

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Tepelné ztráty parního potrubí

Autor: **Lukáš Hurda**  
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Křenek**

Akademický rok 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš HURDA**  
Osobní číslo: **S11B0145P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Název tématu: **Tepelné ztráty parního potrubí**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Máte za úkol:

1. Vypracovat rešerši typů a fyzikálních vlastností izolačních materiálů vhodných pro potrubní síť.
2. Provést rozbor výpočtu tepelných ztrát potrubí kruhového průřezu pro parovody.
3. Provést optimalizační výpočet izolací v programu EXCEL, výpočet bude zahrnovat vliv typu izolace, vliv uložení potrubí, vliv armatur a potrubních prvků.
4. Pro obecný takto navržený program provést optimalizační výpočet tepelných ztrát pro potrubí DN 200 a pro parametry páry:

$p = 0,60 \text{ MPa}$ ,  $t = 158,80 \text{ °C}$  a teplotu okolí  $t_o = 15 \text{ °C}$ .

Rozsah grafických prací: **axonometrické schéma trasy**

Rozsah pracovní zprávy: **40 stran A4**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- **Mareš R.: Kapitoly z termomechaniky (CD-ROM), Západočeská univerzita, 2008**
- **Nožička J.: Základy termomechaniky, skriptum ČVUT, 2001**
- **Kalčík J., Sýkora K.: Technická termomechanika, Academia Praha, 1973**
- **Sazima, Kmoníček: Teplo-technický průvodce**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Křenek**

Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Hrubý**

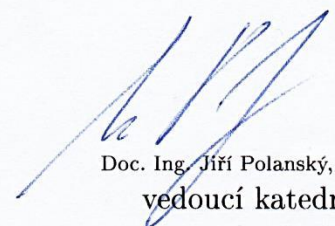
G-TEAM s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **27. června 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Doc. Ing. Jíří Polanský, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 25. října 2013

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 27. června 2014

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Tímto děkuji Ing. Vladimíru Křenkovi a Ing. Jiřímu Hrubému za ochotu při poskytování odborných rad, informací a zdrojů k vypracování této práce.

Děkuji také členům svojí rodiny za všestrannou podporu mé činnosti nejen během studií.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Hurda	<b>Jméno</b> Lukáš		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Křenek	<b>Jméno</b> Vladimír		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Tepelné ztráty parního potrubí			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	78	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	66	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Práce se zabývá materiály tepelných izolací vhodných pro obecná technická potrubí. Uvádí metody výpočtu tepelných ztrát parovodů při různých způsobech uložení potrubí. Jedním z cílů je sestavit program pro výpočet ekonomicky optimální tloušťky izolace. Studují se vlivy armatur a potrubních prvků na tepelné ztráty. Autor se pokouší sestavit metody pro výpočet těchto vlivů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Tepelné ztráty, parovod, izolace, optimalizace, optimální tloušťka izolace, armatury

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hurda	Name Lukáš	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016-13 „Design of Power Machines and Equipment“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Křenek	Name Vladimír	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Heat losses of steam pipeline		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Department of Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2014
----------------	---------------------------	-------------------	---	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	78	<b>TEXT PART</b>	66	<b>GRAPHICAL PART</b>	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This thesis deals with materials for piping thermal insulation for common purposes. Work includes description of methods for solving heat losses of steam pipeline depending on the piping's planting type. One of the goals is to build a program for computing of the optimal thickness of the insulation. The effect of piping equipment and fittings on heat losses has been investigated. Author is trying to create methods to solving these heat transfer problems.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Heat losses, steam pipeline, insulation, optimalization, optimal thickness of insulation, pipeline equipment, piping fittings,</p>

## Obsah

Obsah.....	4
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	6
1 Úvod.....	8
2 Rešerše izolačních materiálů pro potrubní sítě.....	10
2.1 Dělení izolačních materiálů podle makrostruktury a provedení.....	10
2.2 Dělení izolačních materiálů dle chemického složení a mikrostruktury.....	11
2.3 Povrchové úpravy potrubních izolací.....	12
2.4 Popis často používaných izolačních materiálů.....	13
2.4.1 Minerální vaty [9][11][12][14][15][16].....	14
2.4.2 Skelné vaty [11], [14], [15].....	15
2.4.3 Keramické vaty [10] [11] [14].....	15
2.4.4 Polyuretanové pěny [13].....	15
2.4.5 Kaučukové pěny [11], [12], [14].....	17
2.4.6 Polyethylenové pěny [11], [12], [14].....	17
2.4.7 Pěnové sklo [17].....	17
2.4.8 Souhrn.....	18
3 Specifika parovodů.....	19
3.1 Druhy uložení parovodních potrubí [19].....	20
3.1.1 Uložení v interiéru.....	20
3.1.2 Pozemní a nadzemní uložení v exteriéru.....	20
3.1.3 Podzemní kanálové uložení v neprůlezných kanálech.....	21
3.1.4 Podzemní kanálové uložení v městských kolektorech.....	21
3.1.5 Podzemní bezkanálové uložení.....	21
4 Tepelné ztráty parního potrubí kruhového průřezu.....	22
4.1 Odvození obecných vztahů.....	22
4.1.1 Kondukční tepelný tok.....	22
4.1.2 Konvekční tepelný tok.....	23
4.1.3 Sloučený a zobecněný vztah pro tepelný tok.....	23
4.1.4 Tepelné odpory.....	24
4.1.5 Teploty na rozhraních odporových oblastí.....	25
4.2 Určení součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubky.....	26
4.3 Určení součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky.....	27
4.3.1 Při uložení potrubí v interiéru.....	27

4.3.2	Při nadzemním uložení potrubí v exteriéru.....	29
4.3.3	Při bezkanálovém uložení potrubí v exteriéru .....	30
4.3.4	Při uložení v kanálu nebo kolektoru .....	31
4.4	Vliv armatur a potrubních prvků .....	32
4.4.1	Kolena .....	32
4.4.2	Kotvy, patky, závěsy .....	33
4.4.3	Armatury ve válcových izolačních pouzdrech.....	35
5	Optimalizační výpočet tloušťky izolace .....	37
5.1	Vhodnost použití MS Excel.....	38
5.2	Vstupní parametry .....	39
5.3	Způsob výpočtu optimální tloušťky izolace .....	41
5.3.1	Roční cena tepelných ztrát.....	41
5.3.2	Roční cena izolace .....	42
5.3.3	Optimální tloušťka izolace.....	42
5.4	Vedlejší výpočty .....	43
5.4.1	Výsledky založené na přenášeném výkonu .....	43
5.4.2	Výpočet ztrát neizolované trubky, úspory a návratnost.....	44
5.4.3	Kontrolní výpočet pro bezpečnou teplotu vnějšího povrchu .....	44
5.4.4	Výpočet ztrát armatur .....	45
5.5	Poznámky k používání výpočetního programu .....	45
6	Závěr .....	47
7	Zdroje informací .....	48
8	Seznam obrázků .....	49
9	Seznam příloh .....	50



## Přehled použitých zkratk a symbolů

$c, m, n, k$	[-]	Konstanty a koeficienty kritériálních rovnic
$a$	[m/s]	Rychlost zvuku (pro Machovo číslo)
$b$	[m]	Rozměr potrubní podpěry (šířka)
$c_{izm}$	[Kč W/(m <sup>4</sup> K)]	Měrná cena izolace
$c_{iz}$	[Kč/m <sup>3</sup> ]	Objemová cena izolace
$c_{pl}$	[Kč/m <sup>2</sup> ]	Plošná cena pláště izolace
$c_q$	[Kč/J]	Měrná cena tepla
$c_p$	[J/(kg K)]	Izobarická měrná tepelná kapacita
$C_0$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right]$	Úhrnná sálavost dokonale černého tělesa
$C$	[Kč]	Celková cena
$DN$	[m; mm]	Jmenovitý průměr potrubí
$D, d$	[m]	Průměr
$e$	[-]	Eulerovo číslo
$E, E_0$	[W/m <sup>2</sup> ]	Sálavost, dokonale černého tělesa
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Tíhové zrychlení
$h$	[m]	Osová hloubka uložení podzemního potrubí
$h_{fl}, h_k$	[J/kg]	Měrná entalpie páry, kondenzátu
$IAPWS$	[-]	Mezinárodní asociace pro vlastnosti vody a vodní páry (The International Association for the Properties of Water and Steam)
$i$	[-]	Index sumy
$k$	[-]	Přirážkový součinitel zvýšení tepelných ztrát
$L$	[m]	Určující rozměr kritérií, délka prizmatické tyče
$l$	[m]	Rozměr potrubní podpěry (délka)
$l_k$	[J/kg]	Měrné kondenzační teplo
$m, m_k$	[kg/s]	Hmotnostní tok páry, kondenzátu
$N$	[Kč]	Náklady
$n$	[rok]	Prostá návratnost
$n_{A1}, n_{A2}$	[-]	Počet armatur prvního typu, druhého typu
PE, PEHD	[-]	Polyethylen, vysokohustotní (high-density)
PIR	[-]	Polyizokyanurát
PP	[-]	Polypropylen
PS	[-]	Polystyren
PUR	[-]	Polyuretan
$P, P_{vr}$	[W=J/s]	Přenášený výkon, bez výkonu vráceného
$p$	[Pa]	Absolutní tlak
$\dot{Q}, Q$	[W]	Ztrátový tepelný tok
$Q$	[J]	Ztrátové teplo
$\dot{q}, q$	[W/m]	Ztrátový tepelný tok délkový
$r$	[m]	Poloměr, souřadnice cylindrického systému
$s$	[%]	Poměrné množství spotřebované páry
$R$	$\left[\frac{m \cdot K}{W}\right]$	Tepelný odpor
$s$	[m]	Tloušťka izolace
$S, S_T, S_V$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch/plocha, toru, válce
$T, T_h, T_l, T_d$	[K]	Absolutní termodynamická teplota, vysoká (high), nízká (low), na předělu
$t$	[°C]	Teplota

$t_{výp}$	[m]	Výpočtová tloušťka stěny trubky
$U$	[m]	Obvod potrubní podpěry, prizmatické tyče
$V_v, V_p$	[m <sup>3</sup> ]	Potřebný objem izolace: deformované, nedeformované
$w$	[m/s]	Rychlost proudění
$x$	[m]	Souřadnice kartézského systému
$z$	[m]	Souřadnice cylindrického systému
$z$	[%]	Poměrná ztráta tepla
$\alpha$	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	Součinitel přestupu tepla
$\gamma$	[K <sup>-1</sup> ]	Součinitel izobarické objemové roztažnosti
$\Delta T$	[K]	Rozdíl teplot
$\delta$	[m]	Velikost kroku iterace
$\epsilon_T, \epsilon_R, \epsilon_A,$	[-]	Opravný součinitel: teplotní, zakřivení, výpočtu armatur
$\epsilon, \epsilon_n$	[-]	Součinitel poměrné sálavosti, vzájemné sálavosti
$\theta$	[K]	Teplotní rozdíl na prizmatické tyči
$\lambda$	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Součinitel tepelné vodivosti
$\nu$	[m/s <sup>2</sup> ]	Součinitel molekulární kinematické vazkosti
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$\tau$	[rok]	Doba životnosti izolace, jejího pláště
$\varphi$	[°]	Rovinný úhel, souřadnice cylindrického systému

## KRITÉRIA PODOBNOSTI:

$Gr = \gamma \cdot \Delta T \cdot \frac{g \cdot L}{\nu^2}$	[-]	Grashofovo číslo
$Ma = \frac{w}{a}$	[-]	Machovo číslo
$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$	[-]	Nusseltovo číslo
$Pr = \frac{\nu c_p \rho}{\lambda}$	[-]	Prandtlovo číslo
$Re = \frac{w \cdot L}{\nu}$	[-]	Reynoldsovo číslo

## ČASTÉ INDEXY:

1	- pára, vnitřní prostor potrubí	pl	- plášť izolace
2	- atmosféra, prostor kolem potrubí	r	- roční
A	- armatury	ref	- referenční
bezp	- pro bezpečnou teplotu povrchu	s	- sálání
f	- tekutina (fluid)	S	- plošné, vztaženo na plochu
iz	- izolace	tr	- trubky
k	- konvekce, kondenzát	v	- vedení tepla
kr	- kritický	w	- stěna, při stěně (wall)
n	- neizolované	z	- ztrátový
opt	- optimální		

# 1 Úvod

Izolace je obecně prvek technického systému zabraňující přenosu energie či hmoty mezi vnitřkem a vnějškem technického systému. Například při izolování elektrických sítí se z bezpečnostních a funkčních důvodů zabraňuje (pro dané provozní podmínky) proudů náboje skrz stěny izolace dokonale. Stejně tak nádrž na tekutinu je možno postavit tak, aby z ní naprosto žádná skutečně neunikala. Ve vícero případech je možno zabránit veškerému toku energie či hmoty z či do izolovaného místa. Při snaze o izolaci tepelné energie to není možné.

Dle základních zákonů termodynamiky teplo přechází samovolně z oblastí prostoru o teplotě vyšší do oblastí teploty nižší. Pokud je tedy uvažován systém dílo-okolí, jehož dva základní prvky nemají shodnou teplotu, neexistuje způsob zabraňující veškerému toku energie z vyššího potenciálu (teploty) na nižší potenciál. Všude tam, kde se teplo přenáší v jiném místě či čase, než místo a čas, pro něž bylo generováno, dopravováno či skladováno se nazývají tepelnými ztrátami.

Mechanismů přenosu tepla je několik.

Přenosu tepla prostřednictvím hmoty o určitém tepelném obsahu lze zabránit prostým vsazením tuhé nepropustné stěny na rozhraní teplotních oblastí. Přenosu tepla vedením uvnitř hmoty lze také zcela zabránit, ačkoli je technická realizace v běžných podmínkách složitá. Opatřením pro úplnou eliminaci kondukce je vřazení tuhými stěnami ohraničené, vakuované oblasti prostoru. Přenosu tepla sáláním, tedy prostřednictvím elektromagnetického záření, ale nijak zabránit nelze. Elektromagnetické vlny se šíří kromě prostředí všech diatermních materiálů také vakuem. Stínění tohoto záření pomocí nediatermního materiálu je v rozporu s opatřeními pro eliminaci kondukce. Proto není v žádném případě možné dokonale zabránit toku tepelné energie mezi dvěma oblastmi prostoru o nestejných teplotách. Ke snížení kvantity ovšem dojde a proto se v nedávné době se začal rozšiřovat způsob izolace využívající vakuovaného prostoru, který je zcela odlišný od tradičních metod izolace.

Jinak je možné minimalizovat tepelné toky tak, že se vhodně potlačí množství tepla přenášeného konvekcí, kondukcí i radiací. K tomu se používají vrstvy nejčastěji porézních, vláknitých, výjimečně sypkých materiálů. Takový materiál uzavírá ve štěrbinách své vlastní struktury plyny (vzduch), které vykazují ze všech fází nejmenší tepelnou vodivost. Tuhá struktura, kterou jsou obklopeny, jim znemožňuje proudit. Sálání se sice může v těchto dutinách uskutečňovat, ale pohlcení, odrazení a opětovné vysávání paprsků tepelného záření stěnami dutin je tolikanásobné, že je též přenos tepla sáláním značně potlačen. Na povrchu izolace, pokud je okolí systému diatermní, je možno zařadit další opatření snižující množství tepla přeneseného sáláním. Vedení tepla musí být minimalizováno kromě dutin také v samotném materiálu izolace, používají se proto materiály, jež mají co nejmenší tepelnou vodivost. Ta je u tuhých materiálů považovaných za izolanty o několik řádů větší než u plynů. Stěny buněk či vlákna izolace jsou proto co nejtenčí, aby celkový průřez vedoucí teplo tuhým materiálem byl co nejmenší.

Celé technické provedení izolace ale nesestává pouze ze samotné funkční vrstvy izolačního materiálu. Tuto vrstvu je často nutno chránit dalšími prostředky před poškozením mechanickým nebo povětrnostním. Technologie výroby či instalace pak vyžaduje často další opatření v podobě přidaných prvků. Při umístění potrubí v plynném prostředí/atmosféře je často přidávána ještě jedna funkční vrstva materiálu. Jedná se o různými způsoby provedenou úpravu vnějšího povrchu za účelem dosažení co nejmenšího součinitele poměrné sálavosti. Jde tedy o opatření dále minimalizující ztráty sáláním.

Rešerše následující tento úvod se zabývá izolačními materiály používanými pro izolace potrubí. Uvažovanými technickými díly jsou zde tedy potrubní soustavy určené pro transport hmoty, bez rozdílu jejího využití v místě určení. Nutnost tepelné izolace zde má různý původ. Nejčastějším případem řešeným v praxi energetiky jsou bezesporu potrubí přenášející médium o teplotě vyšší, než je okolí. Ty jsou nejčastěji obklopeny atmosférou či jsou zakopány v zemině. Teplo z těchto systémů uniká, což je nežádoucí ztráta energie, která je určena k využití na daném místě. V chladírenství je pro změnu nutno chránit potrubí vedoucí seškrčené chladivo na cestě do výparníku před přívodem tepla z okolí. Tato nutnost plyne jak z požadavku na minimalizaci ztrát, tak samotnou funkci zařízení. Dalšími příklady potrubních systémů vyžadujících tepelné zaizolování mohou být například exteriérem vedoucí vodovody, kde je třeba zamezit zamrznutí vody v zimním období. Dále třeba vzduchotechnické systémy zajišťující topení či klimatizaci civilních či průmyslových interiérů. Nelze zde vypsát všechny aplikace tepelných izolací na potrubí, rešerše si ale klade za úkol pokrýt co nejširší spektrum materiálů tak, aby se z něj dal vybrat druh izolace vhodný pro drtivou většinu potrubních systémů. Při zaměření jinam než na tepelné ztráty, jejichž negativní důsledky jsou ekonomické, vyvstává nutnost izolovat horká potrubí a další povrchy tam, kde by mohla způsobit škody na zdraví lidí a dalších živých bytostí. Funkce tepelné izolace nejen potrubí jsou úzce spojeny také s izolací protipožární a hlukovou. To zvažuje požadavky na použité materiály.

V části této práce věnované výpočtům optimální tloušťky izolace je pozornost věnována nadále již pouze parovodním potrubím. Zohledněna jsou jejich specifika a hlavně různé způsoby uložení potrubí, které mají zásadní vliv na mechanismus přenosu ztrátového tepla i na jeho množství. Vše je patřičně uvozeno v příslušné části práce. Samotná optimalizace je procesem vyvážení výše investic a provozních nákladů. Tento proces, pokud je správně proveden, dokáže ušetřit nemalé objemy finančních prostředků.

Důležitým faktorem kvality funkce izolovaného potrubí je také zaizolování potenciálních tepelných mostů. Jedná se především o prvky tvarově více či méně odlišné od prostého potrubí, které jsou nutné k jeho instalaci a provozu. Díky vysoce tepelně vodivým materiálům jejich konstrukce, složitým tvarům a velkým povrchům vytváří tyto armatury, patky, atd. podmínky pro intenzivní vedení tepla a zároveň technologicky ztěžují instalaci izolace na jejich povrch.

V nedávné minulosti došlo k mnoha inovacím, co se izolací armatur týče, přesto je stále složité zahrnout tyto singularity do výpočtů tepelných ztrát, potažmo právě do výpočtu optimální tloušťky izolace. Tato práce se snaží najít dostupné přesnější metody pro řešení vlivu tepelných mostů, případně přispět k jejich zlepšení či doplnění.

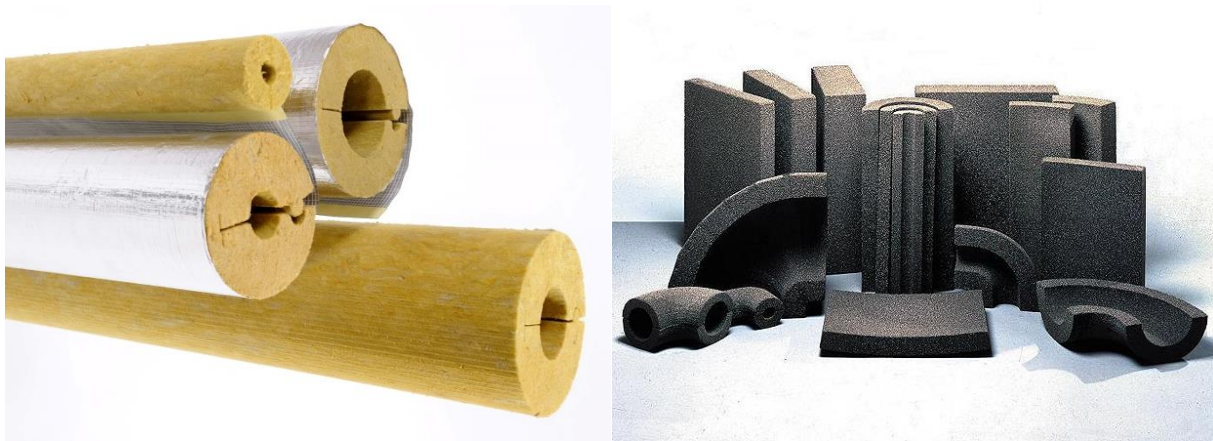
Pro praktické využití teorie popsané v této zprávě je sestaven program pro výpočet optimální tloušťky izolace parovodního potrubí. Je proveden v široce rozšířeném a známém tabulkovém procesoru Microsoft Office Excel. Je hlavním výstupem této práce a práce s ním je komentována v kapitole o optimální tloušťce izolace.

## 2 Rešerše izolačních materiálů pro potrubní sítě

Úvodem rešerše je analýza množství prakticky používaných materiálů technických izolací a jejich následné rozdělení do skupin podle různých kritérií, jež je charakterizují. Následuje analýza vlastností těchto materiálů s celkovým popisem a zhodnocením vhodnosti použití pro izolaci různých typů potrubí.

