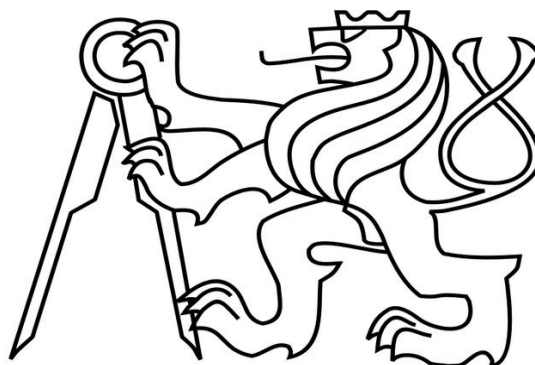


České vysoké učení technické v Praze

Strojní fakulta

Ústav energetiky



Diplomová práce

Tepelné izolace potrubí v jaderných elektrárnách

Bc. Václav Novotný

© 2017 ČVUT v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Tepelné izolace potrubí v jaderných elektrárnách" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. května 2017

Anotční list

Jméno autora:	Václav Novotný
Název DP:	Tepelné izolace potrubí v jaderných elektrárnách
Anglický název:	Thermal insulation of piping in nuclear power plants
Akademický rok:	2016/2017
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí DP:	doc. Ing. Pavel Novák, CSc.
Konzultant:	Ing. Jiří Slach
Bibliografické údaje:	Počet stran: 83 Počet obrázků: 13 Počet tabulek: 25 Počet příloh: 6
Klíčová slova:	Tepelná vodivost, izolace, tepelný tok, tepelná ztráta, konvekce, radiace, potrubí, emisivita
Keyword:	Thermal conductivity, insulation, heat flow, thermal losses, convection, radiation, piping, emissivity
Anotace:	Cílem diplomové práce je navrhnout metodiku stanovení tloušťky tepelných izolací potrubí v jaderných elektrárnách. První částí diplomové práce je rešerše technických izolací, dělení izolačních materiálů, aplikace a vlastnosti izolací. Druhá část se zabývá tepelnou vodivostí a výpočtem požadovaných parametrů. Poslední část práce se zabývá vyhodnocením experimentu, který byl měřen na zařízení Stend VVS v Plzni ve ŠKODA JS a.s.
Abstract:	The aim of the diploma thesis is to design a method for assessment of thickness of the thermal insulation piping in nuclear power plants. In the first part of the diploma thesis there are the review technical insulation, division insulation materials, application and properties of insulation. In the second part there are the thermal conductivity and the calculation of the required parameters. The last part contains the evaluation of the experiment, which was measured on device Stend VVS in Pilsen in ŠKODA JS a.s.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Pavlovi Novákovi, CSc. za odborné vedení práce, vstřícnost a mnoho cenných rad při řešení této práce. Dále bych rád poděkoval zaměstnancům firmy ŠKODA JS a.s., především Ing. Martinovi Pulcovi za ochotu, pomoc a mnoho praktických rad při řešení diplomové práce. Děkuji také členům svojí rodiny za všestrannou podporu při studiích.

Bibliografická citace

Bc. NOVOTNÝ, V. *Tepelné izolace potrubí v jaderných elektrárnách*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017. 83 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Novák, CSc.

Obsah

OBSAH	6
1. ÚVOD	9
2. ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE	11
2.1. SOUČINITELE SDÍLENÍ TEPLA	11
3. TECHNICKÉ IZOLACE	13
3.1. ÚSPORA ENERGIE	14
3.2. OCHRANA PROTI KONDENZACI	14
3.2.1. <i>Ochrana vně potrubí</i>	14
3.2.2. <i>Ochrana uvnitř potrubí</i>	15
3.3. OCHRANA OSOB PŘED KONTAKTEM S HORKÝM ZAŘÍZENÍM.....	15
3.4. PROTIMRAZOVÁ OCHRANA POTRUBÍ	15
3.5. REGULACE TEPLoty LÁTEK VEDENÝCH V ROZVODECH.....	16
3.6. POŽÁRNÍ ODOLNOST IZOLACE.....	16
3.7. OCHRANA PRO HLUKU	17
4. DĚLENÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ	18
4.1. IZOLAČNÍ MATERIÁLY DLE MAKROSTRUKTURY	18
4.2. IZOLAČNÍ MATERIÁLY DLE DRUHU MATERIÁLU	19
4.3. IZOLACE Z MINERÁLNÍ VLNY	19
4.3.1. <i>Izolace z kamenné vlny</i>	20
4.3.2. <i>Izolace ze skelné vlny</i>	20
4.4. IZOLACE Z PĚNOVÉHO SKLA	20
4.5. IZOLACE Z POLYURETANOVÉ PĚNY	21
4.6. IZOLACE Z POLYETYLENOVÉ PĚNY	21
5. APLIKACE TECHNICKÝCH IZOLACÍ	22
5.1. ROHOŽE NA PLETIVU	22
5.2. LAMELOVÉ ROHOŽE	23
5.3. POTRUBNÍ IZOLAČNÍ POUZDRA	23
5.4. OPLÁŠTĚNÍ IZOLACE.....	23
5.4.1. <i>Volba materiálu na povrchové úpravy izolací</i>	24
5.4.2. <i>Tloušťky plechu pro povrchovou úpravu izolací</i>	25
5.4.3. <i>Vyhotovení oplechování tepelných izolací</i>	25
5.4.4. <i>Těsnění</i>	25
5.5. MINIMÁLNÍ VZDÁLENOST MEZI POTRUBÍM A KONSTRUKCÍ	26
5.6. POMOCNÉ KONSTRUKCE IZOLACÍ	26
6. VLASTNOSTI IZOLACÍ Z MINERÁLNÍCH VLN	28
6.1. REAKCE NA OHEŇ.....	28
6.2. PAROPROPUSTNOST	28
6.3. HYDROFOBIZACE.....	28
6.4. BOD TÁNÍ	28
6.5. ODPOR PROTI PROUDĚNÍ VZDUCHU.....	29
6.6. OBJEMOVÁ HMOTNOST	29
6.7. NEJVYŠŠÍ PROVOZNÍ TEPLOTA	29
6.8. AŠ KVALITA	29

7. TEPELNÁ VODIVOST.....	30
7.1. ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI NA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI	30
7.2. ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLOTĚ	31
7.3. ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI NA VLHKOSTI.....	32
7.4. TEPELNÁ VODIVOST MĚŘENÁ	34
7.5. TEPELNÁ VODIVOST DEKLAROVANÁ	34
7.6. TEPELNÁ VODIVOST NÁVRHOVÁ	34
7.7. MOŽNOST KOREKCE TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLOTU	36
7.7.1. <i>Vztahy pro výpočet</i>	36
7.7.2. <i>Příklad chybného zjednodušení výpočtu [10]</i>	39
7.7.3. <i>Závěr</i>	40
8. PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ NÁVRH TLOUŠŤKY IZOLACÍ.....	41
8.1. EMISIVITA POVRCHU	41
8.2. MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	41
8.3. RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU.....	41
8.4. TEPLOTA ROSNÉHO BODU	42
8.5. EKONOMICKÁ TLOUŠŤKA IZOLACE	42
9. METODIKA VÝPOČTŮ TEPELNÝCH IZOLACÍ	45
9.1. BEZROZMĚRNÁ KRITÉRIA PRO POTŘEBY STANOVENÍ SOUČiniteLE PŘESTUPU TEPLA 45	
9.1.1. <i>Nucená konvekce</i>	45
9.1.2. <i>Volná konvekce</i>	46
9.2. SOUČINTEL PŘESTUPU TEPLA.....	47
9.3. SOUČINTEL TEPELNÉ VODIVOSTI	47
9.4. URČENÍ TLOUŠŤKY TEPELNÉ IZOLACE PRO LIMITOVANOU POVRCHOVOU TEPLOTU ... 48	
9.4.1. <i>Kontrola povrchové teploty</i>	49
9.5. TEPELNÝ TOK TEPELNOU IZOLACÍ	49
9.6. HMOTNOSTNÍ PARAMETRY IZOLACE.....	51
10. VÝPOČET POŽADOVANÝCH PARAMETRŮ.....	52
11. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	57
11.1. MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	57
11.2. POPIS MĚŘENÍ IZOLACE.....	57
11.3. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	63
11.4. VYHODNOCENÍ PRO CELÉ MĚŘENÍ	67
12. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST Č. 2	69
13. ZÁVĚR.....	73

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
REJSTŘÍK OBRÁZKŮ.....	78
REJSTŘÍK TABULEK	78
REJSTŘÍK GRAFŮ.....	79
SEZNAM ZDROJŮ	80
PŘÍLOHY	81
PŘÍLOHA Č. 1: VLASTNOSTI TECHNICKÝCH IZOLACÍ [4].....	81
PŘÍLOHA Č. 2: LAMELOVÝ SKRUŽOVATELNÝ PÁS ORSTECH LSP PYRO [15]	82
PŘÍLOHA Č. 3: ROHOŽ NA PLETIVU ORSTECH DP 65 [7]	82
PŘÍLOHA Č. 4: PŘEVODNÍ SOUČINITELE [4].....	82
PŘÍLOHA Č. 5: EMISIVITA PRO RŮZNÉ MATERIÁLY POKRYTÍ TEPELNÉ IZOLACE	83
PŘÍLOHA Č. 6: VLASTNOSTI SUCHÉHO VZDUCHU – PRO TEPLITU OKOLÍ.....	83

1. Úvod

Obecně tepelná izolace je prvek, jehož hlavním cílem je zabránit přenosu tepelné energie mezi vnitřním a vnějším místem technického systému. V dnešní době strmě stoupající kvalitativní a kvantitativní rozvoj v průmyslovém odvětví, stavebnictví a v dalších mnoha technických oborech jsou příčinou stále narůstajícího čerpání energie. Velikost zásob primárních paliv pro výrobu tepla či elektrické energie stále pomalu klesá, nacházení nových zdrojů energií je stále náročnější. Proto jedním z východisek v dnešní době je nacházení úsporných opatření, mezi nichž patří používání tepelných izolací. Snižování energetické náročnosti nespočívá jen v zateplování budov, ale také v aplikaci tepelných izolací na technická zařízení. U technických zařízení se navíc nesleduje jen efekt úspory tepelné energie, ale u většiny technických zařízení je třeba zajistit jejich tepelné odizolování od ostatních zařízení, které nesmějí být tepelně zatíženy. Typickým případem mohou být třeba kabelové lávky v blízkosti horkých aparátů nebo potrubí.

V této diplomové práci se budu zabývat použitím tepelných izolací v průmyslu a to na rozvodech potrubí. Výběr vhodného izolačního materiálu je nejdůležitější částí celého procesu.

Dalším krokem včetně vhodné volby materiálu a jeho užití na dané potrubí je správná volba tloušťky tepelněizolační vrstvy. Neméně důležitá je i správná volba vrstev, která ovlivňuje i další vlastnosti. Zvyšování tloušťky přináší požadované snížení tepelných ztrát, ale jsou s tím spojeny nejen vyšší nároky na pořizovací výdaje, ale také nároky na instalační prostor – což bývá u technologických zařízení zásadní problém. Tyto závislosti jdou tedy proti sobě a je třeba hledat jejich technicko – ekonomickou optimalizaci. Na tloušťku izolace jsou dále i přímé technické požadavky, jako jsou ochrana proti kondenzaci, ochrana osob proti popálení nebo ochrana proti hluku.

Rešeršní část této diplomové práce se zabývá izolačními materiály, které jsou používané pro izolování potrubí v technickém průmyslu. Tato potrubí jsou nejčastěji obklopena atmosférou, tedy jsou umístěna v technických prostorách nebo ve vnějších prostorách energetického komplexu. Únik tepla z potrubí je nechtěnou energetickou ztrátou, která dále způsobuje často nadlimitní ohřev prostor, ve kterých je umístěna technologie. Tyto uzavřené prostory je pak často třeba intenzivně chladit. Další částí rešerše bude popis instalace izolace v technické praxi.

Výpočetní část práce vychází z požadavků firmy ŠKODA JS a.s. V této části bude proveden výpočet optimální tloušťky izolace a povrchové teploty na dané části potrubí v elektrárně. Při projektování potrubních tras energetických zařízení, zejména jaderných elektráren, kde jsou obvykle velmi stísněné podmínky, se často vyskytují kolize mezi izolacemi tras vedených blízko sebe. Výpočty jsou pro médium voda, pára na mezi sytosti a přehřátá pára. Jako výsledek je potřebná tloušťka izolace, tepelná ztráta na jeden metr délky potrubí, hmotnost izolace a zpětný údaj o povrchové teplotě pokrytí izolace. Velmi důležitým faktorem funkce izolovaného potrubí je zaizolování potenciálních tepelných mostů. Jde především o prvky, které jsou tvarově odlišné od samotného potrubí a jsou potřebné k jeho instalaci a provozu. Jedna kapitola je věnována právě pomocným konstrukcím tepelných izolací přímo z jaderné elektrárny Mochovce na Slovensku.

Poslední částí je porovnání vypočtených hodnot s experimentálně naměřenými hodnotami v reálných podmínkách a následné vyhodnocení.

2. Základní pojmy a definice

- **sdílení tepla** – je nauka o šíření tepla v prostoru a čase, kde se teplo samovolně šíří z místa vyšší teploty do místa nižší teploty. Podle prostředí v jakém se přenos tepelné energie uskutečňuje, lze rozeznávat sdílení tepla vedením, prouděním a zářením hmoty.
- **vedení (kondukce)** – teplo přechází z místa teplejšího do místa chladnějšího u vláknitých izolací vedením podél vlákna a mezi vlákny. Vedení tepla je důsledek energetické výměny mikropohybu molekul hmoty a jeho průběh je dán součinitelem tepelné vodivosti λ .
- **proudění (konvekce)** – teplo přechází vlivem pohybujícího se vzduchu, který je dán rozdílem hustot vzduchu, okolo izolace nebo uvnitř izolace. Proudění může být přirozené (interiér) nebo nucené (exteriér, ventilátory).
- **sálání (radiace)** – přenos tepla uskutečňovaný elektromagnetickým vlněním dané vlnové délky. Sálání je jediný způsob, kterým se teplo může šířit ve vakuu. V technických případech se na přenosu tepelné energie podílejí všechny tři uvedené způsoby zároveň, ale s různým podílem. Pokud jeden z uvedených způsobů značně převažuje nad dvěma ostatními, zjednodušuje se podstatně řešení případu a to tím, že se uvažuje pouze jeden způsob přenosu tepelné energie.

2.1. Součinitele sdílení tepla

- **součinitel tepelné vodivosti λ [W.m⁻¹.K⁻¹]** – schopnost dané izolace vést teplo při střední teplotě. Tento součinitel je přímo závislý na mnoha faktorech, např. vlhkosti, objemové hmotnosti izolace, střední teplotě, tloušťce izolace.
- **součinitel přestupu tepla α [W.m⁻².K⁻¹]** – tento součinitel je ovlivněn dvěma přenosovými mechanismy – prouděním a sáláním. Čím je vyšší hodnota součinitele přestupu tepla, tím dochází k většímu přestupu tepla z teplého povrchu a dochází ke snížení tepelného odporu mezi vrstvy.
- **tepelný odpor R [m².K.W⁻¹]** – u tohoto součinitele závisí zda je určen pro vnitřní nebo vnější stranu potrubí. Na vnitřní straně potrubí je velmi malý, a proto se velmi často ve výpočtech zanedbává. Souvisí s vedením tepla, protože je převrácenou hodnotou součinitele tepelné vodivosti.

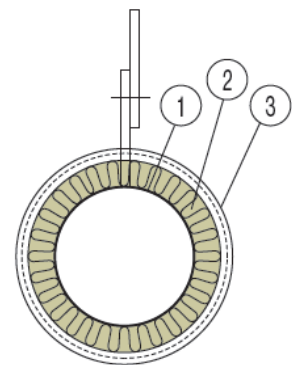
- **součinitel prostupu tepla U** [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$] – je převrácená hodnota tepelného odporu a zohledňuje vliv všech uvedených přenosových mechanismů. Pro potrubí má tento součinitel jednotku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$].

3. Technické izolace

V technické praxi je často přenos tepla prováděn médii s velmi vysokou teplotou (nejčastěji pára a voda). Tato kapitola se věnuje účelu technických izolací v energetice. Části kotlů a potrubí, kde je velmi vysoká teplota a jedná se o tzv. obsluhovaný prostor, musí být aplikována tepelná izolace, která zaručuje teplotu vnějšího povrchu izolace maximálně 50 °C. Tento požadavek je především z důvodu bezpečnosti práce. Místa kde jsou tepelné mosty, se připouští vyšší rozdíl mezi teplotou povrchu izolace a teplotou ovzduší a to dle způsobu provedení pro samostatnou stavbu parních nebo horkovodních kotlů a potrubí. Tato místa, kde je vyšší teplota povrchu jak 50 °C by se měla chránit proti doteku osob [1].

Každá technická izolace se počítá dle kritéria nejvyšší přípustné tepelné ztráty nebo nejvyšší dovolené teploty. V oblasti energetiky téměř každé zařízení, které nějakým způsobem produkuje teplo, ať už pro výrobu tepla samotného nebo přenos tepla do dalších zařízení potřebuje izolaci, neboť ztráta vyrobeného tepla je samozřejmě velice neekonomická a může způsobovat i další problémy – například nechtěnou kondenzaci syté páry v potrubí. Proto je zamyšlení nad správným použitím izolačních materiálů a řešení tepelně technických podmínek na místě instalace. Důležitou činností v oblasti energetiky je použití tepelných izolací na parovodních nebo horkovodních potrubí. Kromě tepelněizolačních vlastností musí izolace splňovat i další požadavky – nízký obsah chloridů, mechanickou odolnost, dokládá se certifikát ze zkoušky proti zanášení filtrů při případném roztrhání izolace při haváriích.

V dnešní době je vhodná volba izolačních materiálů, jejich skladby a následné vhodné použití nedílnou součástí každého energetického zařízení. Proto projektová dokumentace vždy obsahuje část s projektem tepelných izolací – zpravidla ve formě jednostupňové projektové dokumentace. Základní rozdělení technických izolací dle jejich funkcí je popsáno v následujících bodech této kapitoly. Základní průřez potrubím je na obrázku 1.



- 1 ... potrubí
- 2 ... izolace
- 3 ... oplechování při venkovním použití.

Obrázek 1: Průřez potrubím [6]

3.1. Úspora energie

Izolační tloušťka se počítá dle kritéria maximální přípustné tepelné ztráty, kde by se mělo přihlídnout na nežádoucí oteplení nebo naopak ochlazení teplonosné látky. V některých technologických procesech dokonce tyto změny mohou znamenat nutnost změny části skupenství dodatečně řešit – například odlučovače vlhkosti na parovodech se sytou párou na JE. U jednotlivých technologických procesů se kontrolním výpočtem ověřuje, zda je vypočtená tepelná ztráta nižší než očekávaná. Vždy závisí na tom, jaké jsou požadavky na danou izolaci. V případě, že není třeba počítat s omezujícími požadavky, je dobré při návrhu pracovat s ekonomicky optimální tloušťkou izolace. Větší tloušťka izolace sice snižuje tepelné ztráty, což je chtěné, ale jsou s tím spojeny vyšší výdaje nebo obestavěný prostor. Toto zahrnuje jak cenu samostatného izolačního materiálu, tak i náklady na přídatný materiál a montáž. Určit technicko – ekonomickou tloušťku izolace není jednoduché avšak je to nedílnou součástí pro správný návrh a tím i opatření tepelných ztrát. V ekonomickém hodnocení je zapotřebí brát v úvahu náročnost údržby izolace, její životnost, cenu přídatných materiálů, inflaci a cenový vývoj.

3.2. Ochrana proti kondenzaci

Ochrana proti kondenzaci se rozděluje na ochranu na vnějším povrchu a na vnitřním povrchu. V následujících dvou bodech budou obě varianty popsány.

3.2.1. Ochrana vně potrubí

Tomuto principu se říká tzv. princip „chladové izolace“. Jde typicky o izolaci proti orosení. Zvýšením povrchové teploty za použití vhodné izolace a opláštění nad teplotu rosného bodu. Dostatečná tloušťka izolace zamezuje kondenzaci. Tímto způsobem se zabrání kondenzaci na studeném povrchu. Kondenzace je nežádoucí jev, který způsobuje kapání zkondenzované vody z oroseného povrchu potrubí. V případě nezamezení kondenzaci může kondenzát způsobit narušení provozu daného i okolních zařízení a samozřejmě následnou korozi, která může mít neblahý vliv na samotné potrubí nebo příslušné komponenty zařízení. Jako další důležitá vlastnost izolace je zamezit pronikání vodní páry do izolačního materiálu, tedy vždy musí být aplikována účinná parozábrana. Tato vodní pára způsobuje akumulaci vlhkosti uvnitř izolace a následně způsobuje, že izolace prakticky ztrácí izolační vlastnosti a výrazně se pak sníží izolační odpor.

Parametry, které ovlivňují návrh tloušťky chladových izolací:

- tepelná vodivost izolačního materiálu
- teplota teplotonosné látky
- teplota okolního vzduchu
- relativní vlhkost okolního vzduchu
- součinitel přestupu vzduchu.

3.2.2. Ochrana uvnitř potrubí

Tato kondenzace se vyskytuje nejčastěji při proudění syté páry, ale také například při dopravě technických látek, často v souvislosti s chemickou výrobou. Požadavek na vyloučení možnosti fázové přeměny při dopravě nebo skladování speciálních tekutin. Technické řešení těchto problémů se musí podřídít fyzikálním vlastnostem látky a kinetickým podmínkám prostředí nad vnitřním povrchem. [2]

3.3. Ochrana osob před kontaktem s horkým zařízením

V oblasti technických izolací v energetice se téměř vždy pohybujeme ve vyšších teplotních hladinách. Proto je ochrana před kontaktem s horkým zařízením jedním z nejdůležitějších kritérií při návrhu tloušťky izolace. Velikost maximální povrchové teploty nezávisí jen na médiu, které protéká vnitřkem potrubí, ale i na povrchovém materiálu. Aby se snížilo riziko poranění, je důležité navrhnout správný typ a hlavně dostatečnou tloušťku. Hlavně ve vnitřních prostorách energetických zařízení je velice málo prostoru mezi jednotlivými potrubími a stává se, že není možné zaizolovat potrubí dostatečnou tloušťkou izolace, aby nedošlo k nežádoucímu ohrožení. V tomto případě se povrchová teplota snižuje vhodnou povrchovou úpravou, jako jsou plastové typy opláštění, poplastované plechy, tkaniny ze skelných vláken. Existují však případy, kde nelze ani těmito možnostmi zajistit ochranu proti popálení a tj. například revizní otvor do kotle, ba přímo do spalovací komory, kde je povrchová teplota velice vysoká.

