je většina stavebních materiálů pórovitá. Póry materiálů jsou většinou vyplněny vzduchem. Ve vzduchu probíhá šíření tepla prouděním a zářením. Avšak při výpočtech s těmito stavebními materiály, je s pórovitým materiálem počítáno jako s homogenním izotropním tělesem a uplatňuje se zde tedy jen složka vedení. Platí zde Fourierovy vztahy:

$$q = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2)$$

kde: q hustota tepelného toku kolmá na směr proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 θ teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 x směr proudění tepelného toku (souřadnice) [m],
 τ čas [s],
 a součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Výraz (1) udává vztah mezi hustotou tepelného toku q a teplotním gradientem $d\theta / dx$, přičemž platí přímá úměra, t.j. hustota tepelného toku je tím větší, čím větší je teplotní gradient. Teplotní gradient je vektor vzhledem na izotermickou plochu a je mírou změny teploty v dané čase.



Obr. 7 – Schématické znázornění teplotního gradientu a tepelného toku

Teplotní gradient ve směru poklesu teploty (se záporným znaménkem) se nazývá teplotní spád ($-d\theta/dx$). Záporné znaménko v rovnici (1) je proto, že tepelný tok proudí v opačném směru jako teplotní gradient, tj. přírůstek teploty je v tomto směru záporný [6]. Látky můžeme porovnávat podle součinitele teplotní vodivosti λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Součinitel tepelné vodivosti lze vyjádřit jako množství tepla, které projde jedním metrem čtverečným materiálu o tloušťce jednoho metru, jehož teplotní rozdíl protilehlých stěn činí 1 K. Z tohoto vyjádření je zřejmé, že schopnost materiálu vést teplo závisí právě na součiniteli tepelné vodivosti. Každý materiál má však jiné vlastnosti a proto je třeba vymezení podmínek použití daného materiálu a experimentálním měřením zjištění součinitele tepelné vodivosti pro dané

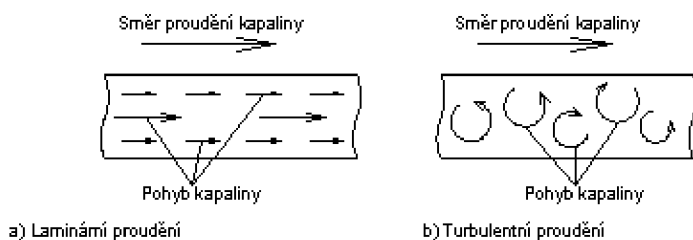
podmínky. Vysoký součinitel tepelné vodivosti mají např. kovy, naopak menšího součinitele tepelné vodivosti dosahují plyny.

1.2.2. Šíření tepla prouděním

Šíření tepla prouděním probíhá pouze v tekutinách, tj. v kapalných a plynných látkách. Důvodem šíření tepla je pohyb částic dané tekutiny, které přenášejí teplo. Tyto částice rozpohybují jednotlivé části tekutiny s rozdílnou teplotou. Šíření tepla tedy neprobíhá jako v pevných látkách - všesměrným, neuspořádaným pohybem částic. Pokud srovnáme rychlost šíření tepla vedením s rychlostí šíření tepla prouděním, zjistíme, že šíření tepla prouděním je daleko efektivnější, tudíž daleko rychlejší než šíření tepla vedením. Při šíření tepla prouděním mění tekutina svou hustotu. S rostoucí teplotou tekutiny klesá hustota dané tekutiny. Důsledkem tohoto jevu je samovolné proudění tekutin. Tekutiny tedy při ohřevu stoupají vzhůru. Účinnost proudění můžeme zvýšit použitím mechanických zařízení, například ventilátoru. Potom můžeme šíření tepla prouděním rozdělit na volné a umělé. Volné proudění můžeme chápat jako přirozený pohyb tekutiny, která má na různých místech různou teplotu. Tento druh proudění má vymezené rychlosti proudění, které nejsou moc velké. Proto při šíření tepla volným prouděním dochází k pomalé výměně tepla. Naopak při použití mechanických zařízení je možno dosáhnout daleko větší intenzity výměny tepla. Rychlost šíření tepla je v tomto případě dána parametry použitého mechanického zařízení. Dále je třeba rozlišit druhy proudění tekutiny. Mohou nastat dvě možnosti proudění tekutiny a to proudění laminární a proudění turbulentní. Laminární proudění můžeme popsat jako rovnoběžný pohyb tekutiny se směrem proudění této tekutiny. Turbulentní proudění charakterizuje všesměrný, neuspořádaný pohyb tekutiny se směrem proudění této tekutiny. Oba druhy proudění tekutin jsou popsány pomocí Reynoldsova čísla, které má hodnotu $Re = 6 \cdot 10^3 - 1,7 \cdot 10^5$ [6].

$$Re = v_s \cdot l / \nu \quad (3)$$

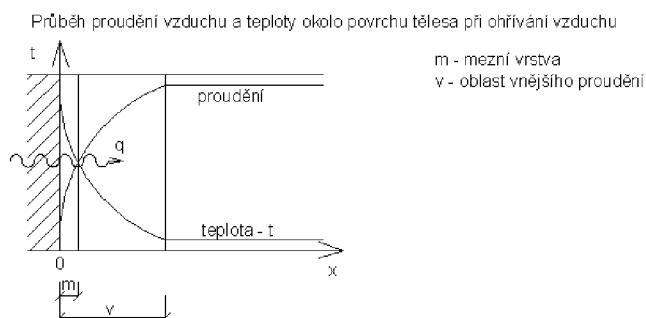
kde: Re Reynoldsovo číslo [-],
 v_s střední hodnota rychlosti proudění tekutiny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
 l délka vzorku [m],
 ν kinematická viskozita tekutiny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].



Obr. 8 – Druhy proudění plynů

TEORETICKÁ ČÁST

Pokud uvažujeme, že tekutina obtéká materiál, pak dochází ke změně rychlosti proudění a teploty se vzdáleností od povrchu obtékaného materiálu. Vzniká tzv. přestup tepla mezi povrchem materiálu a tekutinou. Teplota na povrchu materiálu je nejvyšší. S rostoucí vzdáleností od povrchu materiálu teplota klesá tak dlouho, až dojde k ustálení. Naopak rychlost proudění je na povrchu materiálu nejnižší. S rostoucí vzdáleností od povrchu materiálu rychlost proudění roste tak dlouho, až dojde k ustálení rychlosti na rychlost proudění tekutiny v daném prostředí. U povrchu materiálu tedy dochází k vytvoření jisté mezní vrstvy.



Obr. 9 – Průběh proudění vzduchu a teploty okolo povrchu tělesa při ohřívání vzduchu

V této vrstvě se může tekutina pohybovat laminárním i turbulentním prouděním. V laminární vrstvě se šíří teplo vedením, v turbulentní vrstvě je odpor proti přestupu tepla zanedbatelný. Podle Newtonova zákona přestup tepla při proudění, je daný výrazem:

$$q_k = h_k (\theta_s - \theta_m) \quad (4)$$

kde: q_k hustota tepelného toku mezi vzduchem a povrchem konstrukce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 h_k součinitel přestupu tepla při proudění [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 θ_s teplota povrchu konstrukce [$^{\circ}\text{C}$],
 θ_m teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]. [6]

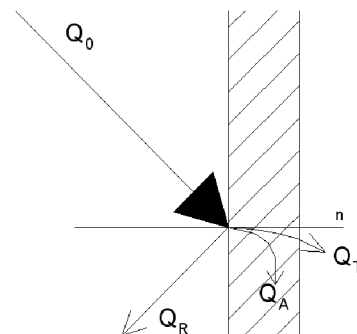
Součinitel přestupu tepla může mít různé hodnoty. Tyto hodnoty závisí na mnoha parametrech. Je třeba zohlednit jak proudící tekutinu, tak materiál, který tekutina obtéká. Při přirozeném proudění tekutiny lze použít vztahy, které experimentálně zjistil Jürgens a Nusselt. Vztahy jsou však pro reálné využití nepřesné. Přesnější vztahy odvodil Griffiths a Dawis. Zahrnují výpočty jak pro desky ve vertikální poloze, tak pro desky v horizontální poloze (tepelný tok jde zdola nahoru). Dále je možno součinitel přestupu tepla zjistit pomocí teorie podobnosti. Přenos tepla se experimentálně určí jen v určitých případech a pomocí teorie podobnosti přepočte na jiné geometricky a fyzikálně „podobné“ případy. Zda jsou si situace podobné, lze určit pomocí podobnostních čísel (kritérií). Situaci můžeme považovat za geometricky a fyzikálně podobné v případě, že se rovnají jejich Nusseltova čísla.

1.2.3. Šíření tepla sáláním

V případě šíření tepla sáláním se jedná o přenos elektromagnetických vln mezi povrchy materiálů. Elektromagnetické vlny se šíří rychlostí světla a mají různou vlnovou délku. Rozsah vlnových délek elektromagnetického záření je uváděn mnoha autory různě. Může se jednat například o vlnové délky 760 – 3000 nm [6]. Z hlediska příjmu sálání můžeme existující materiály rozdělit na nepropustné a polopropustné. Ideální nepropustný materiál sálání naprosto pohltí. V praxi však ideální nepropustný materiál neexistuje, a proto je část dopadajícího sálání pohlcena a část odražena. Polopropustné materiály se vyznačují snížením intenzity dopadajícího sálání. V praxi se tedy dopadající sálání realizuje takto: část sálání je odražena, část pohlcena a část projde. Velikost jednotlivých částí je různá. Intenzita sálání může nabývat pouze určitou maximální hodnotu, kterou nemůže nikdy překročit. Z hlediska této sálavé schopnosti můžeme ideálně tělesa rozdělit na absolutně černá a absolutně odrazivá tělesa. Absolutně černé těleso všechnu dopadající energii pohltí. Má tedy absolutní pohltivost, nulovou odrazivost a nulovou propustnost. Naopak absolutně odrazivé těleso všechnu dopadající energii odrazí. Má tedy absolutní odrazivost, nulovou pohltivost a nulovou propustnost. V realitě však taková tělesa neexistují. Sálavá schopnost všech těles se nachází mezi absolutně černým a absolutně propustným tělesem. Jedná se o tzv. šedé těleso. Celková zářivá energie dopadající na těleso:

$$\begin{aligned} Q_0 &= Q_R + Q_A + Q_T \\ \frac{Q_0}{Q_0} &= \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_T}{Q_0} \end{aligned} \quad (5)$$

kde: Q_0 celková zářivá energie dopadající na těleso,
 Q_A část pohlcovaná tělesem,
 Q_R část odražená tělesem,
 Q_T část procházející tělesem.



Obr. 10 – Rozdělení sálavé energie na dopadající na povrch tělesa [6]

Pokud budeme uvažovat, že ve stavební praxi jsou pevné látky a kapaliny téměř nepropustné, dostaneme nulovou složku propustnosti. Pak můžeme rovnici upravit na $A + R = 1$. Dále je třeba zmínit, že každá složka může nabývat hodnot nula až jedna a součet všech tří složek musí být roven jedné. Vysvětlení tohoto faktu najdeme v prvním termodynamickém zákonu (zákon zachování energie), který říká, že celková energie soustavy je neměnná, tzn., že energie nemůže samovolně vznikat ani zanikat.

Jak jsem již zmínil, těleso může jak vydávat (sálat), tak přijímat (pohlcovat) energii a schopnost pohlcovat energii ovlivňuje i zpracování povrchu daného materiálu (emisivita

TEORETICKÁ ČÁST

povrchu). Pokud je materiál světlý, lesklý, hladký, jeho pohltivost je minimální. Naopak odrazivost takového tělesa je obrovská. Pokud je však materiál tmavý, matný, hrubý, jeho pohltivost je maximální. Naopak odrazivost takového tělesa je minimální. Z tohoto faktu můžeme vypočítat rostoucí absorpci (pohltivost) s rostoucí tmavostí povrchu materiálu. Dále je zřejmé, že s rostoucí tmavostí povrchu se zmenšuje odrazivost.

Jelikož je šíření tepla sáláním realizováno jako přenos elektromagnetického vlnění, není k tomuto šíření potřeba jakékoliv hmoty (částic). Prostřednictvím této vlastnosti se tak teplo může šířit i ve vakuu. Pokud se teplo sáláním šíří vzduchem, pak je důležitá vlhkost tohoto vzduchu. Zcela suchý vzduch bez jakékoliv vlhkosti by byl pro sálání absolutně průzračný, tudíž by měl nulovou složku pohltivosti. Pokud však uvažujeme vlhký vzduch, musíme si uvědomit jeho složení. Vlhký vzduch se skládá ze vzduchu suchého a kapiček vody (vodní páry). Voda však spadá mezi kapaliny, a jak je známo, kapaliny jsou téměř nepropustné.

1.3. Sálání materiálů

Kontaktně instalovanými tepelnými izolacemi probíhá šíření tepla převážně vedením. Složka sálání a proudění je zanedbána nebo se s ní neuvažuje vůbec. Termoreflexní tepelné izolace, na rozdíl od klasických kontaktně instalovaných tepelných izolací, využívají pro šíření tepla v maximální možné míře sálání. Sálát mohou všechny materiály s teplotou vyšší než je absolutní nula. Sálát mohou materiály teplé, studené, ale i materiály se stejnou teplotou. V případě materiálů se stejnou teplotou je přenos umožněn díky rozdílným emisivitám povrchů jednotlivých materiálů.

Tepelně izolační schopnost termoreflexních tepelných izolací záleží na mnoha faktorech, které dále popisují.

1.3.1. Emisivita povrchu tělesa

Emisivita je poměr intenzity vyzařování šedého zářiče M o teplotě T k intenzitě vyzařování dokonale černého zářiče M_b stejné teploty. Platí zde vztah:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_b} = \frac{C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4}{C_b \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4} = \frac{C}{C_b} \leq 1 \quad (6)$$

kde: ε emisivita rovnající se pohltivosti A [-],
 M intenzita vyzařování šedého zářiče [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 M_b intenzita vyzařování černého zářiče [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 C sálavost pro šedý zářič [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$],

TEORETICKÁ ČÁST

C_b sálavost černého zářiče [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$],
 T termodynamická teplota [K].

Pro sálavost povrchu platí vztah: $C = \varepsilon\cdot C_b$ (11)

Emisivita je tedy schopnost tělesa vyzařovat elektromagnetické záření o konkrétní vlnové délce. Ve vzorci je uveden pojem dokonale černý a šedý zářič. Dokonale černý zářič je těleso, které má maximální schopnost záření. Jeho sálavost dosahuje hodnoty $C_b \approx 5,67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$. V praxi se taková tělesa nevyskytují, a proto se zavedl pojem šedý zářič. Šedý zářič je těleso, které má sálavou schopnost menší než dokonale černý zářič. Hodnota sálavosti šedého tělesa může tedy nabývat hodnot $C \in (0; 5,67) \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

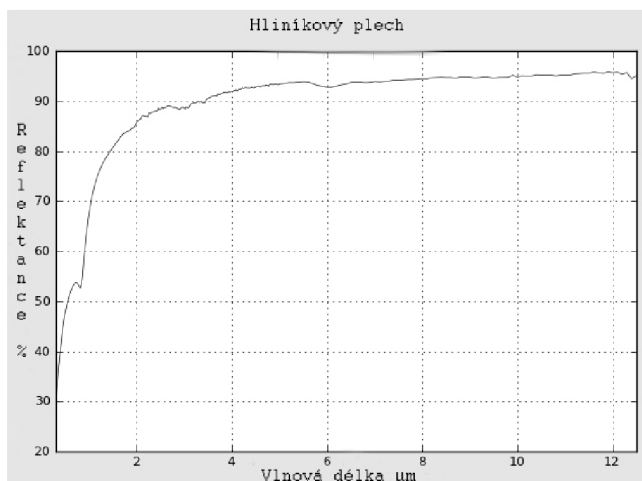
Emisivita může nabývat hodnot nula až jedna. Emisivitu o hodnotě jedna můžeme přiřadit absolutně černému tělesu. Reálné hodnoty emisivity těles jsou však menší. Emisivita závisí na úhlu odklonu od plochy, barvě, struktuře povrchu, vlnové délce a teplotě tělesa. Na tuto skutečnost je třeba si dát pozor a hodnotu emisivity vždy spojovat hlavně s teplotou a vlnovou délkou. Zvýšení teploty tělesa emisivitu ovlivní negativně (emisivita se sníží). Změna teploty v řádech jednotek emisivitu příliš neovlivní. Problém však může nastat při výraznějších změnách teploty.

Hodnoty emisivity pak můžeme rozdělit podle [5] následovně:

- spektrální emisivita-hodnota emisivity na určité vlnové délce záření,
- pásmová emisivita - efektivní hodnota v uvažovaném pásmu vlnových délek,
- totální emisivita - charakterizuje celkový vyzařovaný výkon přes všechny vlnové délky.

Obecně lze říci, že emisivita lesklých kovových materiálů je velmi nízká a blíží se nule. Naopak emisivita stavebních materiálů je vyšší a blíží se jedničce. Materiály s velmi nízkou emisivitou mají maximální schopnost reflexe a velmi nízkou pohltivost.

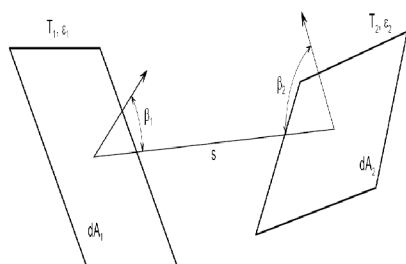
Pro příklad uvádím emisivitu, která je doplňkem do jedničky, hliníkového zoxidovaného plechu. Jde vidět, že v oblasti infračerveného záření (zvláště pak v oblasti od $4 \mu\text{m}$) dosahuje velmi nízké emisivity, jejíž hodnota činí asi 0,06. Naopak v oblasti viditelného světla (tj. 360 nm - 750 nm) se projevuje zoxidování hliníku, které sníží reflektivitu povrchu a rapidně zvýší emisivitu, která se dostává až k hodnotám 0,4.



Obr. 11 – Průběh reflektance hliníkového plechu v závislosti na vlnové délce záření [9]

1.3.2. Součinitel vzájemného sálání

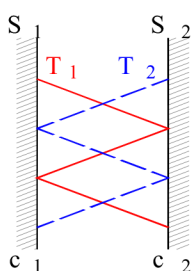
Skutečnost, že sálat může každé těleso a to, že každé těleso je obklopeno nějakým prostředím, nám dává problém spojený se vzájemným sáláním povrchů těles. Pokud by se jednalo o absolutně černá tělesa, nebyl by problém nijak složitý, protože by nedocházelo k odrazu vyzářených paprsků. Všechny tělesa se však řadí do tzv. šedých těles. Jejich pohltivost není absolutní a na jejich povrchu dochází k reflexi záření. Prakticky pak může dojít ke dvěma situacím výměny tepla sáláním. První situace vzniká při výměně tepla sáláním mezi dvěma plochami s různou teplotou. Při této situaci dochází k reflexi paprsků z jedné plochy na druhou a naopak. Součinitel vzájemného sálání pak spočítáme následovně:



$$q_{1 \rightarrow 2} = \varphi_{1 \rightarrow 2} \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot C_\varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$\varphi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s^2} dA_1 dA_2$$

$$\varphi_{2 \rightarrow 1} = \varphi_{1 \rightarrow 2} \cdot \frac{A_1}{A_2}$$



$$c_{vs} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_\varepsilon}}$$

$$Q_{vs} = S_1 \cdot c_{vs} \cdot \left(\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right)$$

Obr. 12, 13 – Princip šíření tepla sáláním mezi dvěma plochami [6]

Dále může nastat situace, kdy k výměně tepla sáláním dochází mezi dvěma plochami v uzavřeném prostoru. V případě, že jeden povrch obklopuje druhý, platí dostatečně přibližně vztah odvozený přesně pro soustředěné kulové nebo souosé válcové plochy dle [7]:

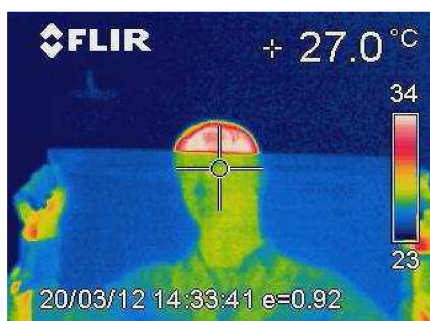
$$C_{vs} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_b} \right)} \quad (7)$$

kde: C_{vs} součinitel vzájemného sálání [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$],
 $C_{1,2}$ sálavost povrchů 1 a 2 [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$],
 $A_{1,2}$ plocha povrchů 1 a 2 [m^2],
 C_b, C_ε sálavost černého zářiče [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].

1.3.3. Průsvitnost materiálu

Průsvitnost je vlastnost materiálu umožňující propustit záření o určité vlnové délce. Většina materiálů je v oblasti viditelného světla, tj. 360 nm - 750 nm, neprůsvitná. Pokud se však posuneme za hranice viditelného světla do oblasti infračerveného záření (750 nm – 1mm), zjistíme, že některé materiály, obzvláště pak v malých tloušťkách, jsou pro tuto část světla průsvitné. Zde už musíme kalkulovat s emisivitou, reflexivitou a propustností. Součet všech složek musí být roven jedné. Záření je tedy z části pohlceno, z části odraženo zpět do prostředí a z části projde materiálem dále.

Na obrázcích 14, 15 můžeme vidět, že pro lidské oko (360 nm - 750 nm) není PE-fólie z pytle průhledná. Naopak pro infračervené záření snímané termokamerou je PE fólie zčásti průsvitná.

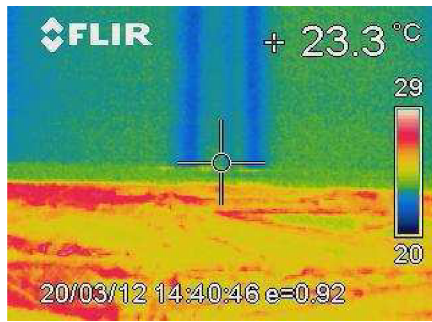


Obr. 14 – Termogram osoby stojící za PE fólií

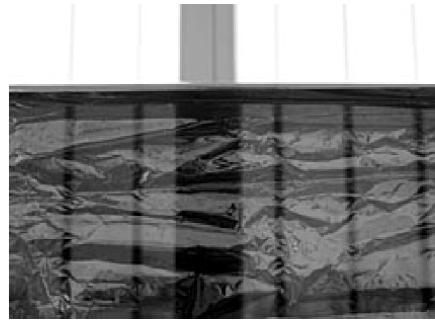


Obr. 15 – Fotografie osoby stojící za PE fólií

Na obrázcích 16, 17 je vidět, že pro lidské oko je isotermická fólie průhledná. Na rozdíl od PE fólie je isotermická fólie pro infračervené záření neprůsvitná, neboť má na povrchu nanесenu tenkou kovovou vrstvu. Fólie má navíc velmi nízkou emisivitu, a proto je na snímku částečně vidět odraz sálající osoby před fólií.



Obr. 16 – Termogram okenního rámu za isotermickou folii



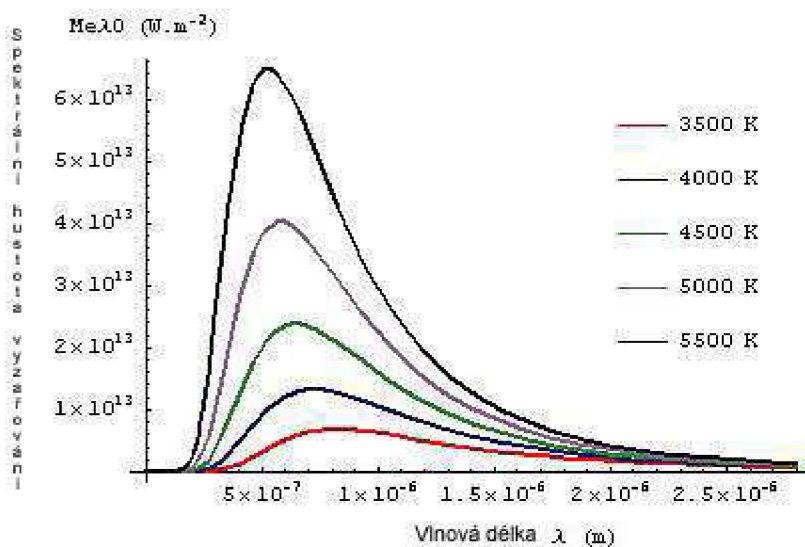
Obr. 17 – Fotografie okenního rámu za isotermickou folii

1.3.4. Planckův zákon

Planckův zákon vyjadřuje, jaká část energie přísluší záření o určité vlnové délce při dané teplotě zdroje záření. Z Planckova zákona je zřejmé, že tělesa o vysokých teplotách vyzařují vyšší energii než tělesa o nízkých teplotách. Nejvyšší hodnota intenzity vyzařování těles o vysokých teplotách odpovídá kratším vlnovým délkám. Čím je teplota tělesa nižší, tím se prodlužuje vlnová délka, na které těleso dosáhne nejvyšší hodnoty intenzity vyzařování.

Termoreflexní tepelné izolace potlačují šíření tepla vedením a prouděním na minimum. Hlavní složkou šíření tepla je zde sálání. Proto u termoreflexních tepelných izolací předpokládám zlepšující se tepelně-izolační vlastnosti se zvyšujícím se teplotním rozdílem.

Graf 3 – Závislost intenzity vyzařování na vlnové délce dokonale černého tělesa [14]



1.4. Experimentální metody stanovení tepelně-izolační vlastnosti materiálu

Tepelně izolační materiály můžeme porovnávat pomocí různých veličin, mezi které patří součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti, tepelný odpor, součinitel difúze vodní páry, tepelná kapacita aj. Součinitel tepelné vodivosti můžeme experimentálně určit různými metodami, jednotlivé metody se od sebe odlišují teplotním stavem během experimentu. Z tohoto hlediska pak lze metody rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- stacionární metody,
- nestacionární, dynamické metody.

Stacionární metody jsou založeny na měření hustoty tepelného toku procházejícího vzorkem a povrchových teplot vzorku v ustáleném tepelném stavu. Z naměřených hodnot, ze známé měřené plochy a tloušťky vzorku lze vyčíslit hodnotu součinitele tepelné vodivosti. Při použití dynamické metody se zpravidla v měřeném materiálu vytváří časově proměnlivé teplotní pole a odečítání teplotních údajů o evolučním procesu se vykonává průběžně.

Stacionární metody jsou časově náročnější než dynamické, ale dosahuje se jimi vyšší přesnosti měření. Stacionární metody měření tepelné vodivosti lze dále rozdělit:

- metodu chráněné teplé desky nebo chráněných konců roury, nebo i metodu primární,
- metodu měření hustoty tepelného toku (pro desku nebo rouru) nebo i metodu sekundární.

1.4.1. Stacionární metody zjištění součinitele tepelné vodivosti

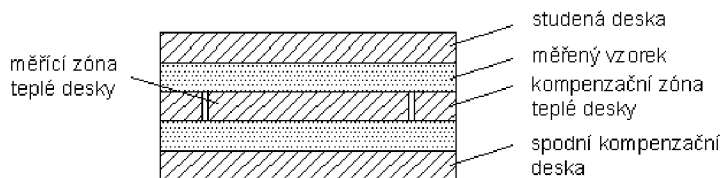
1.4.1.1. Metoda chráněné teplé desky

Metoda chráněné teplé desky se řadí mezi stacionární metody, tato metoda se využívá při ustáleném tepelném stavu a její provádění se řídí normou EN 1946-2, resp. ISO 8202. Zařízení pro tuto metodu vyrábí mnoho výrobců a jsou založeny na stejném principu. Mohou být pro jeden nebo pro dva vzorky. V přístroji se vytváří rozdílné teploty jednotlivých povrchů. Tyto teploty se musí udržovat na stejné hodnotě. Izolace vzorku se provádí pomocí kompenzačních částí zařízení, které dokáží udržet danou teplotu povrchu vzorku. V průběhu zkoušky měří zařízení množství tepla, které projde vymezenou plochou vzorku. Následně je třeba provést výpočet součinitele tepelné vodivosti λ .

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \quad (8)$$

TEORETICKÁ ČÁST

kde: λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 Q elektrický výkon topné spirály v měřicí části [W],
 d tloušťka vzorku [m],
 A plocha referenčního povrchu [m^2],
 $\theta_1 - \theta_2$ termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku [K].



Obr. 18 - Principiální uspořádání měřidla pro měření součinitele tepelné vodivosti stacionární metodou

1.4.1.2. Metoda měření tepelného toku

Metoda měření tepelného toku patří mezi stacionární metody. Provádění metody je předepsáno v normách EN 12 667, EN 1946-3 a předpisem ISO 8301. Pro provedení měření je třeba vlastnit měřidlo hustoty tepelného toku vzorku. Měřidlo se poté umístí na povrch vzorku a provede se vlastní měření. Výsledkem měření je hodnota hustoty tepelného toku vzorku. Následně je třeba provést výpočet součinitele tepelné vodivosti λ . Měření lze realizovat i za pomoci dvou měřidel hustoty tepelného toku. Potom je třeba položit měřidla na obě plochy vzorku.

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{(\theta_1 - \theta_2)} \quad (9)$$

kde: λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 q hustota tepelného toku vzorku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$],
 d tloušťka vzorku [m],
 $\theta_1 - \theta_2$ termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku [K].

1.4.1.3. Metoda měření tepelné izolace na kruhovém potrubí

Tato metoda se provádí při ustáleném tepelném stavu a její provádění se musí řídit nařízením ISO 8497. Pro provedení měření je třeba vlastnit zařízení, které nám měření umožní. Součástí zařízení je trubka. Trubka se musí obalit měřenou tepelnou izolací. Konce trubky jsou opatřeny kompenzačními částmi, které zajišťují stejnou teplotu konců trubek s teplotou střední části trubky. Trubka se následně začne zevnitř ohřívat. Měřicí zařízení pak zaznamená hustotu tepelného toku a teploty povrchu tělesa. Následně je třeba provést výpočet součinitele tepelné vodivosti λ . Na trubkových zařízeních se měří materiály sypké, vláknité a tuhé izolační skruže či návleky.

$$\lambda = \frac{q \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi \cdot (\theta_1 - \theta_2)} \quad (10)$$

kde: λ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 $D; d$ vnější; vnitřní průměr měřeného povrchu cylindrického tělesa [m],
 q hustota tepelného toku vzorku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 $\theta_1 - \theta_2$ termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku [K].