### 2.1 Dělení izolačních materiálů podle makrostruktury a provedení

- Vlákenné izolace – vaty
  - Desky/rohože
  - Skruže/pouzdra – obr.1
- Pěnové izolace
  - Tuhé skruže a tvarovky – obr. 1
  - Pružné skruže a tuby
  - Prefabrikované pěny vstřikované do chráničky
- Sypké izolace
  - Drtě
  - Granuláty
- Lité izolace
  - Tvarovky
  - Lité výkopy



Obr. 1 - Izolační pouzdra a tvarovky pro potrubí

Sypké a lité izolace patří k překonaným technologiím. V dalších podrobných odstavcích rešerše již nejsou popisovány. Tyto materiály byly využívány téměř výhradně pro izolace podzemních potrubí. Sypké hmoty byly hydrofobizovány, potrubí jimi bylo zasypáno přímo v neupraveném výkopu. Lité izolace byly prováděny buď prefabrikovanými tvarovkami, nebo litím materiálu přímo do výkopu, kde tuhnul. Obecně se tyto druhy provedení setkávaly s problémy spojenými s absorpcí vlhkosti. Ta způsobovala výrazné zvýšení tepelné vodivosti, tedy tepelných ztrát. Potřeba odvádění vody komplikovala konstrukci celého aparátu. Podrobný výčet a rozbor vlastností těchto systémů se nachází v [4].

## 2.2 Dělení izolačních materiálů dle chemického složení a mikrostruktury

- Anorganické materiály
  - Přírodní minerální
    - Čedič – mnoho druhů dle naleziště
  - Sklo
    - ~70% SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, CaO; amorfní struktury
  - Keramika
    - SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (ZrO<sub>2</sub>); krystalická struktura
  - Struska
- Organické materiály
  - Elastomery
    - -Přírodní a syntetický kaučuk
  - Termoplasty
    - Polyethylen (PE)
    - Polyuretan (PUR a PIR)
    - Polystyren (PS)

Obecně je možno sledovat, že se mezi technickými izolačními materiály nevyskytují žádné biologického původu. Je to způsobeno potřebou zajistit odolnost materiálů proti degradaci chemickými a biologickými vlivy, tedy například růstem hub a plísní. To splňují právě anorganické materiály nerostného původu a umělé polymery. Výjimkou je kaučuk, jehož vlastnosti jsou přiblíženy v příslušné kapitole.

Stejně jako byly vyloučeny některé body předchozího dělení, i zde je možno považovat některé materiály za nevhodné:

Struskové vaty či vlny se dnes již nepoužívají. Chemicky se metalurgické strusky, které byly používány k výrobě vaty, příliš neliší od přírodního čediče. Struktura v surovém stavu je ale nehomogenní a obsahuje množství těžko předvídatelných vměstků a příměsí jako odpadu metalurgických procesů. Při výrobě vlny se pak tyto vměstky nedařilo vždy roztavit a rozfoukat do vláken vzhledem k různě vysokým teplotám tání těchto nehomogenit. Následkem bylo poškození homogenity samotného výrobku, lokální poruchy teplené vodivosti a technologické nepříjemnosti. Naproti globálním ekologickým trendům bylo tedy od tohoto druhu využití odpadu upuštěno. Hlavní ekologický dopad výroby vláknitých izolací ale nespočívá v získávání výchozí suroviny, ale spíše ve velké energetické náročnosti výroby tavením substrátů s vysokou teplotou tání. Lze tedy uvažovat, že vyrobením obdobné, ale kvalitnější vaty je při stejné schopnosti tepelného odporu možno použít méně vaty a tedy i méně energie na její výrobu.

Polystyren byl ve výčtu uveden především proto, že je pro širokou veřejnost téměř synonymem tepelné izolace. Využívá se jej hojně ve stavebnictví. Není ale vhodný pro izolace potrubí a mnoho dalších technických aplikací. Jednak s teplotní odolností maximálně kolem 70 °C je vyloučeno jeho použití v mnoha průmyslových oblastech, jednak na něj není možno aplikovat efektivnější metodu montáže, než je upevňování rozměrově přesných tvarovek na trubky a potrubní prvky. Stavební polystyren se vyrábí vefukováním a expanzí ve velkých formách a následným dělením na kompaktní desky. Při výrobě tvarovek by tedy bylo za potřebí buďto vyrobit široké spektrum malých forem nebo vyřešit vyřezání tvaru z velkého bloku, což by vedlo k velkým prořezům a časové náročnosti výroby.

Do výčtu není vůbec zahrnut způsob izolování potrubí pomocí vakuovaných prostorů. Tyto systémy se v praxi často nazývají „ocel v oceli“, podle jejich provedení z dvojice

ocelových trubek. Vakuum jako takové není materiál, proto jej nelze dále srovnávat. I výpočet tepelných ztrát těchto potrubí probíhá zcela odlišně, než je popisováno v této práci.

### 2.3 Povrchové úpravy potrubních izolací

Jak bylo řečeno v úvodu, součástí tepelně izolačních systémů potrubí jsou často povrchové úpravy snižující tepelné ztráty sáláním. Jelikož je množství vysálaného tepla úměrné čtvrté mocnině absolutní teploty (viz kap. 4.1.4) mají tato opatření význam při vyšších teplotách média přenášeného potrubím. Jedná se vesměs o úpravy těchto druhů:

- a) Krytí materiálem s nízkoemisivním povrchem s funkcí chráničky
- b) Nízkoemisivní folie bez funkce mechanické či povětrnostní ochrany (používáno v interiérech)
- c) Nízkoemisivní nátěry chráničky

Obecně nejvyužívanějším materiálem v této oblasti je hliník a jeho slitiny. Aplikují se jak hliníkové plechy, tak nátěry s obsahem hliníku a folie, které jsou často integrovány do celku například s rohoží vaty. Vhodnost použití Al je nepopiratelná, ale přesto má své nevýhody. Jeho nepočtené alternativy mohou být především levnější. Rozdíl v ceně se projeví hlavně v případě provedení a), kde je nutno použít krytí o větší tloušťce.

V případě a) se kromě nízké emisivity a odolnosti povětrnostním vlivům klade důraz také na mechanickou odolnost pouzdra. Alternativou k hliníkovým plechům je zde ocelový pozinkovaný plech, který je levnější, ale při poškození povrchové vrstvy koroduje. Montážně efektivní druh pozinkovaného pouzdra je typ „Spiro“, kdy se na potrubí navíjí pás konstantní šířky ve šroubovici.



**Obr. 2** - Povrchová ochrana exteriérového potrubí nekovovou folií

Dále existuje kompozitní folie na bázi polypropylenu (PP) s lesklým povrchem a minimálním obsahem hliníku prodávaná pod obchodním názvem Dartefol [11] či jinými, aplikace viz obr. 2. Mechanické odolnosti potřebné k setrvání ve volných exteriérech

dosahuje při tloušťce pouhých 0,35 mm. Hlavní výhodou jejího převážně nekovového složení je nulová cena jejího materiálu ve výkupnách sběrných surovin, není tedy lákadlem pro zloděje, kteří v mnoha případech rozebrali krytí dálkových potrubních tras za účelem prodeje jeho kovového materiálu.

## 2.4 Popis často používaných izolačních materiálů

Pro zhodnocení celkové vhodnosti materiálů pro izolace potrubí bylo třeba určit, které vlastnosti je třeba sledovat a porovnávat. Nejprve byly hodnoceny vlastnosti přímo určující možnost dlouhodobé existence izolace v místě instalace při zachování požadovaných vlastností.

Takovou vlastností je například **teplotní odolnost**. Tu je třeba sledovat z dlouhodobého hlediska, některé materiály dobře snáší vysoké teploty krátkodobě, ale při trvalé expozici rychle degradují. Teplotní odolnost není dána přímo teplotou tání materiálu, ale například odolností použitých pojiv či hranicí pevnosti únosné pro udržení tvaru a struktury. Dále je možno kvantifikovat funkci izolace a hodnotit jak jsou její materiál či celková konstrukce odolné vnějším vlivům z pohledu změny tepelné vodivosti. Jde tedy o **součinitel tepelné vodivosti**, kterému je přímo úměrný tepelný tok konstantní tloušťkou a průřezem materiálu při konstantním tepelném rozdílu mezi povrchy zkoumaného tělesa. Obecně se ve všech substancích mění s teplotou, mnohem větší změny tepelné vodivosti izolačního systému ale nastávají například právě při **navlhání** vláknitých a porézních materiálů. U materiálů považovaných za izolanty tepelná vodivost s teplotou roste, u tepelných vodičů klesá. Dále je nutno studovat **objemovou hmotnost** (hustotu) materiálu, na které mj. závisí tepelná vodivost, ale také tento parametr určuje zatížení potrubí vahou izolace a ovlivňuje tedy nároky na ukotvení potrubí. **Tepelná roztažnost** udává kompatibilitu s materiálem potrubí, zvláště na delších úsecích by neměly být roztažnosti těchto dvou materiálů příliš rozdílné. Pro dobrou funkci izolace při nestacionárních stavech je důležitá malá hodnota **měrné tepelné kapacity**, to je u používaných materiálů všeobecně splněno.

V neposlední řadě byly hodnoceny vlastnosti jako například **hořlavost**, která nemá nic společného s vlastní funkcí materiálu, přesto je ve velkém množství aplikací určitou míru tohoto bezpečnostního parametru zajistit. Klasifikace se provádí podle normy ČSN EN 13501-1, která dělí materiály do tříd „Reakce na oheň“. Tyto třídy jsou značeny A1, A2, B, C, D, F, seřazeno od nehořlavých materiálů po lehce hořlavé (rozuměno snadno hořlavé).

K nejdůležitějším parametrům technickoekonomických srovnání je bezpochyby **cena**. Aby mohly být efektivně cenově poměřeny jednotlivé izolační materiály, byla zavedena jednotná metoda určení ceny vztažené nikoli na objem či hmotnost, ale na nejdůležitější technický parametr výsledné vytvořené konstrukce – tepelný odpor  $R$ . Ten závisí na tepelné vodivosti substance  $\lambda$  a na tloušťce vrstvy  $s$ , pokud se tato vrstva uvažuje rovinná. Nutné bylo tedy nejprve určit objemovou cenu izolace, tu vztáhnout na objem referenční vrstvy o takové tloušťce, která měla referenční hodnotu tepelného odporu. Nejprve byla stanovena referenční hodnota  $R_{ref}$  a z té bylo možno vypočítat tloušťku referenční vrstvy  $s_{iz}$ . Na této tloušťce závisí objem referenční vrstvy, plocha vrstvy byla uvažována vždy  $1 \text{ m}^2$ . Tloušťka je již parametrem samotné izolace a nikoli obecně dodržovanou referenční hodnotou.

Pro zjednodušení nebyl zaváděn tepelný odpor válcové vrstvy, která odpovídá skutečné izolaci potrubí, jelikož by do výpočtu přibyly rozměrové parametry potrubí. Ty by byly nežádoucím prvkem výpočtu, který se vztahuje pouze k samotnému materiálu a nikoli k místu užití. Vypovídací hodnota této vztažené ceny byla po tomto zjednodušení zachována.



Tepelný odpor rovinné stěny, tloušťka, objem a měrná cena izolace:

$$R = \frac{S}{\lambda} [\text{m}^2\text{K} \cdot \text{W}^{-1}], \quad R_{ref} = 1 [\text{m}^2\text{K} \cdot \text{W}^{-1}],$$

$$\delta_{iz} = R_{ref} \cdot \lambda_{iz} [m], \quad V_{iz} = S_{ref} \cdot s_{iz} [m^3], \quad S_{ref} = 1 [m^2],$$

$$c_{izm} = c_{viz} \cdot V_{iz} = c_{viz} \cdot S_{ref} \cdot R_{ref} \cdot \lambda_{iz} [K\check{c}],$$

při  $R_{ref} = 1$  a  $S_{ref} = 1$  možno jednotku poměrné ceny uvažovat jako  $[K\check{c}/m^4K \cdot W^{-1}]$ .

Určení objemové ceny je možné provést na základě ceníku izolačních výrobků. Způsob se liší v závislosti na formě výrobku (desky, skruže, foukaná izolace). Je nemožné smysluplně poměřovat ceny izolací, pro které se aplikuje zcela jiná technologie instalace, či jsou použity v odlišných podmínkách. Porovnání ceny je možné provést vždy až po určení množiny materiálů vhodných pro konkrétní aplikaci a ceny se musí konfrontovat také s cenou za provedení montáže daného typu izolace či její ochrany před vnějšími vlivy.

### 2.4.1 Minerální vaty [9][11][12][14][15][16]

Vyrábí se z přírodního čediče, jenž je nejhojnější magmatickou horninou na zemském povrchu. Ten se taví při teplotách okolo 1300°C a tavenina se proudem vzduchu rozvlákňuje. Výsledná vlákna mají tedy krystalickou strukturu této horniny. Makrostruktura materiálu je charakterizována jako otevřená, jedná se o tělesa slisovaná či navinutá z těchto vláken, spojená cementovým pojivem. To je přidáno k surovinám ještě před tavením a vytvrzuje se ve zvláštní peci po něm. Teplotní odolnost vyrobené vaty se pohybuje od 250 až do 800 °C. Součinitel tepelné vodivosti vaty se leží v mezích 0,035 až 0,31 W/(m\*K) napříč celým spektrem teplotní odolnosti. Tepelná roztažnost je velmi malá, vata dobře zachovává tvar. Objemová hmotnost se pohybuje mezi 50 až 200 kg/m<sup>3</sup>.

Minerální vata je přirozeně nehořlavá - třída A1. Její poměrně nízký difúzní součinitel odporu zajišťuje vysokou paropropustnost, která je považována za výhodu tohoto materiálu. Následkem této schopnosti se totiž dokáže, při umožněném odvětrání, zbavit vlhkosti, která se k izolaci dostala. Tuto výhodu lze využít pouze u potrubí o vyšší teplotě než okolí, u chladírenských rozvodů by měla za následek naopak přivádění vlhkosti k potrubí, kde by probíhala nežádoucí kondenzace. Hydrofobních vlastností musí být docilováno uměle různými přísadami. Snahou je co největší omezení kapilární elevace vody ve štěrbinách mezi vlákny.

Vyrábí se ve formě desek či skruží. Desky je možno aplikovat pouze na potrubí větších průměrů vzhledem k jejich omezené ohebnosti. Skruže se naopak vyrábějí pouze pro menší průměry, též z technologických důvodů montáže i samotné výroby a skladování. Vlákna samotná mají poměrně vynikající mechanické vlastnosti, ale mechanická odolnost izolace je dána především jejich soudržností. Opatřením pro zvýšení odolnosti vatových desek je ocelové pozinkované pletivo vsíté do jejího povrchu. Dále je někdy nutné celý systém izolace podpořit nosnou konstrukcí přenášející vlastní tíhu izolace na trubku. Tato konstrukce bývá kovová a musí tedy být konstruována tak, aby co způsobila co nejmenší odvod tepla z trubky. Často používanými variantami výrobků jsou vatová tělesa s hliníkovou fólií lepenou na část jejich povrchu.

Minerální vaty se používají velmi hojně. Je možno je využít pro všechny druhy uložení potrubí, zvláště pokud se zajistí její dostatečná ochrana před vnějšími vlivy. Montuje se na hotové potrubí nebo je součástí prefabrikovaných celků předizolovaných potrubí. Více v kapitolách 2.4.4 a 3.1.

## 2.4.2 Skelné vaty [11], [14], [15]

Jsou vesměs alternativou pro minerální vaty. Vlákna vyráběná obdobnou technologií se liší složením a amorfni mikrostrukturou. Pojena jsou nejčastěji formaldehydovou pryskyřicí. Teplotní vodivost nabývá hodnot 0,045 až 0,310 W/(m\*K). Výrobky se liší stropem pro tepelnou odolnost izolace, kterým je hladina 450 °C. Teplotní roztažnost a objemová hmotnost je obdobná jako u vaty minerální.

Mechanické vlastnosti výrobků jsou též odlišné, mají proti minerálním vatám nižší hustotu (objemovou hmotnost), jsou měkčí a poddajnější. Hodí se proto pro izolace komplikovanějších tvarů, například armatur. Vyrábějí se a dodávají často zavínuté v rolích. Vyztužování se provádí kašírováním netkanou skelnou textilií. Na rozdíl od čedičových produktů se hůře realizuje přenos tíhového zatížení prostřednictvím izolace, to vede k zesložitěním technologie a tedy k menší míře použití ve srovnání s minerální vlnou pro běžné geometrické tvary potrubí – válcové trubky a kolena.

## 2.4.3 Keramické vaty [10] [11] [14]

Tyto vaty jsou složeny z oxidických keramik. Obsahují 40-60% SiO<sub>2</sub>, zbytek hmotnosti sestává kromě minoritních příměsí buď z Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nebo ještě z ZrO<sub>2</sub>, který se přidává v množství kolem 15% pouze do těch teplotně nejodolnějších produktů. Teplotní roztažnost a objemová hmotnost je obdobná jako u vaty minerální.

Keramické vlny jsou další alternativou rozšířených pěn minerálních. Mají také krystalickou mikrostrukturu, vyrábí se obdobnou technologií. Jsou také výbornou protipožární izolací. Jejich hlavní výhodou je vysoká teplotní odolnost až 1650 °C. To je předurčuje především k izolacím metalurgických zařízení, pecí a kotlů, ale také vysoce tepelně zatížených potrubí. Výhodou je zde taky výjimečně dobrá odolnost vůči náhlým změnám okolní teploty – tepelným šokům. Jako příklad z oblasti energetiky je uvedeno potrubí primárního okruhu jaderného reaktoru chlazeného tekutými solemi, či parovody s párou nadkritických parametrů. Pro dálková vedení je tedy použití keramické vaty nepravděpodobné.

## 2.4.4 Polyuretanové pěny [13]

Existují v mnoha variantách. Vznikají polyadiční reakcí dvou složek ze složitých organických látek na bázi kyanátů a alkoholů. Měkké polyuretany jsou známé pod názvem molitan, vyrábí se z nich například ložní matrace. Existuje dokonce druh polyuretanu vykazující vlastnosti elastomeru. Relativně nedávno se souputníkem PUR pěn staly pěny PIR neboli polyizokyanuratové pěny.

K tepelnému izolování se používají pěny tvrdé s uzavřenými buňkami. Otevřené pěny se používají k tepelnému izolování pouze ve stavebnictví, naproti uzavřeným druhům disponují malým difúzním součinitelem odporu. Dlouhodobá teplotní odolnost sahá pouze k 120 °C, výjimečně 140 °C, opačným směrem jsou orientovány některé typy, které odolají kryogenním teplotám až -200 °C. Tepelná vodivost dosahuje ve srovnání výborných 0,02 až 0,05 W/(m\*K). Objemová hmotnost lišící se podle hustoty a velikosti buněk se pohybuje od 30 do 300 kg/m<sup>3</sup>. Tepelná roztažnost je srovnatelná s hodnotami oceli, je možno pěnu lepit přímo na povrch trubky.

Požární bezpečnost je dána třídou reakce na oheň B. Téhož kvality se dosahuje uměle přidáním retardérů hoření. Difúze plynů je téměř dokonale znemožněna makrostrukturou pěny. Probírané materiály dosahují ve srovnání se všemi vláknitými i mnoha pěnovými druhy technických izolací znatelně vyšší mechanickou odolnost. Výroba samotné pěny z připravených chemikálií není podmíněna spotřebou energie, vysokými teplotami ani dalšími specifiky. Mechanická odolnost spolu s jednoduchostí technologie předurčuje PUR pro specifické způsoby výroby izolace a celého potrubního systému.

Hlavním způsobem použití PUR a PIR pěn v izolacích potrubí je výroba předizolovaných trub, které se nejčastěji používají při moderním způsobu uložení potrubí do země bez výstavby kanálu – bezkanálová provedení. Pěnou je vyplněn prostor mezi samotnou médionosnou trubkou a chráničkou. Tu tvoří trubka buďto ocelová, na vnějším povrchu potažená vrstvou vysokohustotního polyethylenu (PEHD), nebo samotná polyethylenová trubka. Stejně se vyrábí i nadzemní rozvody s rozdílným provedením chráničky.

Vlastnosti polyuretanu jsou tak výhodné, že se používá v kombinovaných systémech tam, kde je teplota médionosné trubky nad hranicí teplotní odolnosti PUR. Na tuto trubku je aplikována vrstva odolnějšího materiálu, běžně minerální vaty. Z analýzy teplotního pole v systému je určena potřebná minimální tloušťka této vnitřní vrstvy, která bude mít na své vnější hranici teplotu již v únosných mezích pro aplikaci polyuretanu, kterým se pak vyplní zbytek prostoru až po stěnu chráničky.

Výhod nenáročného způsobu výroby PUR se pak využívá při izolaci kolem svarů potrubí či armatur prováděných na samotném staveništi, viz obr. 3. Pouzdrem navlečeným přes izolované místo je uzavřen prostor kolem něj, malou dírou v tomto pouzdře jsou vstříknuty tvořící složky pěny a po krátké technologické přestávce je možno potrubí považovat za dokončené. Do bezkanálových podzemních potrubí izolovaných polyuretanem se často zavádí také elektrické vodiče sloužící pro detekci případné havárie mající za následek vnikání vlhkosti do izolace.

V chladicí technice bývá největší technickou obtíží kondenzace vzdušné vlhkosti v místech sebemenšího tepelného mostu. Takovými jsou kotvy a nosné prvky potrubí. PUR řeší tento problém svou velkou únosností, objímky potrubí je možno provést nikoli přes médionosnou trubku, ale přímo přes zaizolovaný celek. I pro potrubí, kde je aplikován jiný druh izolace se vyrábějí krátká polyuretanová pouzdra pro místa ukotvení. Ostatní izolace pak musí být důsledně spojena s tímto pouzdrem.

Tvrdé polyuretanové pěny, jak název napovídá, není možné po vytvrzení téměř nijak tvarovat a ohýbat. Ve vyráběném sortimentu proto nefiguruje desky pro aplikaci na potrubí. Ani skruže a tvarovky nejsou většinou technologicky a ekonomicky výhodné.



**Obr. 3** - Pohled na svarovou mezeru předizolované trubky

#### 2.4.5 Kaučukové pěny [11], [12], [14]

Mohou být původu přírodního nebo umělého, dnes se častěji vyrábí umělé butylové kaučuky. Teplotní oblast použitelnosti leží většinou mezi -200 až 110, výjimečně až 150 °C. Struktura buněk je uzavřená, viz obr. 4, materiál je zvláště odolný vůči difúzi plynů. Součinitel tepelné vodivosti dosahuje 0,033 W/(m\*K), při teplotě kolem 40 °C se zvyšuje až na 0,040 W/(m\*K) a s teplotou dále stoupá. Hodnoty na mezích oblasti teplotní odolnosti nebyly zjištěny. Hořlavost je charakterizována třídou reakce na oheň B.



Obr. 4 - Detail uzavřené makrostruktury kaučukové pěny

Kaučukové pěny se prodávají ve formě nekonečných podélně rozříznutých hadic, případně rolovaných desek a kratších pouzder pro potrubí větších průměrů, lepší se speciálním lepidlem. Sortiment výrobců nesahá výše než k průměrům potrubí kolem 200 mm.