3.4. Protimrazová ochrana potrubí

Při dopravě daného média není v tomto případě primárním úkolem snížení tepelných ztrát jako předmět ekonomického hlediska, ale hlavní podmínkou je zde správná doprava média na požadované místo bez nebezpečí zamrznutí dopravované kapaliny. Izolace samozřejmě ovlivňuje kvalitu dopravovaného média a velikost potrubí. V některých případech není možné zajistit ochranu proti zamrznutí pomocí izolace. Pak se potrubí omotává topným kabelem nebo se aplikuje koaxiální trubka s topným médiem.

Podstatou topných kabelů je eliminace tepelných ztrát. Umístěním správně zvoleného topného kabelu pod izolaci teplota zůstane stabilní. Výkon topného kabelu se navrhuje na velikost tepelné ztráty, která se předává do prostoru. Ochrana tímto způsobem v průmyslu se rozlišuje dle účelu:

- ochrana proti mrazu a přimrzání
- zamezení kondenzace
- udržování procesní teploty
- ohřev – dodávka tepla médiu.

3.5. Regulace teploty látek vedených v rozvodech

U technologických rozvodů je nutný návrh typu a tloušťky izolace tak, aby byla udržena požadovaná teplota pracovní látky při přesunu z jednoho místa na druhé. Proces, při kterém dochází k cyklické změně z vysoké na nízkou teplotu během několika málo minut, vyžaduje izolaci, která je určena pro rychlé změny teplot. Izolace by taktéž měla mít maximální tepelnou vodivost, která je dána nízkou tepelnou kapacitou a nízkou objemovou hmotností izolace. U rozvodů, u kterých je zapotřebí monitorovat změnu teploty látky se musí předem zvážit, zda navýšení tloušťky izolace je to nejefektivnější řešení. Tato metodika se liší od přístupu volit takovou izolaci, která je ekonomicky nejvýhodnější.

3.6. Požární odolnost izolace

Požární odolnost izolace je jedním z důležitých parametrů pro její použití v technologických celcích. Požární odolnost (PO) je parametr, který se udává v minutách. Doba, po kterou je izolace schopna odolávat účinkům požáru, který probíhá na základě normou stanovených podmínek. PO se ověřuje dvěma způsoby a to buď výpočetně, nebo experimentálně, kdy je izolace vystavena požáru. PO se hodnotí dle stupnice 15, 30, 45, 60, 90, 120 minut. Tyto číselné třídy jsou doplněny o písmenné symboly vyjadřující mezní stav požární odolnosti. Důležité je, že PO je vlastnost celé konstrukce, tj. technologického zařízení včetně izolace. Výhodou moderní izolace je, že se sami nevznítí. Není tedy možnost vzniku požáru vlivem jiskry a izolace zabraňují šíření požáru z místa vzniku. Izolace z čediče v případě hoření nevytvářejí prakticky žádný kouř a vzniklé spalné plyny nejsou toxické. Odpadají tudíž sekundární problémy v podobě ohrožení zdraví lidí. Celkově toto kritérium technických izolací patří mezi ty velmi důležitá. [3]

Aplikace izolace také zpravidla zvyšuje požární odolnost izolovaného zařízení, protože výrazně snižuje povrchovou teplotu chráněného zařízení při požáru. V následující tabulce 1 jsou uvedeny reakční třídy na oheň dle příslušné normy.

Tabulka 1: Reakční třídy na oheň [3]

Třída reakce na oheň ČSN EN 13 501-1	Stupeň hořlavosti ČSN 73 0862	
A1	A	Nehořlavé
A2	B	Nesnadno hořlavé
B	C1	Těžce hořlavé
C nebo D	C2	Středně hořlavé
E nebo F	C3	Lehce hořlavé

3.7. Ochrana pro hluku

Potrubí, kterým protékají plyny, pára nebo kapaliny mohou být významným zdrojem hluku. Příčinou hluku jsou vysoké rychlosti dopravovaného média nebo škrťící clonky v potrubí, které mohou způsobovat turbulence a tím hluk. V případě velmi hlučných míst na potrubí přicházejí v úvahu i protihluková opatření, je třeba brát v úvahu místo, kterým potrubí prochází. Tepelnou izolaci lze spojit se zlepšením akustických parametrů. Je důležité, aby u protihlukových izolací bylo vnější opláštění instalováno beze spár a bylo uloženo tak, aby podpurná kovová konstrukce nepřenášela hluk do okolí, to se řeší pružnými pryžovými podložkami nebo jinými tlumícími elementy (StopShock). [3]

Z celé této kapitoly je vidět, že není tak jednoznačné navrhnout izolaci, která má za úkol co nejvíce snížit tepelné ztráty potrubí. Ale je zde se zabývat i jinými parametry, které vhodnou volbu izolace ovlivňují. Není pravidlem volit tloušťku izolace, která je ekonomicky nejvýhodnější, i když cena je zásadním faktorem při volbě. Vždy závisí na požadovaném použití a dalších požadovaných parametrech izolace.

4. Dělení izolačních materiálů

Základní rozdělení vhodných izolací pro průmyslové aplikace:

- izolace z minerální vlny (MW)
- izolace z elastomerní pěny (FEF)
- izolace z pěnového skla (CG)
- izolace z křemičitanu vápenatého (CS)
- izolace z fenolické pěny (PF)
- izolace z polyetylenové pěny (PEF)
- izolace z polyuretanové pěny (PUR).

Druhů izolačních materiálů je mnoho. V této kapitole jsou izolační materiály rozděleny dle několika kritérií. Pro případ potrubí na elektrárnách přicházejí nejvíce v úvahu izolace na velké průměry potrubí, vysoké teploty, a proto se nejvíce používají izolace ve formě matrací, kde izolačním materiálem je skelná vata zašitá do obalu ze skelné tkaniny.

Důležité vlastnosti, které by měla mít izolace, dle definované normy jsou tepelná vodivost, nejvyšší provozní teplota, reakce na oheň a další doporučené vlastnosti jako jsou odpor proti proudění vzduchu, AS kvalita, chemická neutralita a pevnost v tlaku. Podrobnějšímu popisu těchto vlastností je věnována kapitola 6.

4.1. Izolační materiály dle makrostruktury

- vláknité izolace, vaty – desky, rohože, pouzdra, skruže
- pěnové izolace – skruže, rukávy, tvarovky
- lité izolace – tvarovky
- sypké izolace – granuláty, drtě.

Lité a sypké izolace se již v dnešní době nepoužívají. V dřívější době byly tyto materiály používány hlavně na izolaci podzemních potrubí, ale jejich nevýhodou byla malá voděodolnost a jejich izolační vlastnosti byly tedy nedobré. Pro případ izolace potrubí, které je uloženo nad zemí přichází v úvahu první dva typy.

4.2. Izolační materiály dle druhu materiálu

- organické materiály
 - elastomery – syntetický a přírodní kaučuk
 - termoplasty – polyetylen (PE), polyuretan (PUR).
- anorganické materiály
 - sklo – 70% SiO₂, Na₂O, CaO, amorfní struktury
 - keramika – SiO₂, Al₂O₃, krystalická struktura
 - minerální přírodní materiály – čedič.

Takřka všechny izolační materiály jsou vyrobeny uměle. Přírodní materiály neumí odolávat požadavkům, které jsou na izolace kladeny. Tyto požadavky mohou být odolnost proti chemické a teplotní degradaci a mnoho dalších. V organických materiálech není uveden polystyren, který patří do kategorie termoplasty. Není uveden z důvodu, protože se užívá hlavně ve stavebním průmyslu a jeho vlastnosti nevyhovují použití v průmyslu energetickém, jelikož má nízkou teplotní odolnost (kolem 80°C) a vyrábí se ve formě desek, nikoliv rohoží.

4.3. Izolace z minerální vlny

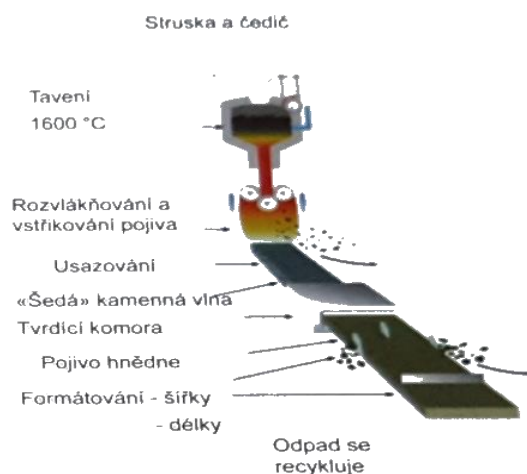
Tento typ izolace se vyrábí metodou rozvlákňování taveniny směsi hornin a dalších mnoha příměsí a přísad. Minerální vlákna (pro projekt EMO s obchodním názvem Izomer TT) se vkládají do jednotlivých komor předem ušitých matrací. Matrace jsou rozdílné nejen podle rozdílné tloušťky matrace, ale také podle průměru potrubí nebo existují matrace pro tvarovky (T-kusy, kolena, armatury). Pro jiné aplikace se mohou minerální vlákna zpracovávat do tvaru lamelových pásů s kolmou orientací vláken na hliníkové fólii vyztužené skelnou mřížkou nebo ve formě mikaných rohoží. Izolace splňuje danou AS kvalitu a i hydrofobizaci. Tento typ izolace je velice vhodný právě pro izolaci potrubí s teplým médiem uvnitř a je na obrázku 8.

Izolaci ve formě matrace nebo rohože je nutné v konstrukci chránit odpovídajícím způsobem, kterým bývá nejčastěji venkovní oplechování. V případě JE, bývá oplechování realizováno nejčastěji nerezovým plechem, z důvodu případné kontaminace. U různých dopravovaných médií jako můžou být horké spaliny za kotlem či přehřátá pára se zde mohou objevovat vibrace celého potrubního úseku. Je proto třeba zvážit celou stavbu konstrukce. Nejvyšší provozní teplota potrubí v energetice může být až 620 °C. V případě rohoží s hliníkovou vnější vrstvou tloušťka pásu musí být navržena tak, aby maximální

teplota na venkovní straně, tedy na straně hliníkové rohože byla maximálně 100 °C. V případě, že teplota přesáhne 150 °C, se začíná z izolace uvolňovat pojivo. Tímto vlivem dochází k postupné degradaci izolace a vzrůstu dalších provozních nákladů.

Přednosti lamelových rohoží jsou velmi dobré izolační vlastnosti (nízká λ), ekologická a hygienická nezávadnost, v případě dodržení daných zásad i dlouhá životnost a hlavně vysoká teplotní odolnost a je to nehořlavý materiál. Proces výroby izolace je uveden na obrázku 2.

Izolace z minerální vlny se dále mohou rozdělit na izolace z kamenné vlny a izolace ze skelné vlny.



Obrázek 2: Proces výroby izolace [16]

4.3.1. Izolace z kamenné vlny

Výhodou tohoto typu je maximální provozní teplota (MST), která je 720 °C. Objemová hmotnost je v rozsahu 30 – 200 kg.m⁻³. Tyto dva parametry jsou na sobě přímo závislé, když stoupá MST, tak roste i objemová hmotnost. Izolace je vyráběna v mnoha podobách, přes rohože na pletivu, lamelové rohože až izolační pouzdra.

4.3.2. Izolace ze skelné vlny

Tento typ materiálu je měkčím typem izolací z minerální vlny. Objemová hmotnost je v rozsahu 10 – 30 avšak může být i 100 kg.m⁻³. Maximální provozní teplota je 250 °C. Z objemové hmotnosti [kg.m⁻³] je vidět, že tento typ izolace se bude volit pro nižší teplotní hladiny užití.

V příloze č. 1: Vlastnosti technických izolací [4] je uvedena tabulka s technickými parametry těchto typů izolací.

4.4. Izolace z pěnového skla

Pěnové sklo patří z hlediska pevnosti k nejlepším materiálům. Výroba je z křemičitého skla, jež se promíchá s koksem, a poté se obě složky zahřívají na teplotu kolem 1000 °C. Izolace umí odolávat velice nízkým teplotám až na hranici - 270 °C, ale i naopak teplotám vyšším do 430 °C. Z teplotního rozsahu je to velice flexibilní izolace. Objemová hmotnost je 120 – 200 kg.m⁻³. Jednou z největších výhod izolace je výborná teplotní roztažnost, která se téměř shoduje roztažnosti ocelového potrubí a izolace se tedy dobře přizpůsobí

chování potrubí. Díky struktuře buněk, ze kterých je pěnové sklo tvořeno může odolávat dlouhou dobu vodě popřípadě kondenzátu. Využití pěnového skla je výhodné na místech, kde dochází k teplotním šokům na potrubním vedení. [5]

4.5. Izolace z polyuretanové pěny

Výroba polyuretanových pěn je čistě chemickou reakcí dvou složek, které jsou složeny z organických látek a alkoholů. Díky možnostem chemie tyto pěny existují v mnoha technických variantách. Na tepelnou izolaci se užívají pěny s uzavřenými buňkami. Maximální provozní teplota je mezi 120 – 140 °C, ale naopak tuto formu izolace je možné použít do kryogenních teplot kolem - 200 °C. Objemová hmotnost závisí na velikosti buněk a pohybuje se v mezích 30 – 300 kg.m⁻³. Instalace se provádí lepením izolace přímo na povrch trubky. Mechanická odolnost u tohoto materiálu je na velice dobré úrovni a také protipožární odolnost je dobrá. Protipožární odolnosti se dosahuje přidáním retardérů hoření. Izolace PUR se nejčastěji používají pro výrobu předizolovaných trub, kde je pěnou vyplněn prostor mezi samotnou trubkou a chráničem potrubí [6]. Vlastnostmi PUR se využívá při zaizolování svarů kolem potrubí nebo armatur. Lze tento materiál použít i ve spojení s jinými izolačními materiály, např. s izolací z minerální vlny.

4.6. Izolace z polyetylenové pěny

Polyetylenové pěny jsou uměle vytvořeným materiálem. Maximální provozní teplota je okolo 100 °C a objemová hmotnost 35 – 50 kg.m⁻³. Reakcí na oheň patří PEF do nejhorších tříd. Nejčastější provedení je ve formě pouzder, která se na potrubí navlékají, tudíž použití je pro potrubí menších průměrů do 200 mm. Je tedy možné tuto izolaci použít ve vnitřních technických zařízeních, kde jsou nižší teploty potrubí, a nehrozí vznik požáru.

5. Aplikace technických izolací

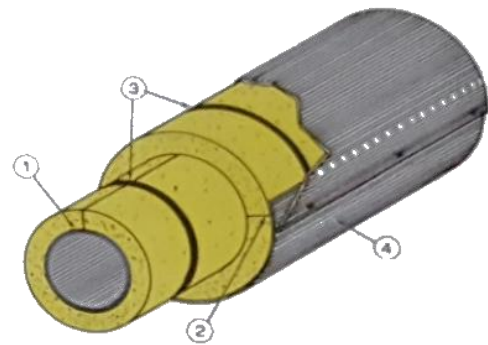
V předchozí kapitole je uvedeno komplexní rozdělení typů izolací dle různých vlastností. Tato kapitola popisuje opláštění izolace, dovolenou vzdálenost mezi potrubími a konstrukcemi a opěrné konstrukce potrubí.

Izolace rozvodů tepla a teplé vody menších průměrů se izolují pomocí izolačních pouzder s polepem hliníkovou fólií. Pouzdro je na podélném spoji opatřeno přesahem fólie se samolepící páskou pro dokonalé uzavření. Izolační pouzdra je vhodné po obvodě stáhnout hliníkovou páskou nebo omotat drátem. [3]

Potrubí větších průměrů se nejčastěji izolují lamelovými rohožemi. V případě výrobce Isover jde o produkty Orstech LSP (kamenná vlna) nebo ML-3 (skelná vlna), případně lze použít rohože na pletivu Orstech DP. Tabulky s parametry těchto tří produktů jsou uvedeny v příloze č. 2: Lamelový skružovatelný pás Orstech LSP Pyro [15], v příloze č. 3: rohož na pletivu Orstech DP 65 [7] a v příloze č. 1: Vlastnosti technických izolací [4]. Na obrázku 3 je naznačeno provedení vícevrstvé izolace. Povrchové úpravy izolací snižují tepelné ztráty sáláním. Při vyšších teplotách dopravovaného média mají tyto úpravy smysl.

Úpravy lze rozdělit:

- krytí materiálem s nízkoemisním povrchem
- nízkoemisní fólie
- nízkoemisní nátěry.



Obrázek 3: Vícevrstvá izolace [6]

5.1. Rohože na pletivu

Rohož se navíjí přímo na izolované potrubí. Čelní plochy rohoží musí být v těsném kontaktu, jelikož vzniklými mezerami by mohlo unikat teplo. V některých případech je třeba tlustší izolace. Používá se vícevrstvé provedení, kde se spáry přesazují o nejméně tři oka pletiva. Jednotlivé rohože se potom spojují vázacím drátem o minimálním průměru 0,7 mm. Je možný ještě jeden typ spojování a to je za pomoci drátěných háčků nebo pásek z nerezové oceli. [8]

5.2. Lamelové rohože

Užití těchto materiálů je hlavně na potrubí velkých průměrů. Díky vláknům kolmo uspořádaným k povrchu mají rohože vysokou pevnost v tlaku a umožňují přenos vzniklého zatížení na podpory konstrukce. V případě použití odpadají tepelné mosty, které jsou způsobované pomocnými konstrukcemi, které jsou nutné při používání rohoží na pletivu [3]. Nevýhodou je vyšší součinitel tepelné vodivosti při vyšších teplotách a z tohoto vyplývá, že je nutné použití vyšších tloušťek izolací. K uchycení slouží hliníkové pásky nebo vázací drát.

5.3. Potrubní izolační pouzdra

Izolační pouzdro má tvar dutého podélně děleného válce, který je vyroben z jednoho nebo více segmentů. Pouzdro obsahuje zámek zamezující tepelným ztrátám přes podélnou drážku. Povrch pouzdra je opatřen hliníkovou fólií vyztuženou mřížkou ze skelných vláken. Pro dokonalé uzavření pouzdra se používá na podélném spoji samolepící páska.

Izolační pouzdra jsou limitována svými rozměry, maximální vnitřní průměr je 273 mm a tloušťka 100 mm. Tloušťka pouzdra musí být zvolena tak, aby teplota na straně hliníkové fólie nepřesáhla 100 °C. V případě vystavení vyšším teplotám nad 150 °C může dojít k uvolňování pojiva. Nejvyšší provozní teplota je 620 °C. Mezi přednosti izolačních pouzder patří např. nízká tepelná vodivost, dobrá pohltivost zvuku.

5.4. Opláštění izolace

Pro použití na potrubí fosilních a jaderných elektráren se používají nejčastěji matrace s náplní se skelnými vlákny, z důvodů uvedených výše. Pro klasické elektrárny přicházejí v úvahu i rohože na pletivu a lamelové rohože. V dalších částech této diplomové práce se budu zabývat jen tepelnými izolacemi matracového typu s náplní skelnou vatou Izomer TT zašité do skleněné tkaniny, tedy izolacemi pro jaderné elektrárny v reaktorové části. U tohoto typu izolace musí být rohože vždy opláštěny nerezovým plechem v reaktorovně nebo hliníkovým plechem v ostatních prostorách.

Opláštění by mělo vyhovovat tepelné roztažnosti potrubí, neměly by tedy být spojeny napevno. Koeficient tepelné roztažnosti je více než dvakrát vyšší než u oceli, ale opláštění je oproti potrubí „studené“, tedy je třeba hlavně počítat s tepelnou roztažností potrubí. Například u potrubních mostů může docházet k poměrně velkým teplotním roztažnostem vlivem přírodních jevů. Povrchová teplota pláště je navyšována zářením slunce a naopak

zase ochlazována deštěm. Těmto nepříznivým účinkům se zabraňuje pohyblivými spoji. V tabulce 2 jsou uvedeny doporučené tloušťky plechů pro opláštění dle průměru potrubí.

Tabulka 2: Tloušťky plechů dle průměru potrubí

Obvod [mm]	Pozink [mm]	Nerez [mm]	Hliník [mm]
Pod 400	0,5	0,5	0,6
400 – 800	0,6	0,5	1
800 – 1200	0,7	0,6	1
1200 – 2000	1	0,8	1
Nad 2000	1	0,8	1,2

Při instalaci opláštění je třeba respektovat tok média a jeho směr. Vodorovné spoje by měly být po spádu potrubí nebo po směru větrů. V místech, v nichž by mohla voda zatékat do izolace, je zapotřebí udělat perforaci spodní hrany opláštění nebo vypouštěcí trubku.

5.4.1. Volba materiálu na povrchové úpravy izolací

Uvedené materiály a jejich technické specifikace jsou pro JE Mochovce. Tyto specifikace jsou poskytnuty firmou ŠKODA JS a.s.

- **izolace typu teplá neobsluhovatelná a studená neobsluhovatelná**

Jedná se o izolace, které jsou v neobsluhovaných místnostech. V tomto případě je vhodný nerezový plech třídy 17 s tl. 0,5 mm. Místnosti jsou definované přetlakem a maximální teplotou.

- **izolace typu teplá obsluhovatelná a studená obsluhovatelná**

Jedná se o izolace, které jsou v obsluhovaných místnostech. Zde se uvažuje venkovní dekontaminace teplou vodou, na povrchu izolace bude tedy použitý hliníkový plech.

- **izolace typu studená obsluhovatelná a studená neobsluhovatelná**

Jako parozábrana pro tyto izolace se používají hliníkové fólie. Lze použít i hliníkovou fólii s polyetylenovým nánosem. Spoje fólií je potřebné přelepit samolepicí hliníkovou páskou. Parozábrana chrání proti poškození rohož ze skelného vlákna.

5.4.2. Tloušťky plechu pro povrchovou úpravu izolací

Pro povrchovou úpravu tepelných izolací se používají následující plechy, které jsou v závislosti na obvodu izolace.

- **hliníkový plech**
 - plech tl. maximální 0,6 mm na potrubí a aparáty do obvodu izolace 50 cm
 - plech tl. 0,8 mm na potrubí a aparáty od obvodu izolace 50 cm do 100 cm
 - plech tl. 1,0 mm na potrubí a aparáty nad obvod izolace 100 cm
 - pouzdra snímatelné izolace Ferrotex na válcové části tl. 0,8 mm
 - čela potrubí jsou z izolace tl. 1,0 mm.
- **nerezový plech**
 - plech tl. 0,5 mm na potrubí a aparáty bez rozdílu obvodu
 - pouzdra snímatelné izolace Ferrotex na válcové části tl. 0,5 mm
 - čela potrubí tl. 0,5 mm.