1.4.2. Nestacionární metody zjištění součinitele tepelné vodivosti

Nestacionární neboli dynamické metody mohou být prováděny, na rozdíl od stacionárních metod, i v náročných podmínkách. Metody lze charakterizovat jako kontaktní a jejich vyhodnocení je daleko rychlejší než vyhodnocení stacionárních metod. Provedení se však neřídí žádnými normovanými požadavky. Proto nejsou tyto zkoušky tak průkazné jako zkoušky metodami stacionárními. Obecné uspořádání měřících dynamických metod obsahuje vzorek, který je v těsném kontaktu s elektrickým topným tělesem s dostatečně nízkou tepelnou kapacitou. Teplý signál generovaný elektrickým proudem v topném tělese se šíří měřeným vzorkem a pomocí teplotního snímače, který je spojen s topným tělesem nebo je umístěn ve vzorku v určité vzdálenosti od topného tělesa, se zaznamenává časová závislost teploty. Termofyzikální parametry vzorku se určí z výkonu topného tělesa a časové závislosti teploty podle tvaru a vzájemného uspořádání topného tělesa a teplotního snímače. Nejrozšířenější dynamické metody jsou:

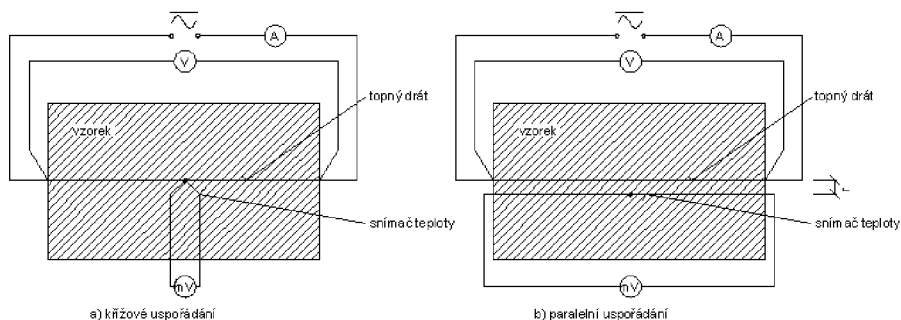
- metoda topného drátu (hot wire method),
- metoda topného pásu,
- metoda jehlové sondy,
- metoda kuličkové sondy (hot ball method),
- metoda plošné sondy.

1.4.2.1. Metoda topného drátu, metoda topného pásu

Metoda topného drátu a metoda topného pásu je založena na stejném principu. Jediný rozdíl je v použití tvarově odlišného topidla. V případě metody topného drátu se používá kovový drát, u metody topného pásu se používá kovový pás, případně tenká kovová folie. Dále jsou obě metody identické. Obě metody pak můžeme rozdělit na dvě formy provedení. Buďto se jedná o provedení pomocí křížového uspořádání nebo je možno zvolit uspořádání paralelní. Měřený vzorek, do kterého je vložen tenký topný drát a teplotní snímač, se udržuje na konstantní

TEORETICKÁ ČÁST

teplotě. Potom se po určitou dobu vložený topný drát připojí k elektrickému zdroji a generuje se skokový tepelný impuls, který se šíří měřeným vzorkem.



Obr. 19a - Uspořádání nestacionárního měřidla, tzv. křížová metoda

Obr. 19b - Uspořádání nestacionárního měřidla, tzv. paralelní metoda

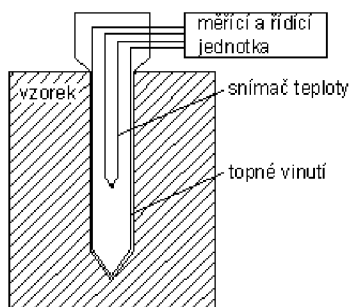
Tepelný snímač, který je v křížovém uspořádání spojen s topným drátem a v paralelním uspořádání je v určité vzdálenosti r od topného drátu, zajistí měření teplotní odezvy, tj. časové závislosti teploty ve vzorku. Ze známé hodnoty výkonu topného drátu a teplotní odezvy se stanoví součinitel tepelné vodivosti λ . Metoda topného drátu se dá jednoduše aplikovat na pevné, sytké a práškové materiály a materiály izolační s vláknitou nebo buňkovou strukturou v širokém teplotním rozsahu.

$$\lambda = \frac{\Phi}{4\pi \cdot L \cdot m} \quad (11)$$

kde: Φ součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 π konstantní tepelný tok liniového zdroje tepla [W],
 L tepelná propustnost prostředí vzorku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 m směrnice nárůstu teploty určena ze záznamu měření.

1.4.2.2. Metoda jehlové sondy

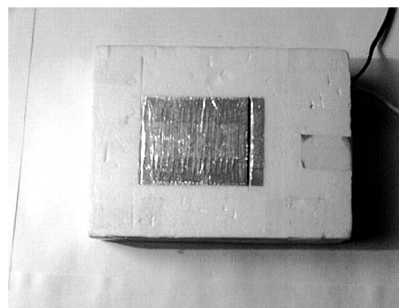
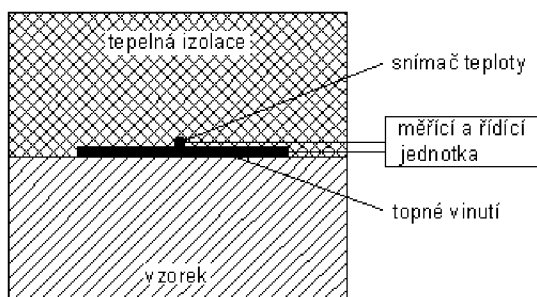
Zařízení sestává z topného vinutí, snímače teploty, měřicí a řídicí jednotky. Vlastní jehlová sonda je tvořena tenkou kapilárou, ve které je vloženo topné vinutí a snímač teploty. Pro realizaci měření je nutno vyvrtat těsnou díru ve zkušebním vzorku, do které se pak sonda vloží. Druhou možností je použití sondy v měkkém zkušebním vzorku, do kterého se sonda zasune. U této metody je třeba zjistit korekce odchylek, které se zjistí za pomoci měření referenčních materiálů.



Obr. 20 - Principiální uspořádání měřidla pro měření součinitele tepelné vodivosti nestacionární metodou vpichovací metodou

1.4.2.3. Metoda plošné sondy

Metoda plošné sondy je podobná metodě jehlové sondy. Využívá se však tam, kde není možno jehlovou sondou zasunout do materiálu nebo do zkušebního materiálu vyvrtat díru pro jehlovou sondu.



Obr. 21 - Uspořádání nestacionárního plošného měřidla pro měření součinitele tepelné vodivosti – vlevo schéma, vpravo fotografie plošné sondy (ÚTHD FAST VUT Brno).

Plošná sonda tedy najde použití u špatně vrtatelných materiálů nebo materiálů tvrdých. Zkušební zařízení, které se skládá ze snímače teploty, topného vinutí, měřicí a řídicí jednotky. Plošná sonda se přikládá na zkoušený materiál a proto je třeba zajistit dobrý kontakt plošné sondy s povrchem zkoušeného materiálu.

Zajištění kontaktu materiálu s měřícím zařízením je významný problém a může způsobit nepřesnosti měření. K zajištění co nejlepšího kontaktu měřícího zařízení s měřeným vzorkem lze dosáhnout pomocí různých silikonových olejů nebo jinou kontaktní kapalinou ke snížení přechodového odporu.

1.5. Tepelně izolační materiály

Tepelně izolační materiály dokáží při tloušťce několika centimetrů nahradit tepelně izolační vlastnosti několikanásobně silnějšího obvodového zdiva. Tohoto efektu lze v praxi využít a část obvodového zdiva nahradit tepelnou izolací. Následkem toho dojde ke snížení hmotnosti konstrukce při zachování stejných nebo dokonce lepších tepelně izolačních vlastností.

TEORETICKÁ ČÁST

V průběhu roku prochází stavební objekt mnoha teplotními extrémy. Jedná se hlavně o přehřívání objektu, ke kterému dochází nejčastěji v letních měsících a ochlazování objektu, ke kterému dochází nejčastěji v zimních měsících. Oba jevy jsou v extrémních případech velmi nežádoucí a je třeba je eliminovat například použitím vhodných tepelně izolačních materiálů. Samotné použití tepelně izolačních materiálů nemusí mít v důsledku ten správný efekt. Proto je důležité dbát na výběr vhodných tepelně izolačních materiálů a hlavně na správné provedení vlastní izolace objektu. Tepelně izolační materiály lze rozdělit do čtyř skupin:

- pěnové materiály,
- minerální vláknité materiály,
- přírodní materiály,
- moderní (ostatní) materiály.

1.5.1. Pěnové materiály

Mezi pěnové materiály lze zařadit pěnový polystyren (EPS), extrudovaný polystyren (XPS), šedý expandovaný polystyren, polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC), pěnové sklo, pěnové polyuretany (PUR) a polyizokyanuráty (PIR). Pěnové materiály vznikají pomocí nadouvadel (například CO_2), které zajišťují napěnění a zvětšení objemu výchozího materiálu. Většina těchto materiálů vyniká nízkou objemovou hmotností, špatnou odolností proti UV záření a vysokou hořlavostí. Výjimku tvoří pouze pěnové sklo, které je i chemicky a mechanicky odolné.

1.5.2. Minerální vláknité materiály

Mezi minerální vláknité materiály lze zařadit skleněnou vatu, kamennou vlnu a čedičovou vlnu. Minerální vláknité materiály vznikají roztavením a rozvlákněním výchozí suroviny. Výhodou minerálních vláknitých materiálů je jejich nízká hořlavost a paropropustnost, která umožňuje zatepleným objektům klidné a pozvolné vysychání. V případě špatného provedení izolace může být nevýhodou možný výskyt plísní. Izolace jsou zdravotně nezávadné.

1.5.3. Přírodní materiály

V dnešní době je brán ohled na ekologii životního prostředí a proto se mezi tepelně izolační materiály dostávají i přírodní materiály. Mezi přírodní materiály lze zařadit konopí, celulózu, dřevo, korek, ovčí vlnu a slámu. Mezi výhody přírodních materiálů patří šetrnost k přírodě při výrobě a zdravotní nezávadnost. Nevýhodou přírodních materiálů je jejich vyšší cena.

1.5.4. Moderní (ostatní) materiály

Mezi moderní materiály lze zařadit tepelné izolace na bázi pyrogenní kyseliny křemičité, tzv. aerogely, vakuové izolace, termoreflexní sendvičové izolace a různé kombinace těchto tepelných izolací. Tyto tepelné izolace eliminují šíření tepla vedením a prouděním na minimum. Šíření tepla je tedy z velké části realizováno sáláním. Jejich výhodou je nízký součinitel tepelné vodivosti. Mezi nevýhody patří v některých případech vyšší výrobní náročnost, možnosti použití, manipulace s tepelnými izolacemi i vyšší cena.

1.5.5. Přehled vybraných vlastností tepelně-izolačních materiálů

Tab. 1 – Přehled vybraných vlastností tepelně-izolačních materiálů

| Skupina materiálů | Materiál | ρ [kg.m ⁻³] | λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|
| Pěnové materiály | Expandovaný polystyren | 20 | 0,036 |
| | Expandovaný polystyren šedý | 18 | 0,030 |
| | Extrudovaný polystyren | 28 | 0,032 |
| | Pěnový polyuretan | 40 | 0,024 |
| | Pěnové sklo | 160 | 0,060 |
| Minerální vláknité materiály | Skleněná vata | 20 | 0,034 |
| | Kamenná vlna | 30 | 0,039 |
| | Čedičová vlna | 150 | 0,039 |
| Přírodní materiály | Konopí | 24 | 0,042 |
| | Ovčí vlna | 23 | 0,039 |
| | Celulóza | 45 | 0,041 |
| | Sláma | 90 | 0,055 |
| Ostatní materiály | Aerogel | 0,002 | 0,015 |
| | Vakuová izolace | 160 | 0,005 |

1.6. Termoreflexní tepelná izolace

V této kapitole je rozebrána termoreflexní tepelná izolace. Zaměřuji se na použité materiály, možné skladby výsledného termoreflexního souvrství a na závěr uvádím některé vlastnosti termoreflexní tepelné izolace.

1.6.1. Materiály termoreflexního souvrství

Termoreflexní souvrství je tvořeno třemi materiály. Jedná se o HDPE bublinovou folii a reflexní vrstvu tvořenou mikronovými kuličkami hliníku zatavenou mezi dvě PP folie.

HDPE bublinová folie vytváří v souvrství vzduchovou mezeru, která je díky bublinám ještě rozdělena na několik přibližně stejně velkých částí. Rozdělení velké vzduchové mezery bublinami na několik menších vzduchových mezer zajišťuje omezení proudění vzduchu, které by ve velké vzduchové mezeře bylo daleko výraznější. V dnešní době se vyrábí spousta druhů bublinových folií, které se liší jak tvarem, tak výškou bublin. Můžeme se setkat s bublinami kruhového nebo šestiúhelníkového tvaru, velkými nebo malými bublinami. Tvar bublin nemá

TEORETICKÁ ČÁST

na výsledné tepelně-izolační vlastnosti nějak významný vliv, avšak výška bublin, která zároveň tvoří vzduchovou mezeru, je pro tepelně-izolační vlastnosti termoreflexní izolace velmi významná.

Reflexní vrstva je tvořena nástřikem mikronových kuliček hliníku s velmi nízkou emisivitou povrchu. Nízká emisivita zaručuje pohlcení pouze 2 % dopadajícího záření. Zbylých 98 % dopadajícího záření je odraženo zpět. Mikronové kuličky hliníku nejsou galvanicky spojeny a proto je vrstva elektricky nevodivá. Hliníkový nástřik je dále zataven mezi dvě PP folie a tím se prodlužuje jeho životnost.

1.6.2. Skladba termoreflexního souvrství

Termoreflexní souvrství je tedy tvořeno dvěma hlavními složkami a to HDPE bublinovou folií a reflexní folií s velmi nízkou emisivitou povrchu.

Nejjednodušší typ souvrství jde tedy vytvořit kombinací těchto dvou složek. Pak vzniká souvrství složené HDPE bublinovou folií a reflexní folií. Pro představu, jak může vypadat jiné souvrství, uvádím kombinaci dvou reflexních folií a tří HDPE bublinových folií. V tomto souvrství se začíná reflexní vrstvou, následuje HDPE bublinová folie, reflexní vrstva, další HDPE bublinová folie a vše je zakončeno reflexní vrstvou. Kombinací HDPE bublinové folie a reflexní folie lze vytvořit mnoho kombinací, které se ve výsledku liší počtem reflexních a bublinových vrstev. S rostoucím počtem vrstev však roste výsledná tloušťka souvrství a z výsledků uvedených v [8] je zřejmé, že neplatí: čím více vrstev, tím lepší tepelně-izolační vlastnosti.



Obr. 22 – HDPE bublinová folie



Obr. 23 -Termoreflexní souvrství
s reflexní folií uprostřed

1.6.3. Vlastnosti termoreflexní tepelné izolace

Jelikož je termoreflexní souvrství tvořeno nevodivými vrstvami, je zaručena jeho elektrická nevodivost, tedy souvrství se chová jako izolant. Podle [10] se uvádí energie potřebná na

TEORETICKÁ ČÁST

výrobu jednoho metru čtverečního termoreflexního souvrství, která je menší než 1,3 MJ. Pro srovnání jsou zde uvedeny i energie potřebné k výrobě materiálů s $R = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$. EPS = 741 MJ/m^2 , minerální vlna = 185 MJ/m^2 , celulóza = 90 MJ/m^2 , ovčí vlna = 144 MJ/m^2 . [10] také uvádí vysokou účinnost odstínění elektrosmogu ve vysokofrekvenčním pásmu 25,9925 MHz až 6 GHz, které činí 99,99 % = 40 dB. Materiál HDPE (polyethylen s vysokou hustotou) se díky svým vlastnostem hodí k vyfukování a tudíž je pro výrobu bublinové folie vhodný. HDPE vyniká vysokou chemickou odolností, je nenasákavý, UV stabilní a trvale odolává teplotám od -100°C do 110°C . Zároveň je však snadno zápalný a lehce hořlavý. [15] Termoreflexní souvrství splňuje požadavky pro udělení požární odolnosti třídy E. Publikace [10] uvádí také další vlastnosti termoreflexního souvrství, mezi které patří lehkost, flexibilita a nehydrokopičnost. Díky těmto vlastnostem jde souvrství přizpůsobit prakticky jakékoliv konstrukci. Souvrství je čisté a nezpůsobující alergie, vyrobené ze zdravotně nezávadných surovin, takže nevyvolává kožní alergie a je fyziologicky nezávadný. Je zde také uváděna životnost, která činí 100 a více let. Výrobek je plně recyklovatelný.

1.7. Analýza tepelného šíření izolačními vrstvami termoreflexních izolací

Kapitola popisuje problém šíření tepla v systému tvořeném svislou obvodovou stěnou a termoreflexní tepelnou izolací. Nejprve je zde popsáno šíření tepla jednotlivými částmi systému, poté popisují skladbu celého systému zateplení. Na závěr uvádím šíření tepla svislou obvodovou stěnou zateplenou termoreflexní tepelnou izolací za různých teplotních podmínek.

1.7.1. Šíření tepla termoreflexním souvrstvím

Pro vysvětlení šíření tepla termoreflexním souvrstvím vybírám souvrství tvořené HDPE bublinovou folií vloženou mezi dvě reflexní folie. Princip šíření tepla, je pro souvrství tvořené více vrstvami, stejný.

Reflexní folie je tvořena mikronovým nástřikem hliníku uzavřeným mezi dvě PP folie. Oba zmíněné materiály jsou pevné a proto se zde teplo šíří pouze vedením. U HDPE folie je situace trochu odlišná. Bublinová folie vytváří vzduchové mezery, ve kterých se teplo může šířit prouděním a sáláním. Složka proudění je díky rozdělení prostoru bublinami, omezena na minimum. Zbytek bublinové folie tvoří HDPE, kterým se teplo šíří opět vedením.

Pokud jsou tímto souvrstvím odděleny dva prostory s různou teplotou, vzniká v souvrství teplotní spád a začíná proces šíření tepla. Zářením, dopadajícím na reflexní folii s velmi nízkou hodnotou emisivity, je z velké části odraženo zpět do prostoru. Pouze malá část přicházejícího

TEORETICKÁ ČÁST

tepla je pohlcena reflexní folií. Pokud uvažujeme emisivitu reflexní folie s hodnotou 0,02, mělo by se teoreticky odrazit 98 % dopadajícího záření a pouze 2 % by měla být pohlcena folií. Ve skutečnosti však budou hodnoty odražené a pohlcené části tepla trochu odlišné. Teplo, pohlcené reflexní folií, se dále šíří vedením. Postupně se dostává až k HDPE bublinové folii a při kontaktu s bublinovou folií se teplo šíří tak, jak bylo popsáno výše. To znamená, že teplo, postupující HDPE materiálem, se šíří vedením a teplo, které prostupuje vzduchovou mezerou, se šíří prouděním a sáláním. Po prostupu tepla vzduchovou mezerou se dostává k druhé reflexní folii se stejnými parametry jako má první reflexní folie. Teplo je tedy z velké části odraženo zpět do vzduchové mezery vytvořené bublinovou folií a pouze malá část tepla se šíří reflexní folií vedením. Vzniká zde tedy situace, kdy dvě reflexní folie sálají proti sobě, tedy vzájemné sálání povrchů dvou rovnoběžných ploch. Část tepla, která projde druhou reflexní folií je pak vyzářena do prostoru. Pokud by bylo souvrství tvořeno více vrstvami, je situace stále stejná.

Z uvedeného příkladu jasně vyplývá, že v případě termoreflexního souvrství je složka šíření tepla vedením a prouděním omezena na minimum. Dominující složkou se tedy stává šíření tepla sáláním.

1.7.2. Šíření tepla svislou obvodovou stěnou

Svislá obvodová stěna je ve většině případů tvořena pevnými zdíciými prvky. Ať už se jedná o keramické zdíci prvky nebo lehčené betony a silikáty, je ve hmotě určité procento pórů a dutin. Někdy jsou zdíci prvky úmyslně vylehčovány. Množství vzduchových pórů neovlivňuje jen hmotnost výsledného výrobku, ale také tepelně-izolační vlastnosti výrobku. Dnešní normy také nastavují určité požadavky na stavbu a už i výrobci zdíciých prvků jsou nuceni uvažovat o výsledných tepelně-izolačních vlastnostech výrobku. Z tohoto důvodu výrobci předkládají zdíci prvky s větším procentem vzduchových pórů či dutin, nahrazují část vstupního materiálu izolačním nebo odpadním materiálem.

Jak už bylo naznačeno, zdíci prvky se skládají z pevné hmoty a vzduchových pórů či dutin. V pevné části zdíciého prvku se teplo šíří pouze vedením. Emisivita zdíciých prvků je ve většině případů vysoká a proto je pouze část dopadajícího záření odražena zpět. Určitá část tepla je materiálem pohlcena a zbylá část materiálem projde dál. Při průchodu tepla vzduchovými póry a dutinami je situace jiná. Teplo se zde šíří převážně prouděním a sáláním. Vše závisí na velikosti vzduchových dutin a teplotě přilehlých povrchů.

1.7.3. Skladba systému pro zateplení svislé obvodové stěny

Postup provádění systému zateplení svislé obvodové stěny je popsán výše a proto se zaměřím pouze na to, jak tento systém vypadá. Skládá se z dřevěných latí, termoreflexní izolace, OSB desek a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek a reflexní lepicí pásky. Uvažuji zde pouze obvodovou stěnu a systém zateplení termoreflexní izolací. Povrchové úpravy ve formě omítek, fasádních desek, apod. nejsou uvažovány.



Obr. 24 – Skladba systému zateplení svislé obvodové stěny termoreflexní tepelnou izolací [11]

Na svislé obvodové stěně tvořené zdíci prvky je ukotvena síť dřevěných latí uložených horizontálně s roztečí latí 750 mm. Tyto latě vytváří prostor pro vzduchovou mezeru o tloušťce 15 – 25 mm. Na latích je sponkami přichycena termoreflexní izolace. Veškeré sponky a spoje jsou přelepeny reflexní lepicí páskou. Na vrstvě termoreflexní izolace je instalována další síť tvořená dřevěnými latěmi. Latě jsou tentokrát ukotveny vertikálně s roztečí 750 mm. Tato síť latí vytváří tak, jako předchozí síť latí, prostor pro vzduchovou mezeru o tloušťce 15 – 25 mm. Na latích jsou ukotveny OSB desky, které vytváří podklad pro budoucí pohledovou vrstvu.

1.7.4. Šíření tepla svislou obvodovou stěnou zateplenou termoreflexní izolací

Dále budu vycházet ze stěny popsané výše. Teoreticky mohou vzniknout tři situace. První situace, kdy je teplota interiéru vyšší než teplota exteriéru. Druhá situace představuje teplotu interiéru nižší než je teplota exteriéru. Poslední situace představuje stav, kdy je teplota interiéru stejná, jako teplota exteriéru. Tato situace se jednak v reálném prostředí moc často nevyskytuje a navíc při této situaci nevzniká teplotní spád potřebný pro šíření tepla. Teplo se v materiálech šíří z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s nižší teplotou.

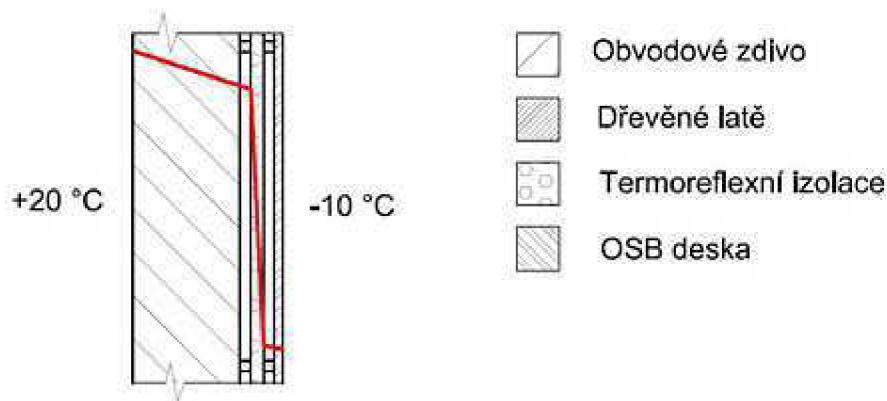
1.7.4.1. Zimní tepelná ochrana budov

V tomto případě se tedy teplo šíří z interiéru do exteriéru. V interiéru probíhá šíření tepla především prouděním a vedením. [10] uvádí, že podíl složky proudění a vedení představuje

TEORETICKÁ ČÁST

až 80 % z celkového objemu. Zbýlých 20 % připadá na šíření tepla sáláním. V případě, kdy se teplo šíří z interiéru do exteriéru, je tedy část tepla z interiéru předána obvodové stěně. V této stěně se teplo šíří převážně vedením. Teplota stěny narůstá a teplo prochází ke vzduchové mezeře vytvořené v systému s termoreflexní izolací. V místě, kde jsou na stěně ukotveny dřevěné latě, se teplo šíří dále vedením. V místě vzduchové mezery je přenos tepla zajištěn prostřednictvím sálání. Obvodová stěna ze zdících prvků má vysokou hodnotu emisivity, což zapříčiní vysoký podíl sálání ze stěny. Teplo se sáláním šíří k nízkoemisivnímu povrchu termoreflexní izolace, kde je však většina tepla odražena zpět k obvodové stěně. Pouze malá část tepla přestoupí do termoreflexní folie s nízkou emisivitou. Většina tepla odraženého zpět k obvodové stěně je díky vysoké emisivitě stěny, stěnou znovu pohlcena. Stěna se tak dále prohřívá a zvyšuje svou teplotu. Teplo, které přestoupí do nízkoemisivní reflexní folie se folií šíří vedením. Teplo však pokračuje reflexní folií k vrstvě tvořené HDPE bublinovou folií, za níž je umístěna opět nízkoemisivní reflexní folie. Část tepla, prošlého reflexní folií, je vysílána do mezery tvořené HDPE bublinovou folií a část tepla je přenesena vedením do HDPE bublinové folie. Teplo, přenášené sáláním, opět naráží na vrstvu nízkoemisivní reflexní folie. Tato folie většinu tepla opět odrazí zpět k první reflexní folii, která opět část tepla pohltí a zbylou část tepla odrazí. Vzniká zde tedy případ, kdy dvě reflexní folie sálají proti sobě, tedy vzájemné sálání povrchů dvou rovnoběžných ploch. Teplo, které se šíří prostřednictvím HDPE bublinové folie vedením, se dostává do termoreflexní folie. Teplo poté prochází termoreflexní folií a část prošlého tepla je vyzářena do druhé vytvořené vzduchové mezery. Ve vzduchové mezeře se však teplo šíří opět sáláním směrem k záklopu termoreflexního systému. V částech, kde je dřevěná lať ukotvena k prvnímu roštu dřevěných latí, se teplo šíří opět vedením směrem k záklopu termoreflexního systému. Teplo, které se dostane do záklopu s vysokou hodnotou emisivity, projde záklopem vedením a velká část je vyzářena do exteriéru. Obvodová stěna je navíc díky nízkoemisivní reflexní folii i rychleji prohřátá.

Když vezmeme v úvahu parametry folie, které uvádí [10], tedy emisivitu reflexní folie s hodnotou 0,02, zjistíme, že do první reflexní folie vstupují pouze 2% z celkového objemu tepla, vyzářeného obvodovou stěnou. Z reflexní folie potom vystupuje pouze část tepla, která sálá směrem ke druhé reflexní folii. Ta přijme opět pouze 2 % z celkového objemu tepla, vyzářeného první reflexní folií. Z toho vyplývá, že ztráty tepla, které unikne do chladnějšího exteriéru, jsou opravdu pouze minimální. Díky tomu nemusí být kladeny zvláště vysoké požadavky na energie spojené s vytápěním objektu.



Obr. 25 – Výpočtový průběh teplot v konstrukci při zimní ochraně budov

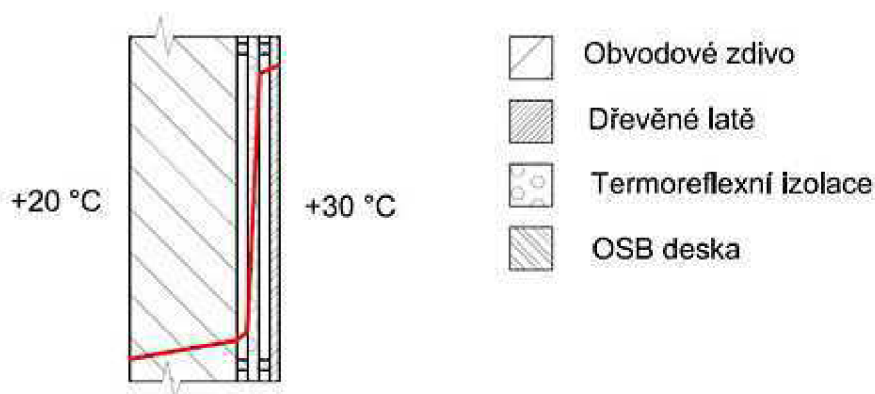
1.7.4.2. Letní tepelná ochrana budov

V tomto případě se tedy teplo šíří z exteriéru do interiéru. V exteriéru probíhá šíření tepla především prouděním a sáláním (např. ze Slunce). V tomto případě je tedy část tepla předána záklopu, vytvořeného v systému s termoreflexní izolací. Záklop je tvořen materiálem s vysokou hodnotou emisivity a teplo vyzářené na záklop, je tedy přijímáno velmi dobře. Do záklopu se dostane většina vyzářeného tepla a pouze část tepla je odražena zpět do exteriéru. Teplo, které se dostane do záklopu se dále šíří vedením. Teplo se postupně dostává až ke vzduchové mezeře vytvořené v rámci systému s termoreflexní izolací. Jelikož je záklop tvořen materiálem s vysokou hodnotou emisivity, je většina tepla vyzářena ze záklopu směrem do vzduchové mezery. V části, kde je záklop ve styku s dřevěnými latěmi, se teplo šíří vedením. Tato část však zaujímá pouze malé procento z celkového objemu. Teplo vyzářené záklopem se šíří sáláním k termoreflexní izolaci. Pouze malá část tepla je však pohlcena nízkoemisivní folií umístěnou na začátku termoreflexní izolace. Zbylá část tepla je odražena zpět k záklopu, který většinu tepla opět pohltí. Část tepla, která je pohlcena reflexní folií, prostupuje termoreflexní folií dále vedením. Teplo se postupně šíří k druhému povrchu reflexní folie, který je opět nízkoemisivní. Část tepla je tedy vyzářena do prostoru tvořeného HDPE bublinovou folií a část tepla je přenesena do HDPE bublinové folie. V bublinové folii probíhá šíření tepla vedením. Ve vzduchových dutinách folie se teplo šíří sáláním a prouděním směrem k druhé reflexní folii. Tato folie většinu tepla opět odrazí zpět k první reflexní folii, která opět část tepla pohltí a zbylou část tepla odrazí. Vzniká zde tedy případ, kdy dvě reflexní folie sálají proti sobě, tedy vzájemné sálání povrchů dvou rovnoběžných ploch. Teplo, které se šíří prostřednictvím HDPE bublinové folie vedením, se dostává do termoreflexní folie. Teplo poté prochází termoreflexní folií a část prošloho tepla je vyzářena do druhé vytvořené vzduchové mezery. Ve vzduchové mezeře se však teplo šíří opět sáláním směrem k obvodové stěně. Obvodová stěna je tvořena zdíci prvky s vysokou hodnotou

TEORETICKÁ ČÁST

emisivity a vyzářené teplo tedy z velké většiny pohltí. Zbylá část tepla je odražena zpět k nízkoemisivní reflexní folii. Teplo, které pohltila obvodová stěna, se šíří vedením až k okraji stěny v interiéru. Jelikož je obvodová stěna tvořena zdíci prvky s vysokou hodnotou emisivity, do interiéru je vyzářena většina tepla prošlého stěnou. Zbylá část tepla je stěnou pohlcena a stěna tak postupně zvyšuje svou teplotu. V interiéru se pak teplo šíří především prouděním.

Pokud budeme brát v úvahu stejné parametry folie jako v případě, kde je popsána zimní tepelná ochrana, zjistíme, že teplo, které projde do interiéru, je opět minimální. Díky tomu se objekt nebude přehřívat ani v horkých letních měsících.