Hlavní využití tedy nachází v rozvodných sítích civilních budov jako vodovody, kanalizace, případně ústřední vytápění. Při aplikaci na kanalizační trubky jde o funkci zvukové, nikoli tepelné izolace.

Díky maximální difúzní odolnosti jsou kaučuky používány v chladírenské technice. Specifickým způsobem aplikace, který využívá vysokou odolnost působení UV záření, je izolace potrubí obsluhujícího solární kolektory.

Montážní práce usnadňuje vysoká poddajnost materiálu. Tato vlastnost ale ztěžuje upevňování potrubí, které řeší například PUR nosná pouzdra popsána v předchozí kapitole.

#### 2.4.6 Polyethylenové pěny [11], [12], [14]

Umělé polymerní pěny z polyethylenu odolné do teplot okolo 100°C. Uzavřená struktura buněk, třída reakce na oheň E nebo F, poměrně vysoký difúzní odpor. Tepelná vodivost při 10 °C je kolem 0,038 W/(m\*K), s teplotou mírně roste. Nízká objemová hmotnost 30-50 kg/m<sup>3</sup>.

Jsou známé mj. pod názvem Mirelon. Sortiment sestává především z trubic, které se na potrubí navlékají, nebo jsou podélně nařiznuté a přetahují se přes hotové potrubí. Vyrábí se také široké pásy. Při montáži je využito vysoké pružnosti a poddajnosti srovnatelné ale menší nežli kaučuk. Provádí se také různá ochranná opatření proti mechanickému poškození vnějšího povrchu. Mezi tyto úpravy patří jak typické aluminiové folie, tak i jiné vrstvy, většinou z plastů. Díky použití na potrubí o nižších teplotách není třeba tolik dbát na nízkou sálavost povrchu, je možné se více soustředit na mechanickou ochranu.

Použití plyne z vlastností a vyráběného sortimentu. Omezuje se hlavně na běžné rozvody civilních budov o malých průměrech potrubí do 200 mm.

#### 2.4.7 Pěnové sklo [17]

Je velmi tuhá a mezi izolacemi nejpevnější pěna s pevností v tlaku od 0,4 až k 1,3 MPa. Je černě zbarvená. Toto zbarvení základního materiálu, kterým je běžné křemičité sklo včetně recyklátu, je způsobeno zpěňováním. Při tom je velmi jemně drcené sklo

promícháno s koksem, a zahřáto na teploty kolem 1000 °C, kdy dochází k hoření uhlíku a produkci spalin, především CO<sub>2</sub>. Ten je zachycován nataveným sklem do bublin. Jelikož je CO<sub>2</sub> tříatomovým plynem, není zcela diatermním prostředím, tak jako vesměs dvouatomový vzduch, tvoří tak clonu paprskům tepleného záření. Samotný plyn má také menší tepelnou vodivost oproti vzduchu.

Tepelná vodivost celku je díky husté síti skleněných stěn přesto až na hodnotách kolem 0,055 až 0,06 W/(mK). Pěnové sklo odolává jak silně kryogenním teplotám blízcím se absolutní nule, tak vysokým teplotám až do 430 °C. Je nehořlavé (A2) a odolává teplotním šokům. Velkou výhodou materiálu je teplotní roztažnost blízká roztažnosti oceli jako převládajícího materiálu pro potrubí. Ani při dlouhodobé expozici vodě není díky dobře uzavřené struktuře buněk pěna nasákavá. Dosahuje objemové hmotnosti 120-200 kg/m<sup>3</sup>.

V izolacích potrubí se používají výhradně přesné tvarovky, možné je též podzemní uložení potrubí v kanálu s granulátem, které se ale vůči progresivním bezkanalovým způsobům uložení nejeví výhodně. Tvarovky také nejsou z hlediska výroby a montáže příliš výhodné, ale existují aplikace, kde je nutno využít výhod pěnoskla. Takovými případy jsou potrubí se střídavou pracovní teplotou, kde vznikají jak tepelné šoky, tak větší délkové dilatace potrubního a izolačního materiálu. Velkou měrou je využíváno pěnosklo v posledních letech ve stavebnictví.

#### 2.4.8 Souhrn

Přehledným znázorněním vybraných zkoumaných hodnot je tabulka 1.

Parametr	Teplotní odolnost	Tepelná vodivost	Měrná hmotnost	Hydrofobní vlastnosti	Difúzní odpor	Hořlavost	Relativní poddajnost	Struktura
	[°C]	[W/(mK)]	[kg/m <sup>3</sup> ]					
Minerální vata	250÷800	0,04÷0,31	50÷200	Dobré, umělé	Malý	A1	Velká	O
Skelná vata	~ 450	0,05÷0,31	15÷150	Dobré, umělé	Malý	A1	Velmi velká	O
Keramická vata	~ 1650	0,04÷0,45	100 ÷200	Dobré, umělé	Malý	A1	Velká	O
Pěnové sklo	-270÷430	0,06÷0,1	120 ÷200	Dobré, přirozené	~ ∞	A2	~ 0	U
Kaučukové pěny	-200÷150	0,04÷0,45	Nezjištěno	Dobré, přirozené	~ ∞	B	Velmi velká	U
PE pěna	~105	~ 0,04	30 ÷50	Dobré, přirozené	~ ∞	C3	Velká	U
PUR pěna	-200÷140	0,02÷0,09	120 ÷200	Dobré, přirozené	~ ∞	A1	Malá	U

**Tabulka 1** – Přehled vlastností izolačních materiálů

(O – otevřená; U – uzavřená; hodnoty jsou orientační, ne vždy postihují celou oblast tepelné odolnosti. U materiálů nepoužitelných pro chladírenství není uvedena dolní mez teplotní odolnosti)

### 3 Specifika parovodů

Parovody jsou potrubní systémy dopravující vodní páru z místa její výroby na místo spotřeby samotné páry nebo tepelné energie v ní obsažené a to zpravidla včetně kondenzačního skupenského tepla.

Jednak se vyskytují jako místní průmyslové rozvody, zejména v uhelných, jaderných a paroplynových elektrárnách a dalších energetických centrálních pracujících s parní turbínou, již jsou dodavatelem páry.

Například v paroplynových cyklech se zplyňováním uhlí a dalších sdružených provozech je pára z rozvodů na krátkou vzdálenost podrobena technologické spotřebě a to i s možností jejího nevrácení do místa výroby. Pokud se přenášená hmota nespotřebovává, vrací se zpravidla zkondenzovaná pára kondenzátním potrubím. Voda má mnohonásobně menší měrný objem, ale nelze ji dopravovat potrubím takovou rychlostí jako páru. V kombinaci těchto skutečností je výsledkem projektování potrubí o průměru přibližně 1/3 průměru parního potrubí (při dvoutrubkovém provedení).

Z pohledu výpočtů je tedy třeba rozlišovat uzavřený a otevřený cyklus, při uzavřeném cyklu je přenášený výkon (tok tepelné energie) nutno zmenšit o výkon přenášený kondenzátním potrubím zpět k výrobnímu páry.

Druhým možným využitím parovodů jsou dálková vedení v rámci soustav centralizovaného zásobování teplem, také s možností její technologické spotřeby nebo pro vytápění civilních a průmyslových objektů [19]. Při projektování dálkového tepelného rozvodu existuje ale více variant provedení. Konkurencí parovodů jsou zde horkovody využívající vysoce přetlakového vedení horké kapalné vody. Při srovnání výhod (+) a nevýhod (-) těchto dvou rozdílných médií a zásad konstrukce jejich transportní sítě jsou vyvozeny následující závěry (horkovody jsou vodní tepelné sítě o teplotě média nad 110 °C, sítě s teplotou nižší se nazývají teplovody a slouží rozdílnému účelu, srovnání se jich netýká):

- + Hmotnostní průtok vzhledem k potřebnému výkonu sítě může být při využití skupenského tepla kondenzace páry menší než u kapalné vody.
- + Pára se dopravuje vlastním tlakem, voda se musí čerpat
- + Pára vytváří ve výškově členité síti mnohem menší hydrostatický tlak než voda
- Při obvykle vyšší teplotě páry dochází k větším absolutním tepelným ztrátám než ve vodní síti
- Při využití mírně přehřáté páry, což je obvyklé, dochází vlivem tepelných úniků a tlakových ztrát ke kondenzaci zlomku páry, kondenzát je nutno odvádět.
- Při kogeneraci tepla a elektřiny v místě výroby páry snižuje odběr páry o dostatečném tlaku účinnost turbíny.

Typické parametry parovodních a horkovodních sítí uvádí následující tabulka.

	Parovod	Horkovod
Přívodní teplota [°C]	180 ÷ 240	110 ÷ 160
Teplota ve vratné větvi [°C]	40 ÷ 70	50 ÷ 80
Pracovní tlak (absolutní) [MPa]	0,2 ÷ 2,4	1,6 ÷ 2,5

**Tabulka 2** – Srovnání typických parametrů parovodu a horkovodu

Pozn.: Vstupní provozní tlak v parovodu závisí přímo na teplotě páry pro splnění existence páry nad oblastí pravé mezní křivky termodynamických diagramů a na tlakových ztrátách v potrubí. U kapalně vody je situace obdobná, je nutno zajistit setrvání v kapalném skupenství a pokrytí tlakových ztrát, ale na rozdíl od páry lze tlak regulovat výkonem čerpadel a nikoli jen samotnými parametry média vstupujícího do sítě.

### 3.1 Druhy uložení parovodních potrubí [19]

Mnoho ze způsobů uložení bylo zmíněno již v rešerši v souvislosti s izolačními materiály, které se pro daný druh uložení hodí. Pro úplnost je uveden tento přehled a následný komentář obsažený v podkapitolách:

- Uložení v interiéru
- Uložení v exteriéru
  - o Nadzemní nebo pozemní
  - o Podzemní
    - Kanálové
      - V neprůlezných kanálech
      - V městských kolektorech
    - Bezkanálové

Pozn.: Za exteriér je zde považován prostor mimo budovy i přesto, že je tento pojem často chápán jako prostor čistě venkovní, kde volně působí povětrnostní vlivy. Kanály a kolektory jsou zde chápány ve smyslu právě ochrany před těmito vlivy. Důvodem tohoto výkladu je, že potrubí, která by nevedla pod zemí, musela by vést nad ní. Zároveň není obvyklé, aby se budovala speciální opatření obdobných rozměrů nebo parametrů jako kanály a kolektory na skrytí a ochránění potrubí mající trasu uvnitř budovy.

#### 3.1.1 Uložení v interiéru

Rozumí se parovodní rozvody procházející vnitřními prostory především průmyslových budov, kde se uvažuje klidná atmosféra. Při konstrukci rozvodů společně s budovou je vhodné oba projekty dostatečně kooperovat, při dodatečném vestavování potrubí do stávajícího objektu je nutno co nejvíce využít nosné konstrukce k upevnění potrubí.

#### 3.1.2 Pozemní a nadzemní uložení v exteriéru

Ve volné, nezastavěné krajině je možno vést potrubí uložená nad terénem na nízkých patkách (pozemní uložení). Jedná se o nejlevnější a nejjednodušší způsob realizace. Izoluje se vhodným izolačním materiálem, dle rešerše a praktické reality jde především o minerální vatu, případně v dvouvrstvé kombinaci s polyuretanem. Je třeba zajistit povrchovou ochranu před povětrnostními vlivy, úzce souvisící s mechanickou ochranou, dle kap. 2.3. Nevýhodou je nutnost vyhýbání trasy veškeré zástavbě i zemědělské půdě, obvykle je vedení směřováno při pozemních komunikacích či vodních tocích.

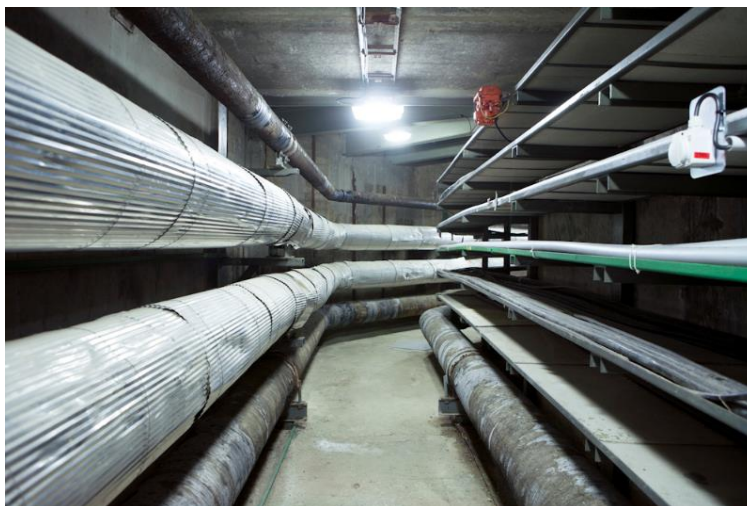
Tzv. nadzemní uložení potrubí na vysokých sloupech se většinou nevyplatí. Výjimkou mohou být rozvody křížující průmyslové areály. Fragmenty tohoto druhu instalace potrubí jsou potrubní mosty překonávající cesty či koryta vodních toků, pokud ovšem není nasnadě využití stávající mostní konstrukce s jiným primárním určením a s dostatečnou nosností.

### 3.1.3 Podzemní kanálové uložení v neprůlezných kanálech

Zastaralý způsob, při jehož realizaci se budovaly z betonových dílců kanály, do kterých bylo ukládáno potrubí izolované běžně – minerální vatou s krytem, nebo pomocí hydrofobních zásypů. Složitost tohoto způsobu v kombinaci dalšími problémy s odváděním vlhkosti způsobilo téměř úplné zavržení této technologie a s tím i ústup sypaných izolantů.

### 3.1.4 Podzemní kanálové uložení v městských kolektorech

Potrubí se montuje do rozměrných průchozích multifunkčních tunelů obsahujících kromě rozvodu tepla také další vedení – vodovod, plynovod, silové elektrické vedení, datové linky apod. Jak lze pozorovat na obr. 5. Logicky se tato technologie používá v husté zástavbě větších měst, kde není místa nad zemí ani pod ní nazbyt. Výhodou je sdružená investice do všech rozvodů a možnost snadné údržby a oprav. Parovod se zde izoluje se stejně jako při pozemním uložení s tím, že není třeba chránit izolaci mechanicky, používají se ale krytí pro snížení sálavých ztrát a průniku případné odkapávající vlhkosti z kondenzované na stěnách kanálu do izolace.



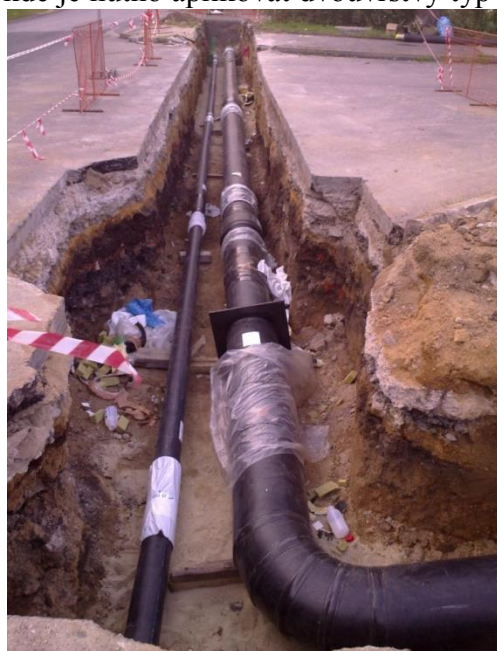
Obr. 5 - Městský kolektor

### 3.1.5 Podzemní bezkanálové uložení

Velmi výhodná technologie pro oblasti s nezhuštěnou zástavbou, která nahradila způsoby kanálové. Je úzce spjata s použitím PUR pěny, detaily o této technologii se nachází proto v kap. 2.4.4. Parovod je zjevně případem potrubí, kde je nutno aplikovat dvouvrstvý typ izolace chránící PUR před teplotním znehodnocením.

Historicky mezi tyto způsoby instalace potrubí patří také rozvody zalité či zasypané v lité resp. sypané izolaci bez aplikace kanálu, avšak s nutností betonování dna výkopu. To se provádělo za účelem stabilizace sypané hmoty či lité izolace před ztuhnutím a také kvůli nutnosti ukotvit potrubí.

Podzemní bezkanálové uložení předizolovaných trub je jedinou technologií stavby parovodu, která nevyžaduje vytvoření tepelných mostů v rámci ukotvení potrubí. Potrubí svou vlastní tíhu přenáší na zeminu celou svou plochou. To je umožněno zejména vysokou pevností PUR a vlastnostmi chráničky. PEHD je houževnatý a vykazuje dobré kluzné vlastnosti, což je nutné pro tepelné dilatace zakopaného potrubí. Pro správnou funkci se potrubí zasypává pískem a až poté zeminou.



Obr. 6 - Pokládka bezkanálového parovodu



## 4 Tepelné ztráty parního potrubí kruhového průřezu

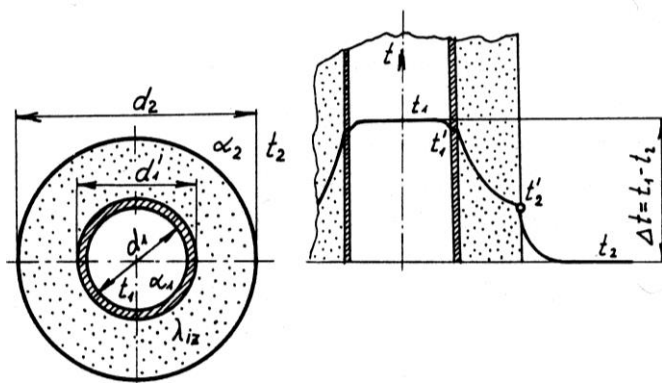
Mechanismus vedení ztrátového tepla se liší podle druhu uložení potrubí zmíněných v předchozí kapitole. Realizují se zde děje jak vedení tepla, tak sálání a konvekce. Z hlediska výpočtu zůstávají děje přestupu tepla mezi médii a stěnou trubky, vedení stěnou trubky a izolací shodné, dle uložení se liší tedy pouze situace na vnější straně povrchu izolace.

Všechny děje jsou považovány za stacionární. Skutečnému provozu tepelné sítě tento předpoklad odpovídá jen přibližně, tato práce se ale omezuje na návrhové stavy těchto sítí, které tak lze řešit s dostatečnou přesností. Předpokládá se také, že rychlost proudění páry je pod úrovní  $Ma = 0,4$ , což je běžně používaná hodnota hranice mezi stlačitelným a nestlačitelným prouděním. Proudění je tedy nestlačitelné, nedochází k projevům Fannova či Rayleighova děje a podobných specifik těchto proudů. Další případná zjednodušení jsou uvedena v příslušné kapitole.

Celá tato kapitola udává návod na co nejpřesnější výpočet tepelných ztrát potrubí se zohledněním co nejvíce možných faktorů tyto ztráty ovlivňujících. Zároveň ale komentuje míru nutnosti to či ono zohlednit a vše je směřováno tak, aby z uvedených vztahů mohl být vyvozen kýžený optimalizační výpočet tloušťky izolace rozebíraný v kap. 5.

### 4.1 Odvození obecných vztahů

Provedeno na příkladu ztrát neizolované parovodní trubky, zobecněno pro izolované trubky. Průběh teploty na izolované trubce je zřejmý z obr.



Obr. 7 - Průběh teploty po souřadnici poloměru

#### 4.1.1 Kondukční tepelný tok

Vedením se teplo v tuhých stěnách přenáší na základě rozdílných teplot jejich povrchů. Zkoumán je ustálený případ, při kterém je pole teplotních gradientů v čase neměnné a tepelný tok je tedy konstantní [2]. Dále lze na válcové ploše při využití cylindrických souřadnic  $(r, \varphi, z)$  s osou  $z$  v ose trubky označit vedení za jednodimenzionální, jelikož teplota se mění pouze se souřadnicí poloměru  $r$ . Zanedbána je tedy změna teploty média po délce potrubí. Předpokládána je také s teplotou neměnná hodnota  $\lambda$ , další komentář dále. Pak pro tepelný tok jednotkovou plochou stěny trubky  $q_s$  platí Biotův-Fourierův zákon. Po jeho pronásobení vztahem pro velikost izotermické plochy jednotkové délky  $S$  závislé na  $r$  vzniká rovnice pro tepelný průtok válcovou plochou jednotkové délky  $\dot{q}$ .

$$q_s = -\lambda \operatorname{grad}(T) = -\lambda \frac{dT}{dr}$$

$$S = 2\pi r$$

$$\dot{q} = -\lambda 2\pi r \frac{dT}{dr}$$

Separací proměnných a integrací:

$$\int_{T_{wl}}^{T_{wh}} dT = \int_{r_{w1}}^{r_{w2}} \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda r} dr$$

$$[T]_{T_{wl}}^{T_{wh}} = \left[ \frac{\dot{q}}{2\pi\lambda} \ln r \right]_{r_{w1}}^{r_{w2}}$$

$$\dot{q} = \frac{2\pi\lambda(T_{wh} - T_{wl})}{\ln \frac{r_{w2}}{r_{w1}}} = \frac{2\pi\lambda(T_{wh} - T_{wl})}{\ln \frac{d_{w2}}{d_{w1}}}$$

Pro zjištění tepelného průtoku je potřeba znát teploty povrchů stěny značené dle vyšší ( $h$ ) a nižší ( $l$ ) teploty  $T_{wh}, T_{wl}$ . Ty jsou ovlivněny dalšími teplosdílnými jevy, které probíhají současně. Jde tedy o kondukcí sousedními odlišnými vrstvami, případně o konvekci v okolních tekutinách.

#### 4.1.2 Konvekční tepelný tok

Pro tepelný tok v teplotní mezní vrstvě takové tekutiny platí empirický Newtonův vztah pro tepelný tok při přestupu tepla  $\dot{q}_S$ . Ten převádí celý problém určení tepelného toku na určení součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Ten je určován na základě teorie podobnosti, viz dále. Z praktických důvodů jsou při vyjádření  $\dot{q}$  nahrazeny poloměry  $r$  pomocí průměrů  $d$  tyto rozměrové parametry odpovídají válcové stěně, při které děj probíhá.

$$\dot{q}_S = \alpha(T_{fh} - T_{fl})$$

$$\dot{q} = S\alpha(T_{fh} - T_{fl}) = 2\pi r\alpha(T_{fh} - T_{fl}) = \pi d\alpha(T_{fh} - T_{fl})$$

Teploty  $T_{fh}, T_{fl}$  jsou teplotami stěny a neovlivněné oblasti proudu tekutiny dosazené podle toho, zda je stěna tekutinou ohřívána ( $T_w = T_{fl}; T_f = T_{fh}$ ) nebo ochlazována (opačně).