5.4.3. Vyhotovení oplechování tepelných izolací

Plechy tepelných izolací, na které se vztahují technické podmínky, jsou zhotovené tak, že velmi dobře odolávají vlivům počasí. Odolávají i venkovním vlivům dekontaminačních činidel:

- při malé kontaminaci → kondenzát nebo vratná voda o teplotě 40, 60, 90 °C
- při větší kontaminaci → zásaditý 1-5 % NaOH (obsah chloridů cca 13 mg.l⁻¹), mezioplach a konečný oplach vodou
- při haváriích (sprchování) → roztok vody, kyselina boritá 12-16 g.kg⁻¹, draslík 0,1-2 g.kg⁻¹, hydrazin hydrát 100-150 mg.kg⁻¹.

5.4.4. Těsnění

Na zamezení pronikání dekontaminačních činidel oplechováním izolace a i se samotnou izolací, až na povrch izolované trubky musí být povrch tepelné izolace vyrobený z plechu vodotěsně. Zabraňuje se tímto korozi a znehodnocení izolace samotné.

V místech, kde je možný únik oleje z technických zařízení nebo u potrubí s možností vniknutí oleje do izolace je oplechování tzv. po vodě, všechny spoje a průniky budou utěsněné. Tyto požadavky musí být hlavně dodrženy tam, kde je v potrubí horké médium.

Příčné a podélné spoje oplechování se zhotovují vždy jako vodotěsné. Na utěsnění se používá těsnicí páska se strukturou uzavřených buněk na bázi polyuretanové pěnové hmoty. Tepelná odolnost pásky musí být v souladu s povrchovou teplotou izolace.

V místech, kde je potrubí zavěšeno ve vzduchu na nosnících je třeba otvory v izolaci utěsnit těsnícím tmelem s tepelnou odolností dle teploty konstrukce. Vodotěsné rozebíratelné spoje odnímatelných částí izolací je třeba zhotovit tak, že kryt v dělicích rovinách je utěsněný páskou nebo tmelem. V místech přechodu nosných elementů se používá tmel nebo těsnící páska.

5.5. Minimální vzdálenost mezi potrubím a konstrukcí

Téměř ve všech energetických provozech je velice málo místa. Potrubí jednotlivých zařízení je natěsnáno velice blízko u sebe a pro pozdější opravy je to veliký problém, který často způsobuje i případné odstavení zařízení a tím nárůst finančních ztrát.

Už při projektování potrubních tras je třeba brát v úvahu tloušťku používané izolace a dispozice daného objektu, ve kterém bude potrubí instalováno. Je nutné zajistit dostatečné odstupové vzdálenosti mezi sebou a potrubím od stěny. Tento odstup bývá minimálně 100 mm. Při nedodržení těchto vzdáleností se izolace obtížně instaluje a hrozí vytvoření zóny s nulovým proděním. Tím by se nepříznivě snížil vnější součinitel přestupu tepla a došlo by ke zvýšenému riziku popálení u rozvodů s vysokými teplotami a malou tloušťkou izolace [3]. V případě chladových izolací roste riziko kondenzace.

5.6. Pomocné konstrukce izolací

Firmou ŠKODA JS a.s. mi byly poskytnuty přímo požadavky na pomocné konstrukce na jaderné elektrárně Mochovce. V následujícím textu jsou uvedeny některé z požadavků.

V místech, kde to okolnosti vyžadují (úseky pevné nebo snímatelné izolace), kde může mít vliv ocelová konstrukce potrubí, může být na vodorovných a svislých potrubích použita pomocná konstrukce pro upevnění tepelných izolací. Typ a rozmístění konstrukce se navrhuje vždy ve vykonávacím projektu pro dané provedení. U izolací na svislých trubkách je potřeba zhotovit pomocnou konstrukci proti sesunutí izolace. V tomto případě se řeší osová vzdálenost pomocné konstrukce.

U vodorovného potrubí do \varnothing 500 mm se pomocná konstrukce nevyužívá, s překročením tohoto rozměru je už váha izolace znatelná, a proto je třeba jej podpořit pomocnou konstrukcí.

Pomocná konstrukce pro upevnění může být samonosná nebo napevno přivařená na izolovaný povrch. Konstrukce pro upevnění izolace a proti sesunutí bývá zhotovena z distančních kruhů se segmenty. Mezi konstrukcí a izolovaný povrch je zapotřebí pro odizolování konstrukce vložit izolační podložku ze skelné tkaniny nebo izolační rohože.

Materiál pomocné konstrukce může být z uhlíkaté nebo nerezové oceli. Samonosná pomocná konstrukce pro pevnou izolaci bývá zhotovena z pásové ocele a přivařených trnů. Materiál pomocné konstrukce musí být kompatibilní s materiálem izolovaného zařízení. Řešení, konstrukce izolace a metodika použitých materiálů musí vyhovovat teplotním deformacím zařízení a potrubí nabíhání a odstavení elektrárny. Izolace také zároveň musí odolávat vibracím příslušných zařízení a potrubí.

Na obrázku 4 je zobrazeno zavěšení potrubí za pomoci potrubního závěsu, přičemž objímka je kryta izolací. Obrázek 5 ukazuje izolování potrubí bez použití kotvicích trnů.



Obrázek 4: Potrubní závěs [3]



Obrázek 5: Izolace bez kotvení trny [3]

6. Vlastnosti izolací z minerálních vln

Každá izolace má různé technické a izolační vlastnosti. Tato kapitola se věnuje jejich nejdůležitějším vlastnostem. Mezi tyto vlastnosti patří nehořlavost, paropropustnost, hydrofobizace, bod tání, odpor proti proudění vzduchu, objemová hmotnost, nejvyšší provozní teplota, AS kvalita, životnost, ekologičnost a tepelná vodivost, které je věnována kapitola 7.

6.1. Reakce na oheň

Téměř všechny tyto materiály jsou nehořlavé, umějí odolávat vysokým teplotám a tím zabraňují šíření požáru dále. Izolace splňují požární třídu A1, A2. Při požárních zkouškách se izolační materiál vystavuje požáru v čase 15 – 20 minut a zkoumá se šíření plamene, rychlost vývinu kouře a tvorba plamenně hořících kapek.

6.2. Paropropustnost

Izolace z minerálních vláken mají nízký difuzní odpor, což je odpor proti průchodu vodních par vrstvou materiálu. Tímto je způsobeno volné odvětrávání vlhkosti z konstrukce. Vlhkost v izolačním materiálu zhoršuje tepelněizolační vlastnosti izolace. Vlhká izolace vede teplo asi 25x lépe než vzduch. Vlhká izolace neizoluje.

6.3. Hydrofobizace

Hydrofobizace neboli vodoodpudivost. Hydrofobizační prostředky jsou do izolačních hmot přidávány už při jejich výrobě. Hydrofobizace je vlastnost izolačního materiálu odpuzovat vodu. Způsobuje stečení vody z materiálu a zabraňuje vnikání vody do struktury izolace. Pro venkovní použití však nestačí pouze tato vlastnost a je nutné oplechování izolace.

6.4. Bod tání

Bod tání se nesmí zaměnit s nejvyšší provozní teplotou (MST). Tento bod je parametrem trvanlivosti izolace v případě požáru. Pro izolace z minerálních vln je bod tání vždy vyšší než 1000 °C a obvykle se pohybuje v rozmezí teplot 1200 – 1600 °C.

6.5. Odpor proti proudění vzduchu

Na tento parametr je v oblasti průmyslových izolací často opomíjen, ale je velmi podstatný. Čím vyšší je odpor, tím nižší je proudění vzduchu v izolačním materiálu. Nízká hodnota tedy ovlivňuje tepelně izolační vlastnosti materiálu. Je žádoucí minimalizovat odpor proti proudění vzduchu [$\text{kPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$].

6.6. Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je prospěšný parametr pro identifikaci izolace společně s MST a součinitelem tepelné vodivosti. Nemělo, by to ale být pravidlem aby se tento parametr používal jako základ pro hodnocení izolací. Izolace o různých objemových hmotnostech mohou mít stejné tepelně technicko - mechanické vlastnosti. Obecně neplatí, že čím vyšší objemová hmotnost, tím lepší a kvalitnější izolace.

6.7. Nejvyšší provozní teplota

Nejvyšší provozní teplota je zkráceně označována jako MST. Je to teplota, při které může být izolace trvale použita v provozních podmínkách, aniž by došlo ke zhoršení jejích vlastností. Těmito vlastnostmi se rozumí rozměrová stálost a tepelně mechanické vlastnosti. Se zvyšující se MST roste i objemová hmotnost. Tato teplota se zjišťuje dle zátěžových zkoušek dle normy EN 14 706. U jednotlivých izolací se tato teplota pohybuje v rozmezí mezi 250 – 700 °C. Je zapotřebí nezaměňovat tuto teplotu s teplotou tání. Není pravidlem, že izolaci lze použít na teplotu povrchu, která je uvedena v technickém listu, vždy je zapotřebí optimalizace.

6.8. AS kvalita

Koroze kovových povrchů je jedním z problémů izolací. Nejedná se o klasickou rez, ale o korozi materiálů z nerezové oceli. Vysoce legované oceli, které jsou legované chromem, niklem a molybdenem jsou velmi náchylné k mezikrystalické korozi, která je způsobena chloridovými ionty. Chloridy ve spojení s vodou napadají povrch kovu a tím vznikají trhliny v materiálu a u tepelných zařízení je tento jev umocněn právě teplotou. Se vzrůstající teplotou stoupá možnost koroze. Možností jak tento neblahý jev eliminovat je použít izolační materiál s malým obsahem chloridů. Minerální vlna, která se používá na izolaci zařízení z austenitické oceli, musí být tedy v AS kvalitě. Tedy obsahuje méně než 10 mg chloridových iontů v jednom kilogramu izolace.

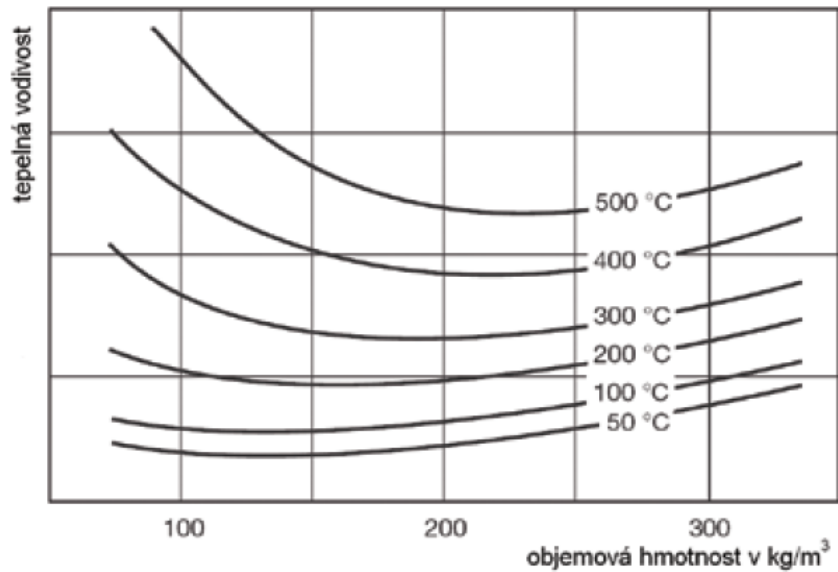
7. Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je nejdůležitějším parametrem izolačních materiálů v podobě součinitele tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Představuje schopnost daného materiálu vést teplo. Součinitel je dán tepelným tokem jehož jednotkou jsou watty, který projde materiálem o ploše 1 m^2 a tloušťce 1 metr. O materiálech s tepelněizolačními vlastnostmi lze hovořit, pokud je λ nižší než $0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tepelná vodivost je závislá na několika faktorech, které jsou popsány v dalších bodech této kapitoly. Určení správného součinitele tepelné vodivosti je stěžejním bodem pro návrh a správnou volbu izolace na daném zařízení.

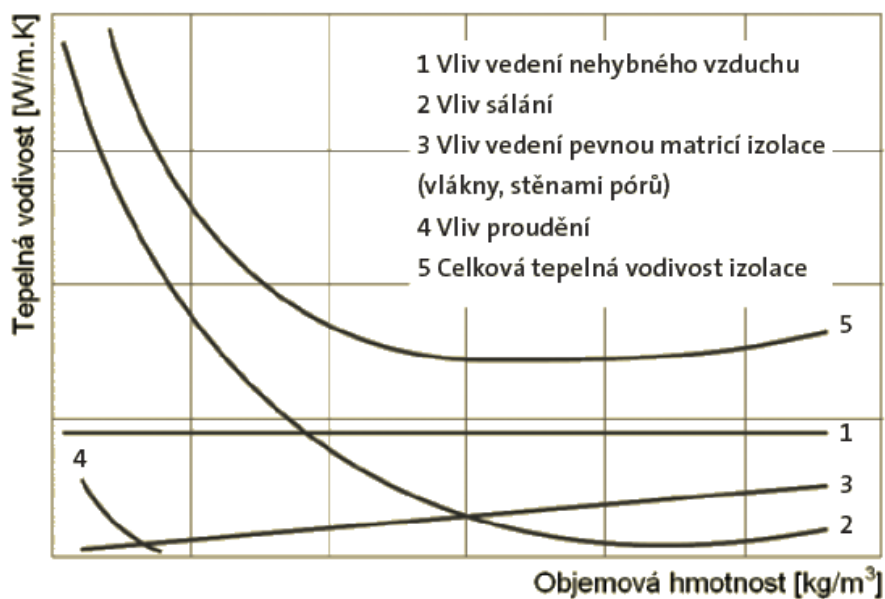
7.1. Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti

Látky, které jsou součástí každého izolačního materiálu lze rozdělit na tuhé substance a plyny. Obě tyto látky ovlivňují výsledné charakteristické chování izolací, dle vlastností pro ni charakteristickou. Plynný podíl látky s pórovitou, zrnitou nebo vláknitou strukturou je rozhodujícím faktorem, jež určuje nízkou tepelnou vodivost [3]. Zvýšení pevnosti nebo pružnosti způsobuje tuhá substance, která naopak nízkou hodnotu tepelné vodivosti zvyšuje. Lze obecně předpokládat, že čím vyšší objemová hmotnost izolačního materiálu, tím méně je tuhé, vodivé substance v materiálu a tím nižší tepelná vodivost. Toto tvrzení je rozdílné pro vysoké teploty a nízké teploty. V případě vysokých teplot se zvyšující se objemovou hmotností klesá tepelná vodivost z důvodu, že materiál má více vláken bránících přenosu tepla radiací. Naopak u nízkých teplot s rostoucí objemovou hmotností roste i tepelná vodivost, tohoto jevu se využívá hlavně ve stavebním průmyslu, kde jsou teploty na nižších úrovních.

V případě podrobného sledování jak se izolace chovají lze usoudit, že s klesající hodnotou objemové hmotnosti se tepelná vodivost do určité meze snižuje, dále však stoupá. Na grafu 1 a 2 jsou vykresleny dané závislosti. Graf 1 popisuje, zahrnuje do závislosti i teploty, přičemž pro parovody přicházejí v úvahu hlavně vyšší teploty okolo $300 - 400 \text{ }^\circ\text{C}$. V grafu 2 je nejzajímavější křivkou křivka 5, která ukazuje celkovou tepelnou vodivost izolace, která je pro další návrh důležitá.



Graf 1: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti a teplotě [3]

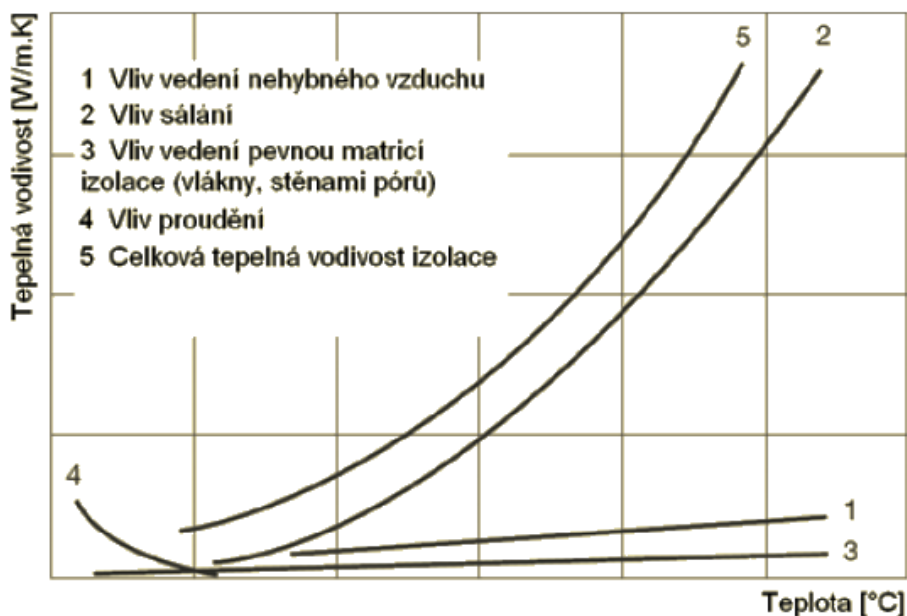


Graf 2: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti [3]

7.2. Závislost tepelné vodivosti na teplotě

Tepelná vodivost je kromě objemové hmotnosti závislá i na teplotě, jak je znázorněno v grafu 3. Lze říci, že s teplotou tepelná vodivost roste. Díky pórovité struktuře izolační látky se projevuje vliv radiace. Zde u tepelné vodivosti záleží, jak velké jsou póry, neboli jaký počet mezistěn se staví na odpor tepelnému prostupu [3]. Při vyšších teplotách je závislost vodivosti na teplotě velmi progresivní. Do návrhového výpočtu je třeba dosazovat střední teplotu. Střední teplota je aritmetický průměr povrchové teploty potrubí

a povrchové teploty izolace. U ocelového potrubí je jeho povrchová teplota rovna teplotě dopravovaného média. Trochu rozdílný přístup se volí v případě návrhu izolací pro rozvody chladu a vzduchotechniky.



Graf 3: Závislost tepelné vodivosti na teplotě [9]

7.3. Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti

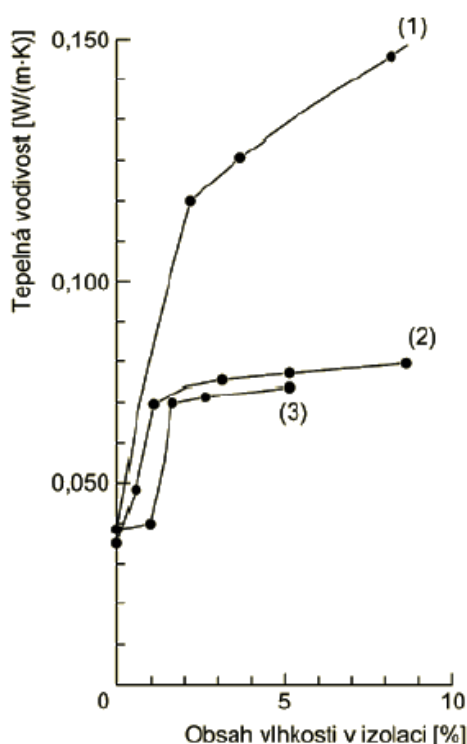
Hlavní bází izolačních látek je uzavření plynu do pórů nebo vytvoření prostorové struktury, která uzavírá objem plynu, ale přitom nedovolí jeho pohyb. Tedy zamezuje proudění uvnitř izolační struktury. V podobě plynu je nejčastěji vzduch s tepelnou vodivostí pro 10 °C $\lambda = 0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, který zaujímá u kvalitních izolací 92 – 96 % a tuhá substance s tepelnou vodivostí 50x větší, která zaujímá zbytek prostoru izolační látky [3]. Jeden z omylů u charakteristik izolace je uvádět její tepelnou vodivost pro 10 °C. U průmyslových izolací se pohybujeme v oblasti mnohem vyšších teplot.

Forma tuhé substance může být různá. Může to být forma uzavřených pórů nebo sypkého, vláknitého prostředí. Čím je méně substance v prostoru, tím je účinnost izolací lepší. Tedy čím jsou stěny pórů tenčí nebo čím je vzájemný dotyk vláken u minerálních plstí méně častý a pouze bodový [9]. Když dojde k narušení těchto podmínek, má to neblahý vliv na tepelnou vodivost látky.

Izolační látky jsou často využívány na místech, kde parciální tlaky [Pa], relativní vlhkost vzduchu [%] a povrchové napětí [V] látek mohou vyvolat kondenzaci vody v daném místě. Velikost kondenzace může vytvořit malé můstky v místech dotyku vláken. V krajním případě voda vyplní větší počet dutin a tím dojde ke zhoršení tepelněizolačních vlastností izolace. [9]

Pro porovnání, tepelná vodivost vody je $\lambda = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, to je přibližně 25x více, než tepelná vodivost vzduchu při stejné teplotě. Toto je důvodem toho, že vlhká izolace neizoluje. Lze říci, že 1 % navýšení vlhkosti má za následek zvýšení tepelné vodivosti o 4 – 6 %. Na uvedeném grafu 4 jsou uvedeny změny tepelných vodivostí. Křivka 1 je skleněná vlna ($92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $24 \text{ }^\circ\text{C}$), křivka 2 kamenná vlna ($78 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $10 \text{ }^\circ\text{C}$) a křivka 3 skleněná vlna ($62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $10 \text{ }^\circ\text{C}$). Jevu popsanému v této podkapitole je zapotřebí předejít opatřeními, která jsou popsána v kapitolách 5.3 a 6.3.

Největším nepřítelem izolační techniky je voda.

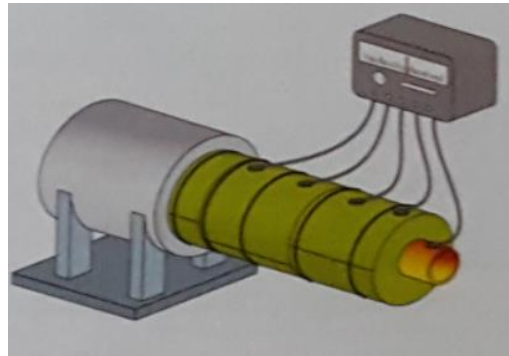


Graf 4: Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti [3]

7.4. Tepelná vodivost měřená

Tepelná vodivost měřená je látková vlastnost zjištěná přímo na vzorcích izolace, které jsou připraveny ve stejné tvaru a se stejnou vlhkostí jako budou užity v praxi. Měření probíhá dle přesně stanoveného postupu dle ČSN EN ISO 8497 pro potrubní izolace. Výsledkem je součinitel tepelné vodivosti, jehož platnost je jen pro měřený vzorek a podmínky panující v laboratorním prostředí. Pro přiblížení realitě je dobré udělat stejné měření na více vzorcích (minimálně třech). Nejčastějším omylem je srovnávat naměřenou vodivost s deklarovanou. Dalším nešvarem je srovnávat naměřené vodivosti na desce s hodnotami naměřenými na potrubí. Hodnota je stanovena výrobcem dané izolace.