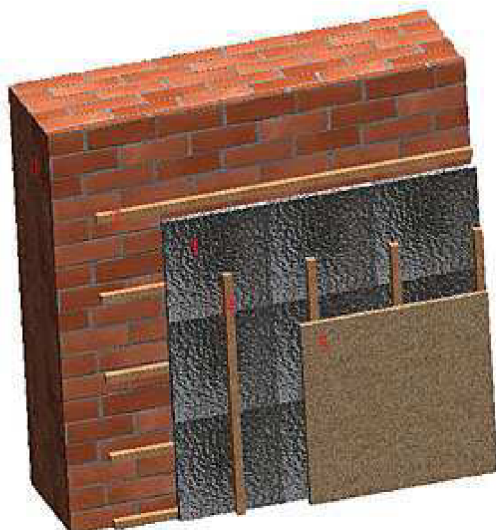
Obr. 26 – Výpočtový průběh teplot v konstrukci při letní ochraně budov

2. Kapitola I – Použití termoreflexní tepelné izolace ve stavbách

V kapitole je rozebráno použití termoreflexní tepelné izolace pro zateplení objektů v našich klimatických podmínkách. Jako podkladní materiál jsem použil konstrukční řešení uvedená v [11]. Jsou zde nastíněny možné systémy zateplení a přibližné postupy prací při instalaci uvedených systémů.

2.1. Vnější zateplení obvodové stěny

Vnější zateplení obvodové stěny je realizováno pomocí dřevěných latí, termoreflexní izolace, OSB desek a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek a reflexní lepicí pásy.



Obr. 27 – Schéma vnějšího zateplení obvodové stěny

kde:

- 1 – obvodové zdivo,
- 2 – dřevěné latě,
- 3 – termoreflexní izolace,
- 4 – dřevěné latě,
- 5 – OSB desky.

Při provádění systému zateplení je třeba postupovat následovně:

- připevnění dřevěných latí k obvodové stěně vruty s použitím hmoždinek. Doporučuje se horizontální uložení latí s roztečí asi 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace k dřevěným latím s použitím sponek. U spojů je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci. Veškeré použité sponky a vzniklé spoje je třeba přelepit termoreflexní lepicí páskou. Přelepení slouží ke snížení emisivity použitých spojovacích prvků, které mají emisivitu vyšší než reflexní lepicí páska,

- připevnění dalších dřevěných latí k již vytvořenému systému s použitím vrutů nebo hřebíků. Doporučuje se vertikální uložení latí s roztečí asi 750 mm. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu z OSB desek s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou pohledovou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezera.

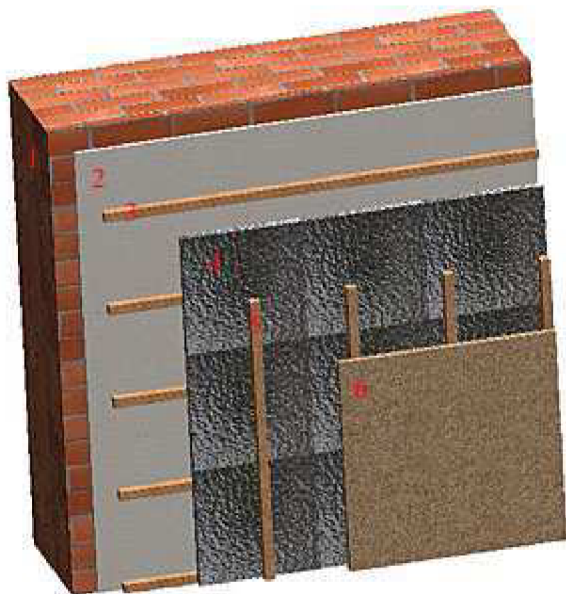
2.2. Vnitřní zateplení obvodové stěny

Při vnitřním zateplení obvodové stěny se nabízejí dvě varianty řešení. Pro oba způsoby je zateplení realizováno pomocí dřevěných latí, termoreflexní izolace, sádkartonových (nebo OSB desek), termoizolační stěrky a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek a reflexní lepicí pásy.

2.2.1. Varianta 1

Při provádění systému zateplení je třeba postupovat následovně:

- nanesení termoizolační stěrky na podklad,
- připevnění dřevěných latí k obvodové stěně vruty s použitím hmoždinek. Doporučuje se horizontální uložení latí s roztečí asi 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,



Obr. 28 – Schéma vnitřního zateplení obvodové stěny – varianta 1

kde:

- 1 – obvodové zdivo,
- 2 – termoizolační stěrka,
- 3 – dřevěné latě,
- 4 – termoreflexní izolace,
- 5 – dřevěné latě,
- 6 – OSB desky.

- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace k dřevěným latím s použitím sponek. U spojů je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o

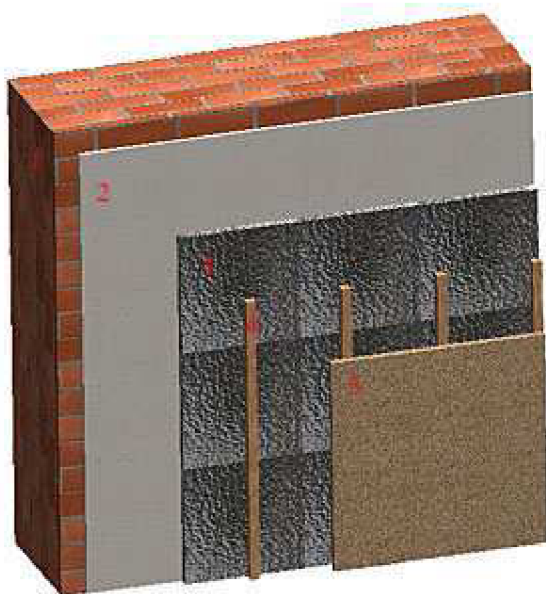
50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci. Veškeré použité sponky a vzniklé spoje je třeba přelepit termoreflexní lepicí páskou,

- připevnění dalších dřevěných latí k již vytvořenému systému s použitím vrutů nebo hřebíků. Doporučuje se vertikální uložení latí s roztečí asi 750 mm. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu ze sádkartonových desek (případně OSB desek) s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou pohledovou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezeru.

2.2.2. Varianta 2

Při provádění systému zateplení je třeba postupovat následovně:

- nanesení termoizolační stěrky na podklad,



Obr. 29 – Schéma vnitřního zateplení obvodové stěny – varianta 2

kde:

1 – obvodové zdivo,

2 – termoizolační stěrka,

3 – termoreflexní izolace,

4 – dřevěné latě,

5 – OSB desky.

- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace ke stěně s použitím sponek. U spojů je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci. Veškeré použité sponky a vzniklé spoje je třeba přelepit termoreflexní lepicí páskou,

PRAKTICKÁ ČÁST

- připevnění dřevěných latí k již vytvořenému systému s použitím vrutů nebo hřebíků. Doporučuje se horizontální uložení latí s roztečí asi 750 mm. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu ze sádrokartonových desek (případně OSB desek) s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou pohledovou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezeru.

2.3. Zateplení šikmé střechy

Zateplení šikmé střechy může být realizováno dvěma způsoby. Pro oba způsoby je zateplení realizováno pomocí dřevěných latí, termoreflexní izolace, sádrokartonových (nebo OSB desek) a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek a reflexní lepicí pásky.

2.3.1. Varianta 1

Způsob zateplení střechy je náročnější na provádění, je také cenově náročnější, avšak poskytuje lepší tepelně-izolační vlastnosti.



Obr. 30 – Schéma
zateplení šikmé střechy –
varianta 1

kde:

- 1 – difúzní folie,
- 2 – krokve,
- 3 – termoreflexní izolace,
- 4 – dřevěné latě,
- 5 – termoreflexní izolace,
- 6 – dřevěné latě,
- 7 – sádrokartonové desky.

Při provádění tohoto systému zateplení je třeba postupovat následovně:

- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace mezi krokve pomocí dřevěných latí a vrutů nebo hřebíků. Termoreflexní izolace by měla být vzdálena 15 – 25 mm od vnitřního okraje krokve. Zakončení je nutno dodržet přesah 50 – 70 mm, který je

PRAKTICKÁ ČÁST

nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci. Použité vruty nebo hřebíky je nutno přelepit reflexní lepicí páskou,

- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace na krokve s použitím sponek. U spoju je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci. Veškeré použité sponky a vzniklé spoje je třeba přelepit termoreflexní lepicí páskou,
- připevnění latí na již vytvořený systém v místě, kde leží krokve, pomocí vrutů. Doporučuje se horizontální uložení latí s roztečí asi 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu ze sádrokartonových (případně OSB desek) s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou pohledovou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezeru.

2.3.2. Varianta 2

Způsob zateplení šikmé střechy je jednodušší na provádění, je cenově méně náročný, avšak poskytuje horší tepelně-izolační vlastnosti než první způsob zateplení střechy.



Obr. 31 – Schéma zateplení šikmé střechy – varianta 2

kde:

- 1 – difúzní folie,
- 2 – krokve,
- 3 – termoreflexní izolace,
- 4 – dřevěné latě,
- 5 – sádrokartonové desky.

Při provádění tohoto systému zateplení je třeba postupovat následovně:

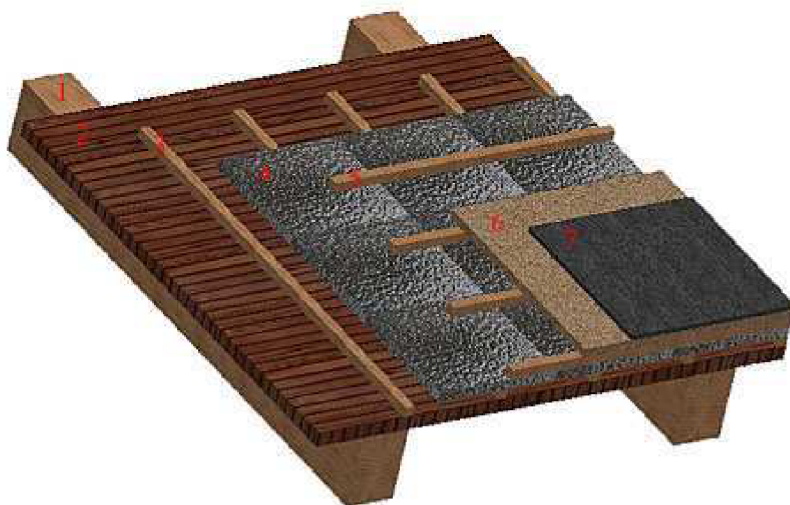
- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace na krokve s použitím sponek. U spoju je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi jednotlivé

vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci. Veškeré použité sponky a vzniklé spoje je třeba přelepit termoreflexní lepicí páskou,

- připevnění latí na již vytvořený systém v místě, kde leží krokve, pomocí vrutů. Doporučuje se horizontální uložení latí s roztečí asi 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu ze sádkartonových (případně OSB desek) s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou pohledovou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezeru.

2.4. Zateplení ploché střechy

Zateplení ploché střechy je realizováno pomocí dřevěných latí, termoreflexní izolace, OSB desek, hydroizolace a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek a reflexní lepicí pásky.



Obr. 32 – Schéma

zateplení ploché střechy

kde:

- 1 – dřevěné trámy,
- 2 – dřevěné desky,
- 3 – dřevěné latě,
- 4 – termoreflexní izolace,
- 5 – dřevěné latě,
- 6 – OSB desky,
- 7 - hydroizolace.

Při provádění tohoto systému zateplení je třeba postupovat následovně:

- připevnění dřevěných latí ke konstrukci vruty s použitím hmoždinek. Doporučená rozteč latí je 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace k dřevěným latím s použitím sponek. U spojů je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi

jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci,

- připevnění dalších dřevěných latí k již vytvořenému systému s použitím vrutů nebo hřebíků. Latě je nutno položit kolmo k již položené vrstvě latí. Doporučená rozteč latí je 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu z OSB desek s použitím vrutů. [11] Doporučuje se použití desek s reflexní vrstvou vespod,
- položení hydroizolace.

2.5. Zateplení podlahy

Při zateplování podlahy se nabízejí dvě varianty řešení. První varianta nepočítá s podlahovým vytápěním, druhá varianta je pak realizována s podlahovým vytápěním.

2.5.1. Zateplení podlahy bez podlahového vytápění

Zateplení podlahy bez podlahového vytápění je realizováno pomocí dřevěných latí, termoreflexní izolace, dřevotřískových desek (případně OSB desek) a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek a reflexní lepicí pásky.



Obr. 33 – Schéma zateplení podlahy bez podlahového vytápění,

kde:

- 1 – betonový podklad,
- 2, 4 – dřevěné latě,
- 3 – termoreflexní izolace,
- 5 – OSB desky.

Při provádění systému zateplení je třeba postupovat následovně:

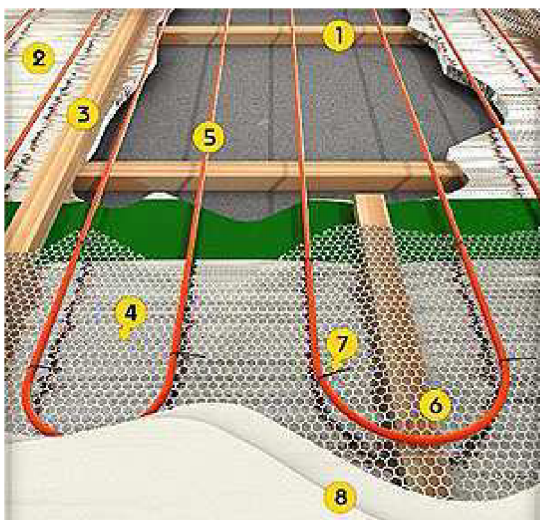
- připevnění dřevěných latí k podlaze vruty s použitím hmoždinek. Doporučená rozteč latí je 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace k dřevěným latím s použitím sponek. U spojů je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi

jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci,

- připevnění dalších dřevěných latí k již vytvořenému systému s použitím vrutů nebo hřebíků. Latě je nutno položit kolmo k již položené vrstvě latí. Doporučená rozteč latí je 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- položení a přichycení záklopu z dřevotřískových desek (případně OSB desek) s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou nášlapnou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezeru. Pro zvýšení tuhosti celého systému je doporučeno položení desek ve dvou na sebe kolmých vrstvách.

2.5.2. Zateplení podlahy s realizací podlahového vytápění

Zateplení podlahy s realizací podlahového vytápění je realizováno pomocí dřevěných latí, termoreflexní izolace, dřevotřískových desek (případně OSB desek), pletiva, hadice podlahového vytápění a montážního příslušenství v podobě vrutů, hřebíků, hmoždinek, sponek, reflexní lepicí pásky a stahovacích pásek.



Obr. 34 – Schéma zateplení podlahy s realizací podlahového vytápění [11]

kde:

- 1 – dřevěné latě,
- 2 – termoreflexní izolace,
- 3 – dřevěné latě,
- 4 – pletivo,
- 5 – hadice podlahového vytápění
- 6 – drážka pro hadici,
- 7 – stahovací páska,
- 8 – dřevotřísková deska.

Při provádění systému zateplení je třeba postupovat následovně:

- připevnění dřevěných latí k podlaze vruty s použitím hmoždinek. Doporučená rozteč latí je 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,

PRAKTICKÁ ČÁST

- natáhnutí a přichycení termoreflexní izolace k dřevěným latím s použitím sponek. U spojů je nutno dodržet přeplátování o 30 – 50 mm, u zakončení potom přesah o 50 – 70 mm. Při přeplátování je třeba vložit oboustrannou lepicí pásku mezi jednotlivé vrstvy termoreflexní izolace. Přesah, u zakončení termoreflexní izolace, je nutno nalepit tmelem ke konstrukci a přichytit dřevěnou latí ke konstrukci,
- připevnění dalších dřevěných latí k již vytvořenému systému s použitím vrutů nebo hřebíků. Latě je nutno položit kolmo k již položené vrstvě latí. Doporučená rozteč latí je 750 mm z důvodu omezení proudění vzduchu ve vytvořené vzduchové mezeře. Vytvořená vzduchová mezera musí odpovídat tloušťce 15 – 25 mm,
- vytvoření drážek do latí v místě budoucího křížení hadice podlahového vytápění s latí,
- položení pletiva na dřevěné latě. V místech s vytvořenou drážkou je třeba pletivo zamáčknout do drážky,
- položení hadice podlahového vytápění. Hadici je nutno přichytit k pletivu pomocí stahovacích pásků,
- položení a přichycení záklopu z dřevotřískových desek (případně OSB desek) s použitím vrutů nebo hřebíků. Tyto desky slouží jako podklad pro navrženou nášlapnou vrstvu a zároveň uzavírají vytvořenou vzduchovou mezera. Pro zvýšení tuhosti celého systému je doporučeno položení desek ve dvou na sebe kolmých vrstvách.

3. Kapitola II - Konstrukce měřícího zařízení

Mezi hlavní veličiny, stanovující tepelně-izolační vlastnosti materiálu patří součinitel tepelné vodivosti a součinitel prostupu tepla. V této práci zjišťuji součinitel prostupu tepla. Tato veličina v sobě zahrnuje jak tepelný odpor zkoušeného materiálu, tak přestupové odpory vznikající na plochách zkoušeného materiálu. Jelikož se při výpočtu přestupových odporů pracuje s doporučenými hodnotami pro výpočet, které ve skutečnosti ovlivňuje sálavá složka a složka přestupu při proudění, nelze s jistotou zjistit hodnoty tepelných odporů zkoušených materiálů. S hodnotou součinitele prostupu tepla se však v praxi běžně pracuje a tepelný odpor materiálu tak není třeba znát. Součinitel prostupu tepla vyjadřuje tepelně izolační schopnost dané konstrukce a je závislý na součiniteli tepelné vodivosti, tloušťce daného materiálu a hodnotách přestupových odporů na vnější a vnitřní straně dané konstrukce. Čím nižší je hodnota součinitele prostupu tepla, tím vyšší je výsledný tepelný odpor konstrukce. Součinitel prostupu tepla je dán vztahem:

$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \quad (12)$$

kde: U součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 R tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 R_{si} přestupový odpor na vnitřní straně konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$],
 R_{se} přestupový odpor na vnější straně konstrukce [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$].

Jelikož neexistuje měřící zařízení, které by umožňovalo měření vzorku v různých polohách, musel jsem vhodné měřící zařízení vyrobit. Konstrukce měřícího zařízení sestávala z následujících kroků:

- návrh a výroba krabic z expandovaného polystyrenu (dále budu používat jen „krabice z EPS“),
- návrh délky topného drátu pro potřeby topných tělísek,
- výroba topných tělísek,
- návrh a výroba elektroniky pro měřící zařízení,
- vývoj softwaru potřebného pro ovládání měřícího zařízení,
- kalibrace teplotních čidel pro měřící zařízení,
- sestavení a testování měřícího zařízení.

3.1. Výpočet součinitele prostupu tepla

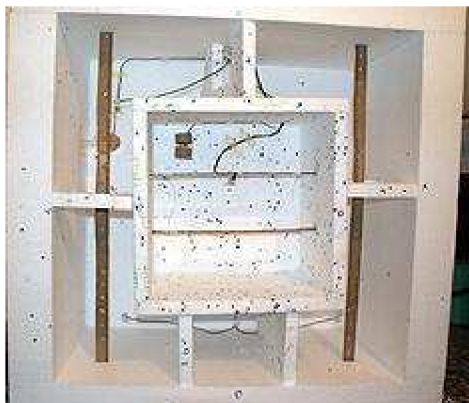
Z hodnot zjištěných vytvořeným stacionárním měřícím zařízením bylo třeba upravit vztah pro výpočet součinitele prostupu tepla:

$$\frac{U_{zdroje}^2}{R_{td}} \cdot p = U \cdot S \cdot \Delta T \Rightarrow U = \frac{U_{zdroje}^2}{R_{td}} \cdot \frac{1}{S \cdot \Delta T} \cdot p \quad (13)$$

kde: U_{zdroje} skutečné napětí protékající topným drátem [V],
 R_{td} skutečný elektrický odpor topného drátu [Ω],
 p poměr který vyjadřuje čas topení ku celkovému času (v programu) [-],
 U součinitel prostupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 S měřící plocha vzorku [m^2],
 ΔT rozdíl teplot studeného a teplého prostředí [K].

3.2. Krabice z EPS

Pro měření bylo třeba vytvořit dvě prostředí. Jedno prostředí s vyšší teplotou (teplé) a druhé prostředí s nižší teplotou (studené). Pro přesnější měření bylo třeba teplé prostředí rozdělit na další dvě prostředí. První prostředí slouží jako kompenzační prostředí. Zde se teplota temperuje na předem danou hodnotu. Druhé prostředí slouží jako měřící prostředí. Zde se teplota vyrovnává na teplotu kompenzačního prostředí. Mezi těmito dvěma teplými měřícími prostředími tedy není vytvořen teplotní spád, protože jejich teplota je stejná. Měřící zařízení je tedy sestaveno ze tří otevřených EPS krabic.



Obr. 35 – Teplé EPS krabice topnými tělísky a čidly teploty PT 1000



Obr. 36 – Studená EPS krabice s větracími otvory, ventilátorem pro homogenizaci prostředí a teplotním čidlem PT 1000

Krabice pro prostředí s nižší teplotou a krabice pro kompenzační prostředí s vyšší teplotou mají rozměry 1000x1000x500 mm. Tloušťka EPS je 100 mm. Jedná se o tzv. vnější neboli také velké krabice. Krabice pro měřící prostředí s vyšší teplotou je tvořena 30 mm EPS. Rozměry této tzv. vnitřní krabice, jsou 460x460x300 mm. Do měřícího zařízení lze upevnit vzorek tepelné izolace o plošném rozměru 1000x1000 mm. Samotné měření však probíhá na části plochy o rozměru 400x400 mm. Jelikož se měření předpokládalo v zimních měsících, teplota chladného prostředí je zajišťována pomocí okolního chladného prostředí. Kvůli tomu

bylo ve vnější chladné EPS krabici vytvořeno pět větracích otvorů. Pro zajištění polohy jednotlivých EPS krabic byly vytvořeny vzpěry z EPS, které jednotlivé EPS krabice drží ve správné poloze.

3.3. Topný drát

Pro potřeby měření byl vypočítán potřebný topný výkon pro teplotní rozdíl 20°C, který vychází z tepelných charakteristik jednotlivých materiálů, jejich ploch a tloušťek. K tomuto výkonu byla přidána rezerva, která má pokrýt případné nedostatky v konstrukci EPS krabic. Pro měření byly stanoveny teploty +5°C v chladné části a +15°C v teplé části. Další experimenty měly směřovat k vyšším teplotním rozmezím a ověřit tak účinnost termoreflexních tepelných izolací za různých teplotních spádů.

Pro potřeby topného drátu byl zvolen konstantanový drát o průměru 0,4 mm. Délka drátu byla odvozena z výpočtu. Pro potřeby topení ve velké teplé EPS krabici je třeba výkon 50 W, čemuž odpovídá elektrický odpor 2,88 Ω a délka drátu 0,77 m. Pro potřeby topení v malé teplé EPS krabici je třeba výkon 20 W, čemuž odpovídá elektrický odpor 7,2 Ω a délka drátu 1,91 m. V praxi se však ukázalo, že konstantanový drát o vypočtené délce nemá potřebný elektrický odpor. Proto je konstantanový drát zakrácen tak, aby pokrýval co nejtěsněji potřebný elektrický odpor. Při měření byl zjištěn skutečný elektrický odpor malé topné EPS krabice, který je třeba při výpočtu součinitele prostupu tepla. Elektrický odpor byl vypočten z naměřeného skutečného napětí a proudu protékajícího drátem.

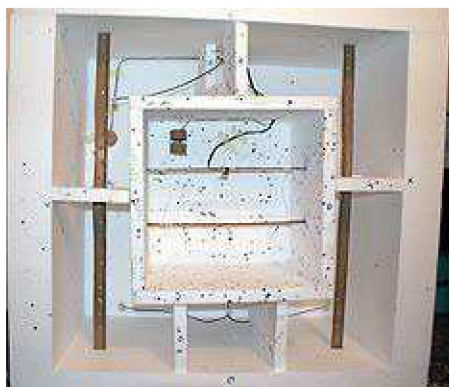
$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow R = \frac{8,535}{1,186} \quad (14) \quad \begin{array}{l} \text{kde: } R \text{ elektrický odpor } [\Omega], \\ U \text{ napětí } [V], \\ I \text{ proud } [A]. \end{array}$$

$$R = 7,196 \Omega$$

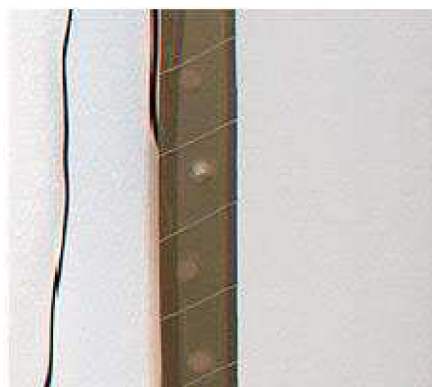
3.4. Topná tělíska

Teplé EPS krabice je třeba vytápět na definovanou teplotu. K tomuto účelu slouží topná tělesa, která byla zhotovena z plátů dibondu, na který byl navinut topný drát o potřebné délce. Dibond je sendvič, který tvoří kombinace hliníku a polyethylenu, kde dva hliníkové plechy obklopují polyethylenové jádro.

Pro vytápění byly zvoleny dva pláty dibondu do velké teplé EPS krabice a dva pláty dibondu do malé teplé EPS krabice. Na tyto pláty byl topný drát navinut tak, aby pokryl co největší délku dibondových plátů a zajistil tak šíření tepla v co největší části EPS krabice. Pro potřeby velké teplé EPS krabice byla na dibondové pláty namotána dvojnásobná délka topného drátu, který byl paralelně připojen pomocí svorkovnice, k přívodnímu měděnému drátu.

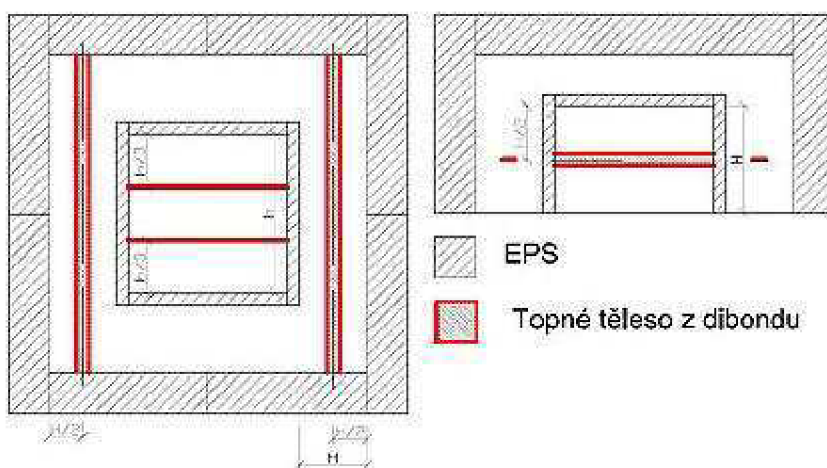


Obr. 37 – Reálné provedení topných těles v měřicím zařízení



Obr. 38 – Detail topného tělesa s navinutým konstantanovým drátem

V malé teplé EPS krabici byla využita vypočtená délka topného drátu, který byl taktéž navinut na dva dibondové pláty a pomocí svorkovnic připojen sériově k přívodnímu měděnému drátu. Oba měděné dráty byly následně vyvedeny skrz EPS krabice na povrch velké teplé EPS krabice.



Obr. 39 – Umístění topných těles v EPS krabicích

3.5. Elektronika měřícího zařízení

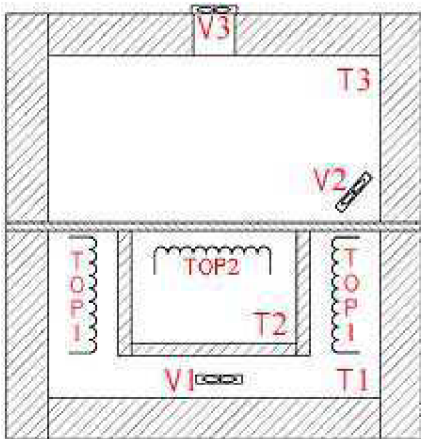
Pro potřeby měření bylo třeba zajistit:

- vytápění velké teplé EPS krabice,
- vytápění malé teplé EPS krabice,
- proudění vzduchu ve velké teplé EPS krabici,
- proudění vzduchu ve velké studené EPS krabici,
- řízení topení a ventilátoru, snímání teploty v EPS krabicích,
- A/D karta do počítače,
- počítač.

Vytápění velké teplé a malé teplé EPS krabice bylo vyřešeno pomocí topných tělísek. Tyto tělíska byla pomocí měděného drátu připojena k řídicí desce měřícího zařízení. Připojení

PRAKTICKÁ ČÁST

topných tělísek je realizováno pomocí spojek a je tak možné topení kdykoliv odpojit z řídicích desek.

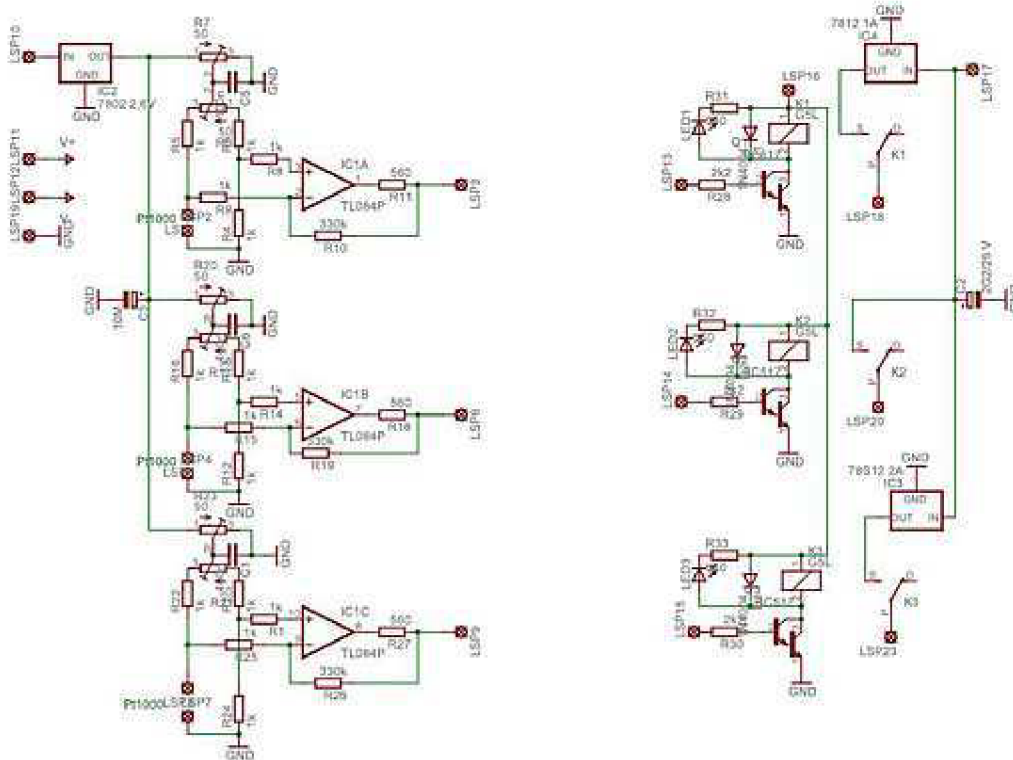


kde:

- T1** – čidlo teploty velké teplé EPS krabice,
- T2** – čidlo teploty malé teplé EPS krabice,
- T3** – čidlo teploty velké studené EPS krabice,
- V1** – ventilátor homogenizující prostředí velké teplé EPS krabice (pomaloběžný, průměr 100 mm),
- V2** – ventilátor homogenizující prostředí velké studené EPS krabice (průměr 40 mm),
- V3** – spínaný ventilátor velké studené EPS krabice (průměr 40 mm), vyhánějící ohřátý vzduch,
- TOP1** – topná tělíska velké teplé EPS krabice,
- TOP2** – topná tělíska malé teplé EPS krabice.