#### 4.1.3 Sloučený a zobecněný vztah pro tepelný tok

Pro případ neizolované parovodní trubky lze dále odvodit vztah pro tepelný průtok  $\dot{q}$  při znalosti teplot neovlivněného proudu páry  $T_{f1}$  a neovlivněné oblasti atmosféry  $T_{f2}$ . Vrstvami, kterými teplo prostupuje, jsou v tomto případě stěna trubky a dvě teplotní mezní vrstvy – v páře (index 1) a v okolním vzduchu (index 2).

K dispozici jsou tedy tři rovnice, 2 podle Newtonova vztahu, 1 podle Biot-Foufierova zákona. Teplota stěny při konvekci je logicky rovna teplotě příslušného povrchu stěny ( $T_{w1}, T_{w2}$ ) v rovnici pro kondukcí. Průměry  $d_{w1}, d_{w2}$  na površích tuhé stěny jsou rovny stejně tak. Výsledná soustava při vyjádření rozdílů teplot na levou stranu vypadá následovně:

$$T_{f1} - T_{w1} = \dot{q} \cdot \frac{1}{\pi d_{w1} \alpha}$$

$$T_{w2} - T_{w1} = \dot{q} \cdot \frac{\ln \frac{d_{w2}}{d_{w1}}}{2\pi\lambda}$$

$$T_{f2} - T_{w2} = \dot{q} \cdot \frac{1}{\pi d_{w2} \alpha}$$

Při sečtení těchto tří rovnic jsou eliminovány obě teploty na rozhraních oblastí přítomných jevů. Po opětovném vyjádření tepelného toku:

$$\dot{q} = \frac{\pi(T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{d_{w1}\alpha_1} + \frac{\ln \frac{d_{w2}}{d_{w1}}}{2\lambda} + \frac{1}{d_{w2}\alpha_2}}$$

Ve jmenovateli se zjevně vyskytuje součet zlomků charakterizující vliv každého probíhajícího děje na tepelný tok. Tyto jednotlivé zlomky jsou proto nazývány tepelnými odpory, které se značí  $R$ . Potom (v souladu s [5]) je obecně, při různém počtu či druhu těchto tepelných odporů ztrátový tepelný tok z trubky tepelné sítě vztahený na jednotku délky dán vztahem:

$$\dot{q} = \frac{\pi(T_{f1} - T_{f2})}{\sum_i R_i}$$

#### 4.1.4 Tepelné odpory

Obecně mají podle předchozích závěrů vztahy pro tepelné odpory následující tvar:

- **Při vedení:**

$$R_v = \frac{\ln \frac{d_{w2}}{d_{w1}}}{2\lambda}$$

Vnější (2) a vnitřní (1) průměry stěny, kterou je stěna trubky či případná vrstva přidané izolace, jsou pro výpočet tepelných ztrát známy. Není tomu tak, pokud je hledána optimální tloušťka izolace, viz kap. 5. Tepelná vodivost je známa, resp. je třeba její hodnotu určit ze známé závislosti  $\lambda(T)$  pro daný materiál a kvalifikovaného odhadu určovací teploty.

Tento princip sdílení tepla se uplatňuje v materiálu potrubí a izolace, který je z makroskopického pohledu možno považovat za tuhý. V plynném vyplněných prostorech v izolaci se ve skutečnosti děje také sálání, jehož vliv je zde dostatečně zahrnut v rámci hodnoty  $\lambda$ , která, určuje-li se měřením, je skutečně tímto faktorem ovlivněna. Konvekce se ve štěrbinách izolantu uplatňuje většinou zanedbatelně, při nízké objemové hmotnosti izolace se může projevit, makroskopicky jde ale opět o zvýšení  $\lambda$ .

- **Při konvekci:**

$$R_k = \frac{1}{d_w \alpha}$$

Pro určení je nutná znalost průměru válcové stěny  $d_w$  a součinitele přestupu tepla  $\alpha$ . Ten na rozdíl od geometrických parametrů není při projektování potrubí znám. Jeho určování se zabývá kapitoly 4.1 a 4.2.

- **Vliv sálání při souběžné konvekci** [5], [6]:

Sálání je řešeno na základech jeho teorie, především zákona Planckova a zákona Stefan-Boltzmannova, uvádějícího sálání dokonale černého a šedého tělesa a zákona Kirchhoffova, udávajícího množství tepla předaného mezi dvěma plochami. Sálavost je teplo vysálané z jednotkové plochy povrchu tělesa. Černé těleso je těleso vyzařující maximum

možné energie na všech vlnových délkách. Jeho sálavost je  $E_0 = C_0 \cdot T^4$ , kde  $C_0 = 5,676 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ . Šedé těleso je idealizací reálného tělesa. Jeho sálavost se vyjadřuje pomocí sálavosti  $E_0$  a bezrozměrného koeficientu poměrné sálavosti  $\epsilon$  jako

$$E = \epsilon \cdot E_0.$$

Celkové množství tepla vyměněné mezi dvěma plochami nestejné teploty je dáno jako

$$\dot{q}_s = \epsilon_n C_0 (T_h^4 - T_l^4),$$

$$\text{kde } \epsilon_n = \left( \frac{1}{\epsilon_h} + \frac{S_h}{S_l} \left( \frac{1}{\epsilon_l} - 1 \right) \right)^{-1}.$$

K podstatnému zjednodušení připívá fakt, že, kromě uložení potrubí v kanálu, platí  $S_l \rightarrow \infty$ , tedy  $S_h/S_l \rightarrow 0$  a  $\epsilon_n \rightarrow \epsilon_h$ . Nutno připustit, že sálání se takto zohledňuje jen přibližným způsobem.

Sálání je ovlivněno také charakterem okolního prostoru. Přestože je třeba pro konvekci uvažován neomezený prostor, z pohledu sálání je nutno uvažovat, že potrubí je obklopeno prostředím, jež obsahuje při pohledu různými směry nějaké tuhé či jiné sálavé těleso v konečné vzdálenosti. To znamená, že vysálaná energie je rozdílem vysálané a absorbované energie. Teplota povrchů těchto těles je uvažována jako shodná s teplotou atmosféry.

V praxi se často případy přestupu tepla z tuhé stěny do plynného, průteplivého okolí řeší podle toho, zda z jevů sdílení tepla dominuje sálání nebo konvekce. U potrubí se ale často tyto jevy z energetického hlediska podepisují srovnatelně a tak je nutno řešit oba. Dle [5] je možno formálně promítnout vysálané množství tepla na zvýšení  $\alpha$  a dále počítat s jevem, jako by se jednalo o samotnou konvekci.

Vztahy pro určení nárůstu  $\alpha$  vlivem sálání ( $\alpha_s$ ) ze známého množství vysálaného tepla  $\dot{q}_s$ . Průteplivý plyn se nachází zpravidla na vnější straně potrubí, proto indexy 2.

$$\dot{q}_s = \alpha_s (T_{w2} - T_{f2})$$

$$\alpha_s = \frac{\dot{q}_s}{(T_{w2} - T_{f2})}$$

Souhrnný jev je potom charakterizován úhrnným součinitelem přestupu tepla:

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k$$

Index  $k$  značí konvekční přestup tepla. Výsledný tepelný odpor je kondukčním odporem s výše uvedeným souhrnným součinitelem přestupu tepla  $\alpha$ .

#### 4.1.5 Teploty na rozhraních odporových oblastí

Při kontrole bezpečné teploty povrchu či určování tloušťky izolace pro její splnění je třeba tuto teplotu z předchozích výpočtů vyjádřit. Podobným případem je určování dělicího průměru mezi vrstvami izolace pro využití málo tepelně odolného izolantu. Slovně lze princip níže uvedené rovnice popsat takto: teplota povrchu stěny je taková, aby byl zajištěn známý tepelný tok mezi tímto povrchem a neovlivněnou oblastí známé teploty.

$$T_{w2} = T_{f2} + \frac{\dot{q}}{\pi d_{w2} \alpha_2}$$

Obdobně pro teplotu na rozhraní vrstev izolace (index  $d$  pro místo předělu,  $k2$  pro konvekci na vnější straně,  $iz2$  pro vnější vrstvu izolace):

$$T_d = T_{f2} + \frac{\dot{q}}{R_{k2} + R_{iz2}} = T_{w2} + \frac{\dot{q}}{R_{iz2}}$$

## 4.2 Určení součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubky

Na rozdíl od přestupu na vnější straně je tento součinitel nezávislý na druhu uložení potrubí. Mezi proudem páry a jej obklopující válcovou stěnou probíhá nucená konvekce, při vysokých rychlostech má přirozená konvekce naprosto zanedbatelný vliv. Pro určení součinitele označeného  $\alpha_1$  slouží teorie podobnosti.

Tato teorie pracuje s kritériálními rovnicemi vytvořenými ze znalosti všech vlivů působících na kvantitu přestupu tepla. Do finální podoby jsou upraveny pomocí výsledků experimentu. Pro běžně se vyskytující případy přestupu tepla, kterým bezesporu tento případ je, jsou experimentálně ověřené výsledky analýzy problému k nalezení v literatuře. Kritériální rovnice jsou funkční závislosti určovaného kritéria na kritériích určujících, běžně obsahují konstantní koeficient a mají mocninný tvar, tedy určující kritéria, kterým přísluší reálný exponent, se vzájemně násobí. Kritéria jsou bezrozměrnými seskupeními určujících či určovaných veličin mající hlubší fyzikální význam.

Ve skutečnosti mohou nastat dva kvalitativně odlišné děje.

Pokud je dopravovaná pára pouze lehce přehřátá, dochází vlivem odvodu tepla k filmové kondenzaci na stěně. Existují kritériální rovnice, které tento děj popisují, avšak jejich řešením se dostává tak vysokých hodnot  $\alpha_1$  (až  $10^4$  W/(m<sup>2</sup>K)) [7], že lze výsledný tepelný odpor oproti ostatním zanedbat a to i v případě neizolované trubky.

$$R_{k1} = 0$$

Pokud jsou stěny dobře smáčivé, nenastane kondenzace kapková. Kromě zjednodušení výpočtu má toto ještě jeden důležitý důsledek: Kondenzace je děj, který vždy probíhá izotermicky. To znamená, že předpoklad neměnné teploty po délce potrubí je splněn a také, že je doprava páry těsně nad mezi sytosti výhodná z hlediska zajištění přesných parametrů na místě spotřeby. V dálkových rozvodech se této skutečnosti často využívá.

Pokud je pára dostatečně přehřátá, projevuje se odvádění tepla na snižování její teploty. Teplota po délce potrubí tedy klesá, což je zanedbáno. Na kratších vedeních, kterými bývá přehřátá pára dopravována, tento předpoklad nezpůsobí velkou chybu. Možná je kontrola pomocí iteračního výpočtu. Příslušná kritériální rovnice pro nucenou konvekci v rovné trubce má podle [1] tvar:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Určující teplotou fyzikálních veličin na ní závislých je dle literatury provedeno pro teplotu proudu, není požadováno zohlednit změnu hodnot těchto veličin vlivem teploty v mezní vrstvě. Určujícím rozměrem je vnitřní průměr potrubí. Po rozepsání kritérií a vyjádření  $\alpha_1$  (ucelený přehled kritérií je dostupný v seznamu použitých symbolů):

$$\alpha_1 = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{f1}}{d_{w1}} \cdot \sqrt[5]{\left(\frac{w_{f1} d_{w1}}{\nu_{f1}}\right)^4 \cdot \left(\frac{\nu_{f1} \rho_{f1} c_{pf1}}{\lambda_{f1}}\right)^2} = 0,023 \cdot \sqrt[5]{\frac{w_{f1}^4 \lambda_{f1}^3}{d_{w1}} \cdot \left(\frac{\rho_{f1} c_{pf1}}{\nu_{f1}}\right)^2}$$

Oblast platnosti rovnice:

- $Re > 10^4$ , tedy turbulentní proudění. V drtivé většině obvyklých konfigurací parovodů splněno.

- $Pr \in < 0,7; 2500 >$ , pro vodní páru vždy splněno,  $Pr > 1$ , s teplotou roste jen mírně.
- Potrubí hydraulicky hladké – je v zájmu kvality rozvodu, aby toto bylo projektantem zajištěno. Dlouhým provozem se může drsnost změnit.
- Potrubí přímá, stálého kruhového průřezu délky větší než  $50 \cdot d_{w1}$ . Tato podmínka není splněna. Tento vliv lze korigovat tabelovaným součinitelem, který zvyšuje hodnotu středního  $\alpha_1$  na kratších úsecích. U dlouhých vedení s malým počtem kolen a armatur vztáženým na délku není vliv podstatný, při krátkých členitých rozvodech je připuštěna chyba v tomto dílčím výpočtu  $\alpha_1$ , která se ale při zvážení vlivu tepelného odporu  $R_{k1}$  vůči ostatním neprojeví v celkovém výsledku výpočtu tepelných ztrát.

### 4.3 Určení součinitele přestupu tepla na vnější straně trubky

Konvekce má podle uložení potrubí odlišný charakter. Podrobně je možno tyto rozdíly srovnat podle jednotlivých podkapitol.

Sledovány jsou střední hodnoty součinitel přestupu tepla po obvodu trubky. Skutečné hodnoty jsou obecně v místě náběhu proudu na obtékané těleso největší a v místě případného odtržení nejmenší a to i v případě proudu indukovaného mechanismem přirozené konvekce.

Použité vztahy platí pro suchý vzduch, přesnost tím neutrpí nevyhovujícím způsobem.

#### 4.3.1 Při uložení potrubí v interiéru

Atmosféra v interiéru je považována za klidnou, neproudící. V okolí parovodu probíhá přirozená konvekce způsobená rozdílem hustoty teplejších a chladnějších částí tekutiny. Okolí potrubí se předpokládá dostatečně otevřené, a to tak, že je možné řešit konvekci v neomezeném prostoru. Tato kategorizace je charakterizována tak, že v bezprostředním okolí ochlazovaného tělesa nedochází k opětovnému chlazení tekutiny. Platí následující kritériální rovnice podle [1]:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{n}}$$

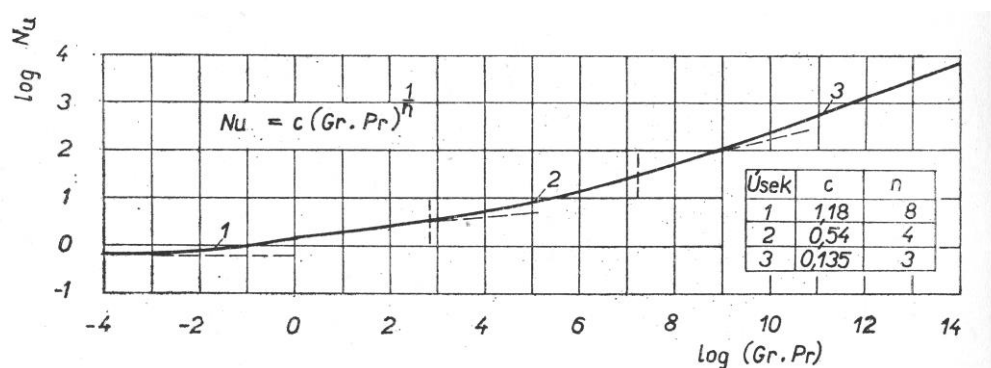
Hodnoty  $c$  a  $n$  jsou závislé na součinu  $GrPr$ , viz obr. 8. Rovnice má tedy tři režimy pro laminární, přechodové a turbulentní proudění. Pro drtivou většinu parovodů nepřipadá v úvahu laminární proudění kolem trubky.

Hodnoty  $c$ ,  $n$  udává následující tabulka:

Proudění	$GrPr \in$	$c$	$n$
Turbulentní	$< 2 \cdot 10^7; \infty >$	1,18	8
Přechodové	$< 5 \cdot 10^2; 2 \cdot 10^7 >$	0,54	4
Laminární	$< 10^{-3}; 5 \cdot 10^2 >$	0,135	3

**Tabulka 3:** Režimy kritériální rovnice přirozené konvekce

Literatura udává ještě zpřesněný vztah pro vodorovné trubky, který však není brán v úvahu, pro složitost integrace do výpočetního programu. Takto program mění při zjištění použití turbulentního režimu hodnoty použitých konstant, nikoli celý výpočetní vztah pro  $\alpha_2$ .



Obr. 8 - Význam c, n

Výpočet je ztížen díky volbě určujícího rozměru, kterým je průměr rozměru tělesa do směru vektoru tíhového zrychlení, jinak řečeno do směru proudění. Tím se určující rozměr  $L$  v Grashofově čísle liší při různé orientaci potrubí. Pro vodorovné potrubí je to jeho vnější průměr (pochopitelně i včetně izolace), pro svislé potrubí je to výška, kterou potrubí překonává.

Při turbulentním proudě a využití jemu příslušících hodnot  $c$  a  $n$  to neplatí, jelikož se určující rozměr v rovnici zcela vykrátí. Fyzikálně to odpovídá stabilizaci tloušťky mezní vrstvy a taktéž stabilizaci  $\alpha_2$  při turbulizaci proudě.

Pro časté případy vírnatého proudění tomu tak není, pro účely této práce je vliv svislých úseků zanedbán, jelikož svislé vedení nebývá časté a naprostou výjimkou by bylo, kdyby tvořilo velkou část délky vedení. Pokud by bylo posouzeno, že svislé vedení je třeba zohlednit, je mnoho způsobů, jak to udělat. Metody by se lišily v závislosti na požadovaném výsledku. Je možno počítat svislé úseky zvlášť a izolovat je odlišnou tloušťkou izolace, nebo například vypočítat  $\alpha_2$  pro tyto úseky zvlášť a zahrnout je do celkové hodnoty pomocí aritmetického průměru váženého podle potrubí a jednotlivých úseků.

Dále je provedeno zanedbání svislých úseků a proto  $L = d_{w2}$ .

Další problém vyvstává při hledání určovací teploty pro fyzikální veličiny tekutiny  $T_u = \frac{T_{w2} + T_{f2}}{2}$ , resp. také členu Grashofova čísla  $\Delta T = T_{w2} - T_{f2}$ . Obecně není totiž známa teplota povrchu  $T_{w2}$ . Tato teplota je ale zpětně funkcí  $\alpha_2$  a proto je třeba provést odhad a po stanovení prvotních výsledků iterovat pro navzájem odpovídající hodnoty  $T_{w2}$  a  $\alpha_2$ . Fyzikální povaha děje zaručuje konvergenci výpočtu.

$$GrPr = \left( \gamma_{f2} \cdot \Delta T \cdot \frac{g \cdot d_{w2}^3}{\nu_{f2}^2} \right) \cdot \left( \frac{\nu_{f2} \rho_{f2} c_{pf2}}{\lambda_{f2}} \right) = \Delta T \cdot d_{w2}^3 \cdot \frac{\gamma_{f2} g \rho_{f2} c_{pf2}}{\nu_{f2} \lambda_{f2}}$$

Nusseltovo číslo má následující tvar, z čehož dále vyplývá celkový vztah pro určení konvektivní části součinitele přestupu tepla na vnější straně potrubí

$$Nu = \frac{\alpha_{2k} d_{w2}}{\lambda_{f2}}$$

$$\alpha_{2k} = c \cdot \frac{\lambda_{f2}}{d_{w2}} \cdot \sqrt[n]{\Delta T \cdot d_{w2}^3 \cdot \frac{\gamma_{f2} g \rho_{f2} c_{pf2}}{\nu_{f2} \lambda_{f2}}}$$

Sálání zohledněné podle kap. 4.1.4 je zahrnuto pomocí

$$\alpha_s = \frac{\dot{q}_s}{(T_{w2} - T_{f2})}, \text{ kde}$$

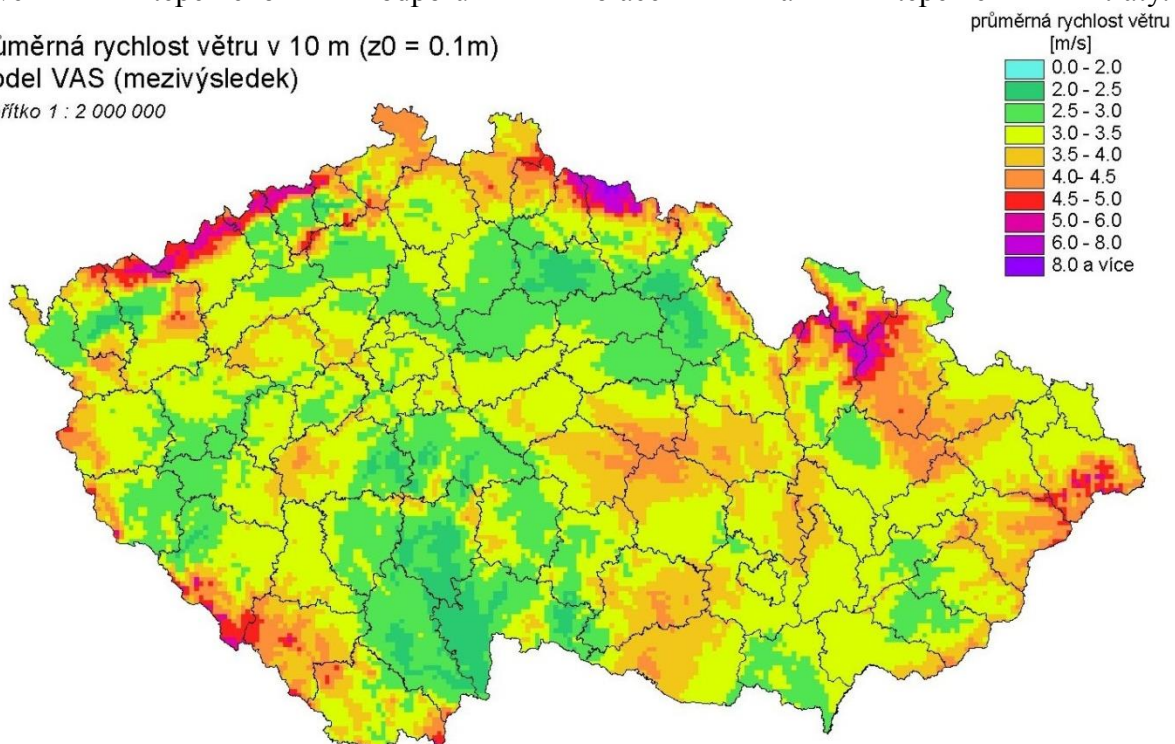
$$\dot{q}_s = 5,676 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon \cdot (T_{w2}^4 - T_{f2}^4)$$

Součinitel  $\epsilon$  je poměrnou pohltivostí vnějšího povrchu, na kterou zdegeneroval původní součinitel vzájemné sálavosti  $\epsilon_n$ . Sálání je možno vypočítat až po iteračním výpočtu konvekce, tedy po zjištění  $T_{w2}$ .