Na uvedeném obrázku 6 je uvedeno schéma měření vodivosti na potrubí pomocí topného pouzdra.



Obrázek 6: Měření pomocí metody topného pouzdra [3]

7.5. Tepelná vodivost deklarovaná

Deklarovaná tepelná vodivost je to limitní křivka stanovená dle ČSN EN ISO 13787. Představuje horní mez pro všechny naměřené hodnoty. Ve srovnání s naměřenou hodnotou vodivosti je obvyklá bezpečnost 5 – 15 %. Pro používání deklarovaných vodivostí je nutné uvádět celý rozsah tepelné vodivosti od 50 °C do maximální provozní teploty. Rozdíl mezi naměřenou a deklarovanou hodnotou vodivosti je velice malý. Přičemž deklarovaná hodnota je vždy vyšší. S touto hodnotou se pracuje i ve výpočtech. V případě provedení kontrolního měření musí vždy vyjít lepší tepelná vodivost než je ta deklarovaná. Tuto hodnotu stanovuje výrobce izolace. [3]

7.6. Tepelná vodivost návrhová

Určení tepelné vodivosti návrhové pro výpočty izolačních systémů je závislé na mnoha ovlivňujících faktorech. Základním parametrem pro stanovení návrhové hodnoty je deklarovaná hodnota tepelné vodivosti.

Mezi faktory, které ovlivňují návrhovou vodivost, patří:

- nelineární závislost součinitele tepelné vodivosti v rozsahu teplot, ve kterých lze izolant použít $F_{\Delta\theta}$
- vliv vlhkosti v izolaci (průměrný obsah vlhkosti – definovaný teplotou a relativní vlhkostí) F_m
- vliv stárnutí dle použití (pokud není zahrnut v deklarované hodnotě) F_a
- stlačení použité v aplikaci F_c
- vliv tloušťky F_d
- vliv vedení tepla v materiálu F_e
- vliv otevřených spár F_j
- tepelné mosty $\Delta\lambda$.

Určení návrhové hodnoty součinitele tepelné vodivosti:

$$\lambda = \lambda_d \cdot F + \Delta\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7.1)$$

kde:

$\Delta\lambda$ se zjistí jako přídavná hodnota pro tepelné mosty dle článku 7.9., normy ČSN EN ISO 23993, celkový převodní součinitel F lze určit dle rovnice (7.2).

$$F = F_{\Delta\theta} \cdot F_m \cdot F_a \cdot F_c \cdot F_e \cdot F_d \cdot F_j [-] \quad (7.2)$$

V některých případech se hodnota součinitele určuje složitě, v tomto případě se dělá „odhad“, tak aby výsledek výpočtu byl na straně bezpečnosti, to znamená, aby vypočítaný prostup tepla byl vyšší než skutečný. Správný postup je tedy z deklarované hodnoty tepelné vodivosti určit hodnotu návrhovou a poté určit optimální tloušťku izolace. Je zapotřebí brát v úvahu vliv tepelných mostů, nárůst tepelné ztráty.

V tabulce 3 jsou uvedeny příklady převodních součinitelů pro rohož na pletivu a lamelovou rohož. V Příloha č. 4: Převodní součinitele jsou uvedeny všechny hodnoty převodních součinitelů, včetně izolačních pouzder.

Tabulka 3: Převodní součinitele dle typu materiálu

Izolační materiál	Převodní součinitele [-]							
	$F_{\Delta\theta}$	F_m	F_a	F_C	F_c	F_d	F_j	F
Rohož na pletivu	1,05	1,0	1,0	0,94	1,0	1,01	1,1	1,10
Lamelová rohož	1,08	1,0	1,0	0,90	1,0	1,01	1,1	1,08

7.7. Možnost korekce tepelné vodivosti na teplotu

Při řešení tepelných izolací je rozhodující hodnota součinitele tepelné vodivosti. Zpravidla se za výchozí pro volbu tohoto součinitele považuje aritmetický průměr povrchových teplot vrstvy. Toto zjednodušení nemá jednoznačné opodstatnění. Chyby při výpočtu tímto postupem mohou dosahovat i desítky procent, a proto v tomto bodu bude nastíněna tato problematika.

7.7.1. Vztahy pro výpočet

Pro nastínění této problematiky je třeba si uvést základní vztahy. Pro válcovou stěnu je výchozím vztahem pro vedení tepla jednotkové délky následující rovnice (7.3).

$$\dot{q} = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dr} [W \cdot m^{-1}] \quad (7.3)$$

kde:

\dot{q} [$W \cdot m^{-1}$] je tepelný tok

t [$^{\circ}C$] je teplota

r [m] je poloměr

λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je tepelná vodivost tělesa.

Tepelná vodivost tepelně izolačních výrobků je zvlášť závislá na teplotě. Nejčastěji je určována pomocí zařízení, které umožňuje přisouzení látkové vlastnosti vzorku jedné určité teplotě t . Pro přesnější teplotní výpočty a širší teplotní rozsahy se určuje dle polynomu (7.4).

$$\lambda = a + b \cdot t + c \cdot t^2 + d \cdot t^3 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7.4)$$

kde:

t [°C] je určující teplota

a, b, c, d jsou materiálové konstanty.

Při integraci proměnné λ ze vztahu (7.4) se zavádí střední integrovaná hodnota λ_{si} . Tento postup je náročný, a proto je možné zjednodušení náhradou λ_{si} hodnotou λ_{sa} , která odpovídá aritmetickému průměru obou povrchových teplot sledované vrstvy izolace. Průměrná teplota se určí dle následujícího vztahu a upravuje se o korekci C_o .

$$t_{sa} = \frac{t_x + t_y}{2} [^{\circ}C] \quad (7.5)$$

Pro posouzení významu korekce C_o , se provádí výpočet jako poměr hodnot λ_{si} a λ_{sa} dle (7.5) a integrace (7.4). Teplota jednoho povrchu je stálá $t_2 = 20$ °C a druhá teplota t_1 se mění např. v rozsahu 20 – 600 °C, což odpovídá teplotám na průmyslových instalacích. Výsledný vztah pro korekci C_o je vztažen na vyšší z obou povrchových teplot tedy na t_1 . Teplota t_1 je takto zvolena z důvodu, že právě tato teplota má hlavní vliv na velikost korekce. Výslednou korekci C_o je možno vyjádřit např. vztahem (7.6). [10]

$$C_o = \frac{\lambda_{si}}{\lambda_{sa}} = 1 + 0,000227 \cdot (t_1 - 50) [-] \quad (7.6)$$

V oblastech s nižší teplotou je význam korekce C_o malý. V tabulce 4 je uvedeno několik číselných hodnot tohoto součinitele pro různé teploty. Pro informativní výpočet je přijatelné používat hodnotu tepelné vodivosti bez korekce, tedy tepelnou vodivost odpovídající aritmetickému průměru povrchových teplot izolační vrstvy. V oblasti energetiky však není možné zanedbat vliv korekce a tedy nutné při výpočtech s tímto faktem počítat.

Tabulka 4: Korekce C_o pro dané teploty [10]

t_1 [°C]	150	300	450	600
C_o	1,022	1,057	1,091	1,125

Z vyhodnocení korekčních hodnot je možné usoudit, že nepřesnost konečného výsledku je mezi 5 – 19 %. V oblasti nízkých teplot dosahuje korekce 5 %, zatímco v oblasti vysokých teplot může představovat odchylku až 19 % od vodivosti odvozené od aritmetického průměru povrchových teplot stěny. Velikost korekce C_o nezávisí přímo na tloušťce izolační vrstvy, ale je ovlivněna hodnotami b , c , d dle (7.4).

Pro případ určení součinitele tepelné vodivosti pro válcovou vrstvu se používá měřicí vyhřívaná trubka. Na trubce nelze regulovat obě povrchové teploty vzorku t_1 a t_2 , ale pouze jednu a to teplotu trubky t_1 . Vnější teplota povrchu trubky t_2 se přizpůsobí příkonu měřeného úseku trubky a okrajovým podmínkám při daném měření.

Výpočet aritmetického průměru povrchových teplot t_{sa} je dle vzorce (7.7). Z následujícího vztahu jednoznačně vyplývá, že použití aritmetického průměru povrchových teplot není zcela jednoznačné.

$$t_{sa} = 0,5 \cdot [(t_1 - \Delta t) + (t_2 - \Delta t)] = konst. [^{\circ}C] \quad (7.7)$$

kde:

Δt [$^{\circ}C$] může mít libovolnou velikost.

Vyjádření tepelně izolačních vlastností záleží na principu měření. V případě měření na Nusseltově kouli je možné trojí vyjádření tepelně izolačních vlastností. Dle ČSN EN ISO 8497 je tepelná vodivost definována takto dle (7.8).

$$\lambda = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{(t_1 - t_2)} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (7.8)$$

kde:

\dot{q} [W] je tepelný tok

d_1, d_2 [m] je vnitřní a vnější průměr izolace potrubí

L [m] je délka izolovaného úseku potrubí

t_1, t_2 [$^{\circ}C$] je teplota měřicí trubky a vnějšího povrchu izolace.

Při řešení běžných technických výpočtu se tato skutečnost neuvažuje. V následujícím bodě je uveden příklad mezi zjednodušeným výpočtem a výpočtem s korekcí.

7.7.2. Příklad chybného zjednodušení výpočtu [10]

Předmětem příkladu je určení tepelného toku válcovou stěnou při daných podmínkách:

- tloušťka stěny $s = 100$ [mm]
- vnitřní poloměr $r_1 = 30$ [mm]
- vnější poloměr $r_2 = r_1 + s$ [mm]
- teplota vnitřního povrchu $t_1 = 620$ [°C]
- teplota vnějšího povrchu $t_2 = 20$ [°C]
- součinitel tepelné vodivosti pro pouzdra z MV o objemové hmotnosti $70 - 90 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ dle [11].

$$\lambda' = 0,0338 + 1,173 \cdot 10^{-4} \cdot t_{sa} + 7,545 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sa}^2 + 7,11 \cdot 10^{-10} \cdot t_{sa}^3 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (7.9)$$

Pro výpočet se použije rovnice (7.9), součinitel tepelné vodivosti bude použita hodnota platná pro aritmetický průměr obou povrchových teplot vrstvy $t_{sa} = 320$ °C.

$$\dot{q} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda'_{320} \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 273,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \quad (7.10)$$

Ke stejnému tepelnému toku musí dojít u jakékoliv vrstvy libovolné tloušťky, která je částí původní válcové vrstvy. Následně se zadaná vrstva rozdělí na dílčí vrstvy s_i . Tloušťka jednotlivých dílčích vrstev není konstantní, ale rozdíl teplot obou povrchů je konstantní $\Delta t = 60$ K. Sečtením tlouštěk jednotlivých vrstev 1 až 10 se dospěje k celkové tloušťce izolace $\sum s_i = 137,2$ mm a to při celkovém teplotním rozdílu 600 K a tepelném toku $273,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$.

Oba výsledky jsou velmi vzdálené. Chyba je zde způsobena zavedením nesprávné hodnoty součinitele λ . Tedy k chybě došlo záměnou tepelné vodivosti λ_{sa} za střední integrovanou hodnotu tepelné vodivosti λ_{si} .

Výše uvedený vzorový příklad ukazuje jak je důležitá správná volba součinitele tepelné vodivosti pro správný návrh tloušťky izolace. Je tedy vhodné používat korekční

součinitel C_λ . Pokud se totiž ve výše uvedeném příkladu tepelná vodivost λ'_{320} násobí číslem $C_\lambda = 1,173$, pak dávají oba početní postupy stejný výsledek. Tepelnému toku $q = 273,9 \text{ W.m}^{-1}$ odpovídá pro zadané povrchové teploty tloušťka izolace 137,2 mm nikoliv 100 mm. Vrstvou o tloušťce 100 mm může protékat pouze tepelný tok o velikosti 236 W.m^{-1} .

7.7.3. Závěr

Při vyšších nárocích na správnost výsledku a správnou tloušťku izolace je možné zavádět do výpočtů střední integrovanou hodnotu tepelné vodivosti pro sledovaný obor teplot, nebo náhradu tohoto postupu vhodnou korekcí, což je jediná možnost pro vrstvy válcového typu.

Zásady pro válcové vrstvy:

- průmyslové izolace jsou vystaveny teplotám v rozsahu 20 – 600 °C, zde je tedy stanovení a uplatnění korekce žádoucí. Pro velikost korekce je třeba rozlišit dvě oblasti:
 - teplota t_1 je nižší než 320 °C a tedy velikost korekce je asi 5 %, pokud je to přípustné, lze v tomto případě použít hodnotu součinitele tepelné vodivosti, která odpovídá aritmetickému průměru povrchových teplot vrstvy.
 - při vyšších teplotách t_1 je třeba vždy zavádět korekci součinitele tepelné vodivosti.
- teplota vnějšího povrchu izolační vrstvy potrubí neovlivní výši korekce pro velmi přesné výpočty, je nutné určit velikost korekce přesně pro daný případ, v případě příkladu v kapitole 7.7.2 byla nutnost korekce tepelné vodivosti o 17 %.

8. Parametry ovlivňující návrh tloušťky izolací

O mnoha parametrech, které ovlivňují zásadně návrh izolací, je pojednáno v předchozích kapitolách. Tato kapitola pojednává o dalších vlastnostech jako emisivita povrchu, měrná tepelná kapacita, relativní vlhkost vzduchu, teplota rosného bodu. Posledním bodem je ekonomická tloušťka izolace a její správná volba.

8.1. Emisivita povrchu

Zářivá energie je energií elektromagnetického vlnění o různých vlnových délkách. Těleso, na které dopadá zářivá energie, může část této energie pohltit, odrazit a propustit. K výpočtům se používá součinitel emisivity ε [-]. Tento součinitel je poměrem energie vysálané tělesem k energii, kterou by za stejné teploty vysálalo dokonale černé těleso. Emisní součinitel kovů je téměř úměrný termodynamické teplotě a je závislý na vlastnostech sálajícího povrchu. Čím je povrch drsnější, tím je vyšší součinitel ε .

V příloze č. 5: Emisivita pro různé materiály pokrytí tepelné izolace jsou uvedeny součinitele ε pro různé kovové materiály. Většina nekovových materiálů má emisivitu kolem 0,94. Řešení součinitele má u potrubí význam v opláštění izolace, jak je popsáno v kapitole 5.3.

8.2. Měrná tepelná kapacita

Vyjadřuje množství tepla, které je nutné pro zvýšení teploty 1 kg materiálu o 1 K. Při konstantním tlaku má označení C_p [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] a při konstantním objemu C_v [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]. Protože jde ale v energetice zpravidla o statické děje (změna teploty je zanedbatelná) není třeba měrnou tepelnou kapacitu izolace zohledňovat. Pouze při měření tepelných vlastností je třeba toto zohlednit.

8.3. Relativní vlhkost vzduchu

Je definována jako poměr absolutní vlhkosti k její maximální hodnotě při stejné teplotě. Její hodnota se určuje vlasovým vlhkoměrem nebo rosným psychrometrem. Relativní vlhkost φ [-] závisí na teplotě. Za konstantního obsahu vodní páry ve vzduchu a s klesající teplotou se relativní vlhkost zvyšuje. Proto jej třeba tento parametr uvažovat při návrhu izolace pro zimní období.

$$\varphi = \left(\frac{\rho_p}{\rho_p''} \right)_t [-] \quad (8.11)$$

kde:

ρ_p [kg.m⁻³] je absolutní vlhkost

ρ_p'' [kg.m⁻³] je absolutní vlhkost maximální.

8.4. Teplota rosného bodu

Teplota rosného bodu je nepřímou charakteristikou vlhkosti vzduchu. Když se začne vlhký vzduch izobaricky ochlazovat, klesá teplota, avšak tlak ani měrná vlhkost vlhkého vzduchu se nemění a relativní vlhkost φ roste. Maximální hodnota $\varphi = 1$ je dosažena v rosném bodě. Rosný bod leží v průsečíku izobary a horní mezní křivky vody. Tudiž teplota rosného bodu je teplota, na níž je nutné vlhký vzduch izobaricky ochladit, aby se stal nasyceným [12]. Je určována pomocí rosného vlhkoměru.

8.5. Ekonomická tloušťka izolace

Při návrhu každého zařízení hraje roli také ekonomika zařízení. Větší tloušťka izolace sice snižuje tepelné ztráty potrubí, a tím s nimi spojené náklady, ale na druhou stranu zvyšuje cenu izolačního materiálu. Závislost ceny izolace na její tloušťce není lineární funkcí, protože při silnější izolaci se cena izolace zvyšuje rychleji než snižování nákladů na tepelné ztráty. Nejekonomičtější a nejchopárnější tloušťka izolace je, když součet nákladů na tepelné ztráty a cena izolace za dané období je co nejnižší. [13]

Roční náklady na tepelné ztráty:

$$N_t = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot Q \cdot C_e \cdot \tau [K\check{c} \cdot m^{-2} \cdot rok^{-1}] \quad (8.12)$$

kde:

Q [W.m⁻²] jsou tepelné ztráty potrubí

C_e [Kč.GJ⁻¹] je cena energie

τ [h.rok⁻¹] je provozní doba za rok.

Roční cena izolace:

$$N_I = \frac{C_I}{z} [K\check{c} \cdot m^{-2} \cdot rok^{-1}] \quad (8.13)$$

kde:

C_I [Kč.m⁻²] je cena instalované izolace

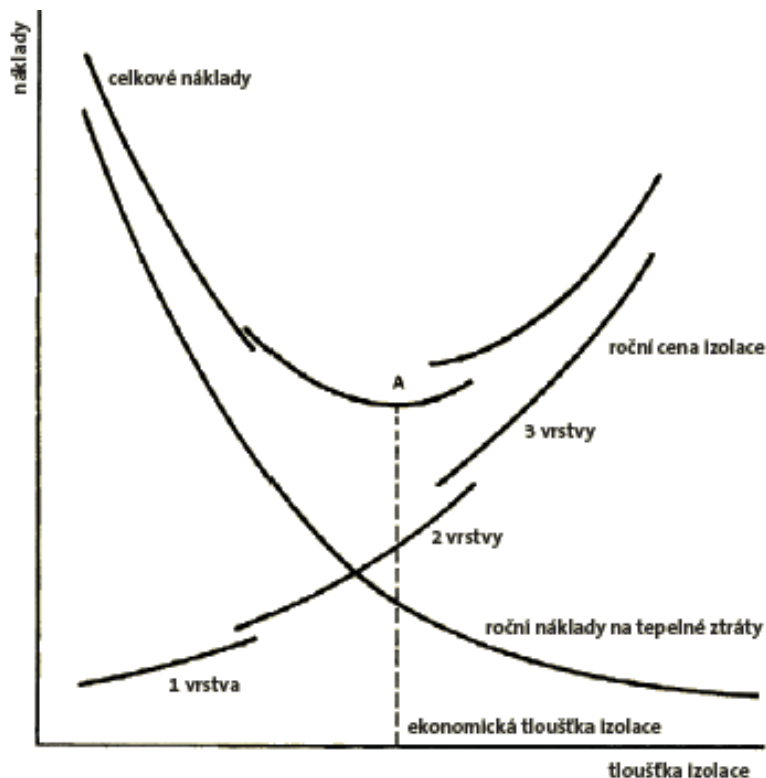
z [h.rok⁻¹] je doba životnosti izolace.

Celkové náklady:

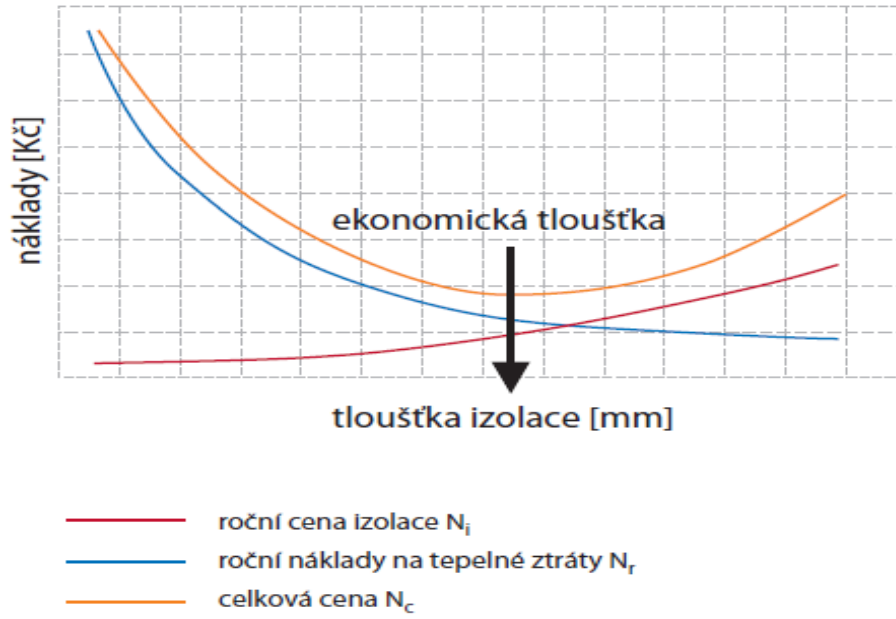
$$N_c = N_t + N_I \text{ [Kč} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (8.14)$$

Na grafu 5 je znázorněna závislost nákladů na tloušťce izolace pro vícevrstvou izolaci. V grafu 6 je také znázorněna ekonomická tloušťka izolace, jsou zde naznačeny průběhy křivek pro roční cenu izolace a roční náklady na tepelné ztráty a celková cena.

Určení optimální tloušťky izolace v závislosti na správné ekonomice je velice složitou úlohou, do které může vstoupit mnoho dalších proměnných. Volba menší tloušťky izolace představuje okamžitou úsporu investic, větší tloušťka znamená dlouhodobější úspory za ušetřenou energii, která je v přepravovaném médiu. V dnešní době neustálého snižování skleníkových plynů, vyšší tloušťka izolace přispívá k ekologizaci celého systému.



Graf 5: Vliv nákladů na tloušťce izolace [3]



Graf 6: Ekonomická tloušťka izolace [3]

9. Metodika výpočtů tepelných izolací

V této kapitole je popsán schematický postup výpočtů tepelných izolací. Vstupem pro výpočty jsou typ média, rozměr potrubí, poloha potrubí, teplota okolního vzduchu, dovolená povrchová teplota, rychlost proudění vzduchu kolem izolace a teplototechnické parametry tepelné izolace.