Obr. 40 – Schéma elektrických zařízení v měřicím zařízení

Pro vytápění bylo třeba zajistit stabilizované napájení zdrojem o potřebném výkonu. Pro tuto potřebu bylo měřicí zařízení osazeno toroidním transformátorem na 220 V o výkonu 100 W. Napětí je pak pomocí usměrňovače převedeno na výsledných 16 V.



Obr. 41 – Schéma elektrického zapojení elektrických obvodů; vlevo řídicí část; vpravo měřicí část

Ve velkých EPS krabicích je třeba zajistit homogenní prostředí. Do velké teplé EPS krabice byl pro tyto potřeby vložen pomaloběžný ventilátor o průměru 100 mm, který je nepřetržitě

PRAKTICKÁ ČÁST

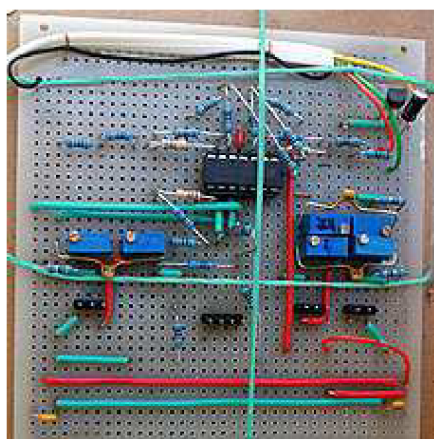
připojen na druhý zdroj s napětím 12 V. Proudění vzduchu ve velké studené EPS krabici by mělo být zajištěno pomocí větracích děr, avšak pro jistotu byl do krabice přidán ventilátor o průměru 40 mm, který je taktéž stále připojen na 12 V zdroj. O odvětrání teplého vzduchu z velké chladné EPS krabice se stará ventilátor o průměru 40 mm, který je připojen pomocí spojek na řídicí desku. Tento ventilátor je poté regulován softwarem a spíná jen v případě potřeby.

Řízení topení a ventilátoru a snímání teploty je zajištěno pomocí elektrických obvodů umístěných na dva univerzální cuprexitové plošné spoje. Na plošné spoje jsou umístěny zásuvky, do kterých jsou pomocí zástrček připojeny další dráty vedoucí do A/D karty v počítači. S řízením topení a ventilátoru umístěným na plošných spojích se komunikuje prostřednictvím vyvinutého softwaru a A/D karty umístěné v počítači. Snímání teploty je vyřešeno teplotními čidly PT 1000. V každé krabici je umístěno jedno teplotní čidlo a pomocí stíněné dvojlinky je vyvedeno na plošný spoj. Napájení pro tento plošný spoj tvoří stabilizovaný zdroj s napětím 5 a 12 V.

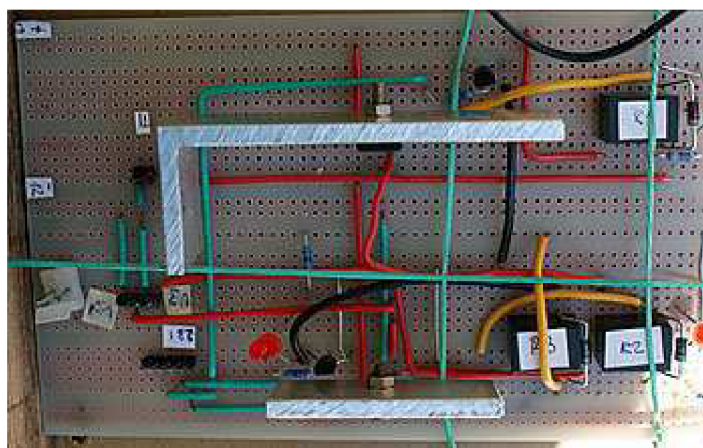
Jako poslední krok bylo třeba umístit teplotní čidla tak, aby na ně nepůsobila sálavá složka z termoreflexních tepelných izolací a z EPS. Proto byly vytvořeny papírové misky, které se umístily pod a nad teplotní čidlo tak, aby na něj záření dopadalo co nejméně a měřila se jen teplota prostředí.



Obr. 42 – Krytí teplotního čidla



Obr. 43 – Měřicí část plošného spoje

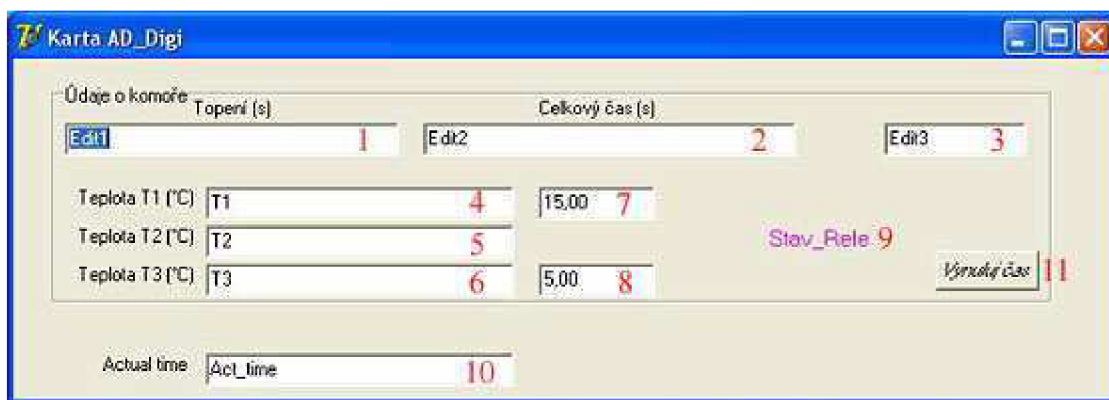


Obr. 44 – Řídicí část plošného spoje

3.6. Software

Pro měření bylo třeba navrhnout a vyvinout software, který bude zajišťovat ustálení teplot na daných hodnotách a který bude příslušné teploty, délky měření a délky topení zaznamenávat a zároveň počítat poměr délky topení k celkové délce měření.

K tomuto účelu bylo zvoleno programovací prostředí Pascal. Následně bylo vytvořeno uživatelsky přívětivé okno, ve kterém se příslušné hodnoty zobrazují a spouští se zde měření. V programu je možno nastavit požadované okrajové podmínky, které určují krajní teploty měření. Program následně zapíná a vypíná topná tělíska v jednotlivých EPS krabicích a ventilátor tak, aby bylo co nejpřesněji dosaženo požadovaných teplot. K určení teplot využívá vztahu vytvořeného v odstavci „Kalibrace teplotních čidel“.



Obr. 45 – Okno programu pro řízení měřícího zařízení

kde:

- 1 – okno „Topení (s)“ – zobrazuje celkový čas topení malé teplé EPS krabice,
- 2 – okno „Celkový čas (s)“ – zobrazuje celkový čas topení velké teplé EPS krabice,
- 3 – okno „Poměr“ – zobrazuje poměr času „Topení“ k „Celkový čas“. Tento poměr je následně využíván k výpočtu součinitele prostupu tepla,
- 4 – okno „Teplota T1 (°C)“ – zobrazuje aktuální teplotu ve velké teplé EPS krabici,
- 5 – okno „Teplota T2 (°C)“ – zobrazuje aktuální teplotu v malé teplé EPS krabici,
- 6 – okno „Teplota T3 (°C)“ – zobrazuje aktuální teplotu ve velké studené EPS krabici,
- 7 – v okně se zobrazuje nastavená horní teplota měření,
- 8 – v okně se zobrazuje nastavená spodní teplota měření,
- 9 – „Stav_Rele“ – zobrazuje kontrolní číslici, která indikuje zapnutí a vypnutí jednotlivých topných těles a ventilátoru,
- 10 – okno „Actual time“ – zobrazuje aktuální čas,
- 11 – tlačítko „Vynuluj čas“ – vynuluje okna „Topení“, „Celkový čas“ a „Poměr“.

3.7. Kalibrace teplotních čidel

Pro potřeby snímání teplot v měřícím zařízení byly vybrány teplotní čidla Pt1000. Ke komunikaci teplotních čidel přes A/D kartu bylo třeba do vyvíjeného softwaru navrhnout vhodné rovnice, které co nejpřesněji popíšou charakteristiku jednotlivých teplotních čidel.

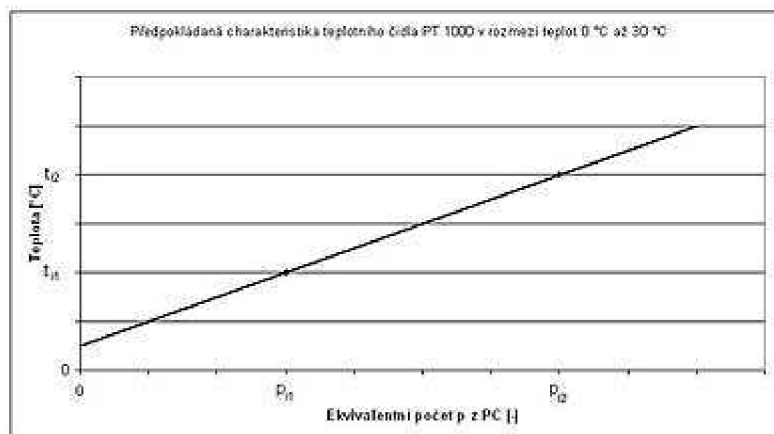
PRAKTICKÁ ČÁST

V rozmezí teplot 0°C až 30°C předpokládám lineární charakteristiku teplotního čidla a proto vycházím z obecné rovnice přímky:

$$t_i = A \cdot p + B \quad (15)$$

kde: p ekvivalentní počet jednotek odečtený z AD převodníku [-],
 t_i teplota odečtená z metricky navázaného teploměru [°C],
 A, B konstanty vypočtené z kalibrace teplotních čidel [-].

Graf 4 – Předpokládaná charakteristika teplotního čidla



Po dosazení konstant dostaneme vztah:

$$t_i = \frac{t_{i2} - t_{i1}}{p_{i2} - p_{i1}} \cdot p + \frac{p_{i2} \cdot t_{i2} - p_{i1} \cdot t_{i1}}{p_{i2} - p_{i1}} \quad (16)$$

kde: p ekvivalentní počet jednotek odečtený z AD převodníku [-],
 p_i ekvivalentní počet jednotek odečtený z AD převodníku [-],
 t_i teplota odečtená z metrologicky navázaného teploměru [°C].

Kalibrace teplotních čidel byla provedena tak, že se teplotní čidla připojila k plošnému spoji měřicího zařízení a veškeré komponenty potřebné k běhu měření byly spuštěny. Následně byla teplotní čidla s přiloženým metricky navázaným teploměrem vložena do termosky se sněhem. Po ustálení teplot na teplotě blízké 0°C se odečetly příslušné hodnoty z PC a z teploměru. Následně byla do termosky nalita voda a po ustálení teplot na teplotě blízké 35°C byly opět odečteny příslušné hodnoty z AD převodníku a teploměru. Dle již uvedeného vztahu byly vypočteny konstanty a vytvořeny jednotlivé rovnice pro teplotní charakteristiky jednotlivých čidel.

Tab. 2 – Naměřené hodnoty z kalibrace teplotních čidel a vypočtené konstanty pro rovnice

| číslo č. | t_1 | p_{i1a} | p_{i1b} | p_{i1} | t_2 | p_{i2a} | p_{i2b} | p_{i2} | A_i | B_i |
|----------|-------|-----------|-----------|----------|-------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| [-] | [°C] | [-] | [-] | [-] | [°C] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | 1,25 | 28620,0 | 28563,0 | 28591,5 | 34,2 | 50554,0 | 50509,0 | 50531,5 | 0,001502 | 77,139377 |
| 2 | 1,25 | 29230,0 | 29092,0 | 29161,0 | 34,21 | 50128,0 | 50262,0 | 50195,0 | 0,001567 | 79,904902 |
| 3 | 1,25 | 28254,0 | 28129,0 | 28191,5 | 34,22 | 49781,0 | 49674,0 | 49727,5 | 0,001531 | 77,379071 |

3.8. Sestavení a testování měřícího zařízení

Na závěr bylo třeba vše sestavit, zprovoznit a otestovat. Sestavení měřícího zařízení bylo bezproblémové. Všechny komponenty se dají kdykoliv připojit nebo odpojit a proto je zajištěna jednoduchá manipulace s celým měřícím zařízením. První spuštění proběhlo bez termoreflexní tepelné izolace a sledovala se funkčnost jednotlivých dílů měřícího zařízení. Byly odstraněny chyby v elektronice měřícího zařízení, které spočívaly v nesprávném spínání topení a ventilátoru. Následně bylo vše opět odzkoušeno a po ověření všech funkčních součástí se do měřícího zařízení instalovala první termoreflexní tepelná izolace.

Ihned po instalaci nastal první problém – termoreflexní tepelná izolace nedoléhala celou potřebnou plochou na malou teplou EPS krabici. Problém byl vyřešen mírným předsazením malé teplé EPS krabice před velkou teplou EPS krabici. Na malou teplou EPS krabici se následně nalepila oboustranná lepicí páska a termoreflexní tepelná izolace se zafixovala v napnutém stavu na velkou teplou EPS krabici. Po této instalaci byly vidět jednotlivé hrany malé teplé EPS krabice vyrýsované na termoreflexní tepelné izolaci.



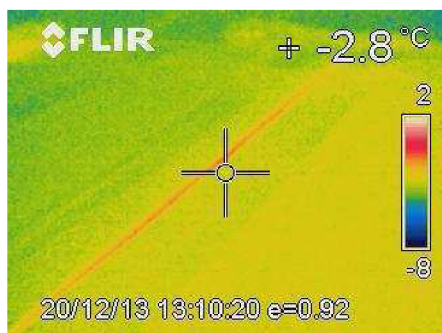
Obr. 46 – Obsluha měřícího zařízení – umístění v místnosti



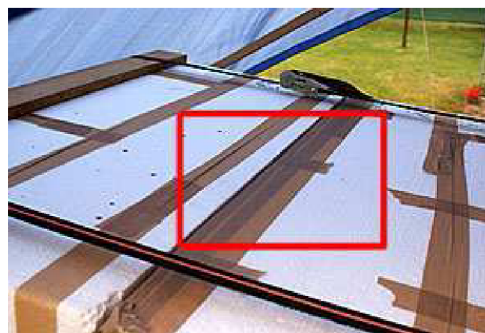
Obr. 47 – Měřící zařízení – venkovní umístění

Další problém nastal chvíli po spuštění měření. Zátěž, kterou jednotlivé elektrické součásti přenášely, byla vysoká a některé prvky se začaly nadměrně zahřívat. Nejvíce byly postiženy stabilizátory napětí na plošných spojích a následně i usměrňovač napětí s kondenzátorem ihned za toroidním transformátorem. Problém byl vyřešen instalací několika hliníkových profilů na elektrické součásti. V případě usměrňovače napětí se však jednalo o velký hliníkový chladič.

EPS krabice byly k sobě staženy gumovými popruhy a to se projevilo po natočení celého zařízení do polohy 45°. Krabice se začaly rozjíždět. Tento problém byl vyřešen použitím stahovacích popruhů, kterými byly k sobě krabice více staženy.



Obr. 48 – Termogram styku EPS



Obr. 49 – Fotografie styku EPS

krabic se vzorkem v průběhu měření

krabic se vzorkem v průběhu měření

Při měření tenkých vzorků termoreflexních tepelných izolací vznikl problém s temperováním velké studené EPS krabice. Tenké termoreflexní izolace mají velký součinitel prostupu tepla, tudíž lze očekávat jejich malý tepelný odpor. Ten zapříčiňuje vysokou propustnost tepla izolací a ohřev studeného prostředí měřícího zařízení. Dle očekávání, se studená část měřícího zařízení při použití tenkých vzorků termoreflexních tepelných izolací začala přehřívat. Proto byly vytvořeny další dva větrací otvory a k jednomu otvoru přidán větrák o průměru 40 mm, který do velké studené EPS krabice nepřetržitě vháněl chladný vzduch z okolního prostředí. Tímto jednoduchým opatřením byl problém vyřešen.

Během měření už kromě upadlých drátů z různých částí plošných spojů nenastaly žádné problémy. Jelikož bylo měřící zařízení umístěno venku, bylo třeba vyřešit i jeho ochranu. Tu zajistila zakrývací plachta natažená na provizorní dřevěnou konstrukci, která byla pevně ukotvena tak, aby ji neodnesl vítr.



Obr. 50 – Přístřešek měřícího zařízení

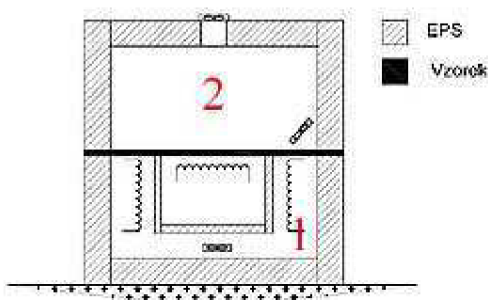
4. Kapitola III - Měření součinitele prostupu tepla

Na trhu je k dispozici několik druhů termoreflexních tepelných izolací. Tyto termoreflexní tepelné izolace se liší jak tloušťkou, tak skladbou termoreflexního souvrství. Po domluvě mi bylo poskytnuto několik druhů termoreflexních izolací. Při měření jsem chtěl ověřit i účinnost termoreflexního souvrství složeného z několika na sebe položených izolací. K dispozici tedy bylo čtrnáct vzorků termoreflexních tepelných izolací a jeden vzorek kontrolní.

4.1. Polohy měřícího zařízení

Pro měření termoreflexních tepelných izolací bylo zapotřebí vypracovat postup prací, který se musel dodržovat. Tento postup zajistil stejné podmínky měření pro všechny termoreflexní tepelné izolace. Měření probíhalo ve třech polohách:

- v první poloze byla termoreflexní tepelná izolace položena vodorovně se zemí. Tato poloha simuluje umístění tepelné izolace například v podlaze. Velká teplá EPS krabice tvořila spodní část měřícího zařízení a velká studená EPS krabice tvořila horní část měřícího zařízení. Větrací otvory v této poloze směřují směrem vzhůru. Tuto polohu dále označuji jako „0“.

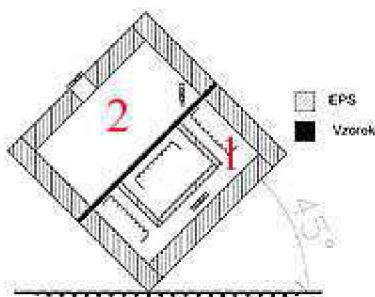


Obr. 51 – Uspořádání měřícího zařízení při měření vzorku ve vodorovné poloze

kde:

- 1 – velká teplá krabice
- 2 – velká studená krabice

- - ve druhé poloze byla termoreflexní tepelná izolace s měřícím zařízením natočena tak, že svírala se zemí úhel 45°. Tato poloha simuluje umístění tepelné izolace například v šikmé střeše. Velká teplá EPS krabice tvořila spodní část měřícího zařízení a velká studená EPS krabice tvořila horní část měřícího zařízení. Tuto polohu dále označuji jako „45“.



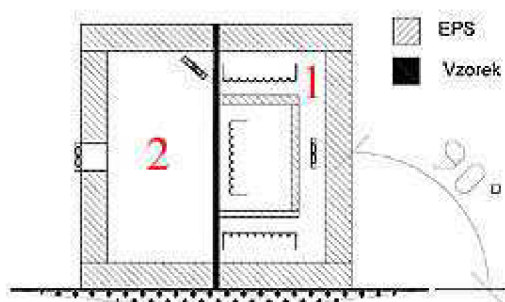
Obr. 52 – Uspořádání měřícího zařízení při měření vzorku v poloze 45°

kde:

- 1 – velká teplá krabice
- 2 – velká studená krabice

PRAKTICKÁ ČÁST

- třetí poloha zajišťovala svislé uložení termoreflexní tepelné izolace. Tato poloha simuluje umístění tepelné izolace například na obvodové stěně. Větrací otvory v této poloze směřují do boku. Tuto polohu dále označuji jako „90°“.



Obr. 53 – Uspořádání zařízení při měření vzorku ve svislé poloze

kde:

- 1 – velká teplá krabice
- 2 – velká studená krabice

4.1.1. Postup měření

Dodržování uvedeného postupu měření mělo zajistit stejné podmínky měření všech vzorků. Před vlastním měřením bylo třeba měřicí zařízení se vzorkem připravit. Proces přípravy sestává z těchto kroků:

- nalepení oboustranné lepicí pásky na horní rohy velké teplé EPS krabice. Tento krok zajišťuje potřebnou fixaci vzorku na dobu nezbytně nutnou k částečnému napnutí vzorku na velkou teplou EPS krabici,
- nalepení oboustranné lepicí pásky na čelní stranu malé teplé EPS krabice. Tento krok spolu s napnutím vzorku zajišťuje přilnavost a těsnost vzorku s malou teplou EPS krabicí,
- napnutí a fixace vzorku na EPS krabice pomocí lepicí pásky. Vzorek má být fixován minimálně ve třech místech každé strany krabice (na krajích a uprostřed strany) a poté přelepen po celé délce,
- přiložení velké studené EPS krabice k velké teplé EPS krabici,
- stažení obou velkých EPS krabic k sobě dvěma stahovacími popruhy,
- uložení měřicího zařízení do vodorovné polohy (poloha „0°“),
- připojení všech spojek a konektorů na plošné spoje,
- spuštění počítače,
- zapnutí všech zdrojů napětí,
- nastavení okrajových podmínek v softwaru na +5°C a + 15°C nebo ekvivalent pro teplotní rozdíl 10 K,
- spuštění měření.

PRAKTICKÁ ČÁST

Vlastní měření se řídí následujícími pravidly:

- temperování teplot měřícího prostředí. Tento krok je po vložení nového vzorku nejdůležitější. Je třeba mu věnovat dostatečnou pozornost a čas. Teploty jsem uvažoval za ustálené, jakmile se po dobu 10 minut nějak výrazně neměnil „poměr“ v okně programu a teplota nejevila výrazné odchylky, tzn. hodnota v okně „Poměr“ se za uvedenou dobu změnila maximálně o pět desetitisícin a teplota se měnila v setinách,
- po ustálení teplot se měření aktivuje pomocí tlačítka „Vynuluj čas“ v okně programu. Měření musí probíhat nejméně 20 minut,
- po uplynutí požadované doby měření jsou hodnoty odečteny z okna programu a zapsány do tabulky,
- následně je spuštěno další měření pomocí tlačítka „Vynuluj čas“ v okně programu. V této poloze takto musí proběhnout tři měření,
- po naměření následuje změna polohy měřícího zařízení z vodorovné do šikmé polohy (poloha „45°“),
- následuje temperování teplot měřícího prostředí, které se řídí stejnými pravidly jako temperování prostředí popsané výše u vodorovné polohy (poloha 0°),
- po ustálení teplot měřícího prostředí se začne s měřením stejným způsobem jako u polohy „0°“,
- v této poloze takto musí proběhnout tři měření,
- po naměření následuje změna polohy měřícího zařízení z šikmé polohy do svislé polohy (poloha 90°),
- následuje temperování teplot měřícího prostředí, které se řídí stejnými pravidly jako temperování prostředí popsané výše u vodorovné polohy (poloha 0°),
- po ustálení teplot měřícího prostředí se začne s měřením stejným způsobem jako u polohy „0°“,
- v této poloze takto musí proběhnout tři měření,
- nastavení okrajových podmínek v softwaru na 0°C a +30°C u silných vzorků nebo ekvivalent pro teplotní rozdíl 30 K, nastavení okrajových podmínek v softwaru na 0°C a +20°C u tenkých vzorků nebo ekvivalent pro teplotní rozdíl 20 K. Vyšší teplotní spád nebyl u tenkých vzorků realizovatelný z důvodu jejich malého tepelného odporu a s tím souvisejícím potřebným výkonem topných těles, který byl vyšší, než navržený,

PRAKTICKÁ ČÁST

- temperování teplot měřicího prostředí, které se řídí stejnými pravidly jako temperování prostředí popsané výše u vodorovné polohy (poloha 0°),
- po ustálení teplot měřicího prostředí se začne s měřením stejným způsobem jako u polohy „0°“,
- v této poloze takto musí proběhnout tři měření,
- po naměření následuje změna polohy měřicího zařízení ze svislé polohy do šikmé polohy,
- následuje temperování teplot měřicího prostředí, které se řídí stejnými pravidly jako temperování prostředí popsané výše u vodorovné polohy (poloha 0°),
- po ustálení teplot měřicího prostředí se začne s měřením stejným způsobem jako u polohy „0°“,
- v této poloze takto musí proběhnout tři měření,
- po naměření následuje změna polohy měřicího zařízení ze šikmé polohy do vodorovné polohy,
- následuje temperování teplot měřicího prostředí, které se řídí stejnými pravidly jako temperování prostředí popsané výše u vodorovné polohy (poloha 0°),
- po ustálení teplot měřicího prostředí se začne s měřením stejným způsobem jako u polohy „0°“,
- v této poloze takto musí proběhnout tři měření,
- ukončení měření realizované korektním vypnutím programu.

Po ukončení měření je třeba měřicí zařízení korektně odpojit a připravit na následující měření.

Tento proces spočívá ve:

- vypnutí veškerých zdrojů napětí,
- odpojení veškerých spojek a konektorů z plošných spojů,
- vypnutí počítače,
- povolení a sundání stahovacích popruhů z EPS krabic,
- odstranění vzorku z EPS krabic,
- odstranění lepící pásky ze styčných ploch EPS krabic se vzorkem.

V každé poloze proběhla série tří měření a z naměřených hodnot byl vytvořen aritmetický průměr. Pro lepší orientaci v použitých vzorcích jsem naměřil i tloušťku jednotlivých vzorků. Tloušťka byla měřena na deseti různých místech. Výsledná tloušťka představuje aritmetický průměr z deseti naměřených hodnot, zaokrouhlený na jedno desetinné místo. Měření tloušťky

PRAKTICKÁ ČÁST

probíhalo tak, že se vzorek termoreflexní tepelné izolace vložil mezi dvě desky, vše se mírně stlačilo a změřilo posuvným měřidlem. Tloušťka desek byla následně odečtena a tím zjištěna tloušťka vzorku.

4.2. Použité vzorky

Na trhu v dnešní době figurují tři významní výrobci termoreflexních tepelných izolací. Jedná se o rakouskou firmu LPS GmbH, která má zastoupení i v České republice. Dále se jedná o firmu Dape, spol. s r.o. se sídlem v Brně a firmu TART, s.r.o. se sídlem v Brně.

Mimo referenčního vzorku z EPS jsou všechny vzorky tvořeny maximálně třemi materiály. Pro popis jednotlivých vzorků jsem zavedl jednoduché značení pomocí tří písmen, označujících jednotlivé vrstvy termoreflexního souvrství.

Tab. 3 – Značení jednotlivých vrstev termoreflexního souvrství

| Označení | popis označení |
|----------|---|
| A | Reflexní hliníková folie s velmi nízkou emisivitou povrchu |
| BX | B - HDPE bublinová folie X – průměr použitých bublin v mm |
| PX | P – pěnová polyethylenová folie s uzavřenou buněčnou strukturou X – tloušťka polyethylenové folie v mm |

Praktické použití uvedeného značení vysvětlím na jednoduchém příkladu souvrství AB8A. Toto souvrství je tvořeno HDPE bublinovou fólií s průměrem bublin 8 mm, vloženou mezi dvě reflexní hliníkové folie s velmi nízkou emisivitou povrchu.

4.2.1. Referenční vzorek - EPS

Jedná se o referenční vzorek tvořený EPS o tloušťce 20 mm. Vzorek byl do měření zařazen kvůli verifikaci měřícího zařízení. Porovnání proběhlo s měřícím zařízením Holometrix Micronet pro zjištění součinitele tepelné vodivosti. Naměřené hodnoty tepelně izolačních vlastností byly následně porovnány a z porovnání byly vyvozeny patřičné závěry. Vzorek byl slepen z dvou desek EPS tak, aby v měřící části nevznikla žádná mezera. Parametry použitého vzorku:

Tab. 4 – Parametry referenčního vzorku

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 1 | 1000 | 1000 | 20 | 1,00 |



Obr. 54 – Vzhled referenčního vzorku připraveného do „teplé“ strany EPS krabice



Obr. 55 – Detail referenčního vzorku při určení jeho tloušťky

4.2.2. Vzorek č. 1 – AB9

Vzorek představuje nejtenčí vzorek termoreflexního souvrství a je tvořen jednou metalizovanou hliníkovou folií a jednou HDPE bublinovou folií. HDPE bublinová folie pevně drží na hliníkové folii a proto se souvrství nerozbaluje a dobře se s izolací pracuje.

Tab. 5 – Parametry vzorku č. 1

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 1 | 1000 | 1000 | 3,5 | 1,00 |

Na hliníkové folii je na jedné straně izolace pozorovatelný obrys bublin. Bubliny jsou otočeny směrem k hliníkové folii. Ze strany HDPE bublinové folie je izolace hladká. Izolace je pevná, netrhá se a jde velmi dobře napnout na EPS krabice. Izolace při působení většího tlaku nepodléhá extrémně velké deformaci. Po rozbalení má izolace tendenci se rolovat. Bubliny HDPE bublinové folie jsou průměru přibližně 9 mm. Vzorek byl do měřícího zařízení uložen hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím.



Obr. 56 – Vzorek č. 1 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 57 – Detail souvrství vzorku č. 1

4.2.3. Vzorek č. 2 - AB9

Vzorek představuje nejtenčí vzorek termoreflexního souvrství a je tvořen jednou hliníkovou folií a jednou HDPE bublinovou folií. HDPE bublinová folie pevně drží na hliníkové folii a proto se souvrství nerozbaluje a dobře se s izolací pracuje.

Tab. 6 – Parametry vzorku č. 2

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 2 | 1000 | 950 | 3,3 | 0,95 |

Na hliníkové folii je na jedné straně izolace pozorovatelný obrys bublin. Bubliny jsou otočeny směrem k hliníkové folii. Ze strany HDPE bublinové folie je izolace hladká. Izolace je pevná, netrhá se a jde velmi dobře napnout na EPS krabice. Izolace při působení většího tlaku nepodléhá extrémně velké deformaci. Po rozbalení má izolace tendenci se rolovat. Bubliny HDPE bublinové folie jsou průměru přibližně 9 mm. Vzorek byl do měřicího zařízení uložen hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím.



Obr. 58 – Vzorek č. 2 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 59 – Detail souvrství vzorku č. 2

4.2.4. Vzorek č. 3 – AB9A

Vzorek je z části tvořen již zmiňovanou izolací AB9. Izolace je rozšířena o jednu hliníkovou folii. Jedná se tedy o vzorek tvořený jednou HDPE bublinovou folií vloženou mezi dvě hliníkové folie. HDPE bublinová folie pevně drží na hliníkových foliích, a proto se souvrství nerozbaluje a dobře se s izolací pracuje.