#### 4.3.2 Při nadzemním uložení potrubí v exteriéru

Konvekce je nucená vlivem obtékání potrubí větrem. Vzhledem k jeho nepředvídatelné rychlosti se vychází z meteorologických měření (kromě obr. 9 jsou i další přesnější data dostupná v [20]). Ta probíhají na sondách umístěných 10 m nad terénem umístěných na mnoha místech v ČR i ve světě. Při použití měřené hodnoty zjištěné v lokalitě umístění potrubí tedy těžko může dojít k podhodnocení skutečné rychlosti. Potrubí se nachází většinou blízko při terénu, kde je sama o sobě rychlost větru menší a dále se zde vyskytuje více obtékaných překážek než ve zmíněné výšce. Nepřesnost tkví ve značně nestacionárním stavu rychlosti větru, měřeny jsou průměrné roční hodnoty. S kolísáním rychlosti větru kolísá také  $\alpha_{2k}$ . Při návrhu izolace dlouhodobě ekonomicky optimální to je zcela v pořádku. Při nutnosti zajištění např. přesných výstupních parametrů páry (resp. množství páry ztracené kondenzací na trase) to může znamenat problém, který je ale většinou potlačen dominantním vlivem tepelného odporu izolace na tepelné ztráty.

průměrná rychlost větru v 10 m ( $z_0 = 0.1\text{m}$ )  
model VAS (mezivýsledek)  
měřítko 1 : 2 000 000



Obr. 9 - Průměrná roční rychlost větru v ČR

Kolísání  $\alpha_{2k}$  se dokonce neděje jen vlivem různé rychlosti, ale i vlivem podstaty tepelně přestupového děje, který je při velmi nízkých rychlostech nuceného proudu ovlivněn také přirozenou konvekcí. Svojí roli hraje také směr náběhu proudu na trubku, který se zohledňuje pomocí bezrozměrného součinitele kolísajícího s úhlem od hodnoty 1 k 0,5 [1], [3]; tzn. přestup tepla může být oproti kolmému náběhu proudu pouze menší. Oba popsané



jevy jsou zanedbány, jelikož při sestavování obecně platného výpočtového aparátu jsou tyto stavy nepostihnutelné

Kriteriální rovnice pro obtékání trubek při nucené konvekci je podle [3]:

$$Nu = 1,11 \cdot k \cdot Re^m \cdot Pr^{0,31} \cdot \left(0,785 \cdot \frac{T_{w2}}{T_{f2}}\right)^{m/4}$$

Při  $k = 0,0239$ ;  $m = 0,805$  platí rovnice při splnění podmínek:

- $Pr \in < 0,5; 1000 >$ , což je v případě vzduchu zaručeno
- $Re \in < 4 \cdot 10^4; 4 \cdot 10^5 >$  horní hranice je intervalu je přerušena u velkých potrubí obtékaných rychlostmi přibližně nad 10 m/s, což je nad průměrnými ročními hodnotami i pro největrnější místa v ČR, viz obr. 9. Spodní hranice je intervalu překročena naopak u malých potrubí obtékaných malou rychlostí, kde  $\alpha_{2k}$  dosahuje nižších hodnot, zanedbání funguje směrem k bezpečnosti výpočtu. Splnění této podmínky je tedy uznáno v mezích malých chyb.

Při dosazení  $k$ ,  $m$  a vyjádření  $\alpha_{2k}$  z  $Nu$ :

$$\alpha_{2k} = 0,0265 \cdot \frac{\lambda_{f2}}{d_{w2}} \cdot Re^{0,805} \cdot Pr^{0,31} \cdot \left(0,785 \cdot \frac{T_{w2}}{T_{f2}}\right)^{0,201}$$

Určující teplotou veličin v kritériích je aritmetický průměr  $\frac{T_{w2}+T_{f2}}{2}$ . Poslední činitel výše uvedené rovnice má funkci opravy určení těchto veličin vzhledem k průběhu teploty v mezní vrstvě proudícího plynu.

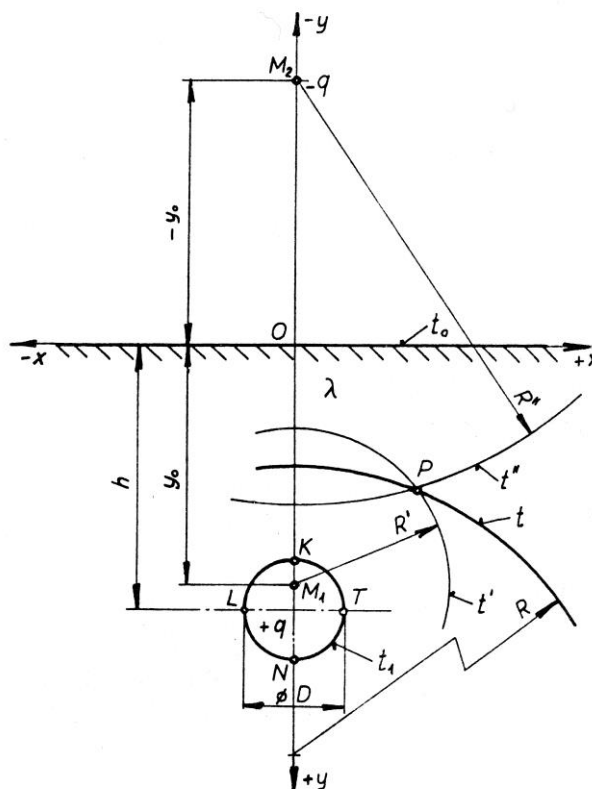
Pro sálavé ztráty je výpočet přibližný, jelikož je potrubí z většiny neobklopeno žádným sálajícím povrchem až na terén. Velkou chybu tato část výpočtu bude vykazovat, pokud budou na potrubí v provozu dopadat paprsky slunce, mající na Zemi výkon sahající při ideálních podmínkách až k 300 W/m<sup>2</sup>. V letních obdobích nebývají parovody většinou v provozu či médium nemá maximální parametry. Pokud by tomu ale tak bylo, mohlo by to vést k teplotnímu poškození nízkoteplotní vrstvy dvouvrstvé izolace. Vlivem slunečního ohřevu vnějšího povrchu a provozního ohřevu vnitřního povrchu izolace celkově stoupne teplota ve vrstvě izolace, která nesmí být nad hranicí teplotní odolnosti izolace. V běžném výpočtu je ale nutno zanedbání slunečního záření provést, protože sluneční svit je podmíněn ročním obdobím a především nepředvídatelnou oblačností. Výpočet  $\alpha_s$  tedy probíhá shodně jako v předchozím případě:

$$\alpha_s = \frac{5,676 \cdot 10^{-8} \cdot \epsilon \cdot (T_{w2}^4 - T_{f2}^4)}{(T_{w2} - T_{f2})}$$

### 4.3.3 Při bezkanálovém uložení potrubí v exteriéru

Speciální přibližná metoda výpočtu popisuje vedení tepla z povrchu izolace polomasívkem zeminy k povrchu terénu, konvektivně ochlazovanému atmosférou. Navzdory názvu kapitoly je určován rovnou celkový odpor způsobený tímto způsobem toku ztrátového tepla.

Pro odvození tepelného odporu je nejprve využito zjednodušení okrajových podmínek Biot-Fourierova zákona pro vedení zeminou za účelem umožnění použití metody skládání teplotních polí, viz obr 10. Ta je analogií ke skládání rychlostních polí potenciálního proudění v mechanice tekutin. Ekvipotenciálami jsou zde izotermy, úprava okrajových podmínek znamená ztotožnění rovinného povrchu terénu s izotermou o teplotě skutečné atmosféry. Zavedeny jsou vzájemně nezávislá teplotní pole bodového zdroje (ztráty trubky) a odběru (zachování zavedené izotermy) sečtením těchto dvou polí je získána soustava celkových izoterm. Určení umístění zdroje a odběru tepla o mohutnosti rovné tepelným ztrátám je provedeno ztotožněním izotermy o teplotě  $T_{w2}$  s vnějším povrchem potrubí. Teplotní pole znázorněné izotermami je soustavou neprotínajících se kružnic se středy ležícími na svislé ose trubky, které se přibližováním k izotermě povrchu z obou stran zvětšují svůj poloměr, až největší kružnice dosáhne nekonečného průměru a splyne tak s přímkovou izotermou na hranici terénu.



Obr. 10 - Schema metody skládání tepelných polí

Přechod na skutečné okrajové podmínky přestupu tepla z prohřáté části terénu do atmosféry je proveden posunutím tohoto teplotního pole o  $\lambda_{f2}/\alpha_2$  směrem nahoru (má význam zvětšení hloubky uložení potrubí). Při hloubce uložení měřené k ose potrubí  $h > 2d_{w2}$  je výsledný tepelný odpor soustavy zemina-přesup do atmosféry:

$$R_{k2} = \frac{1}{2\lambda_z} \cdot \ln \left( \frac{4}{d_{w2}} \left( h + \frac{\lambda_{f2}}{\alpha_2} \right) \right)$$

Index  $z$  značí parametry zeminy, tepelný odpor je vzhledem k souřadnosti s tepelnými odpory konvekce u jiných druhů uložení indexován shodně –  $k2$ . Slovně uvedený postup této metody určení tepelného odporu je matematicky popsán a okomentován v [5]. Hodnota  $\alpha_2$  je kvalifikovaně odhadnuta v rozmezí 10 až 20 W/(m<sup>2</sup>K).

Uvažování vlivu sálání z ohřivaného terénu do atmosféry zde postrádá smysl. Charakter povrchu může být velmi různorodý, teplota terénu je zvýšena velmi málo.

#### 4.3.4 Při uložení v kanálu nebo kolektoru

Tato uložení nejsou přímo zahrnuta do této práce. Podle kapitoly 3.1.3 ani v dnešní době není třeba kanálové potrubí řešit. Ta kolektorová ale aktuální jsou. Přibližný výpočet lze provést na základě kap. 4.3.1, kde jako  $T_{f2}$  bude použita odhadnutá hodnota v kolektoru, která se dle [5] pro kanály pohybuje mezi 25-30 °C pro kolektory může být nižší, vždy je možno ji považovat za totožnou s teplotou stěn.

Diskutabilní je zde použití kritériální rovnice pro přirozenou konvekci v neomezeném prostoru, jelikož prostor v kolektoru je dosti malý, bude se spíše jednat o konvekci v omezeném prostoru. Geometrie rozmístění všech vedení v kolektoru však může být různá, i dostatečně otevřená.

Výše zmíněnou geometrii je ovlivněno také sálání, u kterého pravděpodobně nelze zanedbat poměr velikosti vzájemně sálajících ploch, které je provedeno v poslední části kap. 4.1.4, ve které je ale uveden i úplný vztah pro vzájemnou sálavost  $\epsilon_n$ .

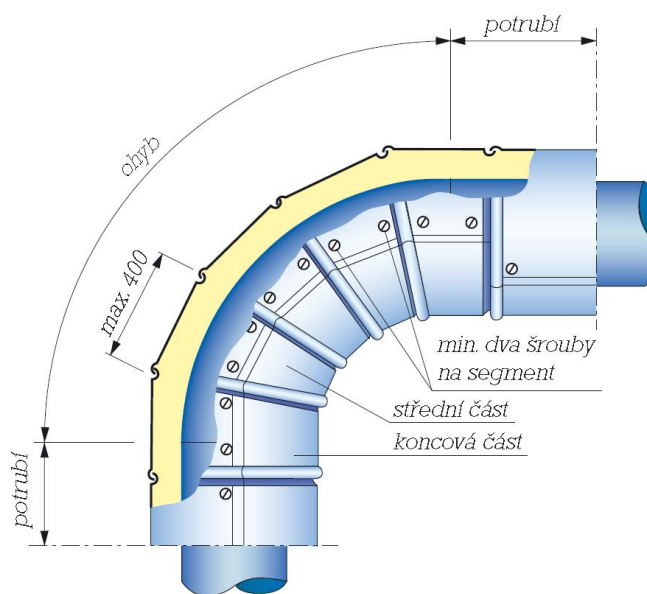
#### 4.4 Vliv armatur a potrubních prvků

Armatury jsou z definice všechny prvky potrubí, kromě samotných trub. Jde tedy o nosné patky či závěsy, prvky zajišťující provoz a ovládání potrubí jako příruby, ventily, klapky, odlučovače kondenzátu či axiální kompenzátory, případně lze mezi armatury počítat také kolena. Všechny tyto prvky ovlivňují tepelné ztráty, jelikož pro ně zcela nebo částečně neplatí dosud uvedené výpočty. Je také třeba se snažit snížit jejich tepelné ztráty, vzhledem k odlišné geometrii se musí izolovat jinak, často se to ale provádí obtížněji či méně účinně.

Nejsou zde zahrnuty potrubní přípojky a odbočky. Zadání práce je autorem chápáno tak, že potrubím je systém dopravující médium z jednoho místa na jedno jediné vzdálené místo určení. Přípojky či odbočky mohou naprosto změnit situaci a parametry, se kterými se má počítat, a vytvářejí z jednoduchého potrubí distribuční síť. V jejích ramenech a mezi každou potrubní křížovatkou se může zcela měnit stav média, jeho průtok, geometrie potrubí atd. Pokud má být vedení s přípojkami považováno za potrubí, pak musí jejich vliv na tyto parametry zanedbatelný (např. při velmi malém průtoku, při pouze příležitostném otevírání průtoku přípojnou větví apod.). Pokud budou patřičně zaizolovány, což by mělo být na kvalitně vyprojektovaném potrubí splněno, je možné zanedbat i jejich tepelné ztráty

##### 4.4.1 Kolena

Zkoumána jsou pouze kolena 90°, kterých se na mnoha technických potrubích vyskytuje drtivá většina. Jedná se o potrubní prvek nejvíce podobný samotnému potrubí. Izoluje se podobným způsobem (obr. 11), pouze je jeho geometrií ztížena instalace izolace, pro kterou je třeba přesně z rohoží či pouzder vyřezat tvary, které dobře okopírují toroidní povrch kolene. Podobná je situace i s pláštěm izolace. U stříkané pěnové izolace předizolovaných potrubí tento problém nastává právě jen u pláštěchráničky, nikoli u samotné izolace.



Obr. 11 - Příklad segmentové izolace kolena

Pokud je počítáno s potrubím tak, že se přítomnost kolena ignoruje, je délka potrubí v místě, kde se koleno nachází brána jako dvojnásobek poloměru ohybu osy kolene. Tepelné ztráty kolene se od ztrát takto dlouhého přímého úseku potrubí liší na základě různých faktorů:

- Vlivem setrvačnosti proudu se v kolenní poloměru  $R$  mění povaha mezní vrstvy, dochází ke zvýšení  $\alpha_1$ . Toto zvýšení je charakterizováno součinitelem  $\epsilon_R = 1 + 1,77 \cdot d_{w1}/R$ . Ten je o málo větší než 1 a vzhledem k minoritnímu příspěvku tepelného odporu vnitřní konvekce k výpočtu tepelných ztrát je možno tento faktor zanedbat.
- Teplotní pole již nelze charakterizovat jako jednorozměrné, jelikož při přechodu válcové plochy na toroidní se na vnitřní straně válcová plocha zdánlivě „bortí do sebe“, na vnější straně se naopak „roztahuje“. Vzhledem k protikladnému vlivu těchto skutečností je možno předpokládat vyrušení jejich vlivu.
- Odlišná je také velikost plochy, na které probíhá vnější konvekce. Poměr válcové plochy výše zmíněných rozměrů k toroidní ploše je odvozena takto:
  - Povrch kolena (¼ toru):  $S_T = \pi^2 R d_{w1} / 2$
  - Povrch válce nahrazujícího koleno:  $S_V = 2\pi d_{w1} R$
  - Podíl povrchů:

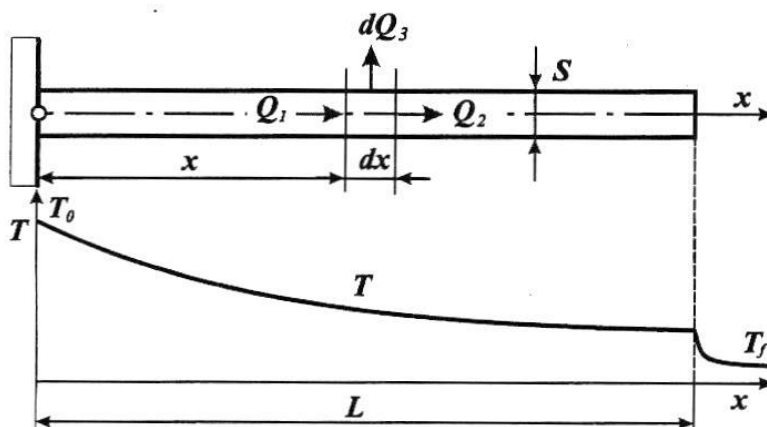
$$\frac{S_T}{S_V} = \frac{\pi^2 R d_{w1}}{2} \cdot \frac{1}{2\pi d_{w1} R} = \frac{\pi}{4} \doteq 0,785$$

Z toho vyplývá, že pokud některý z předchozích dvou předpokladů o zanedbání byl nesprávný, stále je pravděpodobné, že při úplném ignorování kolena a jeho výpočetním nahrazení dotyčným rovným úsekem potrubí nedojde k zásadní chybě. Odvozený poměr povrchů totiž s relativní jistotou udává, že tepelné ztráty kolena budou o něco menší než zmíněného válce. Relativita tohoto tvrzení se skrývá v nejisté hodnotě teploty po povrchu kolena mající vliv na intenzitu vnější konvekce. Výše uvedené platí přesně pro geometricky přesný, hladký torus. Prakticky se geometrický tvar izolace a jejího krytu liší, bývá složen z navazujících částí válců, viz obr. 11. Uvedené závěry zůstávají v platnosti.

Koleno má také vliv na situaci na rovném úseku za ním, narušuje rychlostní a tepelný profil proudu uvnitř, stejně tak jako ostatní armatury měnící přímkovou geometrii proudnic. Viz poslední odstavec kap. 4.2.

#### 4.4.2 Kotvy, patky, závěsy

To jsou prvky, přenášející všechny síly působící na potrubí do pevných konstrukcí stávajících či vybudovaných právě pro upevnění potrubí. Mezi přenášené síly patří především tíha potrubí, média, izolace, jejího pláště a armatur, případně hydrodynamické síly od vnitřního a vnějšího proudu tekutiny a další. Typická provedení jsou dána oborovými a jinými normami. Přehled většího počtu řešení se nachází například v [18]. Vyobrazení dvou z nich lze nalézt v přílohách P I a P II. Jde vždy o spojení kovové konstrukce přímo s potrubím montovaným či svařovaným spojem. Podpěra či závěs pak prochází vrstvou izolace až k pevné konstrukci. Podpěry často umožňují osový posuv potrubí po místě uložení z důvodu eliminace napětí



Obr. 12 - Tepelná bilance elementu tenké prizmatické tyče

vznikajícího teplotního roztažností, to ale s tepelnými ztrátami příliš nesouvisí.

Pro řešení bylo využito metody řešení teplotního pole a tepelného toku na tenké prizmatické tyči vetknuté do vyhřívané plochy přednášené prof. Ing. Linhartem, CSc., jejíž výklad se nachází v [6]. Tenká tyč je zde definována jako tyč průřezu, ve kterém lze zanedbat teplotní profil po průřezu. To je většinou u kotevních prvků potrubí možno provést, jelikož se jedná o jednoduché svařence z relativně tenkých plechů. Prizmaticnost je také často splněna, pokud tomu tak není, je třeba zavést odpovídající zjednodušení.

Vychází se z tepelné bilance vyjmutého elementu délky při okrajových podmínkách známé teploty ve vstupním průřezu (OP 1. druhu) a známé situaci při přestupu tepla z konečného, volného průřezu tyče (OP 3. druhu). Podle obr. 12 Tedy:

$$T|_{x=0} = T_0; \quad -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = \alpha(T|_{x=L} - T_f)$$

Snížení tepelného toku vedeného materiálem na délce elementu tyče odpovídá tepelnému toku povrchem tyče do okolí, opět dle obrázku 12:

$$-d\dot{Q}_1 = d\dot{Q}_3$$

$$-d \left( -\lambda S \frac{dT}{dx} \right) = \alpha U dx (T - T_f)$$

Při substituci  $\theta = T - T_f$ ,  $\frac{\alpha U}{\lambda S} = m^2$  vznikne řešením obyčejné diferenciální rovnice 2. řádu a aplikací OP při určování integračních konstant vztah

$$\theta(x) = T - T_f = (T_0 - T_f) \cdot \frac{e^{m(L-x)}(\lambda m + \alpha) + e^{-m(L-x)}(\lambda m - \alpha)}{e^{mL}(\lambda m + \alpha) + e^{-mL}(\lambda m - \alpha)}.$$

Určení tepelného toku je provedeno na základě vztahu pro tepelný tok vstupním průřezem:

$$\dot{Q} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = -\lambda S (T_0 - T_f) \cdot \frac{e^{mL}(\lambda m + \alpha)(-m) + e^{-mL}(\lambda m - \alpha)m}{e^{mL}(\lambda m + \alpha) + e^{-mL}(\lambda m - \alpha)}.$$

Aplikace tohoto vzorce na konkrétní typ patky se provádí dosazením za geometrické parametry  $L$ ,  $U$  a  $S$ . Ty se určí z jednoduše z rozměrů patky, za  $L$  bylo rozhodnuto považovat volnou délku patky vyskytující se mimo vrstvu izolace, zakřivení válcové plochy přes šířku patky je zde zanedbáno.