Média mohou být voda, pára na mezi sytosti, přehřátá pára a jsou charakterizovány teplotou a tlakem. Rozměr potrubí je určený vnějším průměrem DN a tloušťkou stěny trubky. Teplota okolního vzduchu bývá v rozmezí od 5 do 60 °C a dovolená povrchová teplota izolace 25 °C, 45 °C nebo 60 °C – podle typu prostoru (jeho obslužnosti).

Výsledkem výpočtů je potřebná tloušťka tepelné izolace, tepelná ztráta na 1 m délky potrubí, hmotnost tepelné izolace na 1 m délky potrubí včetně krycího plechu a kotevní konstrukce izolace a zpětná kontrola povrchové teploty pokrytí izolace.

9.1. Bezrozměrná kritéria pro potřeby stanovení součinitele přestupu tepla

V určování bezrozměrných kritérií hraje hlavní roli, zda jde o konvekci nucenou či volnou. V případě, že je trubka umístěná ve vnitřních prostorách jde vždy o laminární proudění, je tedy $Re < 2500$ a naopak při umístění trubky v prostorách vnějších jde o turbulentní proudění, které ovlivňuje hlavně rychlost proudění vzduchu.

9.1.1. Nucená konvekce

U nucené konvekce platí, že je funkcí Reynoldsova a Prandtlova čísla. Reynoldsovo číslo se určí dle:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} [-] \quad (9.15)$$

kde:

d [m] je charakteristický rozměr

v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost proudění vzduchu

ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] kinematická viskozita vzduchu.

Jako charakteristický rozměr je zde brán vnější průměr potrubí včetně tloušťky tepelné izolace.

Prandtlovo číslo vyjadřuje míru podobnosti mezi teplotním a rychlostním polem a určí se dle:

$$Pr = \frac{v \cdot C_p \cdot \rho}{\lambda} [-] \quad (9.16)$$

kde:

ρ [kg.m⁻³] je hustota vzduchu při dané teplotě

C_p [kJ.kg⁻¹.K⁻¹] měrná tepelná kapacita vzduchu při dané teplotě

λ [W.m⁻¹.K⁻¹] měrná tepelná vodivost vzduchu při dané teplotě.

Výsledné Nusseltovo číslo je funkcí obou těchto bezrozměrných kritérií (9.15), (9.16) a určí se dle kritériální rovnice, která má následující tvar:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^m [-] \quad (9.17)$$

kde:

c [-] je charakteristické číslo dle platnosti Re a Pr

n , m [-] jsou mocnitéle dle platností Re a Pr .

9.1.2. Volná konvekce

Pro volnou konvekci platí, že je funkcí Prandtlova a Grashofova čísla. Prandtlovo číslo se určí stejně jako u nucené konvekce dle rovnice (9.16). Grashofovo číslo lze určit dle:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot L^3}{\nu^2} [-] \quad (9.18)$$

kde:

g [m².s⁻¹] je gravitační zrychlení (9,81 m².s⁻¹)

β [K⁻¹] je součinitel objemové roztažnosti, lze určit jako $(t_{\text{pokrytí}} - t_{\text{okolí}})/2$

L [m] je průměr potrubí včetně tloušťky izolace

Δt [°C] rozdíl teploty pokrytí a teploty okolí.

Výsledné Nusseltovo číslo lze určit dle:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n [-] \quad (9.19)$$

kde:

$c [-]$ je charakteristické číslo dle platnosti Gr a Pr

$n [-]$ je mocnitel dle platnosti Gr a Pr .

9.2. Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla α se určí dle Nusseltova čísla, které je definováno kritériálními rovnicemi dle daného typu proudění a zadaných okrajových podmínek. Výsledný součinitel lze určit dle:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (9.20)$$

kde:

$Nu [-]$ je Nusseltovo číslo určené dle dané kritériální rovnice

$\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je součinitel vedení tepla vzduchu

$d [m]$ je průměr potrubí včetně izolace.

U výpočtu průmyslových tepelných izolací může tento součinitel nabývat hodnot:

- volná konvekce – 3 až 25 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
- nucená konvekce – 10 až 200 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

9.3. Součinitel tepelné vodivosti

Z materiálových listů dané tepelné izolace se určí deklarovaná tepelná vodivost. Tato vodivost projde korekcí dle rovnice (7.2) za pomoci korekčních součinitelů dle tabulky 3. Výsledkem je návrhový součinitel tepelné vodivosti (7.1), který se poté používá do všech dalších výpočtů. Deklarovaná hodnota tepelné vodivosti se určuje pro střední teplotu, kterou lze určit dle rovnice (7.5).

9.4. Určení tloušťky tepelné izolace pro limitovanou povrchovou teplotu

Tento výpočet je iterační a je založen na rovnosti tepelného toku izolací. Tento tepelný tok lze určit dle:

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \lambda}{\ln \frac{d_e}{d_i}} \cdot (t_i - t'_e) = d_e \cdot \alpha_e \cdot (t'_e - t_e) [W \cdot m^{-1}] \quad (9.21)$$

kde:

$\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ je součinitel tepelné vodivosti

$d_e [m]$ je průměr trubky včetně izolace

$d_i [m]$ je vnitřní průměr trubky

$t_i [^{\circ}C]$ je teplota média

$t_e [^{\circ}C]$ je teplota okolí

$t'_e [^{\circ}C]$ je teplota pokrytí izolace

$\alpha_e [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ je součinitel přestupu tepla určený dle (9.20).

Pro určení výsledné tloušťky izolace se zavede.

$$F(d_e) = d_e \cdot \ln \frac{d_e}{d_i} = \frac{2 \cdot (t_i - t'_e) \cdot \lambda}{\alpha_e \cdot (t'_e - t_e)} [m] \quad (9.22)$$

Z tohoto výpočtu vyjde předběžná funkce $d_e [m]$ pro určení první předběžné tloušťky izolace. Tato předběžná tloušťka se určí pro zjednodušení válcové stěny na stěnu rovinnou dle:

$$\delta = \frac{\lambda}{\alpha_e} \cdot \frac{(t_i - t'_e)}{(t'_e - t_e)} [m] \quad (9.23)$$

Další postup je iterační a je snaha se dostat co nejlíže číslu dle vzorce (9.22) a vyrovnat tepelné toky dle (9.21). Po vyrovnání tepelných toků lze výslednou tloušťku tepelné izolace považovat za konečnou.

9.4.1. Kontrola povrchové teploty

Celý výpočet je nastaven na požadovanou teplotu pokrytí izolace. Vypočtená tloušťka izolace musí být taková, aby nebyla teplota pokrytí vyšší než teplota dovolená. [14] Naopak v případě příliš nízké zpětné teploty pokrytí dochází k předimenzování tloušťky izolace a tedy i ke zbytečně velkým investičním nákladům a velkému zatížení nosné konstrukce. Zpětná kontrola se provádí dle tepelného odporu R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$], dle následujícího vztahu:

$$q = \frac{\pi \cdot \Delta t}{R} [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (9.24)$$

Tepelný tok je určen pro vypočtenou tloušťku izolace δ [m] dle (9.23). Koeficient A je dán:

$$A = \frac{\Delta t}{R} [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (9.25)$$

kde:

Δt [$^{\circ}\text{C}$] je rozdíl teploty média a teploty okolí.

Přírůstek teploty je vyjádřen pomocí koeficientu A a tepelného odporu R . Tento přírůstek je určen:

$$\Delta t_e'' = A \cdot R_{te} [\text{C}] \quad (9.26)$$

Výsledná teplota pokrytí je tedy součtem rovnice (9.26) a teploty okolí.

9.5. Tepelný tok tepelnou izolací

Tepelné ztráty potrubí jsou dány prostupem tepla z teplosměnné látky přes stěnu potrubí a tepelnou izolaci do okolního prostředí, zpravidla vzduchu. Vztah pro výpočet tepelného toku lze zjednodušit. Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně α_u [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] a součinitel tepelné vodivosti materiálu λ_{tr} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] potrubí jsou oproti součinitelům na straně izolace řádově větší - 10^2 až 10^4 krát. Proto lze psát výsledný vztah pro tepelný tok takto.

$$q_z = \frac{\pi \cdot (t_u - t_v)}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{iz}} \cdot \ln \frac{d_v + 2 \cdot s}{d_v} + \frac{1}{\alpha_v \cdot (d_v + 2 \cdot s)}} [W \cdot m^{-1}] \quad (9.27)$$

kde:

t_u [°C] je teplota média

t_v [°C] je teplota okolního vzduchu

λ_{iz} [W.m⁻¹.K⁻¹] je tepelná vodivost izolace – návrhová

d_v [m] je vnitřní průměr potrubí

s [m] je tloušťka tepelné izolace

α_v [W.m⁻².K⁻¹] je součinitel přestupu tepla na straně vzduchu.

Pokud se λ_{iz} mění s teplotou, je možné v rovnici (9.27) počítat se střední hodnotou pro teplotu t_{iz} dle (9.28), protože pokles teploty v mezní vrstvě vody nebo syté páry činí v důsledku vysoké hodnoty α_u jen asi 1,5 až 3 °C. Hodnota α_v závisí především na rychlosti c_v [m.s⁻¹], způsobu proudění vzduchu a teplotě vzduchu t_v vůči vnější teplotě izolace t_{iz} . Pro výpočet součinitele přestupu tepla na straně vzduchu α_v existují zjednodušující ověřené empirické vzorce, které jsou uvedeny v [1].

Střední teplota se určí dle:

$$\bar{t}_{iz} = \frac{(t_u + t_v)}{2} [°C] \quad (9.28)$$

Výsledná tepelná ztráta potrubí při tloušťce tepelné izolace s [m] a délce potrubí L [m] se určí dle následujícího vztahu:

$$\dot{Q}_z = q_z \cdot L [W] \quad (9.29)$$

Ve výsledné tepelné ztrátě je započtena konvekce, vedení i sálání.

9.6. Hmotnostní parametry izolace

Výsledkem těchto výpočtů je konečná hmotnost tepelné izolace na 1 metr délky potrubí včetně váhy plechu na opláštění a váhy kotevní konstrukce. Ve výpočtech hmotnosti izolace se vychází z plochy izolace S [m^2], objemu izolace V [m^3] a zadaného parametru objemové hmotnosti ρ [$kg \cdot m^{-3}$]. Výsledná hmotnost izolace se tedy určí dle:

$$m = V \cdot \rho \text{ [kg]} \quad (9.30)$$

U určování hmotnosti plechu se vychází z plochy plechu S [m^2], tloušťky plechu s [m] a hustoty materiálu plechu ρ [$kg \cdot m^{-3}$]. Konečná hmotnost se určí dle stejného vztahu (9.30) jako u hmotnosti tepelné izolace.

Hmotnost kotevní konstrukce je dle technických parametrů celého potrubí a pro každý případ jiná. Lze ji hledat v technickém listě k danému projektu. Nejčastěji se používají kotevní trny. Rozestupy a hmotnosti těchto trnů jsou uvedeny v technickém listě. Kotevní konstrukce a trny se ale používají pouze u velkých průměrů – především u nádob a výměníků. Pro potrubí do DN 500 je sestava izolace a opláštění samonosná.

Výslednou hmotností je poté součet hmotností tepelné izolace, kotevní konstrukce a opláštění izolace.

10. Výpočet požadovaných parametrů

V této kapitole je uvedený ilustrativní příklad výpočtů požadovaných parametrů pro danou tepelnou izolaci. Celý výpočet je proveden dle kapitoly 0. Pro samotný výpočet je zvolen průměr izolovaného potrubí, daná izolace, její provozní parametry, médium v potrubí a další okrajové podmínky potřebné pro výpočet. Celý výpočet je proveden v programu, který byl sestaven v rámci této diplomové práce. Zvolené parametry pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Zvolené parametry

Název	Jednotky	Hodnoty
tlak média	p [MPa]	15
teplota média	t [°C]	320
vnější průměr potrubí	D_e [mm]	260
tloušťka stěny potrubí	s_s [mm]	3
teplota vzduchu v okolí	t_o [°C]	20
dovolená povrchová teplota TI	t_p [°C]	45
hustota materiálu pokrytí TI	ρ_m [kg.m ⁻³]	2700
tloušťka plechu pokrytí	s_{pl} [mm]	1
délka potrubí	L [m]	1
materiál pokrytí izolace	ε [-]	0,18

Hodnota emisivity ε [-] pro materiál pokrytí izolace je zvolena dle přílohy č. 5: Emisivita pro různé materiály pokrytí tepelné izolace. Dle teploty okolního vzduchu jsou z přílohy č. 6: Vlastnosti suchého vzduchu – pro teplotu okolí zvoleny vlastnosti suchého vzduchu. Pro zvolenou teplotu 20 °C jsou vybrané hodnoty uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Vlastnosti vzduchu

Název	Jednotky	Hodnoty
rychlost proudění vzduchu kolem TI	v [m.s ⁻¹]	0,1
kinematická viskozita vzduchu	ν [m ² .s ⁻¹]	0,0000157
hustota vzduchu	ρ [kg.m ⁻³]	1,2047
měrná tepelná kapacita	C_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	1010
tepelná vodivost	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0252

Pro tento výpočet je zvolena tepelná izolace, která se používá na JE Mochovce. Jedná se o izolační matrace z materiálu EUTAL. Matrace je tvořena ze skelných vláken a je omezena stlačitelnost této matrace, aby nedocházelo ke změnám v jejích tepelných vlastnostech. V tabulce 7 jsou uvedeny vlastnosti dané izolace pro střední teplotu 170 °C.

Tabulka 7: Vlastnosti tepelné izolace

Název	Jednotky	Hodnoty
deklarovaná tepelná vodivost	λ_d [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,0664
měrná tepelná kapacita TI	C_{pTI} [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	800
objemová hmotnost TI	ρ_{TI} [kg.m ⁻³]	115
korekční souč. pro pravidelné spoje	F_j [-]	1,1

Z důvodu nízké rychlosti vzduchu, který obtéká danou trubku, se uvažuje laminární proudění. Jedná se o potrubí umístěné v uzavřeném prostoru. Hmotnost kotevní konstrukce na 1 m je volena 3 kg. V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty bezrozměrných kritérií, která jsou spočítána dle kapitoly 9.1. Návrhová tepelná vodivost je $\lambda_N = 0,0828$ W.m⁻¹.K⁻¹.

Tabulka 8: Souhrn hodnot pro výpočet Nusseltova čísla

Název	Jednotky	Hodnoty
Reynoldsovo číslo	Re [-]	859,87
Prandtlovo číslo	Pr [-]	0,758
Grashofovo číslo	Gr [-]	2,96E08
součinitel objemové roztažnosti	β [K ⁻¹]	3,27E-03
rozdíl teploty pokrytí a okolí	Δt [°C]	25
gravitační zrychlení	g [m ² .s ⁻¹]	9,81
Nusseltovo číslo	Nu [-]	57,55

Výsledné Nusseltovo číslo je určeno dle rovnice (9.19), kde charakteristické číslo pro laminární proudění je $c = 0,47$ a mocnitel $n = 0,25$.

Součinitel přestupu tepla konvekcí α_k pro daný případ je určen dle rovnice (9.20) a součinitel přestupu tepla sáláním je určen dle rovnice:

$$\alpha_r = \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.31)$$

kde:

T_1 [K] je teplota média v izolované trubce

T_2 [K] je dovolená povrchová teplota izolace

ε [-] je emisivita povrchu (v tomto případě pro hliníkozinkový plech)

σ [W.m⁻².K⁻⁴] je Stefan – Boltzmannova konstanta (5,68E-08).

Součtem součinitelů přestupu tepla konvekcí a sáláním je výsledný součinitel přestupu tepla. S tímto výsledným součinitelem se počítá při určování tepelného toku. V tabulce 9 jsou uvedeny všechny součinitele přestupu tepla pro tento případ laminárního obtékání trubky.

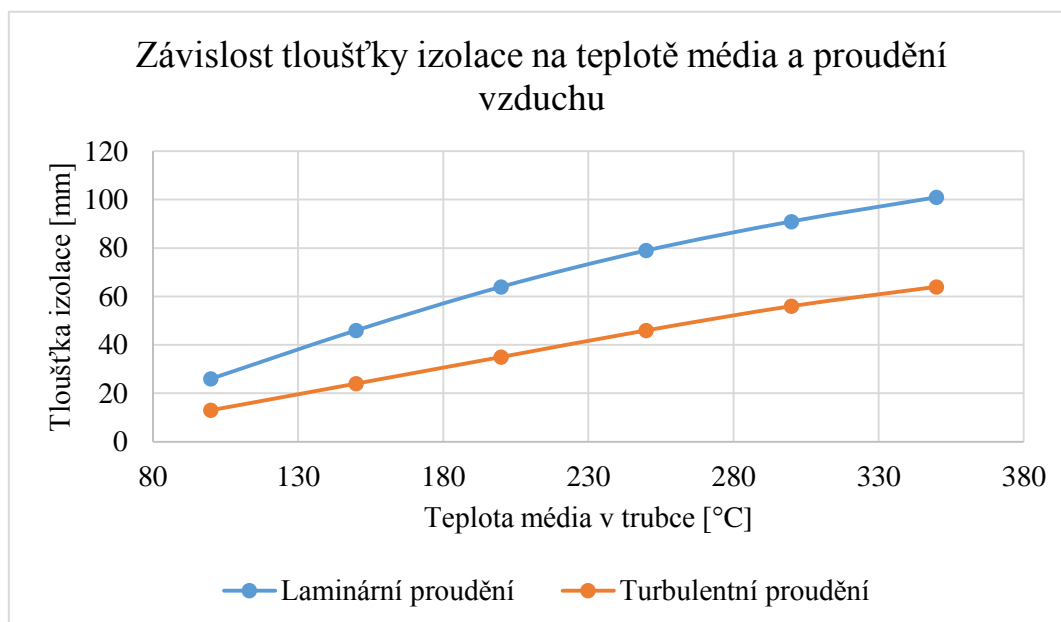
Tabulka 9: Součinitele přestupů tepla

Název	Jednotky	Hodnoty
souč. přestupu tepla konvekcí	α_k [W.m ⁻² .K ⁻¹]	3,223
souč. přestupu tepla sáláním	α_r [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,218
výsledný součinitel přestupu tepla	α_c [W.m⁻².K⁻¹]	7,441

V následující tabulce 10 uvádím vypočtené požadované hodnoty, které jsou výsledkem mého výpočetního programu. Struktura vypočtených hodnot vychází přesně dle výpočetního programu. Celková tepelná ztráta je uvedena na 1 m potrubí, přičemž lze jakkoliv tuto hodnotu v programu změnit. Délka má vliv na vypočtené hmotnosti samotné izolace, oplechování a nosné konstrukce potrubí. Výslednou tloušťku izolace program zaokrouhluje na celá čísla a tloušťka je vždy automaticky určována dle požadované teploty pokrytí. Teplota pokrytí izolace je tedy hlavním kritériem pro určení výsledné tloušťky izolace, z důvodu bezpečnosti. V případě požadavku na jinou tloušťku izolace než je vypočtena, je možno manuálně tuto hodnotu v programu upravovat a tím měnit i jiné vypočtené parametry.

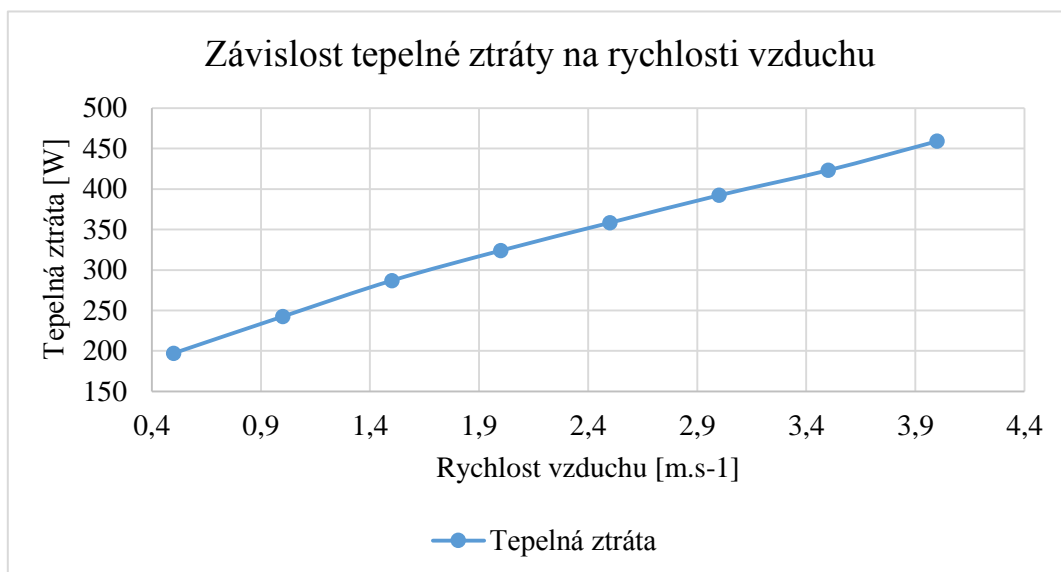
Tabulka 10: Výsledné výstupní hodnoty tepelné izolace na 1 bm

Název	Jednotky	Hodnoty
tloušťka tepelné izolace	s [mm]	95
návrhová teplota pokrytí izolace	t_{pN} [°C]	45
zpětná kontrola povrchové teploty	t_p [°C]	44,71
celková tepelná ztráta	Q [W]	256,47
hmotnost izolace	m_{TI} [kg]	13,43
hmotnost plechu	m_{pl} [kg]	3,82
hmotnost kotevní konstrukce	m_{kk} [kg]	3,00
celková hmotnost	m_c [kg]	20,25



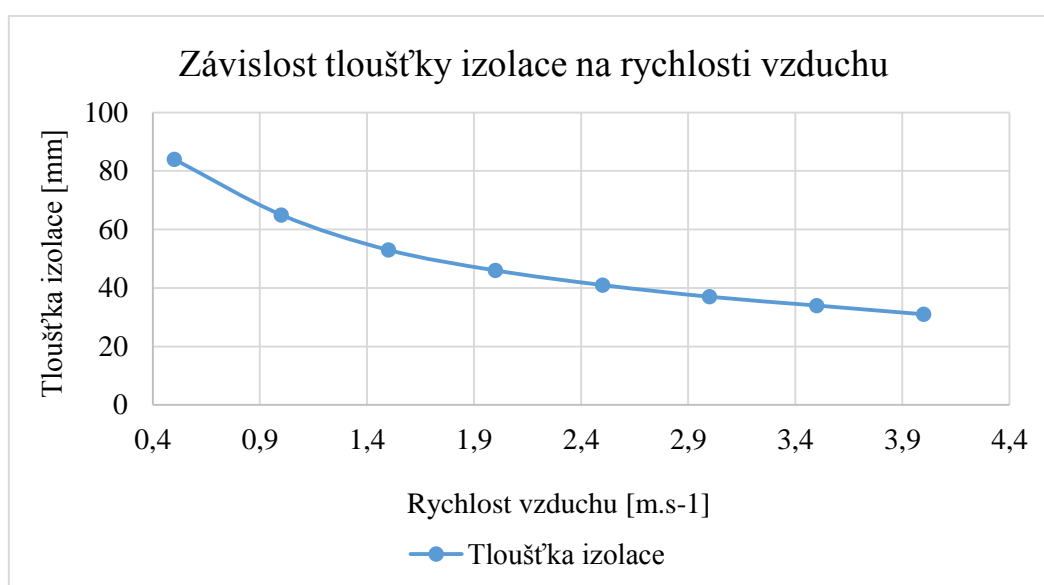
Graf 7: Závislost tloušťky izolace na teplotě média pro různé proudění okolního vzduchu

Uvedený graf 7 ukazuje, jak se mění tloušťka izolace stanovená pro přípustnou povrchovou teplotu se změnou teploty média v trubce a charakterem proudění vzduchu. Všechny ostatní hodnoty pro dané potrubí jsou stejné jako v předešlém případě, aby bylo možné porovnání. Pro každou střední teplotu je určen součinitel tepelné vodivosti λ a dané tloušťky izolace jsou vypočteny ve výpočtovém programu. Závislost je udělána pro prostředí vnitřního uložení izolované trubky (laminární proudění) a pro venkovní uložení (turbulentní proudění), kde je uvažována rychlost proudění větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Graf 8: Závislost tepelné ztráty na rychlosti proudění vzduchu

Graf 8 a graf 9 jsou pouze pro turbulentní proudění vzduchu kolem izolace. Je uvažována konstantní teplota média v trubce 250 °C a všechny ostatní parametry jsou stejné jako v předešlém případě. Daná závislost ukazuje, že s rostoucí rychlostí větru roste tepelná ztráta pro danou délku potrubí. Zároveň dochází ke snižování povrchové teploty izolace a ke snižování potřebné tloušťky izolace z tohoto hlediska, jak je znázorněno na grafu 9.