Tab. 7 – Parametry vzorku č. 3

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 3 | 1000 | 960 | 3,9 | 0,96 |

PRAKTICKÁ ČÁST

Na hliníkové folii jde na jedné straně izolace vidět obrys bublin. Na druhé straně izolace je hliníková folie, vlivem podkladu z HDPE bublinové folie, vroubkovaná. Povrch izolace tedy není perfektně hladký. Izolace je pevná, netrhá se a jde velmi dobře napnout na EPS krabice.



Obr. 60 – Vzorek č. 3 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 61 – Detail souvrství vzorku č. 3

Izolace při působení většího tlaku nepodléhá extrémně velké deformaci. Po rozbalení má vzorek tendenci se rolovat. Bubliny HDPE bublinové folie jsou průměru přibližně 9 mm.

Vzorek je možno na EPS krabice instalovat kteroukoliv reflexní plochou k teplým prostředím. Pro potřeby měření byl vzorek uložen do měřicího zařízení reflexní plochou se zřetelnými obrysy HDPE bublinové folie směrem k teplým EPS krabicím.

4.2.5. Vzorek č. 4 - AP3

Vzorek tvoří jedna folie z pěnového polyethylenu s uzavřenou buněčnou strukturou o tloušťce 3 mm a jedna hliníková folie. Folie z pěnového polyethylenu je přilepená na hliníkové folii a proto se souvrství nerozbaluje a dobře se s izolací pracuje.

Tab. 8 – Parametry vzorku č. 4

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 4 | 1000 | 960 | 3,0 | 0,96 |

Izolace je pevná, netrhá se a jde velmi dobře napnout na EPS krabice. Izolace při působení většího tlaku nepodléhá větším deformacím. Po rozbalení má vzorek tendenci se rolovat.

Vzorek byl do měřicího zařízení uložen hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím.



Obr. 62 – Vzorek č. 4 připravený na
teplých EPS krabicích



Obr. 63 – Detail souvrství
vzorku č. 4

4.2.6. Vzorek č. 5 - AP5

Jedná se o silnější verzi vzorku č. 5 - AP5. Izolace je tedy tvořena jednou folií z pěnového polyethylenu s uzavřenou buněčnou strukturou o tloušťce 5 mm a jednou hliníkovou folií.

Tab. 9 – Parametry vzorku č. 5

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 5 | 1000 | 960 | 5,0 | 0,96 |

Folie z pěnového polyethylenu pevně drží na hliníkové folii a proto se souvrství nerozbaluje a dobře se s izolací pracuje. Izolace je pevná, netrhá se a jde velmi dobře napnout na EPS krabice. Izolace při působení většího tlaku nepodléhá extrémně velké deformaci. Po rozbalení má vzorek tendenci se rolovat. Rolování je daleko výraznější než u slabší verze 4-AP3.

Vzorek byl do měřicího zařízení uložen hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím.



Obr. 64 – Vzorek č. 5 připravený na
teplých EPS krabicích



Obr. 65 – Detail souvrství
vzorku č. 5

4.2.7. Vzorek č. 6 - AB9P5P5B9A

Vzorek první silnější termoreflexní tepelné izolace je tvořen dvěma hliníkovými foliemi, dvěma HDPE bublinovými foliemi a dvěma foliemi z pěnového polyethylenu s uzavřenou

PRAKTICKÁ ČÁST

buněčnou strukturou. Folie z pěnového polyethylenu nejsou v souvrství nijak fixovány a proto má souvrství tendenci se rozbalovat. Izolace je pevná, netrhá se a dobře se s ní pracuje.

Tab. 10 – Parametry vzorku č. 6

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 6 | 1000 | 950 | 23,5 | 0,95 |

Izolace při působení většího tlaku nepodléhá větší deformaci. Skladba souvrství je následující:

- hliníková folie,
- HDPE bublinová folie s bublinami o průměru přibližně 9 mm směrem dovnitř izolace,
- dvě folie z pěnového polyethylenu o tloušťce 5 mm,
- HDPE bublinová folie s bublinami o průměru přibližně 9 mm směrem dovnitř izolace,
- hliníková folie.



Obr. 66 – Vzorek č. 6 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 67 – Detail souvrství vzorku č. 6

4.2.8. Vzorek č. 7 - AB9AP5B9AB9P5AB9A

Termoreflexní tepelnou izolaci tvoří pět hliníkových folií, dvě HDPE bublinové folie s bublinami z jedné strany, dvě HDPE bublinové folie s bublinami z obou stran a dvě folie z pěnového polyethylenu. Jednotlivé vrstvy termoreflexního souvrství nejsou slepeny dohromady a proto má izolace tendenci se rozbalovat. Obě krajní hliníkové folie jsou vyztužené maticí z polypropylenu.

Tab. 11 – Parametry vzorku č. 7

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 7 | 1020 | 980 | 26,5 | 1,00 |

Okraje izolace jsou náchylné k roztrhnutí. Izolace jde dobře napnout na EPS krabice. Při působení většího tlaku se izolace deformuje na přibližně 75 % své původní tloušťky. Po

PRAKTICKÁ ČÁST

rozbalení vzorek drží tvar a nemá tendenci k rolování jako některé vzorky. Skladba souvrství je následující:

- zpevněná hliníková folie,
- HDPE bublinová folie s bublinami z obou stran, bubliny jsou přibližně průměru 9 mm,
- hliníková folie,
- folie z pěnového polyethylenu o tloušťce 5 mm,
- HDPE bublinová folie s bublinami, přibližně o průměru 9 mm, z jedné strany,
- hliníková folie,
- HDPE bublinová folie s bublinami, přibližně o průměru 9 mm, z jedné strany,
- folie z pěnového polyethylenu o tloušťce 5 mm,
- hliníková folie,
- HDPE bublinová folie s bublinami z obou stran, bubliny jsou přibližně průměru 9 mm,
- zpevněná hliníková folie.



Obr. 68 – Vzorek č. 7 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 69 – Detail souvrství vzorku č. 7

4.2.9. Vzorek č. 8 - AB30AB30A

Termoreflexní tepelnou izolaci tvoří tři hliníkové folie a dvě HDPE bublinové folie. Bubliny HDPE bublinové folie mají průměr přibližně 30 mm. Hliníková folie je v izolaci volně vložená a souvrství tak má tendenci se rozbalovat. Izolace je náchylnější k roztrhnutí a špatně se s ní manipuluje.

Tab. 12 – Parametry vzorku č. 8

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 8 | 990 | 970 | 24 | 0,96 |

PRAKTICKÁ ČÁST

Vzorek jde hůře napnout na EPS krabice. Při působení většího tlaku se izolace deformuje přibližně na 50 % své původní tloušťky. Po rozbalení vzorek drží tvar a nemá tendenci k rolování jako některé vzorky.



Obr. 70 – Vzorek č. 8 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 71 – Detail souvrství vzorku č. 8

4.2.10. Vzorek č. 9 - AB12B12AB12B12AB12B12AB12B12A

Termoreflexní tepelnou izolaci tvoří pět hliníkových folií a 8 HDPE bublinových folií. Obě krajní hliníkové folie jsou vyztužené matricí z polypropylenu. Bubliny HDPE bublinové folie mají průměr přibližně 12 mm. Bublinová folie je tenčí než u ostatních vzorků s HDPE bublinovou folií. Jednotlivé vrstvy termoreflexního souvrství nejsou slepeny dohromady a proto má izolace tendenci se rozbalovat.

Tab. 13 – Parametry vzorku č. 9

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 9 | 1000 | 1000 | 24 | 1,00 |

Izolace je náchylnější k roztrhnutí a špatně se s ní manipuluje. Jde hůře napnout na EPS krabice. Při působení většího tlaku se izolace deformuje přibližně na 60 % své původní tloušťky. Po narovnání vzorek drží tvar a nemá tendenci k rolování jako některé vzorky. Skladba souvrství je následující:

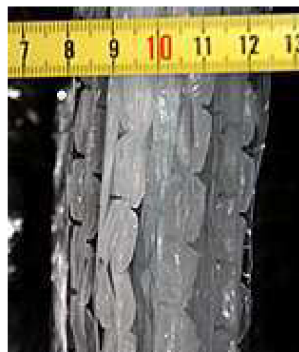
- zpevněná hliníková folie,
- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 12 mm,
- hliníková folie,
- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 12 mm,
- hliníková folie,
- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 12 mm,
- hliníková folie,

PRAKTICKÁ ČÁST

- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 12 mm,
- zpevněná hliníková folie.



Obr. 72 – Vzorek č. 9 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 73 – Detail souvrství vzorku č. 9

4.2.11. Vzorek č. 10 – AP3AB9AP5A

Toto souvrství tvoří vzorek č. 3 vložený mezi vzorek č. 4 a vzorek č. 5. Souvrství se skládá ze čtyř hliníkových folií, dvou folií z pěnového polyethylenu a jedné HDPE bublinové folie.

Vzorek byl na teplé EPS krabice položen v pořadí:

- vzorek č. 4 - AP3, hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím,
- vzorek č. 3 - AB9A,
- vzorek č. 5 - AP5, hliníkovou folií směrem ke studené EPS krabici.

Vzorek se tedy skládá ze čtyř hliníkových folií a tří HDPE bublinových folií.

Tab. 14 – Parametry vzorku č. 10

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 10 | 1000 | 960 | 11,0 | 0,96 |

Každá vrstva izolace byla na velké EPS krabici napnuta tak, aby se nemohla volně posouvat.



Obr. 74 – Vzorek č. 10 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 75 – Detail souvrství vzorku č. 10

PRAKTICKÁ ČÁST

Vlastnosti tohoto souvrství nemohu hodnotit, protože bylo na EPS krabice instalováno po jednotlivých vrstvách. Pokud by k sobě byly jednotlivé vrstvy nalepeny, předpokládám dobrou manipulaci s výsledným souvrstvím.

4.2.12. Vzorek č. 11 – AP3AB9A

Toto souvrství tvoří vzorek č. 4 a na něm položený vzorek č. 3. Souvrství se skládá ze tří hliníkových folií a dvou HDPE bublinových folií. Vzorek byl na teplé EPS krabice položen v pořadí:

- vzorek č. 4 - AP3, hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím,
- vzorek č. 3 - AB9A.

Tab. 15 – Parametry vzorku č. 11

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 11 | 1000 | 960 | 6,0 | 0,96 |

Každá vrstva izolace byla na velké EPS krabici napnuta tak, aby se nemohla volně posouvat do stran. Vlastnosti tohoto souvrství nemohu hodnotit, protože bylo na EPS krabice instalováno po jednotlivých vrstvách. Pokud by k sobě byly jednotlivé vrstvy nalepeny, předpokládám dobrou manipulaci s výsledným souvrstvím.



Obr. 76 – Vzorek č. 11 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 77 – Detail souvrství vzorku č. 11

4.2.13. Vzorek č. 12 – AP3AB9P5P5B9A

Souvrství tvoří vzorek č. 4 a na něm instalovaný vzorek č. 6. Souvrství se tedy skládá ze tří hliníkových folií, dvou HDPE bublinových folií a dvou folií z pěnového polyethylenu. Souvrství bylo na teplé EPS krabice položeno v pořadí:

- vzorek č. 4 - AP3, hliníkovou folií směrem k teplým EPS krabicím,
- vzorek č. 6 - AB9P5P5B9A.

Tab. 16 – Parametry vzorku č. 12

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 12 | 1000 | 950 | 21,0 | 0,95 |

Každá vrstva izolace byla na velké EPS krabici napnuta tak, aby se nemohla volně posouvat do stran. Vlastnosti tohoto souvrství nemohu hodnotit, protože bylo na EPS krabice instalováno po jednotlivých vrstvách. Pokud by k sobě byly jednotlivé vrstvy nalepeny, předpokládám dobrou manipulaci s výsledným souvrstvím.



Obr. 78 – Vzorek č. 12 připravený na teplých EPS krabicích



Obr. 79 – Detail souvrství vzorku č. 12

4.2.14. Vzorek č. 13 – AB9B9AB9B9AB9B9AB9B9A

Termoreflexní tepelnou izolaci tvoří pět metalizovaných hliníkových folií a 8 HDPE bublinových folií. Bubliny HDPE bublinové folie mají průměr přibližně 9 mm. Jednotlivé vrstvy termoreflexního souvrství nejsou slepeny dohromady a proto má izolace tendenci se rozbalovat.

Tab. 17 – Parametry vzorku č. 13

| Označení vzorku | Délka | Šířka | Tloušťka | Plocha vzorku |
|-----------------|-------|-------|----------|-------------------|
| [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [m ²] |
| Vzorek č. 12 | 1000 | 1000 | 21,0 | 1,00 |

Izolace jde hůře napnout na EPS krabice, ale pracuje se s ní dobře. Při působení většího tlaku se izolace deformuje přibližně na 75 % své původní tloušťky. Po narovnání vzorek drží tvar a nemá tendenci k rolování jako některé vzorky. Skladba souvrství je následující:

metalizovaná hliníková folie,

- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 9 mm,
- metalizovaná hliníková folie,
- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 9 mm,

PRAKTICKÁ ČÁST

- hliníková folie,
- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 9 mm,
- metalizovaná hliníková folie,
- dvě vrstvy HDPE bublinové folie s bublinami o průměru přibližně 9 mm,
- metalizovaná hliníková folie.



Obr. 80 – Vzorek č. 13 připravený na
teplých EPS krabicích



Obr. 81 – Detail souvrství vzorku č. 13

5. Kapitola IV - Výsledky měření

V této kapitole uvádím pouze průměrné hodnoty vypočtené z jednotlivých měření. Všechny hodnoty jsou zaznamenány v příloze č. 1 - Výsledky z měření součinitele prostupu tepla.

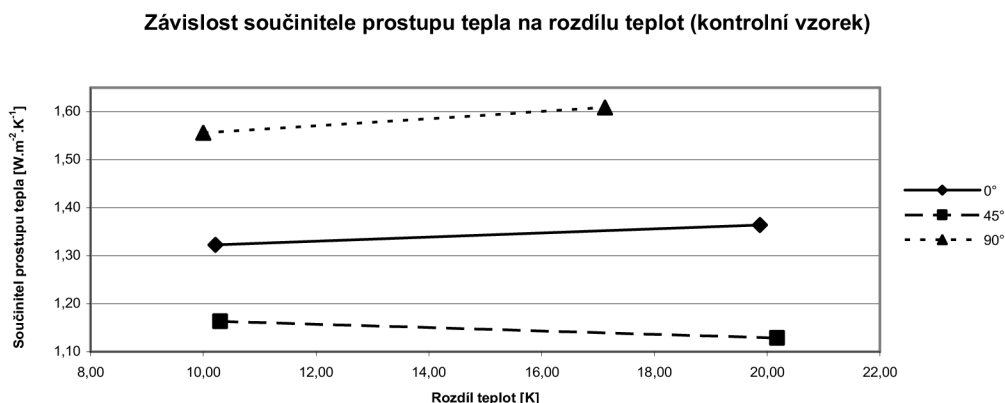
5.1. Referenční vzorek - EPS

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 20 K.

Tab. 18 - Výsledky z měření referenčního vzorku na měřícím zařízení

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0° | 10,2 | 1,323 |
| 45° | 10,3 | 1,163 |
| 90° | 10,0 | 1,556 |
| 0° | 19,9 | 1,364 |
| 45° | 20,2 | 1,129 |
| 90° | 17,1 | 1,609 |

Graf 5 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



Tab 19 – Výsledky a vyhodnocení z měření na kontrolním přístroji Holometrix Micronet

| měření č. | střední teplota | teplotní spád | tepelný odpor | | | součinitel prostupu tepla |
|-----------|-----------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | | | vzorku | průměrný | s přestupovými odpory | |
| [-] | [°C] | [K] | [m ² .K.W ⁻¹] | [m ² .K.W ⁻¹] | [m ² .K.W ⁻¹] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 1 | 9,08 | 9,9 | 0,59 | 0,59 | 0,84 | 1,186 |
| 2 | 9,03 | 9,87 | 0,59 | | | |
| 3 | 9,06 | 9,82 | 0,59 | | | |

5.1.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je patrné snižování hodnoty součinitele prostupu tepla pouze v poloze 45°. Ve vodorovné poloze a ve svislé poloze se hodnota součinitele prostupu tepla zvyšuje.

5.1.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Nejnižších hodnot dosahoval součinitel prostupu tepla v poloze 45° a naopak nejvyšších hodnot dosahoval součinitel prostupu tepla ve svislé poloze. Tento trend se projevil jak při teplotním rozdílu 10 K, tak při teplotním rozdílu 20 K.

5.1.3. Vyhodnocení přesnosti měřícího zařízení:

Kontrolní měření na přístroji Holometrix Micronet bylo možno provést pouze ve vodorovné poloze. Proto lze srovnat jen výsledky z vodorovného měření. Výsledky součinitele prostupu tepla se nepatrně liší. Vzhledem k tomu, že součinitel prostupu tepla je u kontrolního měření vypočten za pomoci výpočtových přestupových tepelných odporů a vzhledem k tomu, že měření na zkonstruovaném měřicím prostředí probíhá venku, kde je vyšší vlhkost prostředí, lze říci, že naměřené hodnoty ze zkonstruovaného měřícího zařízení lze považovat za správné.

5.2. Vzorek č. 1 - AB9

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 1,5 hodiny po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 1,5 hodiny. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 17 K.

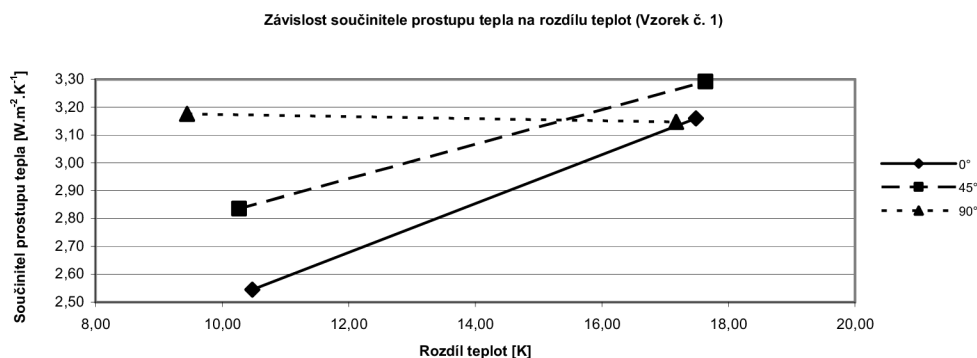
Tab. 20 - Výsledky z měření vzorku č. 1

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,5 | 2,545 |
| 45 | 10,3 | 2,837 |
| 90 | 9,4 | 3,176 |
| 0 | 17,5 | 3,160 |
| 45 | 17,6 | 3,292 |
| 90 | 17,2 | 3,147 |

5.2.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé snižování hodnoty součinitele prostupu tepla pouze ve svislé poloze. U ostatních poloh dochází ke zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Při teplotním rozdílu 10 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve vodorovné poloze. Při teplotním rozdílu 17 K se jako nejvhodnější jeví naopak použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze.

Graf 6 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.2.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění odlišným způsobem při teplotním rozdílu 10 K a 17 K. Při teplotním rozdílu 10 K se součinitel prostupu tepla zvyšuje z vodorovné polohy, přes polohu 45° až do svislé polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot. Při teplotním rozdílu 17 K je situace odlišná. Součinitel prostupu tepla se zvyšuje ze svislé polohy, přes vodorovnou polohu až do polohy 45°, kde dosahuje nejvyšších hodnot.

5.2.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako přídatnou izolaci do systému zateplení svislých a vodorovných konstrukcí. Vzhledem k velmi vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla bych však tuto izolaci doporučil jako přídatnou tepelnou izolaci při zateplování jakékoliv konstrukce a to pro zmírnění působení složky záření.

5.3. Vzorek č. 2 - AB9

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 1,5 hodiny po instalaci vzorku do měřícího zařízení.

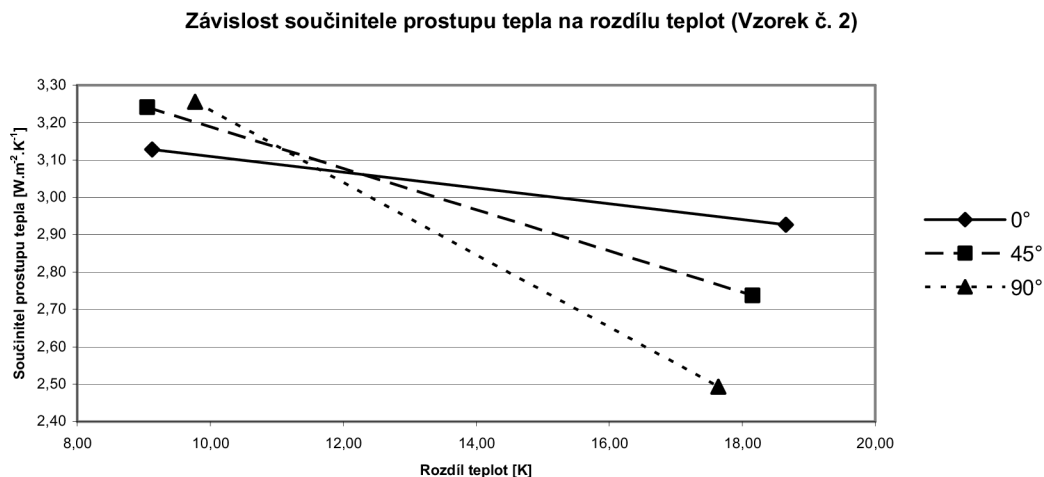
Tab. 21 – Výsledky z měření vzorku č. 2

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 9,1 | 3,128 |
| 45 | 9,1 | 3,241 |
| 90 | 9,8 | 3,256 |
| 0 | 18,7 | 2,927 |
| 45 | 18,2 | 2,737 |
| 90 | 17,6 | 2,494 |

PRAKTICKÁ ČÁST

Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřicího prostředí po dobu 1,5 hodiny. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 18 K.

Graf 7 – Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.3.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Nejvýraznější změna součinitele prostupu tepla probíhá ve svislé poloze. Při teplotním rozdílu 10 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve vodorovné poloze. Při teplotním rozdílu 18 K se jako nejvhodnější jeví naopak použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze.

5.3.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění odlišným způsobem při teplotním rozdílu 10 K a 18 K. Při teplotním rozdílu 10 K se součinitel prostupu tepla zvyšuje z vodorovné polohy, přes polohu 45° až do svislé polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot. Při teplotním rozdílu 18 K je situace odlišná. Součinitel prostupu tepla se zvyšuje ze svislé polohy, přes polohu 45° až do vodorovné polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot.

5.3.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako přídatnou izolaci do systému zateplení svislé obvodové stěny. Zateplení plochých střech nebo podlah vychází jako nejméně vhodná varianta. Vzhledem k velmi vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla bych však tuto izolaci doporučil jako přídatnou tepelnou izolaci při zateplování jakékoliv konstrukce a to pro zmírnění působení složky záření.

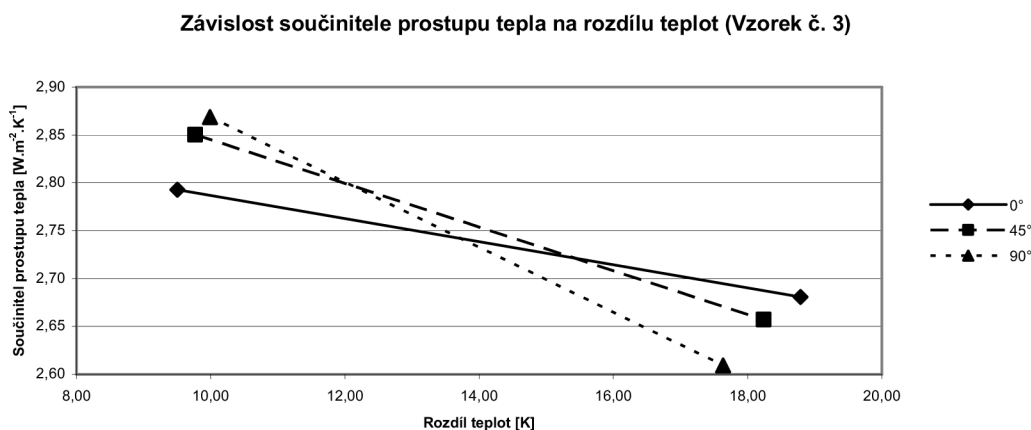
5.4. Vzorek č. 3 - AB9A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 1,75 hodiny po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 1,5 hodiny. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 18 K.

Tab. 22 – Výsledky z měření vzorku č. 3

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 9,5 | 2,793 |
| 45 | 9,8 | 2,850 |
| 90 | 10,0 | 2,869 |
| 0 | 18,8 | 2,681 |
| 45 | 18,2 | 2,657 |
| 90 | 17,6 | 2,610 |

Graf 8 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.4.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Nejvýraznější změna hodnot součinitele prostupu tepla probíhá ve svislé poloze. Při teplotním rozdílu 10 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve vodorovné poloze. Při teplotním rozdílu 18 K se jako nejvhodnější jeví naopak použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze.

5.4.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění odlišným způsobem při teplotním rozdílu 10 K a 18 K. Při teplotním rozdílu 10 K se součinitel prostupu tepla zvyšuje z vodorovné polohy, přes polohu 45° až do svislé polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot. Při teplotním

PRAKTICKÁ ČÁST

rozdílu 18 K je situace odlišná. Součinitel prostupu tepla se zvyšuje ze svislé polohy, přes polohu 45° až do vodorovné polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot.

5.4.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako přídatnou izolaci do systému zateplení svislé obvodové stěny. Zateplení plochých střech nebo podlah vychází jako nejméně vhodná varianta. Vzhledem k velmi vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla bych však tuto izolaci doporučil jako přídatnou tepelnou izolaci při zateplování jakékoliv konstrukce a to pro zmírnění působení složky záření.

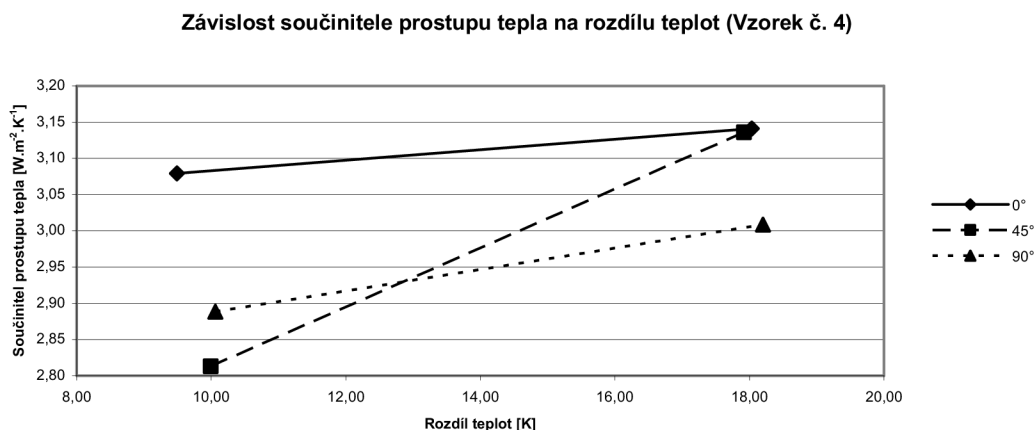
5.5. Vzorek č. 4 - AP3

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 2 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 1,75 hodiny. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 18 K.

Tab. 23 - Výsledky z měření vzorku č. 4

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 9,5 | 3,080 |
| 45 | 10,0 | 2,813 |
| 90 | 10,1 | 2,888 |
| 0 | 18,0 | 3,141 |
| 45 | 17,9 | 3,136 |
| 90 | 18,2 | 3,009 |

Graf 9 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.5.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Nejvýraznější změna součinitele prostupu tepla probíhá v poloze 45°. Při teplotním rozdílu 10 K i při teplotním rozdílu 18 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace v poloze 45°. U termoreflexních tepelných izolací předpokládám snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tuto teorii uvedený vzorek popírá. Efekt je pravděpodobně způsoben nesprávnou velikostí vytvořených vzduchových mezer a zřejmě i vysokým podílem pevné složky ve folii z pěnového polyethylenu, který zapříčiní větší podíl přenosu tepla vedením.

5.5.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění odlišným způsobem při teplotním rozdílu 10 K a 18 K. Při teplotním rozdílu 10 K se součinitel prostupu tepla zvyšuje z polohy 45°, přes svislou polohu až do vodorovné polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot. Při teplotním rozdílu 20 K je situace odlišná. Součinitel prostupu tepla se zvyšuje ze svislé polohy, přes polohu vodorovnou až do polohy svislé, kde dosahuje nejvyšších hodnot.

5.5.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem ke zvyšujícímu se součiniteli prostupu tepla, se zvyšujícím se teplotním rozdílem, nedoporučoval do systému zateplení jakéhokoliv objektu. Vzhledem k vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla bych ji však doporučil jako přídatnou tepelnou izolaci při zateplování vodorovných konstrukcí a to pro zmírnění působení složky záření.

5.6. Vzorek č. 5 - AP5

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřicí prostředí po dobu 2,5 hodiny po instalaci vzorku do měřícího zařízení.

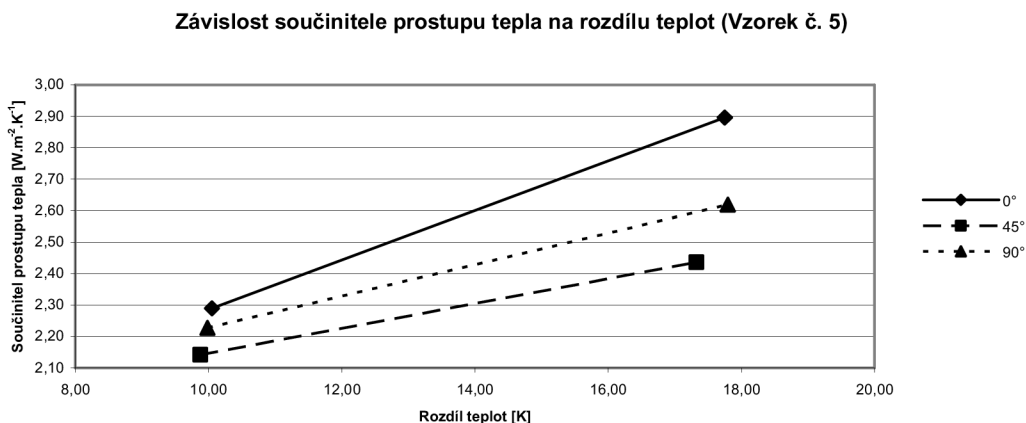
Tab. 24 - Výsledky z měření vzorku č. 5

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,0 | 2,290 |
| 45 | 9,9 | 2,141 |
| 90 | 10,0 | 2,228 |
| 0 | 17,8 | 2,896 |
| 45 | 17,3 | 2,4360 |
| 90 | 17,8 | 2,619 |

PRAKTICKÁ ČÁST

Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 18 K.

Graf 10 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.6.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Uvedený vzorek je silnější verzí předchozí izolace (vzorku č. 4) a proto jsou výsledky velmi podobné. Z výsledků měření je zřejmé zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 10 K i při teplotním rozdílu 18 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace v poloze 45°. U termoreflexních tepelných izolací předpokládám snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tuto teorii uvedený vzorek popírá. Efekt je pravděpodobně způsoben nesprávnou velikostí vytvořených vzduchových mezer a zřejmě i vysokým podílem pevné složky ve folii z pěnového polyethylenu, který zapříčiní větší podíl přenosu tepla vedením.

5.6.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 10 K i 18 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje z polohy 45°, přes svislou polohu až do vodorovné polohy, kde dosahuje nejvyšších hodnot.