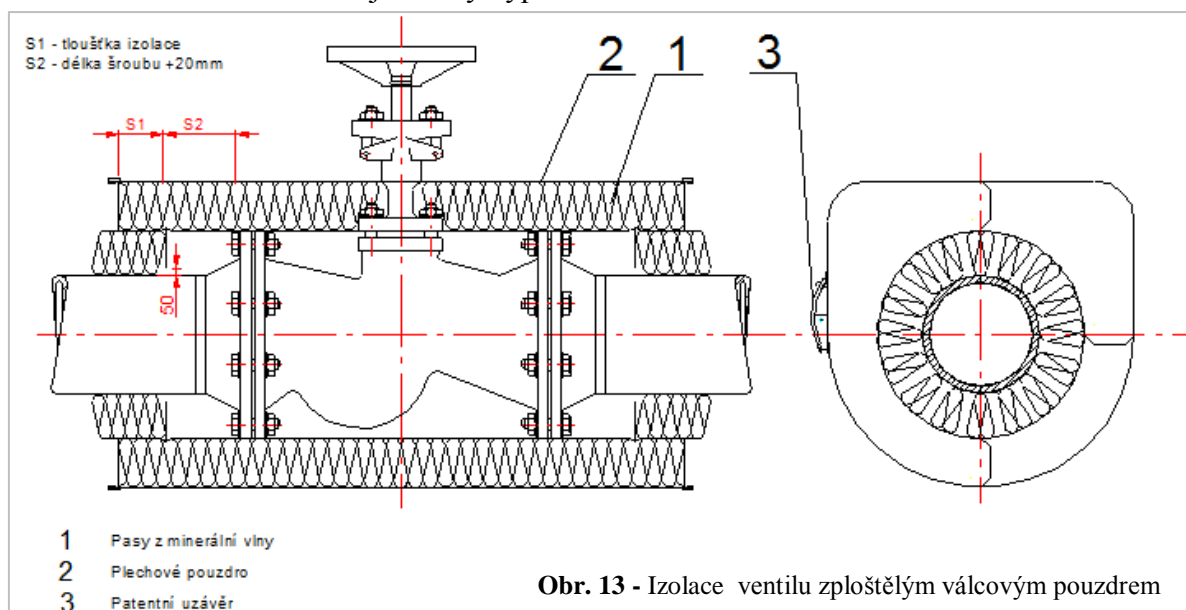
Tepelné veličiny jsou v rámci zjednodušení uvažovány takto:

- $\alpha = \alpha_2$ ; z výpočtu tepelných ztrát potrubí, konstantní
- $\lambda$  je shodná s materiálem trubky, konstantní s teplotou, což je mimo jiné požadováno použitou metodou vedení prizmatickou tyčí
- $T_0 = \epsilon_A \cdot T_{f1}$ , kde  $T_{f1}$  je teplota páry a  $\epsilon_A$  je opravný součinitel, který se snaží postihnout různé dosud zanedbané jevy, které probíhají. Jedná se například o odvod tepla z patky do vrstvy izolace, tepelný odpor vrstvy vzduchu mezi trubkou částmi průřezu patky, které nejsou v přímém kontaktu s trubkou (k trubce nepřivařené podélné výztuhy apod.) a následné rozvádění nerovnoměrného rozložení teploty po průřezu těchto částí. Výchozí hodnota  $\epsilon_A$  je odhadnuta na 0,9.

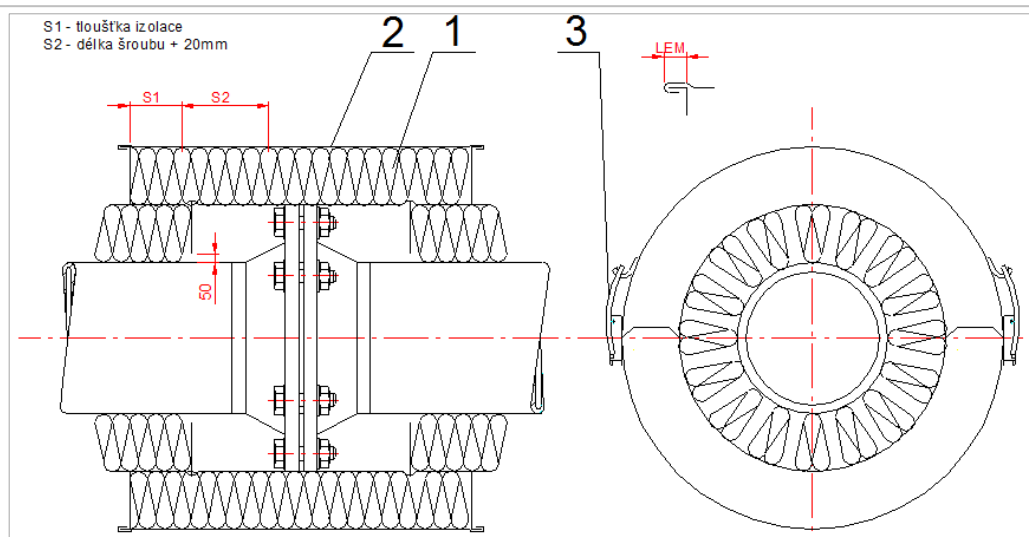
Je bezpodmínečně nutné ověřit správnost použití metody a všech provedených zjednodušení měřeními či výpočtovou simulací. To je nad rámec této bakalářské práce. Pokud by se správnost metody potvrdila a byla by správně kalibrována hodnota  $\epsilon_A$ , umožnilo by se rychle a efektivně zhodnotit tepelné ztráty patek a to bez přímé podpory drahých výpočetních prostředků CFD (computational fluid dynamics, výpočtová mechanika tekutin), kterými se často řeší jevy přenosu tepla neúnosně složité pro jejich analytický popis.

#### 4.4.3 Armatury ve válcových izolačních pouzdrech

Armatury mohou být různě rozměrné a tvarově složité, od čehož se odvíjí způsob jejich zaizolování [8]. Naštěstí velký počet z nich má takové rozměry, že je lze schovat do pouzdra tvaru válce koncentrického s potrubím a to například tak, že armatura se nachází ve volném válcovém prostoru o vnějším průměru izolace potrubí a přes tento průměr je nasazeno pouzdro například právě stejné tloušťky stěny, jako je tloušťka izolace potrubí, viz obr. 14. Taková pouzdra se montují i na armatury, které tomuto popisu dokonale neodpovídají, např. ventily s ovládací hřídelí (viz obr. 13) vedoucí dále od potrubí, než aby se vešla do pouzdra, odlučovače kondenzátu mající vždy vypouštěcí trubku atd.



Obr. 13 - Izolace ventilu zploštělým válcovým pouzdrem



Obr. 14 – Izolace příruby válcovým pouzdrem (pozice z obr. 13 v platnosti)

Tepelné ztráty těchto pouzder lze řešit podobně jako samotné potrubí. Zvětší se vnější plocha, přibude odpor vzduchové mezery (konvekce v omezeném prostoru), případně přibude ztráta přenášená částí armatury mimo pouzdro. Zanedbat je možno oblast překrytí vrstev izolace, na bočních mezikruhových plochách možno uvažovat  $a_2$  vypočítaný na potrubí. Pro tepelný odpor pouzdra by se postupovalo stejně jako pro odpor izolace na trubce. Rovněž pro  $a_{2p}$  konvekce na pouzdře se použije stejný výpočet jako pro potrubí, odvislý od způsobu jeho uložení. Možné je bez velké újmy na přesnosti výpočtu zanedbat vliv armatur bez externí části jako axiálních kompenzátorů a vlnovců, tepelné ztráty jsou téměř shodné se samotným potrubím. Zanedbání je možné provést také v případě vlivu jakékoli armatury na proudové a tepelné pole páry. Tepelný odpor této nucené konvekce přispívá k celkovému stavu přenosu tepla minimálně, jak již bylo řečeno i na jiných místech práce.

Zásadní vliv má vedení tepla většinou kovovou vnější částí armatur ven z pouzdra. V případě vypouštěcí trubky pro kondenzát lze ztrátu řešit dle metody uvedené v předchozí kapitole. Trubka je prizmatická, je zanedbáno vedení kondenzátem, kterým je naplněna, ten má totiž oproti kovovému materiálu trubky násobně menší tepelnou vodivost. To platí při zastaveném průtoku kondenzátu trubkou. Při ustáleném proudu horkého kondenzátu odváděcí trubkou jsou tepelné ztráty dány v podstatě tepelným obsahem odcházející kapaliny, vedení materiálem odváděcí trubky od sběrače kondenzátu je eliminováno, protože je trubka prohřata kondenzátem.

V případě komplikované geometrie např. ovládání kuželky ventilu lze postupovat jen velmi přibližně, doporučením by zde mohlo být využití CFD, stejně jako u armatur, které nelze efektivně izolovat válcovým pouzdem. Výsledky pak budou dosti spolehlivé, ale řešení je zdlouhavé a dá se jen těžko zobecnit, spíše by bylo třeba vypočítat vliv každého odlišného druhu armatury zvlášť a to i včetně rozměrových řad. To je při využití poloempirických metod a výpočtu pomocí algebraických vzorců vzniklých obecným řešením obyčejných diferenciálních rovnic (ODR) jako v kap.4.4.2 třeba také, časová náročnost a nároky na použitý aparát jsou ale nesrovnatelně menší. Zde se ale zdají být tyto metody nepoužitelné.

První přiblížení by bylo možno získat odhadem či sofistikovanějším zjištěním velikosti povrchu externí části a dále odhadu střední teploty tohoto povrchu na základě například násobku  $\Delta T$ , vznikajícího mezi povrchem trubky a atmosférou.

Možno poznamenat, že konvekce probíhající při površích armatur ovládaných nebo vyžadujících údržbu a přístup k nim všeobecně bývá většinou přirozeného charakteru, protože se umísťují většinou do objektů stávajících nebo pro jejich ochranu vybudovaných. Od volného umístění na interiérových potrubích přes exteriérové nadzemní skříně či stavební objekty až po šachty na podzemních trasách.

## 5 Optimalizační výpočet tloušťky izolace

Optimální tloušťka je definována jako tloušťka izolace potrubí, při které je dosaženo minima součtu nákladů vzniklých tepelnými ztrátami a investicí do izolace potrubí. Je tak zajištěno dokonalé využití investičních prostředků. Zbývá určit tyto funkce a jejich součet, najít jejich minimum a zjistit, při jaké tloušťce izolace je jej dosaženo. Tato kapitola přímo popisuje práci programu, v případě potřeby čtenář ale vždy může snadno odvodit, jak postupovat při výpočtu bez jeho podpory.

V první řadě je třeba zmínit, že výpočet tepelných ztrát probíhá v plném rozsahu podle kapitoly 4. Ztráty armatur nemají vliv na hodnotu tloušťky izolace, přístup k jejich propočtu je naznačen pouze v praktických příkladech v přílohách P I a P II. Funkce tepelných ztrát v závislosti na tloušťce izolace není explicitně vyjádřena, ve výpočtu je pouze vypočítána hodnota tepelných ztrát a k ní podle ceny tepla přímo úměrné náklady způsobené tepelnými ztrátami. To je provedeno po malých krocích pro množinu tlouštěk izolací tolikrát, dokud není dosaženo optimální tloušťky izolace.

Výpočet obsahuje tabulky fyzikálních parametrů nutných pro výpočet tepelných ztrát a dalších výsledků. Kromě tabulky rozměrů potrubí komentované v kap. 5.3.2 jsou to tabulky parametrů vzduchu a syté páry, ze kterých je pomocí vestavěných funkcí MS Excel prováděn výběr a interpolace potřebných hodnot dle příslušných určujících teplot pro podobnostní kritéria používaná k výpočtu konvekce. Parametry přehřáté páry jsou obstarány pomocí externího propojení na excelové vydání parních tabulek IAPWS vytvořené Magnusem Holmgrenem [22]. Je třeba udržovat tyto dva soubory v jednom adresáři a pečlivě zkontrolovat toto propojení, nejen pokud je předmětem výpočtu parovod s přehřátou párou, jelikož je tímto způsobem získaná teplota sytosti použita pro kontrolu právě stavu sytosti páry, jejíž parametry jsou zadány.

Dosud nebylo uvedeno, že všechny parametry mající rozměr teploty, se kterými se pracuje ve výpočtu, se ve vztazích vyskytují vždy ve smyslu rozdílu teploty. Je tedy možno libovolně zaměňovat Kelviny se stupni Celsia, pokud bude dodrženo odčítání hodnot vždy ve stejných jednotkách. Výjimkou jsou výpočty sálání, kde se vyskytují čtvrté mocniny absolutních teplot. Celý výpočet, hlavně kvůli pohodlí uživatele tedy pracuje s °C, pro výpočty sálání jsou tyto teploty převedeny na absolutní termodynamické teploty podle vztahu

$$T [K] = (t + 273,15) [^{\circ}C].$$

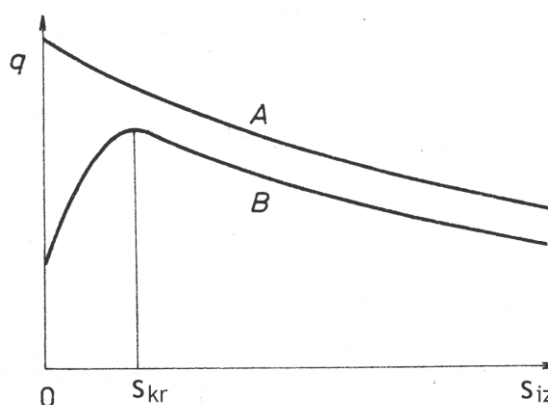
Do výpočtu jsou zavedeny dva typy armatur, navařovací kluzná podpěra a kluzná podpěra se dvěma šroubovanými objímkami [18]. Jeden z listů výpočetního programu obsahuje rozměrové řady podle jim příslušných oborových norem a samotný výpočet jejich tepelných ztrát metodou sestavenou v kap. 4.4.2. Je možno podobným způsobem do výpočtu zavést množství dalších potrubních prvků, jejichž tepelné ztráty lze tímto způsobem propočítat.

Kromě optimální tloušťky izolace poskytuje výpočet množství dalších vedlejších výsledků. Jsou rozděleny do přehledných kategorií a je uveden způsob jejich výpočtu. Vzhledem k omezeným možnostem Excelu v oblasti pokročilých grafických úprav textu a požadavkům na přehlednost je dále upuštěno od veškerých označení s tečkou nad symbolem.

Napříč celou kapitolou je hojně komentován obsah, uspořádání, vzhled a význam prvků vytvořeného excelového sešitu. Grafickým doprovodem slouží této kapitole přílohy P I a P II, které obsahují obrázky podstatné části výpočtového programu.



Pozn.: Ve vztahu k tloušťce izolace je definován ještě jeden zajímavý pojem – kritická tloušťka izolace [3]. Tou je tloušťka, která způsobuje zvětšení tepelného toku válcovou stěnou naproti kýženému snížení. Tento jev nastává vlivem skutečnosti, že přidáváním materiálu k válcovému povrchu se zvětšuje plocha, na které probíhá předpokládaná konvekce. Analýzou matematické závislosti tepelného toku na průměru izolace je zjištěno globální maximum této funkce při  $d_{kr} = 2 \cdot \lambda_{iz} / \alpha_2$  [m]. Při reálných případech izolací potrubí toto není problémem, jak lze ukázat pro typické hodnoty:  $d_{kr} = 2 \cdot 0,05 / 10 = 0,01$  [m]; tzn. že při použitých hodnotách  $\lambda_{iz}$  a  $\alpha_2$  by musela být izolovaná trubka průměru menšího než 1 cm aby vůbec bylo možné dosáhnout stavu zvýšených tepelných ztrát. U parovodů izolovaných kvalitní izolací podléhajících sebestmírně intenzivní konvekci na vnější straně není popsán stav zvýšení tepelných ztrát izolováním potrubí dosažitelný. Tuto skutečnost vystihuje křivka A na obr. 15.



Obr. 15 - Závislost tepelného toku na tloušťce izolace

## 5.1 Vhodnost použití MS Excel

Bylo zadáno použít k výpočtu program Microsoft Office Excel. V akademickém prostředí technických oborů je tento program považován často za téměř méněcenný, oblíbeně se naopak těší mezi ekonomy v praxi i na univerzitách. V technice se k výpočetním účelům používají nejčastěji strukturované programovací jazyky a prostředky (např. Matlab) nebo sofistikované programy s pokročilým grafickým uživatelským rozhraním (např. balík ANSYS), uváděno bez komentáře, k čemu je který vhodný. Tato řešení jsou ale pro mnoho techniků a firem v praxi absolutně mimo jejich finanční možnosti. Naproti tomu je Excel jako součást kancelářského balíku Microsoft Office po dlouhá léta považován za základní součást programového vybavení osobních počítačů. Jeho cena je proto o mnoho řádů nižší než cena programů, se kterými pracují odborníci na univerzitách. Například zde řešený výpočet je v něm proveditelný stejně dobře, jako třeba v Matlabu.

To obrovsky přispívá ke skutečnému přínosu této práce pro praxi. Výpočet může sloužit jako nástroj při projektování i v menších firmách. Vzhledem k tomu, že v oblasti energetiky je potrubí jedním z nejběžnějších a „nejzákladnějších“ zařízení, jeho návrh a provedení mají často za úkol i tyto menší ekonomické subjekty, které stěží mohou svoje podnikatelské zájmy směřovat například k jaderným reaktorům či turbínám.

Při mapování situace vzhledem k tvorbě této práce byla zjištěna existence podobných programů distribuovaných zdarma výrobcí tepelných izolací. Jejich názvy jsou například Rocktech společnosti Rockwool, Isocal (Isover) či KI Tech (Knauf Insulation), k nalezení na doménách www dle [9], [15], [16]. Tyto programy zahrnují mnoho sofistikovaných způsobů jak zpřesnit výpočet tepelných ztrát potrubí, avšak málokdy lze pomocí nich přímo provést výpočet ekonomicky optimální tloušťky izolace. To neznamená, že nelze optimalizaci provést krok za krokem vlastními silami s jejich podporou. Jejich hlavní nevýhodou je však to, že jsou uvolněny ve formátu kompilovaného spustitelného souboru pro PC s Windows (\*.exe), což znemožňuje nahlédnout do jejich algoritmu a zjistit, jak počítají tepelné ztráty. To program vytvořený v MS Excel pro tuto práci je plně čitelný a také upravitelný. Podporou při jeho

ovládání a upravování budiž taktéž tato práce. Znalosti a dovednosti širší technické veřejnosti také mnohem spíše zahrnují práci s Excelem než programování strukturovaných algoritmů.

## 5.2 Vstupní parametry

### Parametry společné všem druhům uložení

*Jmenovitý průměr potrubí  $DN$  [mm]* – pro pohodlí uživatele je do programu zanesena tabulka z normy ČSN 13 1030 (bezešvé ocelové trubky pro potrubí), ze které jsou vyhledávány ostatní potřebné rozměry trubek, rozsah od 40 do 500 mm.

*Délka potrubí  $L$  [m]* – slouží pro určení celkových hodnot veličin vztažených při výpočtu na jednotkovou délku. Jak již bylo řečeno, Výpočet je stvořen především pro dlouhá potrubí, s rovnými úseky delšími  $> 50 \cdot DN$ , pokud se v tomto případě za směrodatný rozměr potrubí vezme jmenovitý průměr potrubí

*Absolutní tlak páry  $p$  [MPa]* – je potřebný pro kontrolu sytosti páry a zjištění jejich fyzikálních parametrů. Podle tlaku v potrubí se také liší potřebná tloušťka stěny trubky. Viz příslušná norma, z rozsahu tabulky je tedy třeba tlak v potrubí mít v rozmezí 0,1 - 2,5 MPa.

*Rychlost proudění páry  $w$  [m/s]* – ovlivňuje především výpočet  $\alpha_1$  a průtočné množství, potažmo tepelný výkon přenášený potrubím. Ty jsou určeny, aby mohl být určen procentuální podíl tepelných ztrát na tomto výkonu a výkon využitelný v místě spotřeby. Dle konzultací bylo za referenční hodnotu zvoleno 45 m/s.

*Teplota páry  $t_{f1}$  [°C]* – stěžejní parametr výpočtu jeho význam je zřejmý z předchozích kapitol, zejména kap. 4.

*Teplota okolní atmosféry  $t_{f2}$  [°C]* – význam parametru je obdobný jako předchozího, jeho hodnota je využita pro všechny výpočty ať už se jedná o teplotu v interiéru či exteriéru a to pro přímé okolí nebo pro atmosféru nad terénem obsahujícím bezkanálové podzemní potrubí. Pro přibližné výpočty kolektorových potrubí je dosazena odhadnutá hodnota vzduchu v kolektoru. V závislosti na obsahu interní tabulky vlastností vzduchu ze zdroje [21] je nutno vejít se do rozsahu -50 – 1000 °C.

*Teplota ve vratné větvi  $t_k$  [°C]* – teplota vracejícího se kondenzátu pro určení celkového výkonu přenášeného potrubím včetně výkonu navraceného. Pokud se použije teplota na začátku kondenzátního potrubí (bráno ve směru proudu), jde o výkon využitelný v místě spotřeby zahrnující ve svojí hodnotě také tepelné ztráty parního potrubí. Použije-li se teplota kondenzátu na konci kondenzátního potrubí, jde o výkon zdroje, který pokrývá spotřebu energie na místě určení a tepelné ztráty jak parního tak kondenzátního potrubí.

*Procentuální množství spotřebované páry  $s$  [% hmotnostního toku]* – zohledňuje případnou technologickou spotřebu páry v místě určení projevující se na přenášeném výkonu. Kondenzát vzniklý vlivem tepelných ztrát po délce parního potrubí se tímto nezohledňuje, jeho množství je možno vypočítat až podle zjištěných tepelných ztrát.

*Součinitel tepelné vodivosti materiálu trubky  $\lambda_{tr}$  [W/mK]* – zkráceně tepelná vodivost trubky, lze použít přibližnou hodnotu a příliš se nezaobírat její závislostí na teplotě. Zpravidla jde o tepelnou vodivost oceli.

*Součinitel tepelné vodivosti materiálu izolace  $\lambda_{iz}$  [W/(m · K)]* – zkráceně tepelná vodivost izolace. Hodnotu je třeba kvalifikovaně odhadnout z její známé závislosti na teplotě, přičemž za určovací teplotu je možné použít aritmetický průměr teplot  $t_{f1}$  a  $t_{f2}$ , pro

bezkanálové uložení teplotu o něco vyšší. Zdrojem teplotních závislostí jsou technické listy tepelně izolačních výrobky publikované výrobcí (viz příloha PIII), je vhodné použít interpolaci, v některých případech je nutno i extrapolovat (viz určení  $\lambda_{iz}$  v příloze P I).