Graf 9: Závislost tloušťky izolace z hlediska přípustné povrchové teploty na rychlosti proudění vzduchu

11. Experimentální část

Tato část popisuje experimentální měření, jehož výsledkem je ověření návrhové tepelné vodivosti izolace. Pro daný nainstalovaný typ izolace byly naměřeny potřebné hodnoty ke zpětnému vyhodnocení a porovnání tepelně izolačních vlastností izolace. Použitá izolace je používána na JE Mochovce a její objemová hmotnost je 115 kg.m^{-3} . S tímto typem je počítán i příklad v kapitole 10.

11.1. Měřicí zařízení

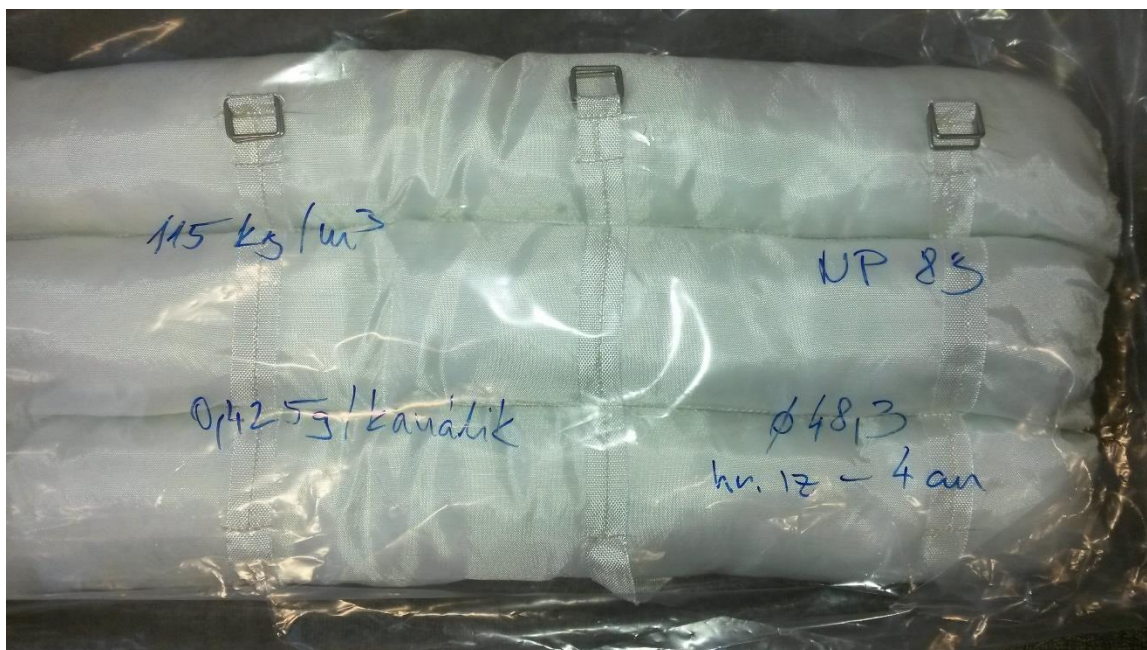
Zkoušky byly provedeny na zařízení Stend VVS (velké vodní smyčce). Tento Stend slouží k předávacím zkouškám pohonů regulačních orgánů pro jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER 440 nebo VVER 1000. Součástí Stendu jsou zkušební kanály, ve kterých se zkoušky pohonů provádí.

Zkoušená izolace a měření teplot na dané izolaci bylo instalováno na výstupním potrubí z těchto kanálů. Pracovním médiem celého Stendu je demineralizovaná voda (DEMI) a parametry zkoušek jsou teplota $T = 290 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlak $p = 12,5 \text{ MPa}$. Stend má své vlastní oběhové čerpadlo, ohřívák a kompenzátory objemu. Je možné ho provozovat bez zkušebních kanálů nebo na něj připojit různá zkušební a experimentální měření.

11.2. Popis měření izolace

Samotné měření se provádělo ve zkušebně firmy ŠKODA JS a.s v Plzni na Bolevci. Izolační matrace byla nainstalována na výstupním potrubí zkušebního kanálu. Zkoušená trubka byla ve vertikální poloze a byla těsně pod pochozí plechovou plošinou. Z tohoto důvodu byla volena rychlost proudění minimální tj. $0,1 \text{ m.s}^{-1}$. Z tohoto tedy vyplývá, že se jedná o laminární obtékání trubky, respektive izolace s oplechováním. Použitá izolace pro JE Mochovce byla dodána firmou ŠKODA JS a.s. a je na obrázku 7. Dodaná izolace byla ve velikosti matrace $1 \times 0,3 \text{ m}$, jejíž pokrytí tvoří skelná tkanina a kolem trubky je fixována pěti páskami se sponami. Matrace obalila téměř celou izolovanou trubku, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce 7. Standardně jsou šířky matrací voleny tak, aby byla celá plocha izolovaného potrubí pokryta násobkem počtu matrací (minimálně jedna matrace). V jednom místě mezi páskami, kterými je izolace stažena se izolace mírně rozevírala, takže bylo nutné do rozevřené mezery doplnit kousek minerální vaty, která je používána jako pomocná při měření. Použitá izolační žárovzdorná rohož Keraunion SIBRAL standart má objemovou hmotnost 100 kg.m^{-3} . Oplechování izolace bylo provedeno pomocí hliníkové fólie s emisivitou povrchu $\varepsilon = 0,05$.

Hliníková fólie přesně obepínala danou izolaci, bez vytvoření vzduchové mezery. Najíždění, samotné měření a vypínání celého zařízení Stend VVS trvalo 67 hodin. Po celou tuto dobu byly zaznamenávány hodnoty i mého měření potřebných teplot na izolaci.



Obrázek 7: Detail izolace pro JE Mochovce – s páskami



Obrázek 8: Izolace z minerální vlny pro JE Mochovce

V následující tabulce 11 jsou uvedeny parametry měřeného potrubí.

Tabulka 11: Parametry měřeného potrubí

Název	Jednotky	Hodnota
vnitřní průměr potrubí JS	D_i [mm]	65
vnější průměr potrubí	D_e [mm]	75
tloušťka stěny potrubí	t [mm]	5
délka potrubí	L [mm]	1110
tloušťka izolace	s [mm]	35

Měření bylo provedeno více způsoby a pro vyhodnocení jsem použil hodnoty naměřené pomocí termočlánků, neboť je nejpřesnější a umožňuje tedy dobré vyhodnocení. Měřeny byly teploty okolního vzduchu, teploty povrchu pokrytí izolace (na oplechování) a teploty média v trubce (DEMI). Na celém zkušebním zařízení se měřily ještě teploty na vstupu a výstupu ze zkušebního kanálu. Samotné teploty byly naměřeny pomocí termočlánků, které byly připevněny na trubku (pod izolací) a na oplechování izolace. Tyto teploty pokrytí izolace byly měřeny ještě dotykovým teploměrem a současně bylo provedeno měření termokamerou. Měřící termočlánky byly zkaličbrovány přímo před měřením a jejich nejistota kalibrace je $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jednalo se o plášťové termočlánky typu J s rozsahem měření do teplot $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

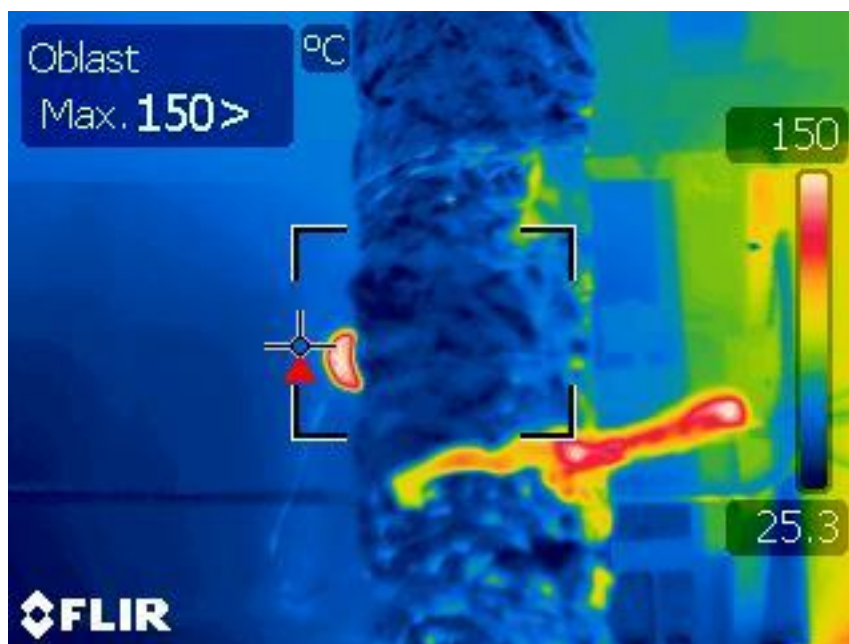
Teplota okolního vzduchu byla naměřena pomocí klasického teploměru. Naměřené hodnoty pomocí dotykového a klasického teploměru jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12: Měření dotykovým teploměrem okolní teploty a povrchové teploty

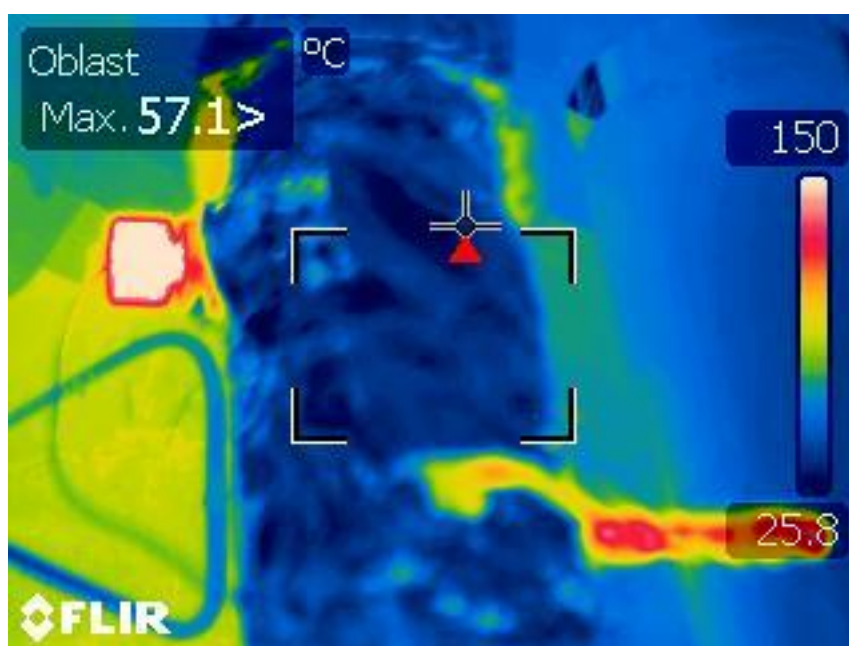
Název	Jednotky	Hodnota
teplota okolí	t_o [$^{\circ}\text{C}$]	25
teplota izolace 1	t_{i1} [$^{\circ}\text{C}$]	62
teplota izolace 2	t_{i2} [$^{\circ}\text{C}$]	73

Uvedené obrázky 9, 10 ukazují pohled z měření povrchové teploty pomocí termokamery. Je vidět, že zaizolování potrubí bylo provedenou správně, jelikož termokamera nenaznačuje únik tepla na plášti. Měření teploty izolace 2 je měřeno v oblasti

dělicí roviny izolace. Použit byl digitální dotykový teploměr 51 II s dotykovým snímačem, typ K s nejistotou měření 0,4 °C a maximální teplotou použití 100 °C.



Obrázek 9: Měření termokamerou 1



Obrázek 10: Měření termokamerou 2

Měření teplot pomocí termočlánků bylo zaznamenáváno každých 30 vteřin po dobu celého měření. Tabulka s naměřenými hodnotami obsahuje 5000 měření, přičemž prvních 500 měření je najíždění zkušebního zařízení a posledních 500 měření je odstavování zařízení. Průměrné teploty z celkového počtu měření jsou uvedeny v tabulce 13, včetně teplot na vstupu a výstupu zkušebního kanálu.

Tabulka 13: Měření pomocí termočlánků – průměrné teploty ze všech měření

Název	Jednotky	Hodnota
teplota na vstupu do ZK	[°C]	228,8
teplota na výstupu ze ZK	[°C]	229,9
teplota v potrubí	t_p [°C]	226,8
teplota na izolaci 1	t_{i1} [°C]	64,7
teplota na izolaci 2	t_{i2} [°C]	77,8

Měření bylo prováděno na dvou protilehlých místech izolace pomocí termočlánků. Teplota na izolaci 1 odpovídá teplotě měřené v oblasti plné izolace. Teplota na izolaci 2 odpovídá teplotě měřené v oblasti spoje izolace sepnuté páskami. Z porovnání naměřených teplot pomocí termočlánků a teplot pomocí dotykového teploměru je vidět rozdíl. Vyšší povrchová teplota v místě 2 je dána horšími tepelně – izolačními vlastnostmi v místě spoje. Tento rozdíl může být způsoben špatnou kalibrací dotykového teploměru. Porovnání teplot je uvedeno v tabulce 14.

Tabulka 14: Porovnání měřených teplot v °C pomocí dotykového teploměru a termočlánku

Číslo měření	Dotykový teploměr	Termočlánek	Diference
teplota na izolaci 1	62	64,7	2,7
teplota na izolaci 2	73	77,8	4,8

Na obrázku 12 je zaizolované potrubí s páskami a nainstalovanými termočlánky pod izolací. Tyto termočlánky měří teplotu média v trubce. Na dalším obrázku 11 je tatáž trubka s izolací obalena hliníkovou fólií a nainstalovanými termočlánky na povrchu pro měření povrchové teploty. Obrázek 13 ukazuje detail měřené trubky včetně vyvedení drátů od termočlánků k měřicímu a vyhodnocovacímu zařízení.



Obrázek 12: Izolovaná trubka bez pokrytí



Obrázek 11: Izolovaná trubka s hliníkovou fólií



Obrázek 13: Zaizolované potrubí s termočlánky

11.3. Vyhodnocení experimentu

Pro určení návrhové tepelné vodivosti měřené izolace a její následné porovnání s uváděnou hodnotou v katalogu jsem zvolil následující postup. Ve zkušebně na Bolevci jsem na experimentálním zařízení naměřil vnitřní průměr potrubí, tloušťku stěny potrubí a délku měřeného úseku. Tloušťka izolace vycházela z poskytnuté izolace k měření a výsledná tloušťka byla po mírném stažení sponami 35 mm, přičemž tloušťka této izolace při montáži pod oplechování byla 40 mm. Všechny tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11. Poté byly naměřeny teploty pokrytí, média a okolí. Z těchto hodnot jsem reverzně k výpočtovému programu vypočetl měřenou tepelnou vodivost. Pro vyhodnocení byly dosazeny stejné hodnoty do výpočtového programu, ze kterého vyšla správná tloušťka izolace pro danou teplotu pokrytí. Důležité pro porovnání tepelných vodivostí je vyrovnání skutečně naměřeného tepelného toku izolací a výpočtového toku. Poté lze porovnat tepelnou vodivost skutečnou a výpočtovou.

Celý výpočet skutečné návrhové tepelné vodivosti je vztažen k průměrné teplotě na izolaci 1, kde bylo měření prováděno v oblasti plné izolace. Daná teplota naměřená pomocí termočlánků na pokrytí izolace byla $t_{t1} = 69,5 \text{ °C}$ a teplota média v trubce $t_p = 246,6 \text{ °C}$.

Hodnoty vycházející z teploty okolního vzduchu potřebné pro výpočet, jsou odečteny z přílohy č. 6: Vlastnosti suchého vzduchu – pro teplotu okolí. Vypočtená bezrozměrná kritéria jsou uvedena tabulce 15.

Tabulka 15: Souhrn hodnot pro výpočet Nusseltova čísla - experiment

Název	Jednotky	Hodnoty
Prandtlovo číslo	Pr [-]	0,766
Grashofovo číslo	Gr [-]	1,54E07
součinitel objemové roztažnosti	β [K^{-1}]	3,1E-03
rozdíl teploty pokrytí a okolí	Δt [$^{\circ}\text{C}$]	44,5
gravitační zrychlení	g [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	9,81
Nusseltovo číslo	Nu [-]	27,52

Výsledný součinitel přestupu tepla je součtem konvekce a sálání. Součinitele přestupu tepla jsou vypočteny dle rovnic (9.20) a (10.31). Součinitele přestupu tepla napočítané pro experimentálně zjištěné hodnoty jsou v tabulce 16.

Tabulka 16: Součinitele přestupu tepla - experiment

Název	Jednotky	Hodnoty
souč. přestupu tepla konvekčí	α_k [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,878
souč. přestupu tepla sáláním	α_r [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,949
výsledný součinitel přestupu tepla	α_e [W.m⁻².K⁻¹]	5,827

Z rovnice (9.21) je určen tepelný tok izolací a z uvedené rovnosti je určena měřená tepelná vodivost. V tabulce 17 jsou uvedeny výsledné hodnoty experimentálně zjištěných hodnot. Měřená tepelná vodivost je uvedena s přesností na pět desetinných míst, aby bylo možné přesnější vyhodnocení a určení odchylky od návrhové tepelné vodivosti spočítané z deklarované hodnoty vodivosti, která je uvedena v technickém listu dané izolace.

Tabulka 17: Výsledné hodnoty - experiment

Název	Jednotky	Hodnoty
tepelný tok	\dot{q} [W.m⁻¹]	118,12
měřená tepelná vodivost	λ_{EX} [W.m⁻¹.K⁻¹]	0,06998

Výsledky experimentu jsou porovnány s tabulkovými hodnotami pro použitou izolaci při experimentu, jež se používá na JE Mochovce. V technických podmínkách dané izolace poskytnuté firmou ŠKODA JS a.s. jsou uváděny hodnoty deklarovaných hodnot tepelné vodivosti určené dle normy ČSN EN 12667. Dle této normy jsou hodnoty tepelných vodivostí měřeny na rovinné desce, tudíž je nutné provést přepočítání deklarovaných hodnot na hodnotu návrhovou pomocí korekčních součinitelů z přílohy č. 4: Převodní součinitele [4] pro lamelovou rohož, aby bylo možné srovnání s hodnotou experimentálně zjištěnou. Převodní součinitel pro pravidelné spoje $F_j = 1,1$ pro jednovrstvou izolaci. Výsledné hodnoty tepelné vodivosti a tepelného toku dle technických podmínek jsou uvedeny v tabulce 18.

Tabulka 18: Výsledné hodnoty pro dovolenou teplotu pokrytí 69,5 °C - výpočetní program

Název	Jednotky	Hodnota
střední teplota	t_{str} [°C]	135,8
deklarovaná tepelná vodivost	λ_d [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,06176
návrhová tepelná vodivost	λ_N [W.m⁻¹.K⁻¹]	0,07772
tepelný tok (pro s = 38 mm)	\dot{q} [W.m⁻¹]	112,12
měřená tepelná vodivost	λ_{EX} [W.m⁻¹.K⁻¹]	0,06998

Při porovnání měřené a návrhové tepelné vodivosti je jejich rozdíl $\Delta\lambda = 0,00774 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Rozdíl v tepelných tocích je $\Delta\dot{q} = 4,0 \text{ W.m}^{-1}$. Velikost tohoto rozdílu tepelných toků je minimální. Rozdíl je způsoben tím, že výpočetní program udává výsledný tepelný tok izolací pro tloušťku izolace (38 mm) vypočtenou dle požadované teploty pokrytí.

Pro tloušťku tepelné izolace 38 mm na měřené délce potrubí vychází tepelná ztráta 124,5 W. Povrchová teplota pro tuto tloušťku izolace je 68,8 °C, tedy tato teplota je nižší než skutečná teplota pokrytí. Z hlediska teploty pokrytí izolace, tato vypočtená teplota vyhovuje. Hmotnost izolace při tloušťce 38 mm na úseku 1110 mm je 2,3 kg a hmotnost hliníkové fólie 0,7 kg.

Ověření teploty pokrytí izolace pro měřenou tepelnou vodivost ve výpočetním programu je uvedeno v tabulce 19.

Tabulka 19: Ověření teploty pokrytí izolace pro měřenou tepelnou vodivost ve výpočetním programu

Název	Jednotky	Výpočetní program
měřená tepelná vodivost	λ_{EX} [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,06998
měřená povrchová teplota	t_{i1} [°C]	69,5
vypočtená povrchová teplota	t_{i1v} [°C]	69,5
vypočtená tloušťka tepelné izolace	s [mm]	35

Konečné vyhodnocení měření je bráno z hlediska kontroly povrchové teploty pokrytí tepelné izolace. Pro vyhodnocení měření je brána měřená tepelná vodivost ($\lambda_{EX} = 0,06998 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), která je použita pro výpočet pomocí výpočetního programu. Z výsledku je patrné, že vypočtená povrchová teplota pomocí měřené tepelné vodivosti je $69,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Je patrné, že povrchová teplota vyhovuje a pro návrh tloušťky tepelné izolace lze tuto hodnotu tepelné vodivosti použít. Při použití měřené tepelné vodivosti do výpočetního programu vyšla tloušťka izolace 35 mm.