5.6.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem ke zvyšujícímu se součiniteli prostupu tepla, se zvyšujícím se teplotním rozdílem, nedoporučoval do systému zateplení jakéhokoliv objektu. Avšak vzhledem k vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla bych ji doporučil jako

PRAKTICKÁ ČÁST

přídavnou tepelnou izolaci při zateplování šikmých konstrukcí a to pro zmírnění působení složky záření.

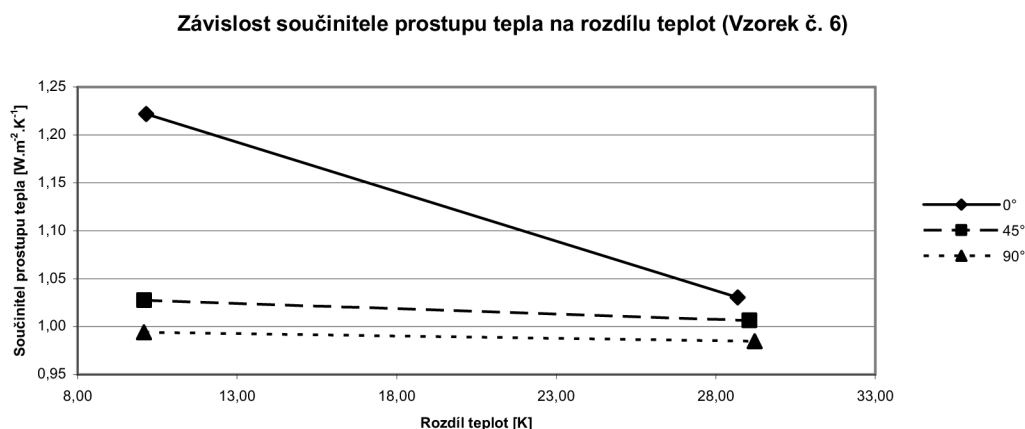
5.7. Vzorek č. 6 - AB9P5P5B9A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 2,5 hodiny po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 29 K.

Tab. 25 - Výsledky z měření vzorku č. 6

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,2 | 1,222 |
| 45 | 10,1 | 1,027 |
| 90 | 10,1 | 0,994 |
| 0 | 28,7 | 1,030 |
| 45 | 29,1 | 1,007 |
| 90 | 29,2 | 0,985 |

Graf 11 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.7.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé snižování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Nejvýraznější změna součinitele prostupu tepla probíhá ve vodorovné poloze. Při teplotním rozdílu 10 K i 29 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze. Vzhledem k velmi podobným hodnotám součinitele prostupu tepla je vhodné použití izolace i v poloze 45°.

5.7.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 10 K i 29 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje ze svislé polohy přes polohu 45° až do vodorovné polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

5.7.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou uzavírají z obou stran vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3 nebo jejich kombinace. Vzhledem k výsledkům bych volil umístění v systému zateplení svislé obvodové stěny, případně do zateplení šikmých konstrukcí.

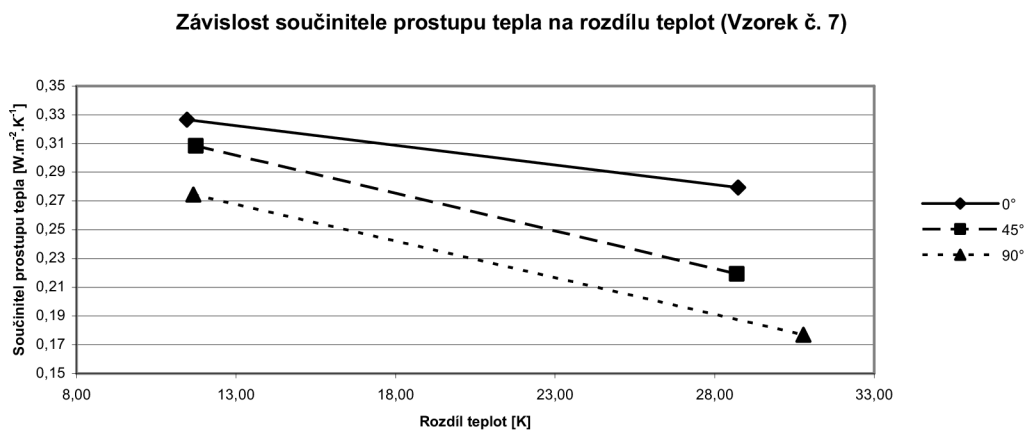
5.8. Vzorek č. 7 - AB9AP5B9AB9P5AB9A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3,5 hodiny po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2,5 hodiny. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 11 K a 29 K.

Tab. 26 - Výsledky z měření vzorku č. 7

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 11,5 | 0,327 |
| 45 | 11,7 | 0,308 |
| 90 | 11,7 | 0,274 |
| 0 | 28,7 | 0,279 |
| 45 | 28,7 | 0,219 |
| 90 | 30,8 | 0,177 |

Graf 12 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.8.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé snižování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 11 K i 29 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze.

5.8.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 11 K i 29 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje ze svislé polohy přes polohu 45° až do vodorovné polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

5.8.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako hlavní izolaci umístěnou v systému zateplení svislé obvodové stěny, případně při zateplení šikmých konstrukcí.

5.9. Vzorek č. 8 - AB30AB30A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 27 K.

Tab. 27 - Výsledky z měření vzorku č. 8

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,3 | 0,515 |
| 45 | 10,4 | 0,436 |
| 90 | 10,4 | 0,395 |
| 0 | 27,0 | 0,418 |
| 45 | 27,1 | 0,362 |
| 90 | 27,0 | 0,335 |

5.9.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

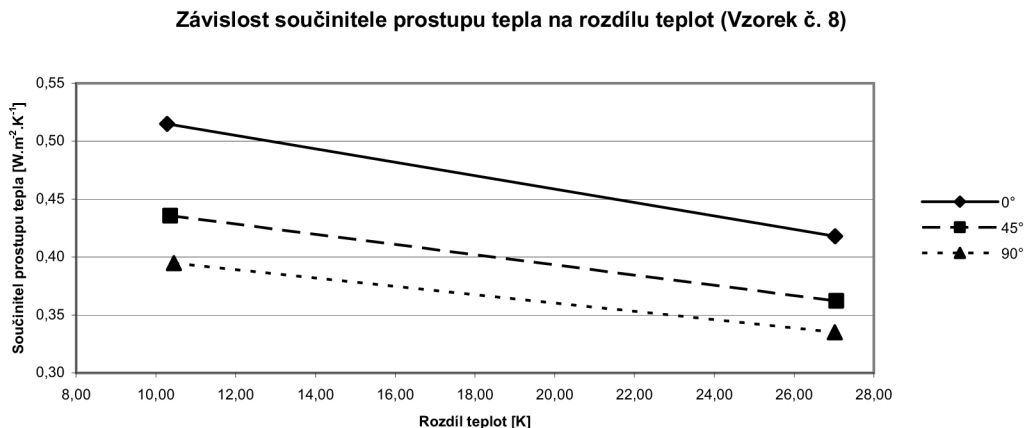
Z výsledků měření je zřejmé snižování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 10 K i 27 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze.

5.9.2. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou z jedné strany uzavírá izolace č. 2 nebo

izolace č. 3. Vzhledem k výsledkům bych volil umístění v systému zateplení svislé obvodové stěny, případně do zateplení šikmých konstrukcí.

Graf 13 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.10. Vzorek č. 9 - AB12B12AB12B12AB12B12AB12B12A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3,5 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2,5 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 11 K a 26 K.

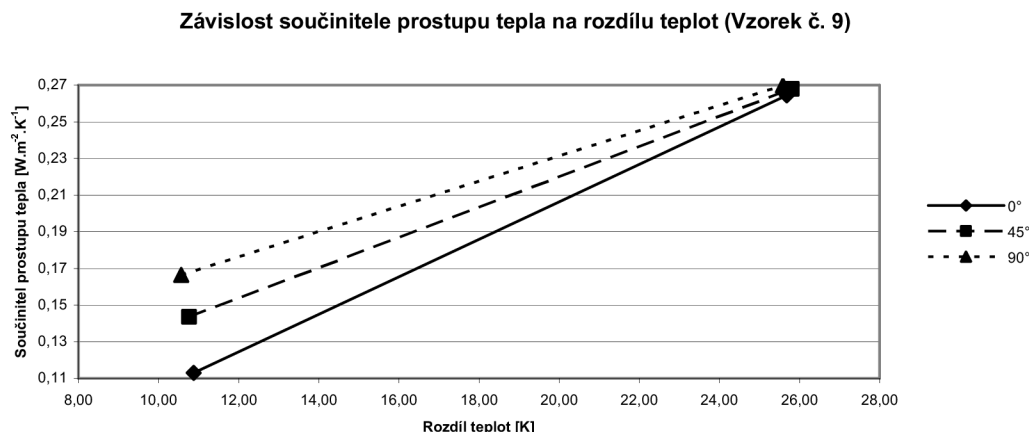
Tab. 28 - Výsledky z měření vzorku č. 9

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,9 | 0,113 |
| 45 | 10,8 | 0,144 |
| 90 | 10,6 | 0,166 |
| 0 | 25,7 | 0,264 |
| 45 | 25,8 | 0,268 |
| 90 | 25,6 | 0,270 |

5.10.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 11 K i 26 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve svislé poloze. U termoreflexních tepelných izolací předpokládám snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tuto teorii uvedený vzorek popírá. Efekt je zřejmě způsoben vysokým podílem pevné složky v termoreflexním souvrství, který zapříčiní větší podíl přenosu tepla vedením.

Graf 14 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.10.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 11 K i 26 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje z vodorovné polohy přes polohu 45° až do svislé polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

5.10.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k naměřeným výsledkům doporučil jako hlavní izolaci především pro vodorovné konstrukce. I přes zvyšující se charakter hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem, dosahuje izolace velmi dobrých výsledků a proto lze izolaci vhodně využít i v ostatních polohách.

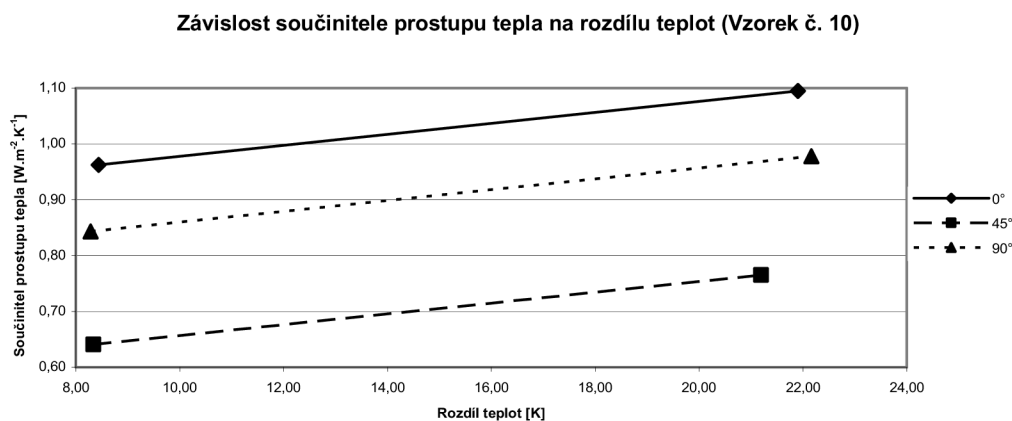
5.11. Vzorek č. 10 - AP3AB9AP5A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 8 K a 22 K.

Tab. 29 - Výsledky z měření vzorku č. 10

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 8,4 | 0,962 |
| 45 | 8,3 | 0,641 |
| 90 | 8,9 | 0,843 |
| 0 | 21,9 | 1,095 |
| 45 | 21,2 | 0,765 |
| 90 | 22,2 | 0,978 |

Graf 15 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.11.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 8 K i 22 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace v poloze 45°. U termoreflexních tepelných izolací předpokládám snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tuto teorii uvedený vzorek popírá. Efekt je zřejmě způsoben vysokým podílem pevné složky v termoreflexním souvrství, který zapříčiní větší podíl přenosu tepla vedením.

5.11.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 8 K i 22 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje z polohy 45° přes svislou polohu až do vodorovné polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

5.11.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Takto vytvořené termoreflexní souvrství bych doporučil do šikmých a svislých konstrukcí jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou uzavírají z obou stran vzorek č. 2, vzorek č. 3 nebo jejich kombinace.

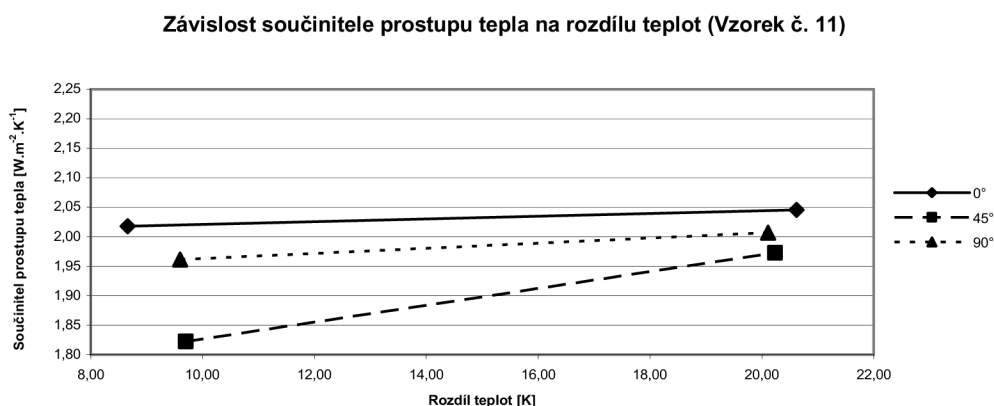
5.12. Vzorek č. 11 - AP3AB9A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 9 K a 20 K.

Tab. 30 - Výsledky z měření vzorku č. 11

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 8,7 | 2,017 |
| 45 | 9,7 | 1,822 |
| 90 | 9,6 | 1,961 |
| 0 | 20,6 | 2,045 |
| 45 | 20,2 | 1,973 |
| 90 | 20,1 | 2,007 |

Graf 16 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.12.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:

Z výsledků měření je zřejmé zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 9 K i 20 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace v poloze 45°. U termoreflexních tepelných izolací předpokládám snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tuto teorii uvedený vzorek popírá. Efekt je zřejmě způsoben vysokým podílem pevné složky v termoreflexním souvrství, který zapříčiní větší podíl přenosu tepla vedením.

5.12.2. Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 9 K i 20 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje z polohy 45° přes svislou polohu až do vodorovné polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

5.12.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

Tuto termoreflexní tepelnou izolaci bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako přídatnou izolaci do systému zateplení svislé obvodové stěny. Zateplení plochých střech nebo podlah vychází jako nejméně vhodná varianta. Vzhledem k velmi vysoké hodnotě součinitele prostupu tepla bych však tuto izolaci doporučil jako přídatnou tepelnou izolaci při zateplování jakékoliv konstrukce a to pro zmírnění působení složky záření.

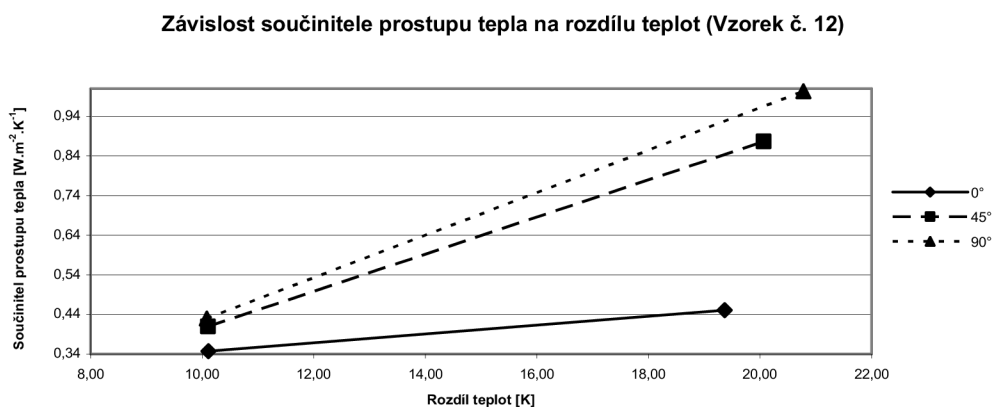
5.13. Vzorek č. 12 - AP3AB9P5P5B9A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 10 K a 20 K.

Tab. 31 - Výsledky z měření vzorku č. 12

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,1 | 0,347 |
| 45 | 10,1 | 0,409 |
| 90 | 10,1 | 0,430 |
| 0 | 19,4 | 0,451 |
| 45 | 20,1 | 0,876 |
| 90 | 20,8 | 1,004 |

Graf 17 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu

**5.13.1. Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:**

Z výsledků měření je zřejmé zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 10 K i 20 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve vodorovné poloze. U termoreflexních tepelných izolací předpokládám snižování součinitele prostupu tepla se

PRAKTICKÁ ČÁST

zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tuto teorii uvedený vzorek popírá. Efekt je zřejmě způsoben vysokým podílem pevné složky v termoreflexním souvrství, který zapříčiní větší podíl přenosu tepla vedením.

5.13.2. *Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:*

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu 10 K i 20 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje z vodorovné polohy přes polohu 45° až do svislé polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

5.13.3. *Doporučení pro klimatické podmínky ČR:*

Takto vytvořené termoreflexní souvrství bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou z jedné strany uzavírá izolace č. 2 nebo izolace č. 3. Vzhledem k výsledkům bych volil umístění v systému zateplení svislé obvodové stěny, případně do zateplení šikmých konstrukcí.

5.14. Vzorek č. 13 - AB9B9AB9B9AB9B9AB9B9A

Při měření bylo třeba nechat temperovat měřící prostředí po dobu 3 hodin po instalaci vzorku do měřícího zařízení. Při změně polohy zařízení bylo třeba temperování měřícího prostředí po dobu 2 hodin. Měření probíhalo při teplotním spádu přibližně 9 K a 19 K.

Tab. 32 - Výsledky z měření vzorku č. 13

| poloha | průměrný rozdíl teplot ΔT | součinitel prostupu tepla U |
|--------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| [°] | [K] | [W.m ⁻² .K ⁻¹] |
| 0 | 10,1 | 0,747 |
| 45 | 8,9 | 0,788 |
| 90 | 9,0 | 1,000 |
| 0 | 18,8 | 0,724 |
| 45 | 19,1 | 0,751 |
| 90 | 18,8 | 0,897 |

5.14.1. *Součinitel prostupu tepla v závislosti na rozdílu teplot:*

Z výsledků měření je zřejmé snižování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem a to ve všech polohách. Při teplotním rozdílu 9 K i 19 K se jako nejvhodnější jeví použití termoreflexní tepelné izolace ve vodorovné poloze.

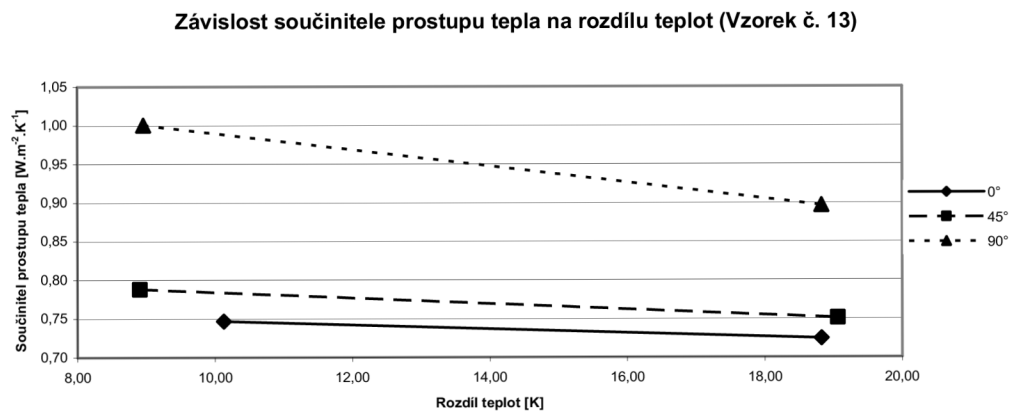
5.14.2. *Součinitel prostupu tepla v závislosti na poloze:*

Měření prokázalo změnu hodnoty součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Hodnota součinitele prostupu tepla se mění stejným způsobem při teplotním rozdílu

PRAKTICKÁ ČÁST

9 K i 19 K. Hodnota součinitele prostupu tepla se zvyšuje z vodorovné polohy přes polohu 45° až do svislé polohy, kde součinitel prostupu tepla dosahuje nejvyšších hodnot.

Graf 18 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla v závislosti na teplotním rozdílu



5.14.3. Doporučení pro klimatické podmínky ČR:

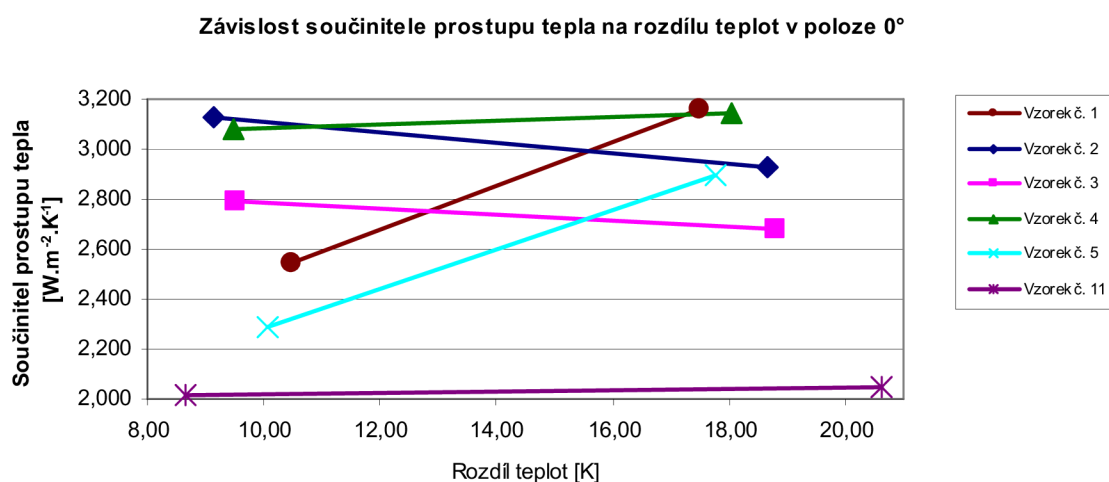
Takto vytvořené termoreflexní souvrství bych vzhledem k uvedeným výsledkům doporučil jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou z jedné strany uzavírá izolace č. 2 nebo izolace č. 3. Vzhledem k výsledkům bych volil umístění ve vodorovných konstrukcích nebo systému zateplení svislé obvodové stěny.

6. Kapitola V - Porovnání a vyhodnocení

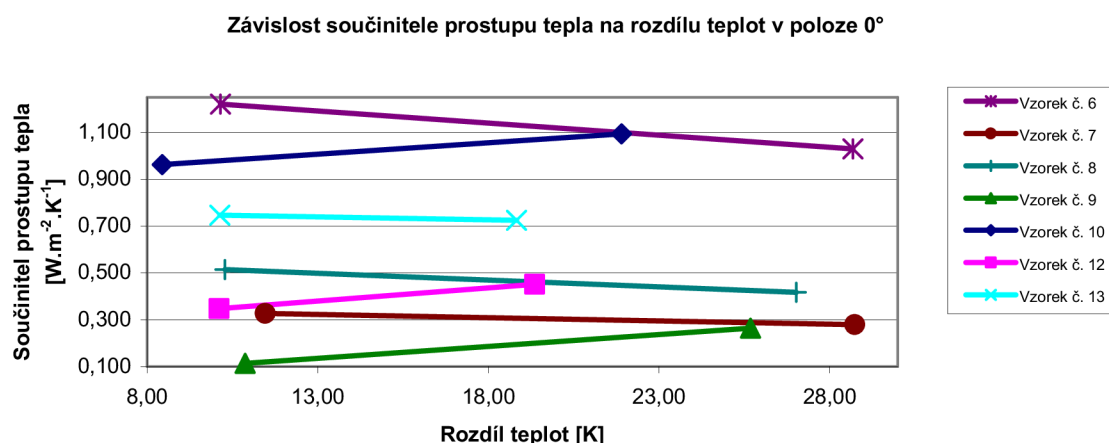
6.1. Hodnota součinitele prostupu tepla vzorků v závislosti na zvyšujícím se teplotním rozdílu

Jelikož je závislost jednotlivých vzorků ve všech polohách podobná, je zde uvedeno vyhodnocení pro všechny polohy. Pro lepší přehled o získaných výsledcích jsou dále sestaveny dva grafy pro každou polohu vzorků. V grafech Graf 19, Graf 21 a Graf 23 jsou uvedeny výsledky z měření vzorků o vyšší hodnotě součinitele prostupu tepla. Jednotlivě se jedná o vzorky č. 1, 2, 3, 4, 5 a 11. V grafech Graf 20, Graf 22 a Graf 24 jsou uvedeny vzorky s vyšší hodnotou součinitele prostupu tepla, které zahrnují vzorky č. 6, 7, 8, 9, 10, 12 a 13.

Graf 19 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla vzorků ve vodorovné poloze

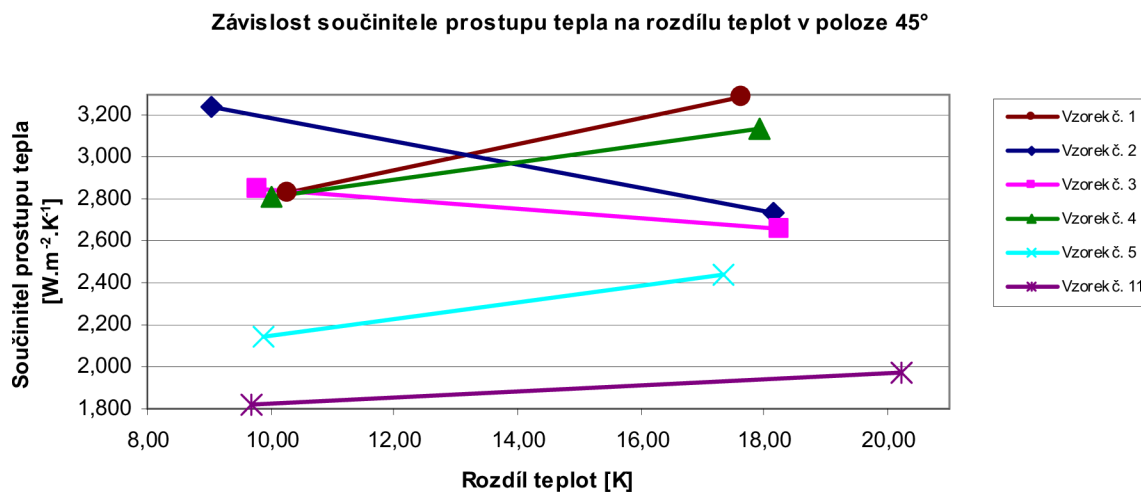


Graf 20 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla vzorků ve vodorovné poloze

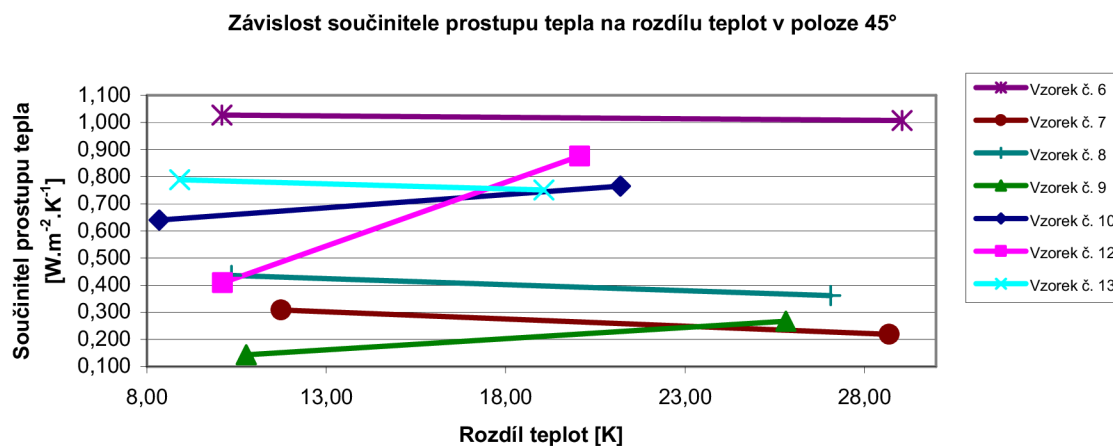


PRAKTICKÁ ČÁST

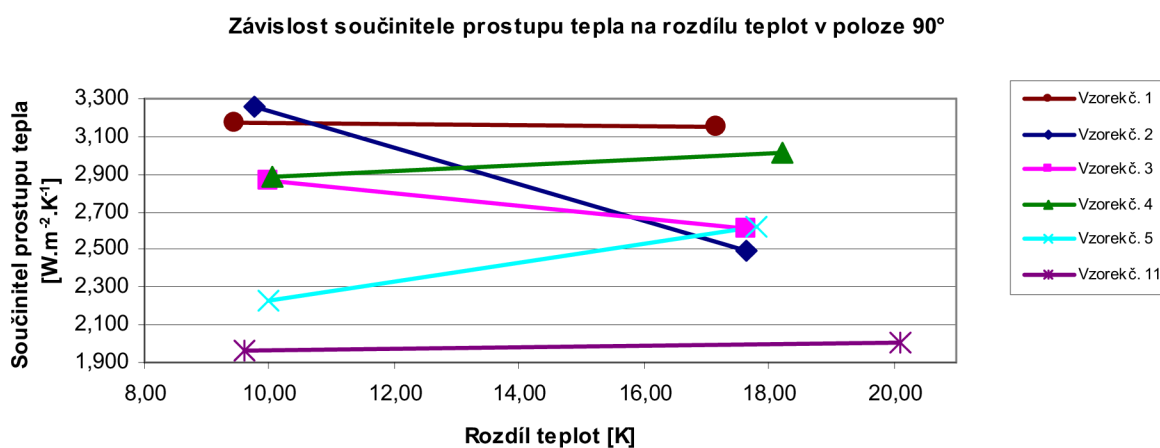
Graf 21 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla vzorků ve poloze 45°



Graf 22 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla vzorků v poloze 45°

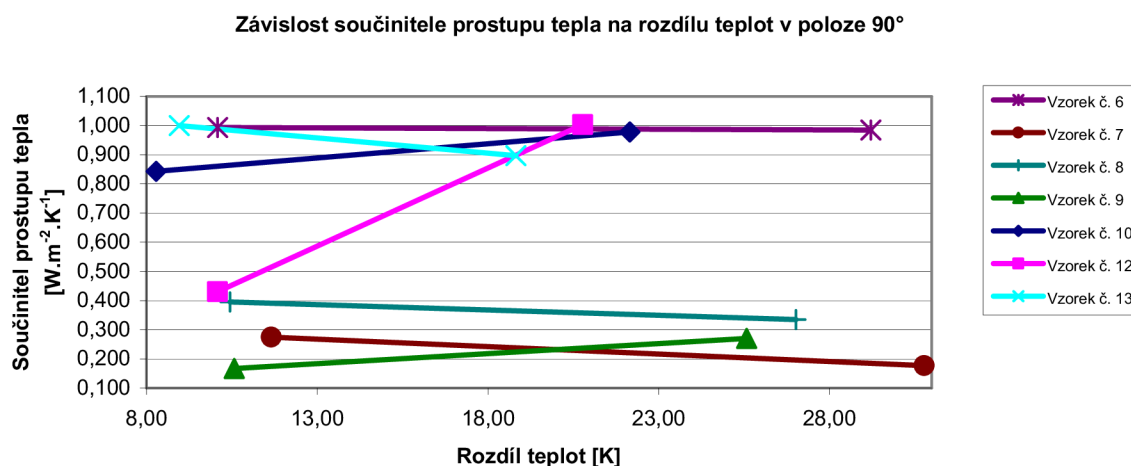


Graf 23 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla vzorků ve svislé poloze



PRAKTICKÁ ČÁST

Graf 24 - Vyhodnocení součinitele prostupu tepla vzorků měřených ve svislé poloze



Z průběhu grafů je zřejmé, že součinitel prostupu tepla se mění v závislosti na teplotním rozdílu. Podle teorie Planckova zákona jsem předpokládal zvyšující se účinnost termoreflexních tepelných izolací se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Tento předpoklad se však potvrdil jen u některých vzorků izolací. Každý vzorek má jinou charakteristiku závislosti součinitele prostupu tepla na zvyšujícím se teplotním rozdílu. Po bližším prozkoumání lze vyzorovat určité skupiny vzorků, které mají podobné závislosti součinitele prostupu tepla na zvyšujícím se teplotním rozdílu.