*Životnost izolace  $\tau$  [rok]* – jedná se o hodnotu, na kterou je izolace projektována, nemusí být posléze striktně dodrženo obnovení izolace, jedná se spíše o hodnotu zohledňující pravděpodobnou rychlost degradace materiálu izolace či krytí včetně zohlednění pravděpodobnosti nedokonalého provedení, vlivu vnějších vlivů apod. Tato hodnota zásadně ovlivňuje výsledky výpočtu, jelikož se právě na tuto dobu rozpočítává cena investice do izolace jako její roční cena.

*Objemová cena izolace včetně ceny  $c_{iz}$  [Kč/m<sup>3</sup>]* – zahrnuje kromě objemové ceny izolace také cenu prováděcích prací, u nichž se předpokládá, že jsou také odvislé od objemu instalované izolace. Cena práce může násobně převyšovat cenu materiálu a je silně závislá na technologii izolace. V praxi je pro určení ceny práce nutno vycházet ze zkušeností či z konzultací s prováděcí firmou. Objemová cena izolace je určena z mnohdy nepřehledně sestavených ceníků, alespoň tedy pro tento účel.

*Plošná cena pláště izolace  $c_{pl}$  [Kč/m<sup>2</sup>]* – pro izolace vybavené integrovaným řešením ochrany a snížení poměrné sálavosti povrchu je nulová. Jinak se kromě materiálu, který je tentokrát vztažen na povrch vnější válcové plochy potrubí započítává také cena prováděcí práce.

*Cena tepla  $c_q$  [Kč/GJ]* – má zásadní vliv na cenu tepelných ztrát. Hodnota by měla odpovídat střední hodnotě po dobu projektované životnosti izolace. Výpočet inflace a kvalifikovaný odhad vývoje ceny v průběhu následujících let je ponechán na uživateli programu.

*Přirážkový součinitel zvýšení tepelných ztrát  $k$  [-]* – univerzální koeficient, kterým lze zahrnout odhadovaný vliv jakéhokoli faktoru na tepelné ztráty, při nesofistikovaném řešení ztrát na armaturách může zahrnovat právě jejich vliv. Jinak do něj lze promítnout například bezpečnost výpočtu, vliv vlhkého vzduchu a dalších vlivů na vnější konvekci, mírné navlhnutí izolace, nedokonalosti provedení atd. Jeho hodnota se pohybuje od 1 (přirážka je nulová) výše.  $k = 1,1$  znamená zvýšení tepelných ztrát oproti výpočtu o 10%.

### **Kontrola bezpečné teploty vnějšího povrchu**

*Bezpečná teplota vnějšího povrchu  $t_{w2bezp}$  [°C]* – teplota, pro kterou je počítána minimální tloušťka izolace potřebná k zamezení popálení při kontaktu živé tkáně s vnějším povrchem vedení. Běžnou hodnotou je 50 °C.

### **Nadzemní uložení**

*Poměrná sálavost pláště izolace  $\varepsilon_{pl}$  [-]* – pro výpočet ztrát sáláním na izolované trubce. Dle definice nabývá hodnot od 0 do 1.

*Poměrná sálavost neizolované trubky  $\varepsilon_{tr}$  [-]* - pro výpočet ztrát sáláním neizolované trubky. Dle definice nabývá hodnot od 0 do 1.

- V exteriéru:

*Střední roční rychlost větru  $w_{j2}$  [m/s]* – ovlivňuje hodnotu  $\alpha_2$ , je možno použít také extrémní (nikoli střední) hodnoty pro zjištění jejich vlivu na tepelné ztráty. Zadaná hodnota nesmí být při výpočtu exteriérového potrubí nulová. Z nulové rychlosti plyne nulový součinitel přestupu tepla.

Pozn.: proměnná „*switch\_ext*“ ve výpočtu má charakter logické hodnoty a slouží pro přepínání mezi výpočtem přestupu tepla na vnější straně pro interiérové a exteriérové uložení potrubí. Výpočet součinitelů  $\alpha_2$  a tepelných odporů  $R_{k2}$  probíhá paralelně pro oba případy, tento přepínač rozhoduje, který z odporů bude použit pro výpočet ztrátového tepelného toku. Pokud je zadána hodnota „PRAVDA“, proběhne výpočet potrubí v exteriéru, při jakémkoli jiném vstupu je proveden výpočet pro interiér.

### Podzemní bezkanálové uložení

*Hloubka uložení potrubí v zemině (k ose trubky) h [m]* – pro výpočet tepelného odporu vrstvy zeminy.

### Armatury

*Počet patek typu ON130810  $n_{A1}$  [-]* – počet navařovacích kluzných podpěr na trase.

*Počet patek typu ON130802  $n_{A2}$  [-]* – počet dvojobjímkových kluzných podpěr na trase.

*Opravný součinitel  $\epsilon_A$  [-]* – komentováno v kap 4.4.2

## 5.3 Způsob výpočtu optimální tloušťky izolace

Tepelné ztráty jsou programem vypočtené podle kap. 4, bez uvažování armatur, které nemají vliv na optimální tloušťku izolace. Zvýšením tloušťky izolace na trubkách nejsou nijak zvlášť ovlivněny hlavní příčiny ztrát armatur – nezaizolované kovové části spojené s potrubím.

Jelikož je optimalizační výpočet hledáním minima součtové funkce nákladů, lze se k minimu dopracovat porovnáváním hodnot této funkce. Nejprve jsou určeny hodnoty jednotlivých funkcí, jež jsou součástí této sumy.

Hodnota  $s_{opt}$  je proměnnou tohoto iteračního výpočtu. Tepelné ztráty jsou v jeho průběhu určeny pro všechny hodnoty, kterých nabyde, souborem výsledků jsou pak ty určené v posledním kroku iterace, kterým je získána skutečná hodnota optimální tloušťky izolace. Uživatel si z inicializací výpočtu nemusí dělat starosti, žádné odhady není třeba provádět. Výsledkem je dosaženo při startu výpočtu z libovolné hodnoty, třeba z té, která byla výsledkem při minulém použití výpočtu s jinou sadou vstupních parametrů.

Není-li uvedeno jinak, pracuje se s veličinami v základních jednotkách soustavy SI.

### 5.3.1 Roční cena tepelných ztrát

Aby mohlo být počítáno s náklady v jednotkách Kč, je nutno vztáhnout ztrátový tepelný tok na určité období a určit absolutní hodnotu ztrát. Použito je období jednoho kalendářního roku, přes které je obvykle možno při nepřetržitém provozu potrubí uvažovat střední hodnotu sezónně závislých vstupních veličin. Toto vztažné období ale nijak nebrání počítat potrubí, která nejsou v provozu celý rok, ale přesto je jejich provoz v roce pravidelný. Stačí použít veličiny střední po dobu jejich provozu. Náklady vydané za tepelné ztráty jsou cenou tepelných ztrát.

Při známém měrném tepelném toku  $q$  [ $W/m$ ] je celkový tepelný tok  $Q = q \cdot L$  [ $W$ ].

Roční ztráta tepla je tedy dána jako  $Q_{zr} = Q \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 10^9$  [ $GJ$ ].

Při aplikaci součinitele zvýšení ztrát  $Q'_{zr} = k \cdot Q_{zr}$  [ $GJ$ ].

Cena této roční ztráty neboli roční náklady na tepelné ztráty jsou tedy

$$C_{zr} = c_q \cdot Q'_{zr} \text{ [Kč/rok]}.$$

### 5.3.2 Roční cena izolace

Cena zaizolování a opláštění vychází ze vstupních hodnot objemové ceny izolace a plošné ceny opláštění, obojí včetně ceny prováděcí práce a objemu izolace potřebné k provedení obalení potrubí konkrétní tloušťkou izolace. Znáť je tedy třeba rozměry potrubí. Ty jsou určeny podle  $DN, p = PN$  na základě výběru rozměrů z tabulky uvedené v normě ČSN 13 1030: Bezešvé ocelové trubky pro potrubí. Tato tabulka je v programu integrována. Pracuje se s tzv. výpočtovou tloušťkou stěny trubky, která je definována jako teoretická tloušťka zvětšená o přídavky na korozi, erozi a nepřesnosti výroby. Výsledkem tohoto stanovení jsou hodnoty  $d_{w1}, t_{výp}, D_{tr}$ .

Hodnota  $s_{opt}$  je považována za známou. Odtud také

$$d_{w2} = D_{tr} + 2 \cdot s_{opt} \text{ [m]}.$$

Výpočet potřebného objemu izolace se liší v závislosti na tom, zda jsou základní díly izolace při obalování trubky deformovány či nikoli.

Potřebný objem desek a rohoží je tedy dán původním nedeformovaným objemem, pro který výrobce stanovil cenu. Tímto objemem je krychle rozměrů  $L, s_{opt}, d_{w2} \cdot \pi$ :

$$V_v = L \cdot s_{opt} \cdot d_{w2} \cdot \pi \text{ [m}^3\text{]}.$$

Potřebným objemem v případě skruží či nedeformované pěnové izolace je samotný objem meziprostoru trubky a pláště izolace:

$$V_p = \pi/4 \cdot (d_{w2}^2 - D_{tr}^2) \cdot L \text{ [m}^3\text{]}.$$

Plocha pláště izolace je velikostí povrchu válce průměru  $d_{w2}$ :

$$S_{pl} = \pi \cdot d_{w2} \cdot L \text{ [m}^2\text{]}.$$

Při dalším pokračování s objemem deskové, deformované izolace  $V_v$  je cena izolace a opláštění dána sumou cen těchto dvou položek, tedy

$$C_{iz} = V_v \cdot c_{iz} + S_{pl} \cdot c_{pl} \text{ [Kč]}.$$

Roční cena izolace je právě vypočítanou investiční cenou zaizolování potrubí vztaženou na dobu životnosti izolace v rocích:

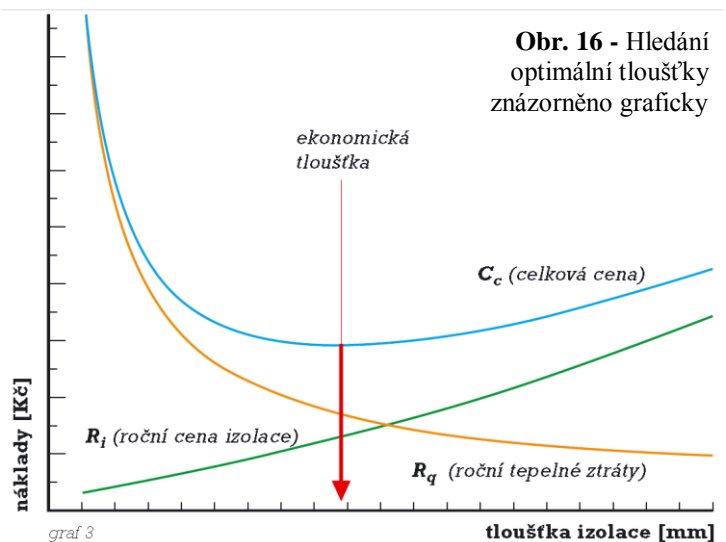
$$C_{izr} = C_{iz}/\tau \text{ [Kč/rok]}.$$

### 5.3.3 Optimální tloušťka izolace

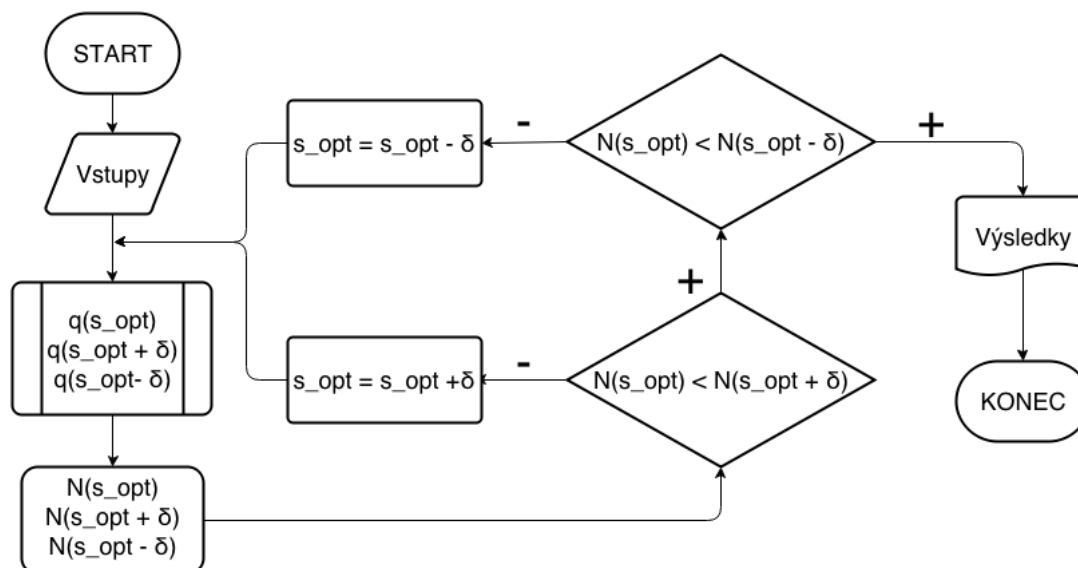
Hodnota součtových nákladů je podle výsledků předchozích kapitol

$$N = C_{zr} + C_{izr} \text{ [Kč/rok]}.$$

V každém kroku iteračního výpočtu je vypočítána hodnota součtových nákladů pro aktuální tloušťku izolace a dvě další hodnoty těchto nákladů pro tloušťku izolace o málo menší a o málo větší. Porovnáním hodnot je zjištěno, kterým směrem funkce klesá a tímto směrem je o málo změněna hodnota tloušťky izolace. Takto se iteruje, až je dosaženo stavu, kdy jsou obě hodnoty součtových nákladů v okolí bodu větší než v onom bodu, hodnota tloušťky izolace je zde optimální tloušťkou. Platí to pouze v případě, že funkce má na svém



definičním oboru jediné globální minimum. Takovou funkcí závislost součtových nákladů na optimální tloušťce izolace je, jak dokládá obr. 16. Tento graf byl rekonstruován pro demonstraci správné funkce vytvořeného výpočtu v příloze P I. Hrubý nástin iteračního procesu ukazuje vývojový diagram na obr 17.  $\delta = 0,001 [m]$  je pevně definována uvnitř programu.



Obr. 17 - Hrubý vývojový diagram průběhu výpočtu

Na pozadí případně probíhá další iterační výpočet, a to výpočet  $\alpha_{2k}$  při volné konvekci (vnitřní uložení potrubí). Výpočty ztrát pro tloušťky v okolí aktuální hodnoty  $s_{opt}$  jsou zjednodušeny tak, že je přepočítán pouze  $R_{viz}$ , tedy tepelný odpor vedení izolací. Při zmíněném rozměru  $\delta$  je změna ostatních odporů zcela zanedbatelná.

## 5.4 Vedlejší výpočty

Z výsledků vztahujících se k předchozímu je ještě přiřazen celkový tepelný odpor soustavy jako charakteristika tepelných ztrát. Ten je dán podle kap. 4.1.4. takto:

$$\sum_i R_i = R_{k1} + R_{vtr} + R_{viz} + R_{k2} = \frac{1}{\alpha_1 d_{w1}} + \frac{\ln\left(\frac{D_{tr}}{d_{w1}}\right)}{2\lambda_{tr}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{w2}}{D_{tr}}\right)}{2\lambda_{tr}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{w2}}$$

Součinitele přestupu tepla je možno vyčíst ve vedlejších listech excelovského sešitu, v němž je výpočet sestaven.

### 5.4.1 Výsledky založené na přenášeném výkonu

Zajímavým údajem jistě je podíl tepelných ztrát na přenášeném výkonu. Ten je určen z hmotnostního průtoku potrubím a entalpie média. Entalpie je stavovým parametrem určeným z tabulky, jak je uvedeno v kap 5. Kinetická energie proudu je zanedbána, naopak zohledněna je entalpie případného kondenzátu vracejícího se ke zdroji.

Hmotnostní tok:

$$m = \pi \cdot d_{w1}^2 / 4 \cdot \rho_{f1} \cdot w_{f1} [kg/s]$$

Výkon přenášený k místu spotřeby:

$$P = m \cdot h_{f1} [W]$$

Výkon přenášený zpět proudem kondenzátu, s částečnou spotřebou,  $h_k(t_k)$  dle IAPWS:

$$P_k = s \cdot m \cdot h_k [W]$$

Celkový výkon (= spotřeba + tep. ztráty):

$$P_{vr} = P - P_k [W]$$

Poměrné ztráty jsou pak dány již řečeným podílem:

$$z = Q/P_{vr} \cdot 100 [\%]$$

Mezi veličinami souvisejícími s průtokem je také důležitá hodnota sekundového množství kondenzátu vzniklého při proudění syté páry díky tepelným ztrátám. Ten je dán kondenzačním teplem syté páry  $l_k(t_{f1})$  podle IAPWS a tepelným ztrátovým tokem jako

$$m_k = Q/l_k [kg/s]$$

#### 5.4.2 Výpočet ztrát neizolované trubky, úspory a návratnost

Probíhá jednoduše při  $s_{opt} = 0$ . Jeho výsledky jsou získány naprostou analogií s výpočty při  $s_{opt} \neq 0$ . Zařazeny sem jsou  $\sum R_n, q_n, Q_n, Q_{nZR}, C_{nZR}$  a  $T_{w2n}$ , jehož význam a způsob výpočtu osvětluje následující kapitola. Je třeba zvláště, znovu, provést výpočet součinitelů přestupu tepla, jelikož se oproti izolovanému potrubí liší jak rozměrové, tak teplotní parametry konvekce, zvláště té vnější. Velkého vlivu dosahuje salání.

Úspory jsou dány logicky rozdílem

$$C_{ru} = C_{nZR} - C_{zr} [Kč/rok].$$

Návratnost je při provedeném rovnoměrném rozepsání ceny izolace na dobu životnosti dána podílem roční ceny izolace k ročně ušetřeným financím. Investiční cena izolace bude tedy ušetřena za

$$n = C_{iz}/C_{ru} [rok].$$

Možno je stanovit také celkovou úsporu po celkovou dobu životnosti izolace. Jednoduše:

$$C_U = C_{ru} \cdot \tau [Kč].$$

#### 5.4.3 Kontrolní výpočet pro bezpečnou teplotu vnějšího povrchu

Pro již zmíněné zamezení popálení je možné určit takovou tloušťku izolace, která bude na hranici splnění požadavku na teplotu povrchu  $T_{w2bezp}$ , resp.  $t_{w2bezp}$ . Jedná se, stejně jako při optimalizaci tloušťky izolace, o fyzikálně iterační výpočet. Nejsou zde ale sledovány náklady, ale  $t'_{w2bezp} \doteq t'_{w2bezp}(s_{bezp})$ . Podmínka pokračování cyklu je podmíněna opět z obou stran pro odstranění složitostí inicializace výpočtu.  $s_{bezp}$  se zkrátka mění tak dlouho, dokud hodnota skutečné, zpětně vypočítané (proto značení s čárkou)  $t'_{w2bezp}$  není v blízkém okolí  $t_{w2bezp}$ . Odtud se také určí  $d_{w2bezp}$ . Zpětný výpočet je proveden na základě kap. 4.1.5:

$$t'_{w2bezp} = t_{f2} + \frac{q_{bezp}}{\pi d_{w2bezp} \alpha_{2bezp}} [^{\circ}C].$$

Výpočet konvekce na vnější straně se pro účel tohoto výpočtu omezuje na přirozenou konvekci, která kromě interiéru nastane také v exteriéru za bezvětří. Jelikož je tento děj méně intenzivní, bude při něm vnější povrch ochlazovaný méně, bude mít vyšší teplotu.

Pro potrubí izolované minimální bezpečnou tloušťkou izolace jsou také určeny základní tepelné veličiny  $\sum R_{bezp}$  a  $q_{bezp}$ .

Cyklickou záměnou veličin se vypočítají také teploty povrchu optimálně izolované a neizolované trubky  $t_{w2}$  a  $t_{w2n}$ . Výpočet zde nebude iterační ale jednorázový, proto se neoperuje se skutečnou (" ' ") a zadanou hodnotou.

#### 5.4.4 Výpočet ztrát armatur

Po úvaze nad dosahovanými výsledky bylo rozhodnuto považovat vytvořenou metodu (kap. 4.4.2) prozatím za experimentální. Celkový přístup je pravděpodobně správný, což je samo o sobě úspěchem. Bylo by třeba doladit především množinu zjednodušení a zanedbání různých faktorů. Výpočet přesto dává relativně reálné hodnoty tepelných ztrát kolem 5%. Praxí zjišťovaná hodnota se pohybuje kolem cca 10%, jak bylo autorem vyslyšeno při konzultaci.

Vzorce pro zahrnutí zjištěného tepelného toku přes armaturu, pomocí nichž lze po menším doplnění programu do výpočtu vpravit hodnoty zjištěné libovolnou metodou, třeba právě vytvořenou metodou prizmatické tyče jsou tyto:

Tepelné ztráty armaturami, jež byly podrobně zhodnoceny, jsou součtem ztrát všech definovaných typů o příslušné četnosti jejich výskytu na trase:

$$Q_A = \sum_i n_{Ai} \cdot q_{Ai} [W].$$

Roční ztráta armaturami pak obdobně k roční ztrátě samotného potrubí:

$$Q_{Ar} = Q_A \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 10^9 [GJ].$$

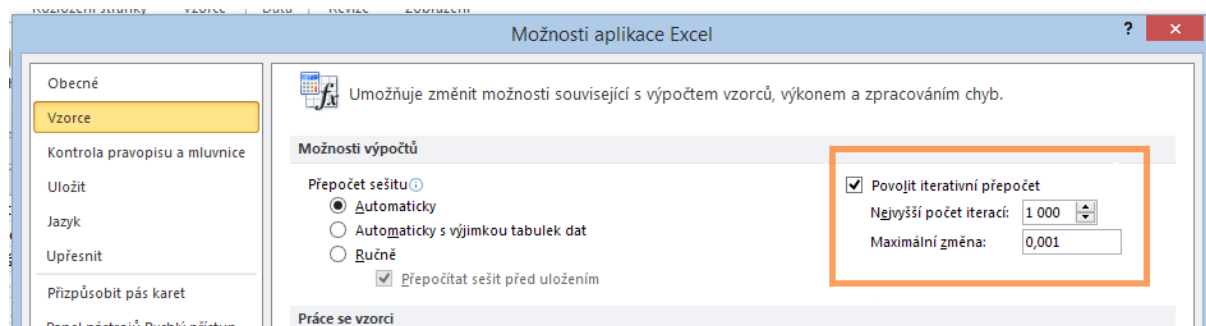
A cena těchto ročních ztrát jednoduše:

$$C_{Ar} = Q_{Ar} \cdot c_q [Kč/rok]$$

#### 5.5 Poznámky k používání výpočetního programu

Při otevření souboru je nutné, aby uživatel povolil aktualizaci propojení s externími daty, kterými jsou v tomto případě tabulky vlastností páry.