V případě tohoto měření je měřená tepelná vodivost zjištěná u experimentu nižší než hodnota tepelné vodivosti z technického listu izolace, jak je uvedeno v tabulce 18. Na vyhodnocování experimentu mohlo mít vliv několik faktorů. Jeden z faktorů je, že izolace používaná při experimentu mohla být lehce navlhla při její montáži na potrubí. Dalším faktorem mohlo být přílišné stáhnutí izolace páskami. Tím nejvíce ovlivňujícím faktorem mohlo být to, že na jednom místě mezi páskami, které stahovaly izolaci, se tato izolace mírně rozevírala. Tudíž musela být mezera doplněna kouskem minerální vaty. Tato vata sice měla stejné tepelněizolační vlastnosti, ale je jisté, že tepelný tok v tomto místě byl nepatrně jiný a tedy i tepelná ztráta se mohla navýšit. Naměřená průměrná teplota v tomto místě rozevření byla $83,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Dá se tedy předpokládat, že pokud by izolace nebyla v jednom místě rozevřená, tak by se tepelná ztráta $Q \text{ [W]}$ při experimentu snížila a vše by odpovídalo ideálním podmínkám.

Zvláštním případem je, že při zadání stejné tloušťky izolace 35 mm a návrhové tepelné vodivosti dle technického listu použité izolace $\lambda_N = 0,07772 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ do výpočetního programu, dojde k tomu, že povrchová teplota vyjde $72,5 \text{ }^\circ\text{C}$ a tedy nevyhovuje. Tato teplota je vyšší než skutečně naměřená teplota $69,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Z experimentu vyplývá, že skutečná tepelná vodivost je nižší než vodivost určená z technického listu. Teoreticky by tedy vždy v případě správné instalace izolace měla být tepelná ztráta na daný úsek nižší, než vychází z technického listu. Provoz je tedy v případě akceptování návrhové tepelné vodivosti izolace na straně bezpečnosti a na straně nižších tepelných ztrát, tedy nižších ročních nákladů na provoz daného zařízení vztažených na tepelné úniky. Zkoušená izolace na potrubí tedy **vyhověla**.

11.4. Vyhodnocení pro celé měření

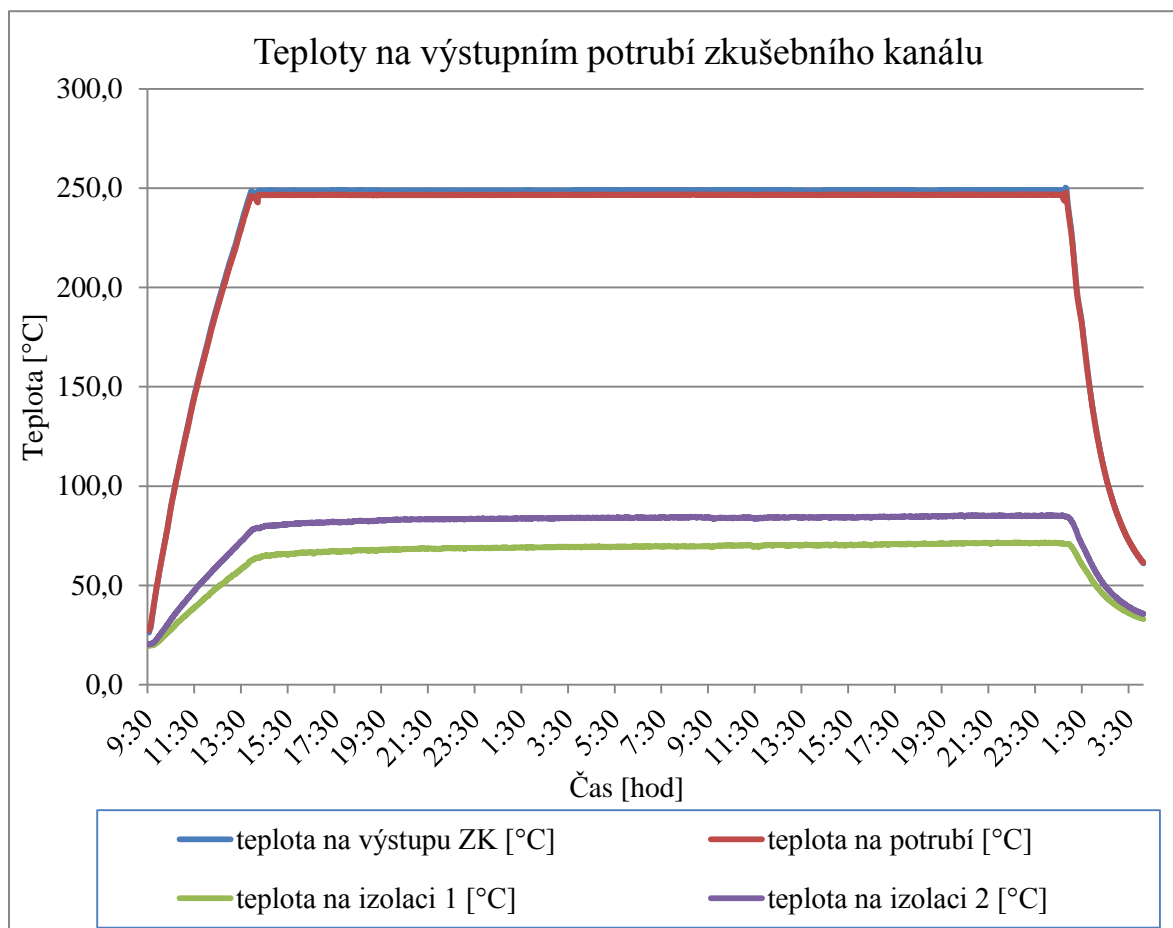
V tomto bodě je ukázáno, jak vypadají výsledné hodnoty pro průměrnou teplotu, která je vztažena pro celé měření na zařízení Stend VVS. Do výsledné teploty pokrytí jsem započítal i najíždění a vypínání zařízení. Výsledná teplota pokrytí je tedy teplotou průměrnou za celé 3 dny měření a její hodnota je $t_{i1} = 64,7 \text{ °C}$. Ostatní hodnoty jsou stejné jako v předchozím vyhodnocování měření a jsou uvedeny v tabulce 13. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 20.

Tabulka 20: Porovnávací tabulka výpočetního programu a experimentu pro teplotu pokrytí izolace 64,7 °C

Název	Jednotky	Výpočetní program	Experiment
tepelná ztráta	Q [W]	128,00	112,73
návrhová tepelná vodivost	$\lambda_N [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	0,077	0,066
tepelný tok	$\dot{q} [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}]$	115,32	101,56

Pokud je výpočet vztažen na celé měření, tak při nižší hodnotě návrhové tepelné vodivosti je i nižší tepelná ztráta. V tomto případě je jiný tepelný tok v místě rozevření izolace zanedbatelný. Výpočetní program určil pro danou povrchovou teplotu 64,7 °C tloušťku izolace 39 mm, kdežto experiment je počítán pořád s tloušťkou 35 mm, která byla instalována.

Průběhy všech měřených teplot v průběhu celého měření jsou ukázány na grafu 10. Graf zobrazuje teploty na vstupu a výstupu zkušebního kanálu, teploty na potrubí (médiu) a teploty na izolaci 1 a 2, tedy teploty pokrytí izolace.



Graf 10: Teploty na zkušebním kanále – měření 1

12. Experimentální část č. 2

Ve druhé experimentální části je popsáno druhé měření na stejném zařízení Stend VVS v Plzni ve firmě ŠKODA JS a.s. Rozměry měřeného potrubí jsou stejné jako v experimentu 1 a jsou uvedeny v tabulce 11. Naměřená teplota okolí byla 25 °C. Toto nové měření probíhalo o týden později od předešlého měření. Zařízení Stend se znovu najíždělo a celý proces funkce zařízení probíhal ve stejných fázích jako v předešlém měření. V tomto experimentu byly teploty měřeny pouze pomocí termočlánků, proto zde není uvedena srovnávací tabulka s teplotami měřenými pomocí dotykového teploměru popřípadě termokamery.

Teplotní úroveň zde je zhruba o 100 °C nižší, teplota média se tedy pohybuje okolo 150 °C. Ve vyhodnocení experimentu 2 jsou ukázány rozdílné hodnoty při vyhodnocení oproti experimentu 1 a je zde také na výsledném grafu ukázáno, že docházelo ke změnám výkonu zařízení Stend v průběhu měření. Tato skutečnost se projevila na průběhu teplot na měřené izolaci.

V tabulce 21 jsou uvedeny průměrné teploty z celého měření ve všech měřených místech.

Tabulka 21: Průměrné teploty celého měření - experiment 2

Název	Jednotky	Hodnota
teplota na vstupu do ZK	[°C]	148,1
teplota na výstupu ze ZK	[°C]	146,9
teplota v potrubí	t_p [°C]	45,7
teplota na izolaci 1	t_{i1} [°C]	54,0
teplota na izolaci 2	t_{i2} [°C]	147,7

Pro vyhodnocení výsledné měřené tepelné vodivosti jsem použil průměrné hodnoty z měření. Průměr teplot je udělán z hodnot kdy došlo k ustálení teplot na povrchu izolace a teplota média se blížila optimální ustálené hodnotě. V tomto experimentu docházelo k ustálení teploty média za delší časový úsek, nežli tomu bylo v prvním měření. Průměrná teplota byla pro izolaci 1 $t_{i1} = 47$ °C a teplota média v trubce $t_p = 151,9$ °C. Médiem byla demineralizovaná voda.

Výpočet experimentální měřené tepelné vodivosti byl proveden stejným přístupem jako ve vyhodnocování prvního měření. Hodnoty součinitelů přestupu tepla spolu s Nusseltovým číslem jsou uvedeny v tabulce 22.

Tabulka 22: Součinitele přestupu tepla a Nusseltovo číslo – experiment 2

Název	Jednotky	Hodnoty
souč. přestupu tepla konvekcí	α_k [W.m ⁻² .K ⁻¹]	4,127
souč. přestupu tepla sáláním	α_r [W.m ⁻² .K ⁻¹]	0,599
výsledný součinitel přestupu tepla	α_c [W.m⁻².K⁻¹]	4,726
Nusseltovo číslo	Nu [-]	23,29

Z uvedených hodnot je vidět, že v případě nízkých teplot je složka sáláním v poměru k výslednému přestupu tepla velmi nízká. Nízký součinitel přestupu tepla sáláním je také způsobem nízkou emisivitou ($\varepsilon = 0,05$) pro lesklou hliníkovou fólii.

Výsledné hodnoty vyhodnocení tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 23.

Tabulka 23: Vyhodnocení měřené tepelné vodivosti a tepelného toku - experiment 2

Název	Jednotky	Hodnoty
tepelný tok	\dot{q} [W.m⁻¹]	47,36
měřená tepelná vodivost	λ_{EX} [W.m⁻¹.K⁻¹]	0,04737

Oproti prvnímu měření na vyšších teplotních úrovních je zde mnohem nižší tepelný tok izolací a z tohoto důvodu je vypočtená měřená tepelná vodivost nižší. Při nižších teplotách je nižší teplotní spád Δt [°C], a tím nižší tepelný tok \dot{q} [W.m⁻¹]. Z toho tedy plyne, že při nižších teplotách je díky nižší hodnotě tepelné vodivosti i nižší celková tepelná ztráta.

Tabulka 24: Vyhodnocení pro hodnoty dle experimentu ve výpočetním programu

Název	Jednotky	Hodnota
střední teplota	$t_{stř}$ [°C]	88,45
deklarovaná tepelná vodivost	λ_d [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	0,05433
návrhová tepelná vodivost	λ_N [W.m⁻¹.K⁻¹]	0,06957
tepelný tok (pro s = 35 mm)	\dot{q} [W.m⁻¹]	69,54

Z tabulky 24 vyplývá, že při nižších teplotách se s rostoucí tepelnou vodivostí mění tepelný tok pomaleji, nežli je tomu na vyšších teplotních úrovních. Návrhová tepelná vodivost byla určena z deklarované hodnoty z technického listu izolace EUTAL a byla přepočtena přes korekční součinitele. Při porovnání obou tepelných vodivostí je jejich rozdíl $\Delta\lambda = 0,0222 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Rozdíl v tepelných tocích je $\Delta\dot{q} = 22,18 \text{ W.m}^{-1}$. Výsledný rozdíl měřené a „návrhové“ tepelné vodivosti je vyšší než v případě prvního měření. Tento rozdíl může být způsoben nestálostí teplot při měření celého experimentu, jelikož výkon zařízení Stend byl velmi proměnlivý. Také na tento vyšší rozdíl v tepelných vodivostech může mít vliv výpočet dle průměrných teplot, které jsem zvolil pro vyhodnocování měření. Tato volba byla v čase, kdy došlo k ustálení teplot, tedy od 3:55 do 19:55 hodin z grafu 11. Poslední příčinou této difference by mohly být nepřesně uvedené hodnoty deklarovaných hodnot vodivosti v technickém listu použité izolace pro nižší teplotní hladiny použití.

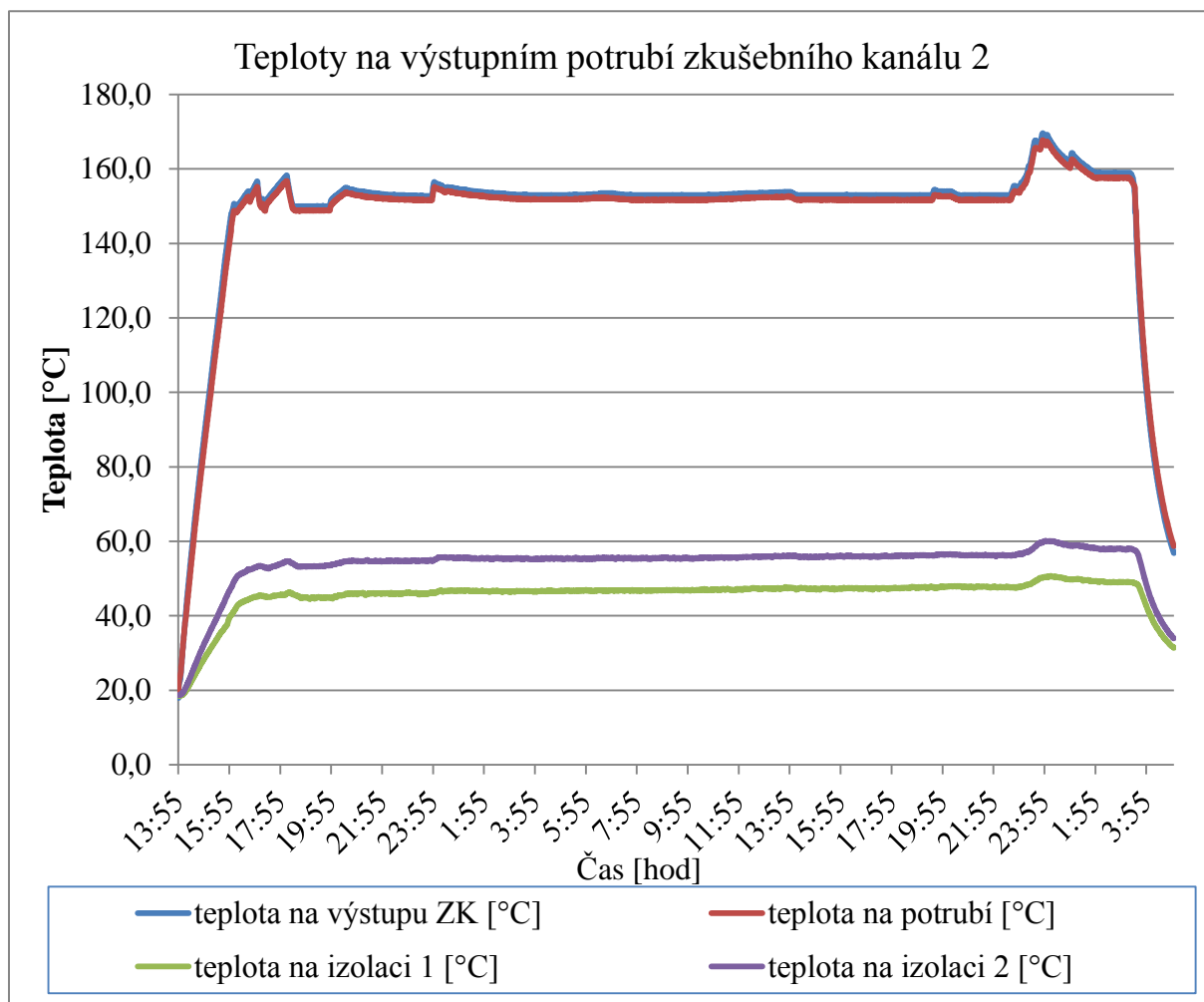
Experiment byl vyhodnocen pro tloušťku izolace 35 mm, jež byla skutečně instalována na měřeném potrubním úseku. Pro konečné vyhodnocení z hlediska povrchové teploty byla použita měřená tepelná vodivost. V tabulce 25 jsou uvedeny měřené a vypočtené povrchové teploty. Z výsledků je patrné, že je možno pro návrh tloušťky izolace použít měřenou tepelnou vodivost, neboť zpětně určená povrchová teplota **vyhovuje**.

Tabulka 25: Ověření teploty pokrytí pro měřenou tepelnou vodivost – experiment 2

Název	Jednotky	Výpočetní program
měřená tepelná vodivost	$\lambda_{EX} [\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}]$	0,04737
měřená povrchová teplota	$t_{i1} [^{\circ}\text{C}]$	47
vypočtená povrchová teplota	$t_{iv} [^{\circ}\text{C}]$	47
vypočtená tloušťka tepelné izolace	s [mm]	35

V případě použití návrhové tepelné vodivosti z technického listu použité izolace, která je uvedena v tabulce 24, by pro splnění povrchové teploty 47 °C byla potřebná tloušťka izolace 49 mm. V případě návrhu nové izolace by došlo k předimenzování tloušťky izolace. Při návrhu nové izolace se vychází vždy z návrhových hodnot tepelných vodivostí, které jsou vyšší než deklarované hodnoty a předchází se tímto poddimenzování izolace. Je však vždy nutné uvažovat i výši investičních nákladů na izolaci a navrhnout hospodárnou tloušťku izolace. Na tomto případě je vidět, že z hlediska dodržení povrchové teploty

vyhovuje tepelná vodivost $0,04737 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a tedy i odpovídající menší tloušťka tepelné izolace.



Graf 11: Teploty na zkušebním kanále - měření 2

Na grafu 11 je znázorněn průběh celého druhého měření. Je zde také vidět jak se v čase měnily jednotlivé teploty. K ustálení teplot na téměř konstantní hodnoty došlo až po několika hodinách provozu zařízení a na konci měření docházelo prudkému nárůstu teplot. Při okamžitém nárůstu teplot média v trubce je vidět tomu odpovídající nárůst teplot na izolaci 1 a i v místě rozevření izolace 2. I při skokových změnách média v trubce jsou teploty na povrchu izolace celkem ustálené. Změny teplot média o 10 až 20 °C se na povrchové teplotě izolace projevilo vzrůstem povrchové teploty průměrně o 2 – 4 °C.

13. Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval metodikou stanovení potřebné tloušťky tepelné izolace potrubí v jaderných elektrárnách. Prvním bodem řešeršní části diplomové práce byly technické izolace. Pod tuto kapitolu patří úspora energie pomocí instalace vhodné tloušťky izolace, ochrana proti kondenzaci, ochrana proti hluku a další. Nejdůležitějším bodem této kapitoly je ochrana osob před kontaktem s horkým zařízením, protože tato varianta v prostředí kde jsou vysoké teploty, nastává nejčastěji.

Dalším bodem je dělení izolačních materiálů, které lze v technické praxi na elektrárnách používat. Nejčastějším materiálem používaným na jaderných elektrárnách jsou izolace z minerální vlny. Tyto izolace z minerální vlny jsou děleny na izolace z kamenné vlny nebo ze skelné vlny. Důvodem jejich použití jsou dobré tepelněizolační vlastnosti a hlavně jejich vysoká provozní teplota (MST). Použití těchto izolací je možné do teplot kolem 620 °C. Ostatní izolační materiály jsou použitelné pro nižší provozní teploty, avšak jejich nasazení v technické praxi je také běžné.

Technické izolace jsou používány ve formě rohoží na pletivu, lamelových rohoží a pro menší průměry izolovaného potrubí lze používat izolační pouzdra. Při instalaci těchto druhů tepelných izolací je třeba brát v úvahu mnoho faktorů. Je třeba izolaci přesně omotat okolo izolovaného potrubí, nepřesáhnout její stažení páskami a snažit se vyhnout tepelným mostům, které slouží jako nadbytečný únik tepla.

Mezi vlastnosti izolací z minerálních vln patří jejich reakce na oheň, odolnost proti absorpci vody, paropropustnost a nejdůležitější vlastností je objemová hmotnost a MST. Objemová hmotnost je zcela zásadní technickou vlastností zvolené technické izolace.

Zcela zásadní vlastností každé izolace je její tepelná vodivost. Hodnota tepelné vodivosti je závislá na objemové hmotnosti, teplotě a vlhkosti. Jsou zavedeny tři druhy tepelné vodivosti. Měřená tepelná vodivost je vždy uvedena v technickém listu každé tepelné izolace od různých výrobců. Zároveň s touto hodnotou je uváděna tepelná vodivost deklarovaná. V případě výpočtů je hodnota deklarované vodivosti převáděna pomocí korekčních součinitelů na tepelnou vodivost návrhovou. S touto hodnotou tepelné vodivosti se provádějí návrhové výpočty tloušťek izolací. Ve výpočtovém programu je s touto hodnotou vždy počítáno a dané korekční součinitele se vždy mění tak, jak je zadáno do vstupní tabulky výpočtového programu.

Parametry, které vždy ovlivňují návrh tloušťky izolace, jsou emisivita povrchu, měrná tepelná kapacita, relativní vlhkost vzduchu, teplota rosného bodu a rychlost proudění

vzduchu kolem izolace. Tyto parametry je možné měnit i ve vzniklém výpočtovém programu.