Tab. 33 – Vyhodnocovací tabulka

| | A | A-metal | HDPE B | P | AP | AP teplá |
|--------------|----------|----------------|---------------|----------|-----------|-----------------|
| Vzorek č. 1 | + | + | + | - | - | - |
| Vzorek č. 2 | + | - | + | - | - | - |
| Vzorek č. 3 | + | - | + | - | - | - |
| Vzorek č. 4 | + | - | - | + | + | + |
| Vzorek č. 5 | + | - | - | + | + | + |
| Vzorek č. 6 | + | - | + | + | - | - |
| Vzorek č. 7 | + | - | + | + | + | - |
| Vzorek č. 8 | + | - | + | - | - | - |
| Vzorek č. 9 | + | + | + | - | - | - |
| Vzorek č. 10 | + | - | + | + | + | + |
| Vzorek č. 11 | + | - | + | + | + | + |
| Vzorek č. 12 | + | - | + | + | + | + |
| Vzorek č. 13 | + | + | + | - | - | - |

Tabulka 33 vytváří podklady pro klasifikaci vzorků do jednotlivých skupin. Písmeno „A“ značí hliníkovou folii. „A-metal“ představuje metalizovanou hliníkovou folii. „HDPE B“ značí HDPE bublinovou folii, „P“ představuje folii z pěnového polyethylenu. Zkratka „AP“ vyjadřuje souvrství, kde je folie z pěnového polyethylenu v těsném kontaktu s hliníkovou folií. Poslední zkratka „AP teplá“ označuje stav, kdy je folie z pěnového polyethylenu v těsném kontaktu s hliníkovou folií a takto vzniklé souvrství je ještě v těsném kontaktu

PRAKTICKÁ ČÁST

s teplým prostředím. Znaménko „+“ představuje stav, kdy uvedená část v souvrství nechybí. Naopak znaménko „-“ značí stav, kdy uvedená část v souvrství chybí.

První skupina zahrnuje vzorky tvořené pouze kombinací hliníkové folie a HDPE bublinové folie. U těchto vzorků se projevuje snižování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Se snižujícím se součinitelem prostupu tepla samozřejmě roste tepelný odpor izolace, což je pozitivní jev. Z výsledků je také zřejmý vliv počtu vzduchových mezer. Se zvyšujícím se množstvím vzduchových mezer klesá hodnota součinitele prostupu tepla.

Druhá skupina zahrnuje vzorky tvořené metalizovanou hliníkovou folií a HDPE bublinovou folií. U těchto vzorků se naopak projevuje zvyšování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Do této skupiny však nezapadá vzorek č. 13. Jeho součinitel prostupu se mírně snižuje se zvyšujícím se rozdílem teplot. Změna součinitele prostupu je však nepatrná a předpokládám, že došlo k chybě měření. Předpokládám, že vzorek č. 9 byl tvořen jinými materiály než vzorek č. 13. protože tyto vzorky mají stejnou skladbu termoreflexního souvrství. Jelikož má vzorek č. 9 a vzorek č. 13 stejnou skladbu souvrství, předpokládám, že jsou tvořeny jinými materiály. Tyto vzorky se liší velikostí a množstvím bublin na bublinové folii. Velikosti vzduchových mezer se nijak výrazně neliší. V důsledku těchto faktů je zřejmé, že množství pevné složky tvořené bublinovou folií ovlivňuje šíření tepla termoreflexní tepelnou izolací.

Třetí skupinu tvoří vzorky, u kterých je folie z pěnového polyethylenu v těsném kontaktu s hliníkovou folií a tato kombinace je ještě v těsném kontaktu s teplým prostředím. Zde se opět projevuje zvyšování hodnoty součinitele prostupu tepla s rostoucím teplotním rozdílem. Ve vzorku zřejmě dojde ke zvýšení podílu šíření tepla složkou vedení (tak jako předpokládám v předchozí skupině) a vzorek se tak z části chová jako klasická pevná izolace s vyšší hodnotou emisivity povrchu.

Poslední skupina zahrnuje vzorky, ve kterých je folie z pěnového polyethylenu oddělena od hliníkové folie vrstvou HDPE bublinové folie a vzorky, kde je sice folie z pěnového polyethylenu s hliníkovou folií v těsném kontaktu, ale tato kombinace není v těsném kontaktu s teplým prostředím. Tato skupina vykazuje snižování součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem.

V tabulce 34 jsou jednotlivé vzorky zařazeny do výše zmíněných skupin. Zelené podbarvení značí snižování hodnoty součinitele prostupu tepla se zvyšujícím se teplotním rozdílem. Modré podbarvení značí zvyšující se součinitel prostupu tepla s rostoucím teplotním rozdílem.

Tab. 34 – Obsazení jednotlivých skupin

| Skupina č. | Vzorek č. | | | | |
|------------|-----------|---|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 8 | | |
| 2 | 1 | 9 | 13 | | |
| 3 | 4 | 5 | 10 | 11 | 12 |
| 4 | 6 | 7 | | | |

6.1.1. Doporučení

Vzhledem k uvedeným výsledkům doporučuji vzorek č. 2., vzorek č. 3, vzorek č. 4 a vzorek č. 5 a vzorek č. 11 jako přídatnou izolaci do systému zateplení s libovolnou hlavní izolací a to pro zmírnění působení složky záření.

Vzorek č. 6 a vzorek č. 10 vzhledem k uvedeným výsledkům doporučuji jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou uzavírají z obou stran vzorek č. 2, vzorek č. 3 nebo jejich kombinace.

Vzorek č. 12 a vzorek č. 13 vzhledem k uvedeným výsledkům doporučuji jako hlavní izolaci vloženou do vzduchové mezery, kterou z jedné strany uzavírá vzorek č. 2 nebo vzorek č. 3.

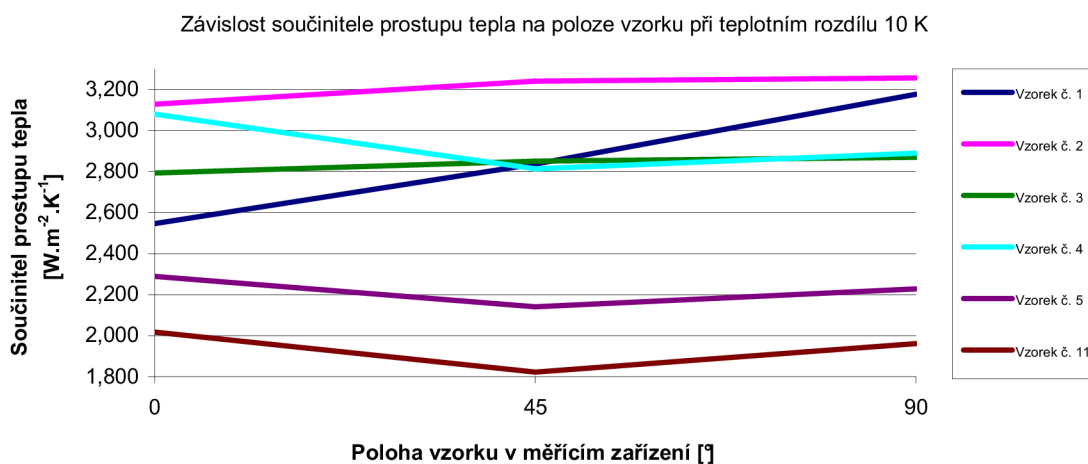
Jako hlavní izolaci, vzhledem k hodnotám součinitele prostupu tepla, doporučuji vzorek č. 7, vzorek č. 8 a vzorek č. 9. Předpokládám, že tyto izolace instalované ve vzduchové mezeře, nahradí EPS o minimální tloušťce 10 cm.

6.2. Hodnota součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze vzorku

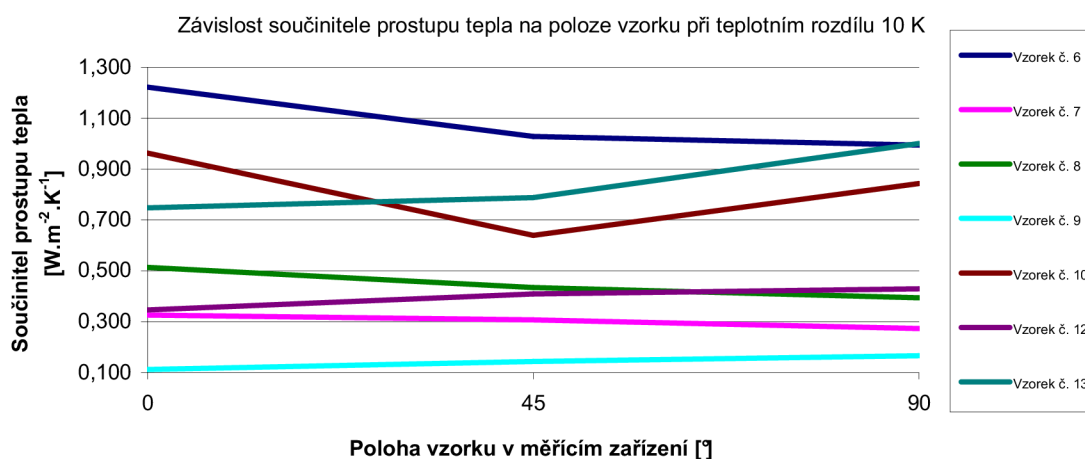
Pro lepší přehlednost výsledků jsou zde uvedeny dva grafy pro každý teplotní rozdíl. V grafech Graf 25 a Graf 26 jsou uvedeny vzorky s vyšší hodnotou součinitele prostupu tepla. Jedná se o vzorky č. 1, 2, 3, 4, 5 a 11. V následujících grafech Graf 27 a Graf 28 jsou uvedeny vzorky s vyšší hodnotou součinitele prostupu tepla. Jedná se o vzorky č. 6, 7, 8, 9, 10, 12 a 13.

PRAKTICKÁ ČÁST

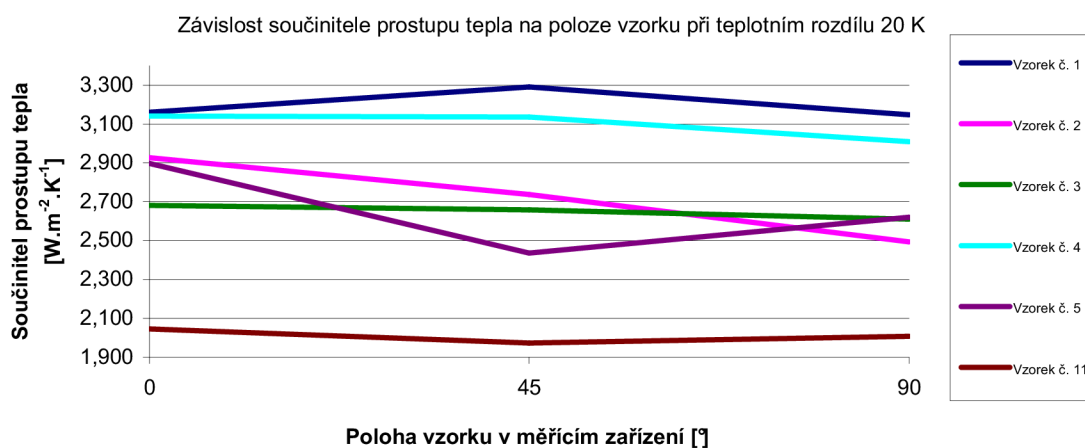
Graf 25 – Závislost hodnoty součinitele prostupu tepla na poloze měřených vzorků při teplotním rozdílu 10 K



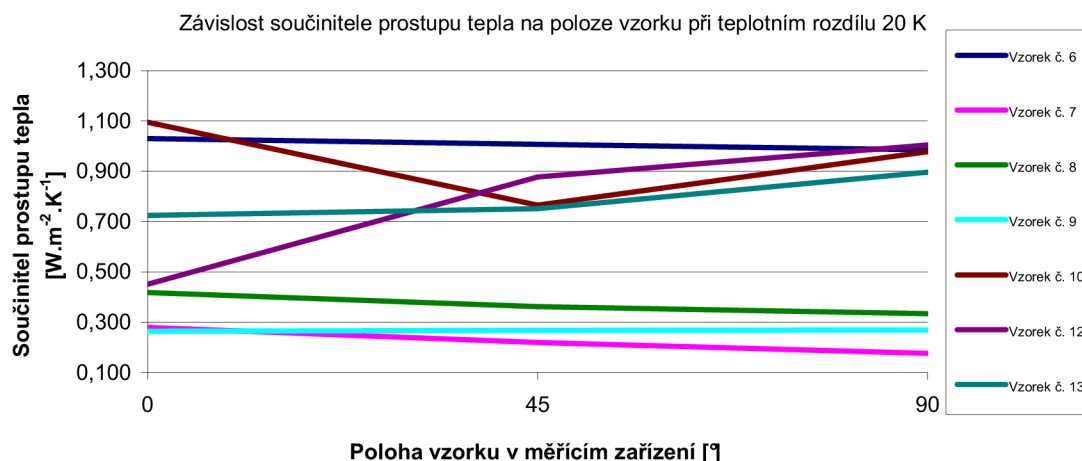
Graf 26 – Závislost hodnoty součinitele prostupu tepla na poloze měřených vzorků při teplotním rozdílu 10 K



Graf 27 – Závislost hodnoty součinitele prostupu tepla na poloze měřených vzorků při teplotním rozdílu 20 K



Graf 28 – Závislost hodnoty součinitele prostupu tepla na poloze měřených vzorků při teplotním rozdílu 20 K



Z uvedených výsledků je zřejmé, že poloha izolace má vliv na hodnotu součinitele prostupu tepla. Z naměřených výsledků je zřejmé, že jednotlivé vzorky nelze kategorizovat do stejných skupin jako v kapitole 6.1. Po bližším studiu závislosti součinitele prostupu tepla na zvyšujícím se teplotním rozdílu jsem nenalezl jiné společné znaky, podle kterých lze následující vzorky sjednotit do kategorií. Předpokládám vliv použitého materiálu a množství vzduchových mezer v termoreflexním souvrství na hodnotu součinitele prostupu tepla, avšak z naměřených výsledků nelze přesně určit charakter těchto vlivů. U většiny vzorků se hodnota součinitele prostupu tepla snížila při přechodu z vodorovné polohy měření do svislé polohy. Tento projev však nenastal u všech vzorků, a proto nemohu konstatovat, že by tento trend měl být pravidlem. Snížení hodnoty součinitele prostupu tepla je patrnější u vyšších teplotních rozdílů.

6.3. Tepelný odpor vytvořených souvrství

Pro potřeby měření byly vytvořeny tři vzorky termoreflexního souvrství, které jsem sestavil z již proměřených vzorků izolací. Cílem bylo zjistit, zda lze vypočítané tepelné odpory jednotlivých vzorků sčítat. Takto sestavené souvrství termoreflexních izolací bylo podrobena měření za stejných okrajových podmínek jako jednotlivé vzorky izolací.

V následující části využívám pojmů teoretické a skutečné souvrství. Pojmem teoretické souvrství charakterizují souvrství vzniklé z jednotlivých již proměřených vzorků a jeho tepelný odpor je součtem tepelných odporů těchto jednotlivých vzorků, oproti tepelnému odporu skutečného souvrství, který byl vyčíslen z naměřených hodnot součinitele prostupu tepla takto vytvořeného souvrství z jednotlivých vzorků, jak je popsáno v 4.2.

6.3.1. Vyhodnocení

Tab. 35 – Porovnání tepelného odporu teoretického a skutečného souvrství (vzorek č. 10)

| poloha [°] | součinitel prostupu tepla U [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] | | | souvrství (vzorek č. 10) | tepelný odpor R [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] | | | souvrství teoret. | souvrství skuteč. |
|---------------|---|--------|--------|-----------------------------|--|-------|-------|----------------------|----------------------|
| | vzorku č. | | | | vzorku č. | | | | |
| | 4 | 3 | 5 | | 4 | 3 | 5 | | |
| 0 | 3,0795 | 2,7928 | 2,2898 | 0,962 | 0,325 | 0,358 | 0,437 | 1,12 | 1,04 |
| 45 | 2,8130 | 2,8502 | 2,1414 | 0,641 | 0,355 | 0,351 | 0,467 | 1,17 | 1,56 |
| 90 | 2,8884 | 2,8686 | 2,2277 | 0,843 | 0,346 | 0,349 | 0,449 | 1,14 | 1,19 |
| 0 | 3,1411 | 2,6810 | 2,8964 | 1,095 | 0,318 | 0,373 | 0,345 | 1,04 | 0,91 |
| 45 | 3,1361 | 2,6573 | 2,4359 | 0,765 | 0,319 | 0,376 | 0,411 | 1,11 | 1,31 |
| 90 | 3,0086 | 2,6095 | 2,6191 | 0,978 | 0,332 | 0,383 | 0,382 | 1,10 | 1,02 |

Tab. 36 – Porovnání tepelného odporu teoretického a skutečného souvrství (vzorek č. 11)

| poloha [°] | součinitel prostupu tepla U [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] | | souvrství (vzorek č. 11) | tepelný odpor R [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] | | souvrství teoret. | souvrství skuteč. |
|---------------|---|--------|-----------------------------|--|-------|----------------------|----------------------|
| | vzorku č. | | | vzorku č. | | | |
| | 4 | 3 | | 4 | 3 | | |
| 0 | 2,2898 | 3,0795 | 2,017 | 0,437 | 0,325 | 0,76 | 0,50 |
| 45 | 2,1414 | 2,8130 | 1,822 | 0,467 | 0,355 | 0,82 | 0,55 |
| 90 | 2,2277 | 2,8884 | 1,961 | 0,449 | 0,346 | 0,80 | 0,51 |
| 0 | 2,8964 | 3,1411 | 2,045 | 0,345 | 0,318 | 0,66 | 0,49 |
| 45 | 2,4359 | 3,1361 | 1,973 | 0,411 | 0,319 | 0,73 | 0,51 |
| 90 | 2,6191 | 3,0086 | 2,007 | 0,382 | 0,332 | 0,71 | 0,50 |

Tab. 37 – Porovnání tepelného odporu teoretického a skutečného souvrství (vzorek č. 12)

| poloha [°] | součinitel prostupu tepla U [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] | | souvrství (Vzorek č. 12) | tepelný odpor R [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$] | | souvrství teoret. | souvrství skuteč. |
|---------------|---|--------|-----------------------------|--|-------|----------------------|----------------------|
| | vzorku č. | | | vzorku č. | | | |
| | 4 | 6 | | 4 | 6 | | |
| 0 | 1,2220 | 1,2220 | 0,347 | 0,818 | 0,818 | 1,64 | 2,88 |
| 45 | 1,0274 | 1,0274 | 0,409 | 0,973 | 0,973 | 1,95 | 2,44 |
| 90 | 0,9940 | 0,9940 | 0,430 | 1,006 | 1,006 | 2,01 | 2,33 |
| 0 | 1,0304 | 1,0304 | 0,451 | 0,970 | 0,970 | 1,94 | 2,22 |
| 45 | 1,0066 | 1,0066 | 0,876 | 0,993 | 0,993 | 1,99 | 1,14 |
| 90 | 0,9848 | 0,9848 | 1,004 | 1,015 | 1,015 | 2,03 | 1,00 |

Z uvedených výsledků je zřejmé, že sečtením tepelných odporů jednotlivých vzorků termoreflexních tepelných izolací nelze dostat správnou hodnotu tepelného odporu výsledného skutečného termoreflexního souvrství. Z výsledků nevyplývá závislost, která by určovala, zda má být tepelný odpor skutečného souvrství vyšší nebo nižší než součet tepelných odporů jednotlivých vzorků izolací. Porovnáním výsledků v tabulkách 35 – 37 se však nepotvrzuje předpoklad, že součet hodnot tepelných odporů jednotlivých vzorků v posuzovaném souvrství poskytuje hodnotu odpovídající změřenému tepelnému odporu. To je zřejmě způsobeno složkou sálání mezi vnitřními vrstvami nebo účinkem přestupových tepelných odporů.

Závěr

Teoretická část práce shrnuje informace potřebné ke studiu problematiky termoreflexních tepelných izolací. Tato část je doplněna přehledem nejrozšířenějších izolačních materiálů používaných v současnosti ve stavebnictví. Závěr teoretické části práce je věnován analýze tepelného šíření izolačními vrstvami termoreflexní tepelné izolace.

Praktická část je věnována ověření tepelně-izolační vlastnosti termoreflexních tepelných izolací. Pro tento účel jsem sestrojil měřící zařízení, které využívá metody chráněné teplé komory. Pomocí tohoto zařízení jsem následně zjišťoval součinitel prostupu tepla vybraných vzorků termoreflexních tepelných izolací. Z těchto výsledků měření jsem sestavil závislosti hodnot součinitele prostupu tepla na teplotním rozdílu a poloze umístění vzorku v měřícím zařízení. Prokázal jsme závislost, podle níž lze vzorky rozdělit do několika skupin z hlediska sledovaných faktorů, jež tuto závislost ovlivňují. Některé skupiny vzorků potvrdily předpoklad zvyšující se účinnosti termoreflexních tepelných izolací se zvyšujícím se teplotním rozdílem, avšak u některých skupin vzorků se tento předpoklad nepotvrdil. Proto nelze s jistotou potvrdit, že hodnota součinitele prostupu tepla klesá u všech termoreflexních tepelných izolací se vzrůstajícím teplotním rozdílem. S jistotou lze tvrdit pouze to, že na hodnoty součinitele prostupu tepla má vliv skladebné uspořádání termoreflexního souvrství, materiálu použitých vrstev v souvrství i velikosti vzduchových mezer.

Dále byla zjištěna změna hodnot součinitele prostupu tepla v závislosti na poloze měřeného vzorku. Z výsledků měření však nevyplývá jednoznačná závislost, která by charakterizovala projevy součinitele prostupu tepla vzhledem k poloze měřeného vzorku. Ve většině případů došlo ke snížení hodnoty součinitele prostupu tepla při změně umístění vzorku z vodorovné polohy do svislé polohy; avšak tento poznatek neplatí u všech vzorků.

V závěru praktické části jsem zjišťoval, zda platí předpoklad, že dílčí tepelné odpory jednotlivých částí tepelně-reflexního souvrství poskytují údaj o celkovém tepelném odporu vzniklého souvrství. Prokázal jsem, že se nepotvrzuje tento předpoklad. Rozdíl je způsoben dalšími projevy, zejména složkou sálání mezi vnitřními vrstvami nebo účinkem přestupových tepelných odporů.

V práci jsou uvedena praktická doporučení pro použití termoreflexní tepelné izolace ve stavbách pro klimatické podmínky České republiky a také schématický přehled systémů zateplení s termoreflexní tepelnou izolací pro některé části stavby.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ŘEHÁNEK, J., JANOUŠ, A., KUČERA, P., KUČERA, V., ŠAFRÁNEK, J., VÁCLAVÍK, V., *4 x E o tepelné izolaci budov*. ČKAIT Praha, 2004
- [2] HUDCOVÁ, L., *Energetická náročnost budov* [online]., 2009, [cit. 2014-1-3]. Dostupné z: <<http://www.ekowatt.cz>>
- [3] SRDEČNÝ, K., *Jak postavit nízkoenergetický dům* [online]. 2008, [cit. 2014-1-3]. Dostupné z: <<http://www.ekowatt.cz>>
- [4] URBAN, M., KABELE, K., *Nové požadavky na hodnocení energetické náročnosti budov od 1. dubna 2013* [online]. 2013, [cit. 2012-1-4]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz>>
- [5] HONNER, M., SOUKUP, O., BARTEL, V., MAUER, M., *Povlaky s vysokou emisivitou a metody jejich vysokoteplotního testování* [online]. 2010, [cit. 2014-1-3]. Dostupné z: <<http://www.address.cz/data/www.bgsysht.cz/hitcoat/files/KonferenceSmokovec.pdf>>
- [6] HALAHYJA, M., *Stavebná tepelná technika akustika a osvetlenie*. ALFA Bratislava, 1986
- [7] VAVERKA, J., *Stavební tepelná technika a energetika budov*. VUTIUM Brno, 2006
- [8] ŠOT, P., *Studium účinnosti novodobých tepelných izolací pro stavby*. Brno, 2011. 46 s. bez příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.
- [9] *Aluminium Metal* [online]. [cit. 2014-1-3]. Dostupné z: <<http://www.speclib.jpl.nasa.gov/search-1>>
- [10] *firemní literatura DAPE* [online]. [cit. 2014-3-1]. Dostupné z: <<http://www.dape.cz>>
- [11] *firemní literatura LUPOTHERM* [online]. [cit. 2014-1-3]. Dostupné z: <<http://www.lupotherm.eu/cs>>
- [12] *Fotogalerie* [online]. [cit. 2012-1-4]. Dostupné z: <<http://tepelnekontroly.cz>>
- [13] Centrum energetického poradenství PRE, *Jak eliminovat tepelné ztráty* [online]. 2012, [cit. 2012-1-3]. Dostupné z: <<http://www.tzb-info.cz>>
- [14] *Planckův zákon* [online]. [cit. 2014-1-3]. Dostupné z: <<http://www.powerwiki.cz>>
- [15] *Plastic Properties of High Density Polyethylene (HDPE)* [online]. [cit. 2012-1-3].
- [16] O hospodaření energií, Zákon č. 406/2000 Sb. 2000

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | | |
|-----------------------|--|---------------------|
| A | plocha referenčního povrchu | $[m^2]$ |
| A | pohltivost | $[-]$ |
| $A_{1,2}$ | plocha povrchů 1 a 2 | $[m^2]$ |
| a | součinitel teplotní vodivosti | $[m^2.s^{-1}]$ |
| C | sálavost šedého zářiče | $[W.m^{-2}.K^{-4}]$ |
| C_b | sálavost černého zářiče | $[W.m^{-2}.K^{-4}]$ |
| C_{vs} | součinitel vzájemného sálání | $[W.m^{-2}.K^{-4}]$ |
| $C_{1,2}$ | sálavost povrchů 1 a 2 | $[W.m^{-2}.K^{-4}]$ |
| $D; d$ | vnější; vnitřní průměr měřeného povrchu cylindrického tělesa | $[m]$ |
| d | tloušťka vzorku | $[m]$ |
| h_k | součinitel přestupu tepla při proudění | $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ |
| I | proud | $[A]$ |
| l | délka vzorku | $[m]$ |
| L | tepelná propustnost prostředí vzorku | $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ |
| M | intenzita vyzařování šedého zářiče | $[W.m^{-2}]$ |
| M_b | intenzita vyzařování černého zářiče | $[W.m^{-2}]$ |
| m | směrnice nárůstu tepoty určena ze záznamu měření | $[-]$ |
| Q | elektrický výkon topné spirály v měřicí části | $[W]$ |
| Q_A | energie pohlcovaná tělesem | $[W]$ |
| Q_R | energie odražená tělesem | $[W]$ |
| Q_T | energie procházející tělesem | $[W]$ |
| Q_0 | celková zářivá energie dopadající na těleso | $[W]$ |
| q | hustota tepelného toku kolmá | $[W.m^{-2}]$ |
| q_k | hustota tepelného toku mezi vzduchem a povrchem konstrukce | $[W.m^{-2}]$ |
| R | tepelný odpor | $[m^2.K.W^{-1}]$ |
| R | elektrický odpor | $[\Omega]$ |
| Re | Reynoldsovo číslo | $[-]$ |
| T | termodynamická teplota | $[K]$ |
| U | součinitel prostupu tepla | $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ |
| U_p | průměrný součinitel prostupu tepla | $[W.m^{-2}.K^{-1}]$ |
| U_{zdroje} | napětí zdroje | $[V]$ |
| ΔT | průměrný rozdíl teplot | $[K]$ |
| ε | emisivita | $[-]$ |
| θ | teplota | $[^{\circ}C]$ |
| θ_m | teplota vzduchu | $[^{\circ}C]$ |
| θ_s | teplota povrchu konstrukce | $[^{\circ}C]$ |
| $\theta_1 - \theta_2$ | termodynamický teplotní rozdíl povrchových teplot vzorku | $[K]$ |
| λ | součinitel tepelné vodivosti | $[W.m^{-1}.K^{-1}]$ |
| ν | kinematická viskozita tekutiny | $[m^2.s^{-1}]$ |
| ν_s | střední hodnota rychlosti proudění tekutiny | $[m.s^{-1}]$ |
| ρ | objemová hmotnost | $[kg.m^{-3}]$ |
| τ | čas | $[s]$ |
| x | směr proudění tepelného toku (souřadnice) | $[m]$ |
| Φ | konstantní tepelný tok liniového zdroje tepla | $[W]$ |