V rámci výpočtové části práce vznikl program, do kterého jsou zadávány požadované hodnoty. Tyto hodnoty jsou tlak média proudícího v trubce, teplota média, rozměry izolované trubky, teplota okolí a dovolená povrchová teplota. Povrchová teplota je hlavním parametrem při určování výsledné tloušťky izolace. Výpočetní program vždy vypočte hodnotu tloušťky izolace právě tak, aby teplota pokrytí na izolaci byla nižší než teplota přípustná a předešlo se tedy případným úrazům. Výstupem z programu je výsledná tloušťka izolace, celková tepelná ztráta na zadaný úsek potrubí, hmotnost izolace, hmotnost plechu a hmotnost kotevní konstrukce. V kapitole 10 je uvedený příklad výpočtu pro tepelnou izolaci používanou na JE Mochovce. Z výpočtů vyšlo, že pro průměr potrubí 260 mm a povrchovou teplotu 45 °C je výsledná tloušťka tepelné izolace 95 mm, tepelná ztráta na 1 metr potrubí činí 256,5 W a celková hmotnost je 20,3 kg.

Poslední část práce je věnována experimentu. Ve zkušebně firmy ŠKODA JS a.s. na Bolevci v Plzni jsem experimentálně na zařízení Stend VVS měřil tepelné vlastnosti dané izolace. Na zkušebním kanálu zařízení byla na potrubí o průměru 65 mm instalována izolace, jež byla pokryta hliníkovou fólií. Na celém měřicím zařízení byly nainstalovány termočlánky a teploty byly zaznamenávány každých 30 vteřin po dobu 67 hodin. Teploty byly měřeny pro porovnání také termokamerou a dotykovým teploměrem. Z naměřených hodnot jsem udělal průměrné hodnoty za daný časový úsek, se kterými byl dále experiment vyhodnocen.

Celé vyhodnocení bylo reverzním výpočtem k postupu, jež je aplikovaný ve vzniklém výpočtovém programu. Výsledkem celého experimentu je porovnání měřené tepelné vodivosti, která vyšla z experimentu a návrhové tepelné vodivosti vypočtené z technického listu použité izolace. Při porovnání obou hodnot tepelných vodivostí je jejich rozdíl 0,00774 W.m⁻¹.K⁻¹ (cca 10%) a rozdíl v tepelných tocích je 4,0 W.m⁻¹. Výstupem z vyhodnocení experimentu je experimentálně zjištěná tepelná vodivost, která je nižší než návrhová (výpočtová) tepelná vodivost. Je tedy patrné, že v případě instalace izolace vycházející z návrhové tepelné vodivosti by skutečná tepelná ztráta (i teplota pokrytí) měla být vždy nižší, než vypočtená. Návrh tepelné izolace je pak tedy na straně bezpečnosti a na straně nižších tepelných ztrát a tedy úspory finančních nákladů na roční provoz energetického zařízení. Zkoušená izolace na potrubí je vyhovující.

Seznam použitých zkratek a symbolů

A	[W.m ⁻¹]	koeficient
a, b, c, d	[-]	materiálová konstanta
c	[-]	charakteristické číslo
Ce	[Kč.GJ ⁻¹]	cena energie
C _I	[Kč.m ⁻²]	cena instalované izolace
Co	[-]	korekce pro teplotu
C _p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
C _v	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu
d	[m], [mm]	průměr potrubí
F	[-]	převodní součinitel
g	[m ² .s ⁻¹]	gravitační zrychlení
Gr	[-]	Grashofovo číslo
L	[m]	délka potrubí, průměr potrubí
m	[kg]	hmotnost
MST	[°C], [K]	maximální provozní teplota
N _c	[Kč.m ⁻² .rok ⁻¹]	celkové náklady
N _i	[Kč.m ⁻² .rok ⁻¹]	roční cena izolace
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
N _τ	[Kč.m ⁻² .rok ⁻¹]	roční náklady na tepelné ztráty
OH	[kg.m ⁻³]	objemová hmotnost
p	[MPa]	tlak
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
q̇	[W.m ⁻¹]	tepelný tok
Q	[W]	tepelná ztráta
r	[m]	poloměr
R	[m ² .K.W ⁻¹]	tepelný odpor
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
s	[m]	tloušťka stěny potrubí, tloušťka tepelné izolace
S	[m ²]	plocha

t	[mm]	tloušťka stěny potrubí
t, T	[°C], [K]	teplota
U	[W.m ⁻² .K ⁻¹], [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel prostupu tepla
V	[kg.m ⁻³]	objem
v	[m.s ⁻¹]	rychlost proudění vzduchu
z	[h.rok ⁻¹]	doba životnosti izolace
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
β	[K ⁻¹]	součinitel objemové roztažnosti
δ	[m]	tloušťka izolace
Δλ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	přídavná hodnota na tepelné mosty
ε	[-]	emisivita
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita vzduchu
ρ	[kg.m ⁻³]	absolutní vlhkost
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan – Boltzmannova konstanta
τ	[h.rok ⁻¹]	provozní doba za rok
φ	[%], [-]	relativní vlhkost

Horní indexy

“	maximální
n, m	mocnitelé

Dolní indexy

a	vliv stárnutí
c	celkový
C	vedení tepla vlivem proudění vzduchu
c	vliv stlačení
d	deklarovaná, vliv tloušťky
e	okolí, vnější
i	vnitřní
i _{1, 2}	izolace 1, 2

iz	izolace
j	pravidelné spoje
k	konvekce
kk	kotevní konstrukce
m	materiál, vliv vlhkosti
o	okolí
p	povrchová, potrubí
pl	plechu
p _N	pokrytí, návrhová
r	sálání (radiace)
s	stěna
sa, x, y	povrch
stř	střední
TI	tepelné izolace
u	médium
v	vzduch, vypočteno
$\Delta\theta$	vliv teplotních rozdílů

Rejstřík obrázků

Obrázek 1: Průřez potrubím [6]	13
Obrázek 2: Proces výroby izolace [16]	20
Obrázek 3: Vícevrstvá izolace [6]	22
Obrázek 4: Potrubní závěs [3]	27
Obrázek 5: Izolace bez kotvení trny [3]	27
Obrázek 6: Měření pomocí metody topného pouzdra [3]	34
Obrázek 7: Detail izolace pro JE Mochovce – s páskami	58
Obrázek 8: Izolace z minerální vlny pro JE Mochovce	58
Obrázek 9: Měření termokamerou 1	60
Obrázek 10: Měření termokamerou 2	60
Obrázek 11: Izolovaná trubka s hliníkovou fólií	62
Obrázek 12: Izolovaná trubka bez pokrytí	62
Obrázek 13: Zaizolované potrubí s termočládky	62

Rejstřík tabulek

Tabulka 1: Reakční třídy na oheň [3]	17
Tabulka 2: Tloušťky plechů dle průměru potrubí	24
Tabulka 3: Převodní součinitele dle typu materiálu	36
Tabulka 4: Korekce Co pro dané teploty [10]	37
Tabulka 5: Zvolené parametry	52
Tabulka 6: Vlastnosti vzduchu	52
Tabulka 7: Vlastnosti tepelné izolace	53
Tabulka 8: Souhrn hodnot pro výpočet Nusseltova čísla	53
Tabulka 9: Součinitele přestupů tepla	54
Tabulka 10: Výsledné výstupní hodnoty tepelné izolace na 1 bm	55
Tabulka 11: Parametry měřeného potrubí	59
Tabulka 12: Měření dotykovým teploměrem okolní teploty a povrchové teploty	59
Tabulka 13: Měření pomocí termočládků – průměrné teploty ze všech měření	61
Tabulka 14: Porovnání měřených teplot v °C pomocí dotykového teploměru a termočládku	61
Tabulka 15: Souhrn hodnot pro výpočet Nusseltova čísla - experiment	63
Tabulka 16: Součinitele přestupu tepla - experiment	64
Tabulka 17: Výsledné hodnoty - experiment	64
Tabulka 18: Výsledné hodnoty pro dovolenou teplotu pokrytí 69,5 °C - výpočetní program	65
Tabulka 19: Ověření teploty pokrytí izolace pro měřenou tepelnou vodivost ve výpočetním programu	65
Tabulka 20: Porovnávací tabulka výpočetního programu a experimentu pro teplotu pokrytí izolace 64,7 °C	67
Tabulka 21: Průměrné teploty celého měření - experiment 2	69
Tabulka 22: Součinitele přestupu tepla a Nusseltovo číslo – experiment 2	70
Tabulka 23: Vyhodnocení měřené tepelné vodivosti a tepelného toku - experiment 2	70
Tabulka 24: Vyhodnocení pro hodnoty dle experimentu ve výpočetním programu	70
Tabulka 25: Ověření teploty pokrytí pro měřenou tepelnou vodivost – experiment 2	71

Rejstřík grafů

Graf 1: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti a teplotě [3].....	31
Graf 2: Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti [3]	31
Graf 3: Závislost tepelné vodivosti na teplotě [9]	32
Graf 4: Závislost tepelné vodivosti na vlhkosti [3]	33
Graf 5: Vliv nákladů na tloušťce izolace [3]	43
Graf 6: Ekonomická tloušťka izolace [3]	44
Graf 7: Závislost tloušťky izolace na teplotě média pro různé proudění okolního vzduchu ...	55
Graf 8: Závislost tepelné ztráty na rychlosti proudění vzduchu.....	56
Graf 9: Závislost tloušťky izolace z hlediska přípustné povrchové teploty na rychlosti proudění vzduchu	56
Graf 10: Teploty na zkušebním kanále – měření 1	68
Graf 11: Teploty na zkušebním kanále - měření 2	72

Seznam zdrojů

- [1] SAZIMA, Miroslav, Vladimír KMONÍČEK a Jiří SCHNELLER. *Teplo*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 588 s. Technický průvodce (Státní nakladatelství technické literatury), sv. 2. ISBN 8003000432.
- [2] KOVERDYNSKÝ, Vít. Technické izolace detailně (I). *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo, 2001-2016 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/izolace/13763-technicke-izolace-detailne-i-ucel-technicky-ch-izolaci>
- [3] Technické izolace. *ISOVER: tepelné izolace, zvukové izolace a protipožární izolace* [online]. Brno: PeckaDesign, 2016 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/ti>
- [4] ISOVER: Katalogy, ceníky a dokumentace k produktům ke stažení: Informace pro projektanty a realizační firmy. In: *ISOVER pro technické izolace* [online]. Praha: Saint - Gobain Construction Products a.s., 2015, s. 30 [cit. 2017-04-01].
- [5] *REFAGLASS s.r.o.* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.refaglass.cz/>
- [6] Potrubí. *PUR IZOLACE* [online]. Litoměřice, 2010 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.pur.cz/cz/potrubí/>
- [7] EN 14303. *Orstech DP 65: Rohož na pletivu*. 1. Praha: Saint - Gobain Construction Products a.s., 2016.
- [8] PROKOP, Jiří. *Tepelné izolace v tepelné technice*. Ediční středisko. Praha: Čes. vys. učení techn, 1993. ISBN 8001008886.
- [9] BROŽ, Karel. *Zásobování teplem*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 217 s. ISBN 80-010-2521-7.
- [10] STRNADEL, Karel. Důsledky dvojí formulace tepelné vodivosti izolačních látek při výpočtu tepelných ztrát. *Vytápění, větrání, instalace*. Praha: ČVUT, 2014, **2014**(2), 59-65.
- [11] *Arbeitsblatt*. Stuttgart: Forkel-Verlag, 1949. ISSN 07234139.
- [12] CHYSKÝ, Jaroslav. *Vlhký vzduch*. 2., upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1977, 156 s. Řada strojírenské literatury. ISBN 04-239-77.
- [13] VLACH, Josef. *Zásobování teplem a teplotěním*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989, 543 s. ISBN 04-208-89.
- [14] ČSN EN ISO 8497. *Tepelná izolace - Stanovení vlastností prostupu tepla v ustáleném stavu tepelné izolace pro kruhové potrubí*. 1. Praha: ČVUT, 1996.
- [15] EN 14303. *Orstech LSP PYRO: Lamelový skružovatelný pás*. 1. Praha: Saint - Gobain Construction Products CZ a.s., 2016.
- [16] Technické izolace. *Darte s.r.o.* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.darte.cz/technicke-izolace>

Přílohy

Příloha č. 1: Vlastnosti technických izolací [4]

Parametry technické izolace	označení	jednotky	norma	Kamenná vlna													Skelná vlna		ULTIMATE		
				Orstech						rohová na pleťvu ¹⁾	deska ²⁾	Isover Fireprotect [®] 150	Petrušiční izolární pouzdro	Klimarol	Isover ML3	U Protect Slab 4.0 Alu1	U Protect Wfired Kat 40 Alu1	rohová na pleťvu			
				LSP40	LSPH	LSPYRO	DP 65	DP 80	DP 100										45	65	90
tepnota (°C)	lamelový skrúšťovací pás	lamelový skrúšťovací pás	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾	rohož na pleťvu ¹⁾				
	λ_D			0,040	0,040	0,040	0,035	0,035	0,035	0,035	0,036	0,035	0,035	0,035	0,036	0,040	0,037	0,033	0,033		
				0,044	0,044	0,044	0,033	0,033	0,039	0,040	0,039	0,039	0,039	0,039	0,039	0,043	0,040	0,034	0,034		
				0,046	0,046	0,046	0,041	0,041	0,041	0,042	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041	0,044	0,042	0,035	0,035		
				0,056	0,056	0,056	0,047	0,047	0,047	0,053	0,048	0,047	0,047	0,047	0,047	0,055	0,053	0,040	0,040		
				0,069	0,069	0,069	0,055	0,055	0,054	0,066	0,058	0,055	0,054	0,054	0,053	0,068	-	0,079	0,047		
				0,084	0,084	0,084	0,065	0,065	0,063	0,082	0,068	0,065	0,063	0,063	0,060	0,087	-	0,102	0,054		
				0,103	0,103	0,103	0,076	0,076	0,073	0,100	0,081	0,076	0,073	0,073	0,068	0,110	-	0,130	0,062		
				0,125	0,125	0,125	0,089	0,089	0,084	0,124	0,097	0,089	0,084	0,084	0,077	0,136	-	0,172	0,072		
				-	0,180	0,180	0,134	0,118	0,110	-	0,134	0,118	0,110	0,110	0,098	-	-	0,095	0,095		
				-	0,251	0,251	0,183	0,155	0,143	-	0,183	0,155	0,143	0,123	0,123	-	-	0,125	0,125		
				-	0,340	0,340	0,248	0,201	0,182	-	0,248	0,201	0,182	0,154	0,154	-	-	0,162	0,162		
				-	-	-	0,225	0,204	-	-	0,225	0,204	-	0,172	0,172	-	-	-	-		
				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,192	0,192	-	-	-	-		
Objemová hmotnost	P, kg/m ³		ČSN EN 1602	40	55	65	80	100	100	45	65	90	110	110	165 (150)	65	40	25	66	66	
Nevyšší provozní teplota / na straně polepu	MST °C		ČSN EN 14706	300 / 100	600 / 100	560 / 100	640 / 100	640 / 100	660 / 100	300 / 100	600 / 100	640 / 100	660 / 100	660 / 100	700 / 100	620 ³⁾ / 100	250 / 100	250 / 100	620 / 100	620 / 100	
Chemické	-	AS kvalita	AGI Q132 ⁶⁾	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
hydrofobizace podle	-	hydrofobizace podle	ČSN EN 1609	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	
Tloušťka	d ₄ mm		ČSN EN 823	20 30 40 50 60 80 100	20 30 40 50 60 80 100	30 40 50 60 80 100	30 40 50 60 80 100 (120)	30 40 50 60 70 80 100 (120)	30 40 50 60 70 80 100 (120)	40 50 60 80 100	40 50 60 80 100	40 50 60 80 100	40 50 60 80 100	40 50 60 80 100	20 25 30 35 40 50 60 80 100	25 30 40 50 60 80 100	20 30 40 50 60 80 100	20 30 40 50 60 80 100	30 40 60 80 100	30 40 60 75 100 120	
Rozměry	b mm	šířka	ČSN EN 822	1000	1000	1000	500 (1000)	500 (1000)	500 (1000)	500 (1000)	500	500	500	500	1000	1000	1000	600 a 500	600	600	
	l mm [mm]	délka	ČSN EN 822	5; 5; 4; 4; 3; 2,8	8; 5; 4; 4; 3; 2,8	3; 3; 2,5; 2,5; (2,3)	3; 3; 2,5; 4; 4; (3)	8; 5; 5; 5; 4; 4; (3)	(6; 5); 4; 4; 3; 3; 3; (3)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)
Balení	S m ²	plocha	-	5; 5; 4; 4; 3; 2,8	8; 5; 4; 4; 3; 2,8	3; 3; 2,5; 2,5; (2,3)	3; 3; 2,5; 4; 4; (3)	8; 5; 5; 5; 4; 4; (3)	(6; 5); 4; 4; 3; 3; 3; (3)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	4; 4; 2,5; 4; 4; 2,5; 2,5; 2,5; 2; 2; (1,5)	
Požární	-	reakce na oheň	ČSN EN 13 501-1	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2-s1,d0	A2-s1,d0	A1	A1	
Odpor proti proudění vzduchu	ι	IPa.s/m ²	ČSN EN 29053	-	-	33	53	72	72	19	23	54	78	78	-	-	-	-	-	-	

Příloha č. 2: Lamelový skružovatelný pás Orstech LSP Pyro [15]

Parametr	Jednotka	Hodnota											Norma
TEPELNÉ VLASTNOSTI													
Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_0 dle ČSN EN ISO 13787	°C	10	40	50	100	150	200	250	300	400	500	600	
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,040	0,044	0,046	0,056	0,069	0,084	0,103	0,125	0,180	0,251	0,340	
Měřená hodnota souč. tepelné vodivosti podle ČSN EN 12667	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,039	0,042	0,043	0,052	0,063	0,076	0,092	0,111	0,157	0,215	0,290	
Nejvyšší provozní teplota ST(+) / na straně hliníkové fólie	°C	600 / max. 100											ČSN EN 14706
Měrná tepelná kapacita c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	800											-
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI													
Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$	65											ČSN EN 1602, ČSN EN 13470
Krátkodobá nasákavost (W_p) WS	$kg \cdot m^{-2}$	<< 1											ČSN EN 1609
PROTIPOŽÁRNÍ VLASTNOSTI													
Reakce na oheň – doplňková klasifikace na tvorbu kouře, plamenně hořící částice	-	A2-s1, d0											ČSN EN 13501-1
Bod tání t_f	°C	≥ 1000											DIN 4102 díl 17

Příloha č. 3: Rohož na pletivu Orstech DP 65 [7]

Parametr	Jednotka	Hodnota											Norma
TEPELNÉ VLASTNOSTI													
Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti λ_0 dle ČSN EN ISO 13787	°C	10	40	50	100	150	200	250	300	400	500	600	
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,035	0,039	0,041	0,048	0,058	0,068	0,081	0,097	0,134	0,183	0,248	
Měřená hodnota souč. tepelné vodivosti podle ČSN EN 12667	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,034	0,037	0,039	0,047	0,056	0,067	0,080	0,095	0,129	0,173	0,225	
Nejvyšší provozní teplota / na straně hliníkové fólie	°C	560 / max. 100											ČSN EN 14706
Měrná tepelná kapacita c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	800											-
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI													
Objemová hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$	65											ČSN EN 1602, ČSN EN 13470
Krátkodobá nasákavost W_p	$kg \cdot m^{-2}$	<< 1											ČSN EN 1609
Odpor proti proudění vzduchu Ξ	$kPa \cdot s \cdot m^{-2}$	33											ČSN EN 29053
PROTIPOŽÁRNÍ VLASTNOSTI													
Reakce na oheň	-	A1											ČSN EN 13501-1
Bod tání t_f	°C	≥ 1000											DIN 4102 díl 17
AKUSTICKÉ VLASTNOSTI													
Praktický číselník zvukové pohltivosti α_w dle ČSN EN ISO 354 a ČSN EN ISO 11654	Frekvence	Hz	125	250	500	1000	2000	4000					
	Tloušťka	40 mm	0,15	0,50	0,95	0,95	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
		60 mm	0,30	0,85	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
		80 mm	0,40	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
		100 mm	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
Stanovení jednočíselné veličiny podle ČSN EN ISO 11654	Jednočíselné hodnoty	-	α_w				α_{nr}				NRC		
	Tloušťka	40 mm	0,80 (H)				0,85				0,85		
		60 mm	1,00				0,98				1,00		
		80 mm	1,00				1,04				1,05		
		100 mm	1,00				1,05				1,05		

Příloha č. 4: Převodní součinitele [4]

Izolační materiál	Převodní součinitele							
	$F_{\Delta\theta}$	F_m	F_a	F_c	F_c	F_d	F_j	F
Rohož na pletivu	1,05	1,0	1,0	0,94	1,0	1,01	1,1	1,1
Lamelová rohož	1,08	1,0	1,0	0,9	1,0	1,01	1,1	1,08
Izolační pouzdro	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Příloha č. 5: Emisivita pro různé materiály pokrytí tepelné izolace

Povrch Tepelné izolace	Emisivita ε [-]
Lesklá hliníková fólie	0,05
Hliníkový plech, mírně zoxidovaný	0,13
Nerezový plech	0,15
Hliníko - zinkový plech	0,18
Pozinkovaný plech	0,26
Ocel, zoxidovaná	0,3
Hliník, stucco-design	0,4
Mosaz, brunírovaná	0,42
Nátěr, bílý	0,85
PVC; plech opatřený nátěrem	0,9
Nátěr, černý	0,92
Minerální vlna	0,94

Příloha č. 6: Vlastnosti suchého vzduchu – pro teplotu okolí

Teplota	Hustota	Tepelná vodivost	Tepelná kapacita	Kinematická viskozita
[°C]	[kg.m ⁻³]	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	[m ² .s ⁻¹]
0	1,2959	0,0237	1,01	0,0000137
5	1,2697	0,0241	1,01	0,0000142
10	1,2472	0,0245	1,01	0,0000147
15	1,2256	0,0249	1,01	0,0000152
20	1,2047	0,0252	1,01	0,0000157
21	1,2006	0,0253	1,01	0,0000159
22	1,1965	0,0254	1,01	0,0000160
23	1,1925	0,0255	1,01	0,0000162
24	1,1885	0,0256	1,01	0,0000163
25	1,1845	0,0257	1,01	0,0000165
30	1,1649	0,0258	1,01	0,0000166
35	1,1460	0,0262	1,01	0,0000171
40	1,1277	0,0265	1,01	0,0000176
45	1,1100	0,0269	1,02	0,0000181
50	1,0928	0,0272	1,02	0,0000186
55	1,0762	0,0276	1,02	0,0000191
60	1,0600	0,0280	1,02	0,0000196
65	1,0444	0,0283	1,02	0,0000201
70	1,0292	0,0286	1,02	0,0000205