Seznam příloh

Příloha č. 1 Výsledky z měření součinitele prostupu tepla

Přílohy

Příloha č. 1 - Výsledek z měření součinitele prostupu tepla

| vzorek č. | tl. d | poloha | poměr ρ | čas měření τ | čas topení τ_t | dol. teplota T_n | hor. teplota T_h | ΔT | U | | |
|-----------|---------|--------|--------------|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------|--|--------|--------|
| [-] | [mm] | [°] | [-] | [s] | [s] | [°C] | [°C] | [K] | $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ | | |
| EPS | | 0 | 0,2137 | 1881,315 | 402,028 | 4,754 | 14,941 | 10,187 | 1,3272 | | |
| | | | 0,2148 | 2048,356 | 439,994 | 4,756 | 15,002 | 10,246 | 1,3263 | | |
| | | | 0,2122 | 1615,742 | 342,868 | 4,778 | 14,981 | 10,203 | 1,3158 | | |
| | | 45 | 0,1878 | 1981,551 | 372,121 | 4,823 | 15,102 | 10,279 | 1,1559 | | |
| | | | 0,1914 | 1856,412 | 355,326 | 4,811 | 15,118 | 10,307 | 1,1748 | | |
| | | | 0,1889 | 1894,334 | 357,848 | 4,824 | 15,132 | 10,308 | 1,1594 | | |
| | | 90 | 0,2448 | 2372,602 | 580,860 | 5,062 | 15,008 | 9,946 | 1,5572 | | |
| | | | 0,2459 | 1642,180 | 403,814 | 5,047 | 15,078 | 10,031 | 1,5509 | | |
| | | | 0,2467 | 1766,120 | 435,422 | 5,089 | 15,097 | 10,008 | 1,5595 | | |
| | | 0 | 0,4292 | 1972,337 | 846,501 | 5,232 | 25,122 | 19,890 | 1,3652 | | |
| | | | 0,4276 | 2143,154 | 916,408 | 5,278 | 25,113 | 19,835 | 1,3639 | | |
| | | | 0,4288 | 1474,307 | 632,187 | 5,261 | 25,147 | 19,886 | 1,3642 | | |
| | | 45 | 0,3591 | 13560,870 | 4869,100 | 5,128 | 25,330 | 20,202 | 1,1246 | | |
| | | | 0,3599 | 1562,170 | 562,228 | 5,156 | 25,312 | 20,156 | 1,1297 | | |
| | | | 0,3612 | 1645,162 | 594,213 | 5,144 | 25,323 | 20,179 | 1,1324 | | |
| | | 90 | 0,4337 | 2240,361 | 971,642 | 8,049 | 25,120 | 17,071 | 1,6073 | | |
| | | | 0,4355 | 1914,224 | 833,647 | 8,013 | 25,148 | 17,135 | 1,6079 | | |
| | | | 0,4369 | 1486,754 | 649,560 | 8,034 | 25,188 | 17,154 | 1,6113 | | |
| | | 1 | | 0 | 0,4214 | 2079,330 | 876,260 | 4,479 | 14,982 | 10,503 | 2,5383 |
| | | | | | 0,4232 | 1648,210 | 697,516 | 4,453 | 14,957 | 10,504 | 2,5489 |
| | | | | | 0,4200 | 1894,715 | 795,775 | 4,482 | 14,913 | 10,431 | 2,5474 |
| | | | | 45 | 0,4598 | 2691,991 | 1237,800 | 4,792 | 15,037 | 10,245 | 2,8394 |
| | | | | | 0,4612 | 2014,118 | 928,908 | 4,774 | 15,068 | 10,294 | 2,8345 |
| | | | | | 0,4605 | 1566,451 | 721,348 | 4,751 | 15,024 | 10,273 | 2,8360 |
| | | | | 90 | 0,4737 | 2194,706 | 1039,600 | 5,524 | 14,968 | 9,444 | 3,1733 |
| | | | | | 0,4751 | 1647,162 | 782,567 | 5,547 | 14,989 | 9,442 | 3,1834 |
| | | | | | 0,4736 | 1816,603 | 860,342 | 5,534 | 14,981 | 9,447 | 3,1717 |
| 0 | 0,8738 | | | 1800,549 | 1573,300 | 5,775 | 23,216 | 17,441 | 3,1696 | | |
| | 0,8716 | | | 2048,231 | 1785,232 | 5,762 | 23,232 | 17,470 | 3,1564 | | |
| | 0,8746 | | | 1612,957 | 1410,687 | 5,734 | 23,276 | 17,542 | 3,1543 | | |
| 45 | 0,9187 | | | 14381,900 | 13213,000 | 6,539 | 24,136 | 17,597 | 3,3030 | | |
| | 0,9169 | | | 2013,009 | 1845,718 | 6,512 | 24,184 | 17,672 | 3,2825 | | |
| | 0,9172 | | | 1914,513 | 1755,984 | 6,521 | 24,162 | 17,641 | 3,2893 | | |
| 90 | 0,8541 | | | 1964,025 | 1677,400 | 6,386 | 23,536 | 17,150 | 3,1507 | | |
| | 0,8529 | | | 2134,620 | 1820,621 | 6,374 | 23,581 | 17,207 | 3,1359 | | |
| | 0,8554 | | | 1451,238 | 1241,391 | 6,357 | 23,514 | 17,157 | 3,1543 | | |
| 2 | 3,3 | | | 0 | 0,4522 | 1640,720 | 741,993 | 5,928 | 15,066 | 9,138 | 3,1307 |
| | | | | | 0,4513 | 1428,352 | 644,679 | 5,936 | 15,087 | 9,151 | 3,1201 |
| | | | | | 0,4495 | 1524,850 | 685,426 | 5,942 | 15,021 | 9,079 | 3,1323 |
| | | | | 45 | 0,4627 | 2597,295 | 1201,800 | 6,029 | 15,052 | 9,023 | 3,2443 |
| | | | | | 0,4683 | 1325,426 | 620,728 | 5,952 | 15,101 | 9,149 | 3,2383 |
| | | | | | 0,4598 | 1449,826 | 666,661 | 6,032 | 15,012 | 8,980 | 3,2394 |
| | | | | 90 | 0,5078 | 1621,141 | 823,140 | 5,327 | 15,193 | 9,866 | 3,2563 |

| | | | | | | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|-------|--------|
| | | | 0,5027 | 1528,341 | 768,271 | 5,315 | 15,081 | 9,766 | 3,2566 | | |
| | | | 0,4982 | 1248,624 | 622,081 | 5,427 | 15,112 | 9,685 | 3,2544 | | |
| | | 0 | 0,8618 | 1832,495 | 1579,300 | 0,765 | 19,465 | 18,700 | 2,9156 | | |
| | | | 0,8645 | 1436,247 | 1241,653 | 0,742 | 19,422 | 18,680 | 2,9279 | | |
| | | | 0,8637 | 1532,610 | 1323,754 | 0,624 | 19,223 | 18,599 | 2,9379 | | |
| | | 45 | 0,7893 | 2514,636 | 1984,900 | 0,429 | 18,675 | 18,246 | 2,7368 | | |
| | | | 0,7882 | 1624,824 | 1280,708 | 0,442 | 18,682 | 18,240 | 2,7339 | | |
| | | | 0,7796 | 1548,711 | 1207,421 | 0,431 | 18,422 | 17,991 | 2,7415 | | |
| | | 90 | 0,6950 | 1943,665 | 1350,900 | 1,167 | 18,841 | 17,674 | 2,4878 | | |
| | | | 0,6958 | 1742,321 | 1212,344 | 1,097 | 18,822 | 17,725 | 2,4835 | | |
| | | | 0,6949 | 1427,945 | 992,246 | 1,002 | 18,524 | 17,522 | 2,5090 | | |
| | | 3 | 3,88 | 0 | 0,4196 | 3218,869 | 1350,800 | 5,595 | 15,087 | 9,492 | 2,7967 |
| | | | | | 0,4204 | 1321,286 | 555,554 | 5,502 | 15,045 | 9,543 | 2,7871 |
| | | | | | 0,4183 | 1262,528 | 528,054 | 5,542 | 15,012 | 9,470 | 2,7945 |
| | | | | 45 | 0,4403 | 2563,586 | 1128,600 | 5,261 | 15,024 | 9,763 | 2,8532 |
| 0,4399 | 1422,980 | | | | 625,904 | 5,274 | 15,043 | 9,769 | 2,8489 | | |
| 0,4399 | 1247,851 | | | | 548,945 | 5,302 | 15,072 | 9,770 | 2,8486 | | |
| 90 | 0,4533 | | | 4079,636 | 1849,350 | 5,071 | 15,073 | 10,002 | 2,8673 | | |
| | 0,4528 | | | 1337,471 | 605,625 | 5,103 | 15,082 | 9,979 | 2,8707 | | |
| | 0,4529 | | | 1638,429 | 742,143 | 5,056 | 15,047 | 9,991 | 2,8679 | | |
| 0 | 0,7968 | | | 2222,125 | 1770,500 | 1,118 | 19,960 | 18,842 | 2,6754 | | |
| | 0,7961 | | | 1436,247 | 1143,430 | 1,112 | 19,921 | 18,809 | 2,6778 | | |
| | 0,7954 | | | 1624,849 | 1292,440 | 1,243 | 19,952 | 18,709 | 2,6897 | | |
| 45 | 0,7663 | | | 1915,724 | 1468,100 | 1,643 | 19,927 | 18,284 | 2,6515 | | |
| | 0,7652 | | | 1724,153 | 1319,382 | 1,682 | 19,913 | 18,231 | 2,6554 | | |
| | 0,7668 | | | 1494,201 | 1145,791 | 1,703 | 19,907 | 18,204 | 2,6649 | | |
| 90 | 0,7285 | 1942,417 | 1415,119 | 2,287 | 19,941 | 17,654 | 2,6107 | | | | |
| | 0,7247 | 1423,874 | 1031,927 | 2,301 | 19,924 | 17,623 | 2,6016 | | | | |
| | 0,7291 | 1624,184 | 1184,251 | 2,321 | 19,953 | 17,632 | 2,6161 | | | | |
| 4 | 2,5 | 0 | 0,4620 | 1675,499 | 774,070 | 5,610 | 15,109 | 9,499 | 3,0770 | | |
| | | | 0,4617 | 1528,743 | 705,840 | 5,582 | 15,082 | 9,500 | 3,0747 | | |
| | | | 0,4622 | 1216,945 | 562,511 | 5,573 | 15,046 | 9,473 | 3,0868 | | |
| | | 45 | 0,4444 | 2132,096 | 947,610 | 5,149 | 15,127 | 9,978 | 2,8177 | | |
| | | | 0,4439 | 1523,489 | 676,402 | 5,075 | 15,069 | 9,994 | 2,8100 | | |
| | | | 0,4449 | 1324,847 | 589,462 | 5,011 | 15,023 | 10,012 | 2,8113 | | |
| | | 90 | 0,4602 | 1852,234 | 852,460 | 5,011 | 15,096 | 10,085 | 2,8869 | | |
| | | | 0,4593 | 1421,230 | 652,794 | 5,045 | 15,109 | 10,064 | 2,8873 | | |
| | | | 0,4587 | 1624,841 | 745,383 | 5,008 | 15,046 | 10,038 | 2,8910 | | |
| | | 0 | 0,8944 | 9731,513 | 8703,982 | 1,221 | 19,201 | 17,980 | 3,1471 | | |
| | | | 0,8954 | 1742,120 | 1559,982 | 1,204 | 19,197 | 17,993 | 3,1483 | | |
| | | | 0,8964 | 1324,642 | 1187,426 | 1,103 | 19,234 | 18,131 | 3,1279 | | |
| | | 45 | 0,8888 | 1599,951 | 1422,000 | 1,192 | 19,139 | 17,947 | 3,1331 | | |
| | | | 0,8872 | 1824,661 | 1618,899 | 1,345 | 19,321 | 17,976 | 3,1225 | | |
| | | | 0,8891 | 1421,621 | 1264,021 | 1,362 | 19,204 | 17,842 | 3,1526 | | |
| 90 | 0,8661 | 1938,978 | 1679,400 | 1,734 | 19,951 | 18,217 | 3,0079 | | | | |
| | 0,8643 | 1468,432 | 1269,184 | 1,652 | 19,846 | 18,194 | 3,0054 | | | | |
| | 0,8665 | 1523,213 | 1319,921 | 1,702 | 19,899 | 18,197 | 3,0126 | | | | |
| 5 | 4,8 | 0 | 0,3647 | 2303,843 | 840,190 | 5,088 | 15,165 | 10,077 | 2,2897 | | |
| | | | 0,3629 | 1732,183 | 628,650 | 5,082 | 15,092 | 10,010 | 2,2936 | | |
| | | | 0,3635 | 1423,825 | 517,597 | 5,043 | 15,103 | 10,060 | 2,2860 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|--------|----------|----------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | 45 | 0,3341 | 1690,641 | 564,870 | 5,295 | 15,138 | 9,843 | 2,1474 | | |
| | | | 0,3329 | 1235,620 | 411,394 | 5,152 | 15,003 | 9,851 | 2,1380 | | |
| | | | 0,3358 | 1387,264 | 465,875 | 5,143 | 15,076 | 9,933 | 2,1388 | | |
| | | 90 | 0,3526 | 1638,770 | 577,830 | 5,111 | 15,099 | 9,988 | 2,2334 | | |
| | | | 0,3501 | 1679,224 | 587,936 | 5,098 | 15,061 | 9,963 | 2,2232 | | |
| | | | 0,3522 | 1374,336 | 484,066 | 5,086 | 15,094 | 10,008 | 2,2264 | | |
| | | 0 | 0,8112 | 2034,812 | 1650,715 | 2,145 | 19,892 | 17,747 | 2,8918 | | |
| | | | 0,8076 | 1826,421 | 1475,081 | 2,184 | 19,901 | 17,717 | 2,8839 | | |
| | | | 0,8192 | 1634,111 | 1338,688 | 2,135 | 19,923 | 17,788 | 2,9136 | | |
| | | 45 | 0,6682 | 1861,036 | 1243,660 | 2,172 | 19,521 | 17,349 | 2,4367 | | |
| | | | 0,6659 | 1426,942 | 950,223 | 2,189 | 19,491 | 17,302 | 2,4349 | | |
| | | | 0,6672 | 1624,186 | 1083,679 | 2,174 | 19,502 | 17,328 | 2,4360 | | |
| | | 90 | 0,7373 | 1791,636 | 1320,900 | 2,217 | 20,027 | 17,810 | 2,6191 | | |
| | | | 0,7345 | 1723,145 | 1265,704 | 2,221 | 19,996 | 17,775 | 2,6143 | | |
| | | | 0,7384 | 1423,124 | 1050,885 | 2,198 | 20,001 | 17,803 | 2,6240 | | |
| | | 6 | 23,5 | 0 | 0,1968 | 1903,868 | 374,682 | 4,910 | 15,203 | 10,293 | 1,2096 |
| | | | | | 0,1959 | 1823,491 | 357,222 | 4,956 | 15,102 | 10,146 | 1,2215 |
| | | | | | 0,1954 | 1433,111 | 280,029 | 4,987 | 14,999 | 10,012 | 1,2347 |
| | | | | 45 | 0,1633 | 2207,184 | 360,433 | 4,942 | 15,023 | 10,081 | 1,0248 |
| | | | | | 0,1641 | 1864,121 | 305,904 | 4,986 | 15,034 | 10,048 | 1,0332 |
| | | | | | 0,1639 | 1943,934 | 318,612 | 4,931 | 15,056 | 10,125 | 1,0241 |
| | | | | 90 | 0,1589 | 2150,352 | 341,691 | 4,959 | 15,062 | 10,103 | 0,9950 |
| | | | | | 0,1579 | 1734,620 | 273,896 | 4,961 | 15,042 | 10,081 | 0,9909 |
| | | | | | 0,1583 | 1712,364 | 271,067 | 4,972 | 15,028 | 10,056 | 0,9959 |
| 0 | 0,4670 | | | 2691,119 | 1256,800 | 1,234 | 29,978 | 28,744 | 1,0279 | | |
| | 0,4678 | | | 1876,003 | 877,600 | 1,298 | 29,946 | 28,648 | 1,0331 | | |
| | 0,4671 | | | 1632,143 | 762,431 | 1,301 | 29,982 | 28,681 | 1,0303 | | |
| 45 | 0,4621 | | | 1857,450 | 858,280 | 1,003 | 30,062 | 29,059 | 1,0061 | | |
| | 0,4619 | | | 1812,642 | 837,209 | 1,031 | 30,048 | 29,017 | 1,0071 | | |
| | 0,4628 | | | 1792,112 | 829,500 | 1,001 | 30,087 | 29,086 | 1,0066 | | |
| 90 | 0,4549 | | | 2408,633 | 1095,766 | 0,987 | 30,218 | 29,231 | 0,9846 | | |
| | 0,4538 | | | 1834,219 | 832,460 | 1,012 | 30,221 | 29,209 | 0,9829 | | |
| | 0,4557 | | | 1726,913 | 786,914 | 1,006 | 30,214 | 29,208 | 0,9871 | | |
| 7 | 26,5 | | | 0 | 0,0599 | 1838,653 | 110,160 | 3,692 | 15,215 | 11,523 | 0,3289 |
| | | | | | 0,0590 | 2034,132 | 120,048 | 3,678 | 15,143 | 11,465 | 0,3256 |
| | | | | | 0,0586 | 1843,122 | 108,065 | 3,723 | 15,122 | 11,399 | 0,3252 |
| | | | | 45 | 0,0578 | 1835,920 | 106,170 | 3,469 | 15,356 | 11,887 | 0,3076 |
| | | | | | 0,0568 | 1634,180 | 92,855 | 3,522 | 15,234 | 11,712 | 0,3068 |
| | | | | | 0,0571 | 1729,404 | 98,805 | 3,621 | 15,248 | 11,627 | 0,3107 |
| | | 90 | 0,0504 | 2871,168 | 144,799 | 3,592 | 15,294 | 11,702 | 0,2725 | | |
| | | | 0,0500 | 1815,460 | 90,808 | 3,614 | 15,284 | 11,670 | 0,2711 | | |
| | | | 0,0513 | 1762,781 | 90,453 | 3,606 | 15,212 | 11,606 | 0,2796 | | |
| | | 0 | 0,1272 | 2078,508 | 264,380 | 1,322 | 30,120 | 28,798 | 0,2794 | | |
| | | | 0,1266 | 1943,123 | 246,062 | 1,311 | 30,022 | 28,711 | 0,2790 | | |
| | | | 0,1270 | 1512,340 | 192,100 | 1,298 | 30,004 | 28,706 | 0,2799 | | |
| | | 45 | 0,1002 | 1819,056 | 182,332 | 1,282 | 29,921 | 28,639 | 0,2213 | | |
| | | | 0,0992 | 1772,014 | 175,834 | 1,308 | 30,007 | 28,699 | 0,2187 | | |
| | | | 0,0989 | 1932,411 | 191,176 | 1,391 | 30,141 | 28,750 | 0,2176 | | |
| | | 90 | 0,0862 | 2081,242 | 373,550 | -0,972 | 30,026 | 30,998 | 0,1759 | | |
| | | | 0,0867 | 1812,341 | 157,188 | -0,762 | 30,011 | 30,773 | 0,1782 | | |

| | | | | | | | | | | | |
|----|--------|----|--------|----------|---------|----------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 0,0855 | 1534,613 | 131,148 | -0,561 | 30,026 | 30,587 | 0,1768 | | |
| 8 | 24 | 0 | 0,0832 | 1976,923 | 164,504 | 4,749 | 15,080 | 10,331 | 0,5095 | | |
| | | | 0,0841 | 1423,403 | 119,754 | 4,813 | 15,001 | 10,188 | 0,5222 | | |
| | | | 0,0837 | 1643,751 | 137,630 | 4,779 | 15,103 | 10,324 | 0,5129 | | |
| | | 45 | 0,0713 | 1587,913 | 113,160 | 4,901 | 15,295 | 10,394 | 0,4340 | | |
| | | | 0,0705 | 1721,316 | 121,288 | 4,864 | 15,213 | 10,349 | 0,4310 | | |
| | | | 0,0721 | 1613,487 | 116,384 | 4,922 | 15,248 | 10,326 | 0,4417 | | |
| | | 90 | 0,0656 | 1431,234 | 93,851 | 4,723 | 15,108 | 10,385 | 0,3996 | | |
| | | | 0,0649 | 1567,111 | 101,742 | 4,692 | 15,192 | 10,500 | 0,3910 | | |
| | | | 0,0651 | 2165,043 | 141,101 | 4,607 | 15,065 | 10,458 | 0,3938 | | |
| | | 0 | 0,1787 | 1580,102 | 282,420 | 3,180 | 30,015 | 26,835 | 0,4213 | | |
| | | | 0,1776 | 1751,561 | 311,118 | 2,986 | 30,112 | 27,126 | 0,4142 | | |
| | | | 0,1792 | 1623,487 | 290,983 | 2,977 | 30,097 | 27,120 | 0,4180 | | |
| | | 45 | 0,1544 | 1453,310 | 224,364 | 3,015 | 30,084 | 27,069 | 0,3609 | | |
| | | | 0,1553 | 1701,607 | 264,296 | 3,018 | 30,102 | 27,084 | 0,3628 | | |
| | | | 0,1550 | 1618,444 | 250,860 | 3,101 | 30,132 | 27,031 | 0,3628 | | |
| | | 90 | 0,1422 | 1443,951 | 205,377 | 3,102 | 30,104 | 27,002 | 0,3332 | | |
| | | | 0,1432 | 2070,707 | 296,589 | 3,106 | 30,118 | 27,012 | 0,3354 | | |
| | | | 0,1438 | 1645,236 | 236,686 | 3,115 | 30,169 | 27,054 | 0,3363 | | |
| | | 9 | | 0 | 0,0194 | 2232,131 | 43,321 | 4,187 | 15,051 | 10,864 | 0,1130 |
| | | | | | 0,0198 | 1570,348 | 31,040 | 4,166 | 15,065 | 10,899 | 0,1149 |
| | | | | | 0,0191 | 1982,421 | 37,854 | 4,187 | 15,048 | 10,861 | 0,1113 |
| | | | | 45 | 0,0243 | 2112,870 | 51,362 | 4,252 | 15,021 | 10,769 | 0,1428 |
| | | | | | 0,0237 | 1968,428 | 46,541 | 4,278 | 15,049 | 10,771 | 0,1392 |
| | | | | | 0,0253 | 1988,561 | 50,310 | 4,279 | 15,036 | 10,757 | 0,1488 |
| 90 | 0,0287 | | | 1864,951 | 53,521 | 4,466 | 15,058 | 10,592 | 0,1714 | | |
| | 0,0276 | | | 2535,936 | 70,100 | 4,454 | 15,032 | 10,578 | 0,1651 | | |
| | 0,0271 | | | 2128,426 | 57,690 | 4,478 | 15,011 | 10,533 | 0,1628 | | |
| 0 | 0,1074 | | | 2451,765 | 263,380 | 4,162 | 29,820 | 25,658 | 0,2648 | | |
| | 0,1092 | | | 1864,677 | 203,652 | 4,166 | 29,853 | 25,687 | 0,2690 | | |
| | 0,1054 | | | 2127,914 | 224,284 | 4,189 | 29,903 | 25,714 | 0,2593 | | |
| 45 | 0,1087 | | | 1927,251 | 209,502 | 4,125 | 29,995 | 25,870 | 0,2658 | | |
| | 0,1104 | | | 1860,135 | 205,359 | 4,167 | 29,948 | 25,781 | 0,2709 | | |
| | 0,1098 | | | 1874,847 | 205,861 | 4,159 | 29,961 | 25,781 | 0,2694 | | |
| 90 | 0,1087 | | | 2451,606 | 266,380 | 4,563 | 30,131 | 25,568 | 0,2690 | | |
| | 0,1094 | | | 1871,621 | 204,765 | 4,523 | 30,117 | 25,594 | 0,2704 | | |
| | 0,1092 | | | 2016,814 | 220,237 | 4,519 | 30,108 | 25,589 | 0,2700 | | |
| 10 | | | | 0 | 0,1283 | 2457,984 | 315,450 | 6,665 | 15,085 | 8,420 | 0,9640 |
| | | | | | 0,1275 | 1951,230 | 248,982 | 6,648 | 15,094 | 8,446 | 0,9551 |
| | | | | | 0,1294 | 1845,324 | 238,794 | 6,632 | 15,087 | 8,455 | 0,9683 |
| | | | | 45 | 0,0837 | 1879,373 | 157,230 | 6,692 | 14,985 | 8,293 | 0,6385 |
| | | | | | 0,0851 | 1627,681 | 138,522 | 6,648 | 15,003 | 8,355 | 0,6444 |
| | | | | | 0,0844 | 1917,841 | 161,873 | 6,631 | 14,991 | 8,360 | 0,6387 |
| | | 90 | 0,1092 | 2016,099 | 220,260 | 6,749 | 15,055 | 8,306 | 0,8318 | | |
| | | | 0,1106 | 1548,847 | 171,301 | 6,784 | 15,023 | 8,239 | 0,8493 | | |
| | | | 0,1114 | 1847,545 | 205,821 | 6,755 | 15,062 | 8,307 | 0,8484 | | |
| | | 0 | 0,3815 | 1897,769 | 723,920 | 7,948 | 29,845 | 21,897 | 1,1022 | | |
| | | | 0,3782 | 2013,374 | 761,488 | 7,943 | 29,874 | 21,931 | 1,0910 | | |
| | | | 0,3774 | 1948,621 | 735,429 | 7,992 | 29,881 | 21,889 | 1,0908 | | |
| | | 45 | 0,2564 | 2218,480 | 568,820 | 7,935 | 29,135 | 21,200 | 0,7652 | | |

| | | | | | | | | | |
|----|--|----|--------|-----------|----------|-------|--------|--------|--------|
| | | | 0,2553 | 1724,180 | 440,185 | 7,944 | 29,153 | 21,209 | 0,7616 |
| | | | 0,2571 | 1543,486 | 396,847 | 7,968 | 29,148 | 21,180 | 0,7680 |
| | | 90 | 0,3414 | 3056,545 | 1043,400 | 7,628 | 29,805 | 22,177 | 0,9739 |
| | | | 0,3385 | 2047,921 | 693,234 | 7,613 | 29,794 | 22,181 | 0,9655 |
| | | | 0,3476 | 1458,332 | 506,961 | 7,684 | 29,813 | 22,129 | 0,9938 |
| 11 | | 0 | 0,2763 | 1873,373 | 517,618 | 6,345 | 14,964 | 8,619 | 2,0281 |
| | | | 0,2748 | 2009,201 | 552,121 | 6,312 | 14,978 | 8,666 | 2,0062 |
| | | | 0,2771 | 1453,199 | 402,690 | 6,301 | 14,988 | 8,687 | 2,0181 |
| | | 45 | 0,2791 | 1916,356 | 534,867 | 5,423 | 15,190 | 9,767 | 1,8079 |
| | | | 0,2806 | 1433,277 | 402,183 | 5,468 | 15,101 | 9,633 | 1,8429 |
| | | | 0,2784 | 1606,451 | 447,254 | 5,423 | 15,125 | 9,702 | 1,8154 |
| | | 90 | 0,2987 | 1788,942 | 534,365 | 5,402 | 15,019 | 9,617 | 1,9650 |
| | | | 0,2963 | 2114,038 | 626,394 | 5,462 | 15,011 | 9,549 | 1,9631 |
| | | | 0,2977 | 1653,411 | 492,214 | 5,414 | 15,046 | 9,632 | 1,9554 |
| | | 0 | 0,6664 | 1925,099 | 1282,800 | 3,451 | 24,034 | 20,583 | 2,0483 |
| | | | 0,6651 | 1574,462 | 1047,186 | 3,402 | 24,021 | 20,619 | 2,0407 |
| | | | 0,6682 | 1687,234 | 1127,421 | 3,432 | 24,087 | 20,655 | 2,0467 |
| | | 45 | 0,6314 | 2107,951 | 1330,900 | 3,735 | 23,995 | 20,260 | 1,9717 |
| | | | 0,6320 | 1840,120 | 1162,964 | 3,726 | 24,006 | 20,280 | 1,9716 |
| | | | 0,6297 | 1453,855 | 915,497 | 3,742 | 23,912 | 20,170 | 1,9751 |
| | | 90 | 0,6365 | 1992,014 | 1267,800 | 3,877 | 23,946 | 20,069 | 2,0065 |
| | | | 0,6394 | 1322,003 | 845,293 | 3,901 | 24,038 | 20,137 | 2,0088 |
| | | | 0,6379 | 1824,126 | 1163,612 | 3,894 | 24,021 | 20,127 | 2,0051 |
| 12 | | 0 | 0,0566 | 2107,952 | 119,341 | 5,012 | 15,128 | 10,116 | 0,3540 |
| | | | 0,0542 | 1622,951 | 87,974 | 5,034 | 15,133 | 10,099 | 0,3395 |
| | | | 0,0557 | 1823,100 | 101,557 | 4,998 | 15,124 | 10,126 | 0,3480 |
| | | 45 | 0,0658 | 2304,514 | 151,643 | 4,987 | 15,115 | 10,128 | 0,4110 |
| | | | 0,0641 | 1884,302 | 120,784 | 4,952 | 15,066 | 10,114 | 0,4010 |
| | | | 0,0662 | 2012,573 | 133,233 | 4,962 | 15,031 | 10,069 | 0,4159 |
| | | 90 | 0,0694 | 2221,925 | 154,210 | 4,964 | 15,074 | 10,110 | 0,4343 |
| | | | 0,0678 | 2112,680 | 143,241 | 4,947 | 15,022 | 10,075 | 0,4257 |
| | | | 0,0684 | 1513,831 | 103,540 | 4,965 | 15,031 | 10,066 | 0,4299 |
| | | 0 | 0,1368 | 2145,795 | 293,460 | 2,981 | 22,325 | 19,344 | 0,4474 |
| | | | 0,1392 | 1857,327 | 258,541 | 2,967 | 22,348 | 19,381 | 0,4544 |
| | | | 0,1382 | 1422,984 | 196,648 | 2,948 | 22,314 | 19,366 | 0,4515 |
| | | 45 | 0,2761 | 2074,422 | 572,820 | 2,906 | 22,981 | 20,075 | 0,8701 |
| | | | 0,2781 | 1512,117 | 420,523 | 2,912 | 22,974 | 20,062 | 0,8770 |
| | | | 0,2798 | 1624,185 | 454,457 | 2,924 | 22,989 | 20,065 | 0,8822 |
| | | 90 | 0,3288 | 2244,508 | 737,950 | 2,289 | 23,097 | 20,808 | 0,9997 |
| | | | 0,3308 | 1945,115 | 643,435 | 2,294 | 23,041 | 20,747 | 1,0087 |
| | | | 0,3294 | 1536,327 | 506,051 | 2,287 | 23,063 | 20,776 | 1,0031 |
| 13 | | 0 | 0,1106 | 1756,986 | 194,280 | 7,689 | 17,030 | 9,341 | 0,7491 |
| | | | 0,1237 | 10399,113 | 1285,900 | 8,606 | 19,180 | 10,574 | 0,7401 |
| | | | 0,1243 | 2011,408 | 250,010 | 8,643 | 19,108 | 10,465 | 0,7515 |
| | | 45 | 0,1094 | 1978,775 | 216,450 | 6,587 | 15,444 | 8,857 | 0,7814 |
| | | | 0,1121 | 2041,633 | 228,859 | 6,523 | 15,481 | 8,958 | 0,7917 |
| | | | 0,1115 | 1614,203 | 179,984 | 6,548 | 15,463 | 8,915 | 0,7913 |
| | | 90 | 0,1428 | 2976,420 | 425,031 | 9,348 | 18,284 | 8,936 | 1,0110 |
| | | | 0,1407 | 5010,955 | 705,000 | 9,322 | 18,276 | 8,954 | 0,9941 |
| | | | 0,1414 | 1427,621 | 201,866 | 9,312 | 18,297 | 8,985 | 0,9956 |

| | | | | | | | | | |
|--|--|----|--------|----------|----------|-------|--------|--------|--------|
| | | 0 | 0,2145 | 2138,134 | 458,660 | 8,419 | 27,287 | 18,868 | 0,7192 |
| | | | 0,2164 | 1889,247 | 408,830 | 8,439 | 27,246 | 18,807 | 0,7280 |
| | | | 0,2158 | 2102,130 | 453,641 | 8,451 | 27,261 | 18,810 | 0,7258 |
| | | 45 | 0,2257 | 1779,338 | 401,580 | 8,183 | 27,206 | 19,023 | 0,7506 |
| | | | 0,2269 | 2140,189 | 485,605 | 8,127 | 27,248 | 19,121 | 0,7507 |
| | | | 0,2261 | 1815,554 | 410,499 | 8,169 | 27,218 | 19,049 | 0,7509 |
| | | 90 | 0,2668 | 4305,391 | 1148,600 | 8,105 | 26,958 | 18,853 | 0,8953 |
| | | | 0,2679 | 2305,140 | 617,545 | 8,122 | 26,971 | 18,849 | 0,8992 |
| | | | 0,2657 | 1522,624 | 404,563 | 8,137 | 26,908 | 18,771 | 0,8955 |