Dále je nutné vzít na vědomí přítomnost cyklických odkazů, které zajišťují iterační přepočty a dle toho se nadále zachovat. V nastavení programu Excel je nutno vyhledat zaškrtnávací pole povolující tento přepočet, výchozí hodnoty nastavené pro chod této funkce vyhovují chodu programu pro výpočet tepelných ztrát, viz obr. 18.

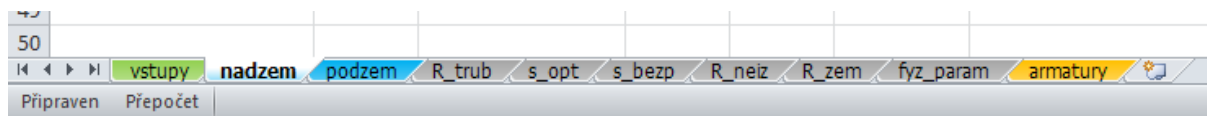


Obr. 18 - Povolení iterativního přepočtu v Excelu

Pokud je uživatel dosti znalý problematiky jak tepelných ztrát, tak používání MS Excel, může provádět libovolné úpravy. Usnadnit by mu to měla autorova snaha o přehledné členění výpočtu a také třeba použití funkce „názyvy“, která vytváří symbolické odkazy na buňky např. se vstupními hodnotami. Sestavování vzorců z takto připravených odkazů je potom podobné psaní přiřazovacích příkazů ve strukturovaných programovacích jazycích.

Členění částí výpočtu na jednotlivé listy sešitu je provedeno jednak podle povahy jejich obsahu, kterou lze rozlišit dle barev záložek listů při spodní liště grafického rozhraní a jednak podle jejich názvů, obr. 19.





Obr. 19 - Pohled na lištu s listy sešitu výpočtu

Barevné členění:

- Zelená – vstupní parametry
- Modrá – přehledné seskupení hlavních výstupů výpočtu
- Šedá – členěné výpočty dílčích výsledků, především tepelných odporů, obsahuje také výpočty prováděné za účelem iterování.
- Oranžová – postranní výpočet ztrát armatur, nezralý výpočet.

Obsah zeleného, modrých a oranžového listu je podrobně popsán v kap. 5.3 a 5.4, zbývající šedé listy sešitu různých názvů obsahují:

- **List „R\_trub“** – výpočet tepelných odporů invariantních s uložení potrubí a nezávislých také na tom, zda se provádí výpočet trubky neizolované, izolované či se hledá minimální bezpečná tloušťka izolace. To znamená výpočet  $R_{1k}$  a  $R_{vtr}$ . Lze zde najít hodnotu  $\alpha_1$  a kontrolovat oblast platnosti použité kritériální rovnice. To pomocí zobrazeného Reynoldsova čísla a pro rychlý přehled také jeho dekadický logaritmus. Podmíněné formátování zbarvuje tyto buňky do zelené barvy při splnění a do červena při neplnění kritéria platnosti.
- **List „s\_opt“** – výpočet tepelných odporů  $R_{viz}$  a  $R_{k2}$  a součinitelů přestupu tepla při vnější konvekci v exteriéru či interiéru. Kontrola oblastí platnosti a použitých režimů kritériálních rovnic. Pozadí iterace pro  $s_{opt}$ .
- **List „s\_bezp“** – obdoba listu „S\_opt“ pro účely výpočtu bezpečné tloušťky izolace. Jak bylo uvedeno, obsahuje pouze výpočet přirozené konvekce.
- **List „R\_zem“** – paralelní výpočet k „S\_opt“ se vstupními parametry neizolované trubky, struktura shodná.
- **List „fyz\_param“** – tabulky rozměrů trubek, vlastností vzduchu a syté páry.

Při interpretaci výsledků dojde uživatel do situace, kdy bude muset vybrat konkrétní výrobek z nabízeného sortimentu tepelných izolací. Bude třeba zaokrouhlit vypočtenou hodnotu tak, aby jí bylo možno za pomoci rozměrových řad onoho výrobku namontovat či jinak zhotovit.

Pokud uživatel shledá metodu vedení tepla v prizmatické tyči nevhodnou pro zpřesněné zohlednění ztrát armatur, může provést výpočet dle vlastních postupů a integrovat jej do připraveného programu. Pro většinu aplikací bude nejspíše dostačovat zohlednění vlivu armatur pomocí součinitele zvýšení tepelných ztrát  $k$ . V praxi je toto běžný postup.

Další tipy k použití programu jsou zřejmé z příloh P I a P II.

## 6 Závěr

Práce naplňuje vytyčené cíle v aspektech uvedených v následujících odstavcích.

Byl sestaven výčet používaných materiálů pro tepelné izolace potrubí uvádějící obecně do problematiky těchto izolací a dávající přehled o současných možnostech v oboru. Pečlivě komentovány byly stěžejní vlastnosti materiálů, podle kterých se v praxi posuzuje vhodnost pro danou aplikaci a provádí se vzájemná srovnání materiálů či přímo výrobků z nich. Uvedena byla i metoda zhodnocení ceny izolace ve vztahu k její užitné hodnotě, která ale nemůže sloužit pro globální srovnávání napříč spektrem technických izolací. Je určena právě pro srovnání na konkrétním aplikačním případě či alespoň použití v dostatečným způsobem charakteristických podmínkách.

Kapitola výpočtu tepelných ztrát je uceleným pohledem na tuto problematiku v oblasti parovodních potrubí, s možností zobecnění většiny závěrů na jakékoli technické potrubí. Dává přehled především o použitých metodách včetně teorie podobnosti a kritériálních rovnic pro různé druhy konvekce. Mezi použité metody méně tradičního rázu lze zařadit způsob výpočtu ztrát bezkanálového potrubí či zohlednění vlivu sálání pomocí zvýšení součinitele přestupu tepla. Důsledně bylo hodnoceno, které vlivy na výsledky těchto výpočtů je třeba uvažovat a které je možno zanedbat. Pro úplnost je provedená úvaha vždy popsána.

Autor se snažil také o vytvoření postupu pro přibližný výpočet tepelných ztrát armatur. Výsledkem snažení je metoda založená na teorii vedení tepla tenkou prizmatickou tyčí, která však není kalibrována ani ověřena měřeními, přesto dává zajímavé výsledky s možností být blízko realitě. Autor věří ve využitelnost této metody, jejíž ověření a kalibrace pomocí více či méně rozsáhlých úprav je ale nad možnosti této práce.

Požadovaný program pro výpočet optimální tloušťky izolace je sestaven do plně funkční podoby, až na onen přesný výpočet vlivu armatur, komentovaný výše. Jejich vliv se zahrnuje tak, jak je v praxi běžné, a to koeficientem tepelných ztrát závislých čistě na zkušenostech projektanta a jeho kvalifikovaném odhadu. Vzhledem k přibližnému charakteru celého výpočtu daným mnoha nahodilými vlivy působícími na reálné tepelné ztráty je to způsob dostatečný.

Přínosným může být program hlavně pro konstrukční a projekční kanceláře menších firem, které si nemohou dovolit drahý software typu Matlab apod. a zároveň se nechtějí spoléhat na výpočetní programy formy černých skříněk distribuovaných výrobcí izolací. Práce dává technikům v těchto pracovních podmínkách nástroj pro rychlé a levné provedení výpočtu tepelných izolací a jejich optimalizace s uspokojivými výsledky a možností provedení vlastních úprav.

V přílohách je uveden konkrétní výpočet tepelných ztrát dvou různých potrubí, a to fiktivního parovodu o parametrech z oficiálního zadání práce, které byly příslušně doplněny, a reálného parního potrubí, instalovaného v teplárně v Plzni-Doubravce. V obou výpočtech je pro ilustraci vypočítán vliv zde přítomných patek jako armatur zvyšujících tepelné ztráty, který ovšem není promítnut, vzhledem k nejisté kvalitě dosažených hodnot, do celkového výsledku. Kromě samotného předvedení práce s výpočetním programem ukazuje některé předcházející činnosti, které je třeba provést pro zvládnutí výpočtu.

Celkově dává práce návod pro řešení tepelných ztrát potrubí a optimální tloušťky izolace, přináší nástroj pro usnadnění těchto výpočtů a může pomoci také s výběrem vhodného materiálu či technologie výroby a instalace potrubí mající přímý dopad na rentabilitu investic do parovodních rozvodů. To je hlavním přínosem této bakalářské práce.

## 7 Zdroje informací

### LITERATURA

- [1] KALČÍK, Josef a SÝKORA, Karel. *Technická termomechanika*. 1. vyd. Praha: Academia, 1973. 536 s.
- [2] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky* [CD-ROM]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-706-3.
- [3] SAZIMA, Miroslav, KMONÍČEK, Vladimír a SCHNELLER, Jiří. *Teplo*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. 588 s. Technický průvodce.
- [4] CIKHART, Jiří aj. *Soustavy centralizovaného zásobování teplem*. 2., přeprac. a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1989. 557 s. ISBN 80-03-00021-1.
- [5] BROŽ, Karel. *Zásobování teplem*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2002. 217 s. ISBN 80-01-02521-7.
- [6] LINHART, Jiří. *Termomechanika*. Plzeň. ZČU. 103 s. Stručné učební texty.
- [7] HASAL, Pavel, SCHREIBER, Igor a ŠNITA, Dalimil. *Chmické inženýrství I*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha, 2007. ISBN 987-80-7080-002-7.
- [8] HRUBÝ, Jiří. *RS7 - Propojovací potrubí*. Vochov, 2014. 17 s. Montážní dokumentace.

### INTERNETOVÉ ZDROJE

- [9] ROCKWOOL, a.s., *Technické izolace*. 2010. 23s. Dostupné z <<http://www.rockwool.cz/technicka-podpora/prospekty-a-technicke-listy>>.
- [10] UNIFRAX, s.r.o., *Fiberfrax*. Technický list. Dostupné z <<http://www.inheat.cz/produkty&idk=54>>.
- [11] DARTE s.r.o. *Technické listy*. Dostupné z <<http://www.darte.cz/technicke-izolace>>.
- [12] AZ FLEX a.s. *Technické listy*. Dostupné z <<http://www.azflex.cz>>.
- [13] PUR izolace, s.r.o, *Časté otázky*. Dostupné z <<http://www.pur.cz/cz/caste-otazky/>>.
- [14] EKOMIRELON, *Technické listy*. Dostupné z <<http://www.ekomirelon.cz/Sortiment/>>.
- [15] ISOVER, *Technické listy*. Dostupné z <<http://www.isover.cz>>.
- [16] KNAUF INSULATION, *Technické listy*. Dostupné z <<http://www.knaufinsulation.cz>>
- [17] REFAGLAS, *Produktové listy*. Dostupné z <<http://www.refaglass.cz/produkt.listy.pdf>>
- [18] KOŇAŘÍK ZÁVĚSOVÁ TECHNIKA, a.s., *Potrubní díly, těžké uložení potrubí*. Dostupné z <<http://www.konarik.cz/cs/produkty/14-potrubni-dily-tezke-ulozeni-potrubni>>
- [19] *Tepelné sítě – hydraulické výpočty*. Výuková prezentace. Dostupné z <<http://users.fs.cvut.cz/~matustom/ZZT-P3-hydraulika.pdf>>.
- [20] Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i, *Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie...* Dostupné z <<http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/projekty-qsy/vavf320f08f03.html>>.
- [21] TOPINFO, s.r.o. *TZB-info*. Dostupné na <<http://www.tzb.info.cz>>.
- [22] HOLMGREN, Magnus. *IAPWS IF97 Excel Steam Tables*. Dostupné z <<http://www.mycheme.com/steam-tables-in-excel/>>

## 8 Seznam obrázků

OBRÁZEK	STRANA	ZDROJ
<b>Obr. 1</b> - Izolační pouzdra a tvarovky pro potrubí	10	[* <sup>1</sup> ]
<b>Obr. 2</b> - Povrchová ochrana exteriérového potrubí nekovovou folií	12	[11]
<b>Obr. 3</b> - Pohled na svarovou mezeru předizolované trubky	16	
<b>Obr. 4</b> - Detail uzavřené makrostruktury kaučukové pěny	17	[* <sup>2</sup> ]
<b>Obr. 5</b> - Městský kolektor	21	[* <sup>3</sup> ]
<b>Obr. 6</b> - Pokládka bezkanálového parovodu	21	[* <sup>4</sup> ]
<b>Obr. 7</b> - Průběh teploty po souřadnici poloměru	22	[5]
<b>Obr. 8</b> - Význam c, n	28	[1]
<b>Obr. 9</b> - Průměrná roční rychlost větru v ČR	29	[20]
<b>Obr. 10</b> - Schema metody skládání tepelných polí	31	[5]
<b>Obr. 11</b> - Příklad segmentové izolace kolena	32	[9]
<b>Obr. 12</b> - Tepelná bilance elementu tenké prizmatické tyče	33	[6]
<b>Obr. 13</b> - Izolace ventilu zploštělým válcovým pouzdem	35	[8]
<b>Obr. 14</b> – Izolace příruby válcovým pouzdem	35	[8]
<b>Obr. 15</b> - Závislost tepelného toku na tloušťce izolace	38	[3]
<b>Obr. 16</b> - Hledání optimální tloušťky znázorněno graficky	42	[9]
<b>Obr. 17</b> - Hrubý vývojový diagram průběhu výpočtu	43	
<b>Obr. 18</b> - Povolení iterativního přepočtu v Excelu	45	
<b>Obr. 19</b> - Pohled na lištu s listy sešitu výpočtu	46	

\*<sup>1</sup> <<http://www.offshore-technology.com/>>; <[www.izomat.cz](http://www.izomat.cz)>

\*<sup>2</sup> <<http://eshop.neosolar.cz>>

\*<sup>3</sup> <<http://www.kolektory.cz>>

\*<sup>4</sup> <<http://www.revis-liberec.cz/cs/reference/detail/23>>

## 9 Seznam příloh

### Přílohy volně vložené:

PŘÍLOHA 1: PROPOJOVACÍ POTRUBÍ RS7 (výkres, axonometrické schéma)

PŘÍLOHA 2: DISPOZICE POTRUBÍ RS7 (výkres)

PŘÍLOHA 3: Výpočetní program tepelných ztrát parního potrubí (CD-ROM)

### Přílohy vevázané:

PŘÍLOHA I: Výpočet parovodního potrubí ze zadání

PŘÍLOHA II: Výpočet parovodního propojovacího potrubí RS7

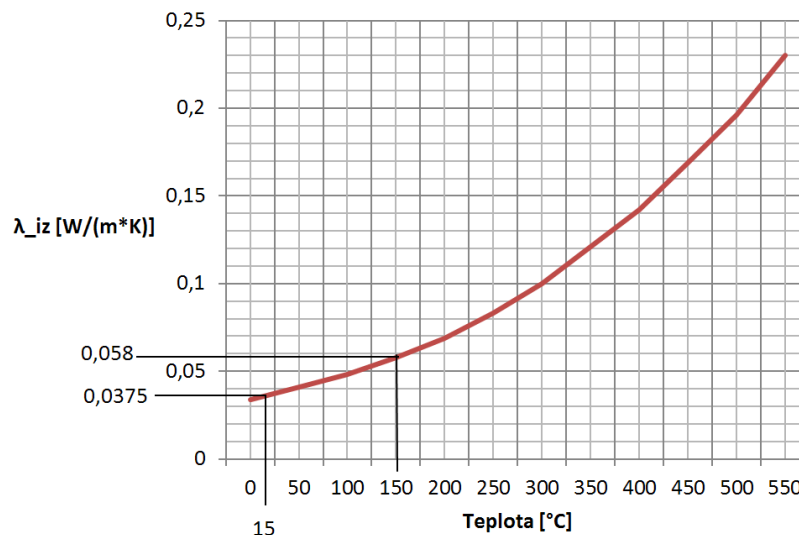
PŘÍLOHA III: Technický list Orstech DP 65 – Rohož na pletivu [15]

## **PŘÍLOHY**

## PŘÍLOHA I: Výpočet parovodního potrubí ze zadání

Vstupní parametry byly patřičně doplněny o hodnoty z běžných relací. Uložení potrubí je uvažováno jako exteriérové, pro ukázkou je bez dalších úprav uveden také soubor výsledků platící pro bezkanálové podzemní potrubí.

- Trasa je považována za vodorovnou.
- Izolace je provedena rohožemi ISOVER Orstech DP 65 a zakryta fólií Dartefol. Určení  $\lambda_{iz}$  podle příslušného technického listu (Příloha III), vychází se z deklarovaných hodnot tepelné vodivosti, které tvoří závislost zobrazenou v Obr P I/1:



Obr. P I/ 1: Graf teplotní závislosti  $\lambda(t)$  pro ISOVER Orstech DP65

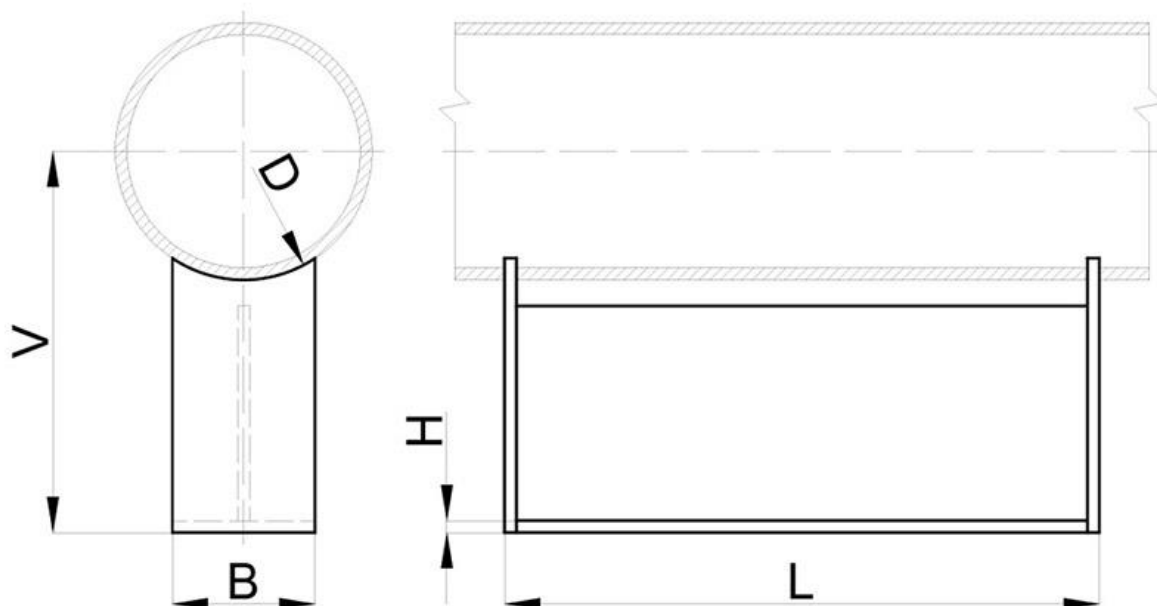
Lineární interpolací mezi  $\lambda_{iz 0^{\circ}C}$  a  $\lambda_{iz 50^{\circ}C}$ :

$$\lambda_{iz 15^{\circ}C} = 0,0375 \text{ W}/(m \cdot K).$$

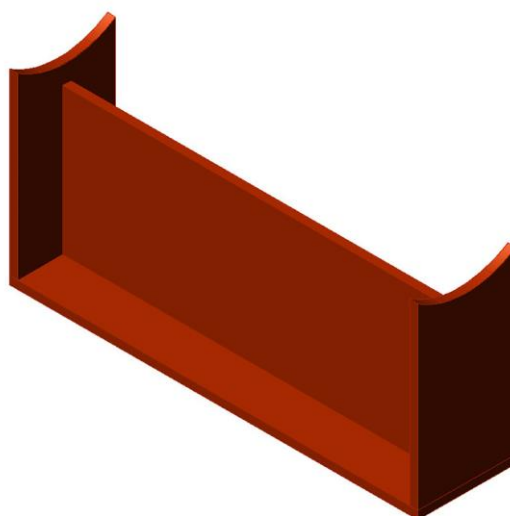
$$\lambda_{iz 158,8^{\circ}C} \doteq \lambda_{iz 150^{\circ}C} = 0,0580 \text{ W}/(m \cdot K)$$

$$\lambda_{iz} = \frac{\lambda_{iz 15^{\circ}C} + \lambda_{iz 158,8^{\circ}C}}{2} \doteq 0,48 \frac{W}{m \cdot K}$$

- Potrubí je uloženo na přivařovacích kluzných podpěrách ON130810 vzhledu dle P I/ 3 a kotevních stojanech obdobné geometrie. V počtu 12 na celkovou délku potrubí 150 m. Pro případ, že je výška stojanu nedostatečná pro danou tloušťku izolace, je předpokládáno sjednání výroby prodloužených podpěr ( $p$  [m] – parametr prodloužení). Odvozeny jsou potřebné vzorce platné pro všechny rozměrové řady. Skutečné rozměry pro dané DN viz výsledky.



Obr. P I/ 2: Rozměry kluzné podpěry ON130810 [18]



Obr. P I/ 3: Pohled na kluznou podpěru ON130810 [18]

Vstupní geometrické parametry pro metodu výpočtu ztrát armatur pomocí teorie vedení v tenké prizmatické tyči (značení v obr. P I/ 4 je z kapitálek nahrazeno malými písmeny, rozměry jsou dosazovány v  $[m]$ ):

$$L = v + p - \frac{d_{w2}}{2} - s_{opt} [m]$$

$$S = h \cdot (l - 2h + 2b) [m^2]$$

$$U = 2 \cdot (l - h + 2b) [m]$$

Jak se při prvním provedení výpočtu ukázalo, nedostačuje výška normalizované podpěry pro to, aby její kluzná plocha ležela mimo pásmo izolace. Uvažováno je, že lze zajistit výrobu prodloužené verze této podpěry. Nutné prodloužení bylo stanoveno na  $p_A = 0,02 m$ .

Další stanovení vstupních parametrů nejsou prováděna a zbytek této množiny je tedy považován za známý, viz obr. P I/ 4. Je již možno provést výpočet.

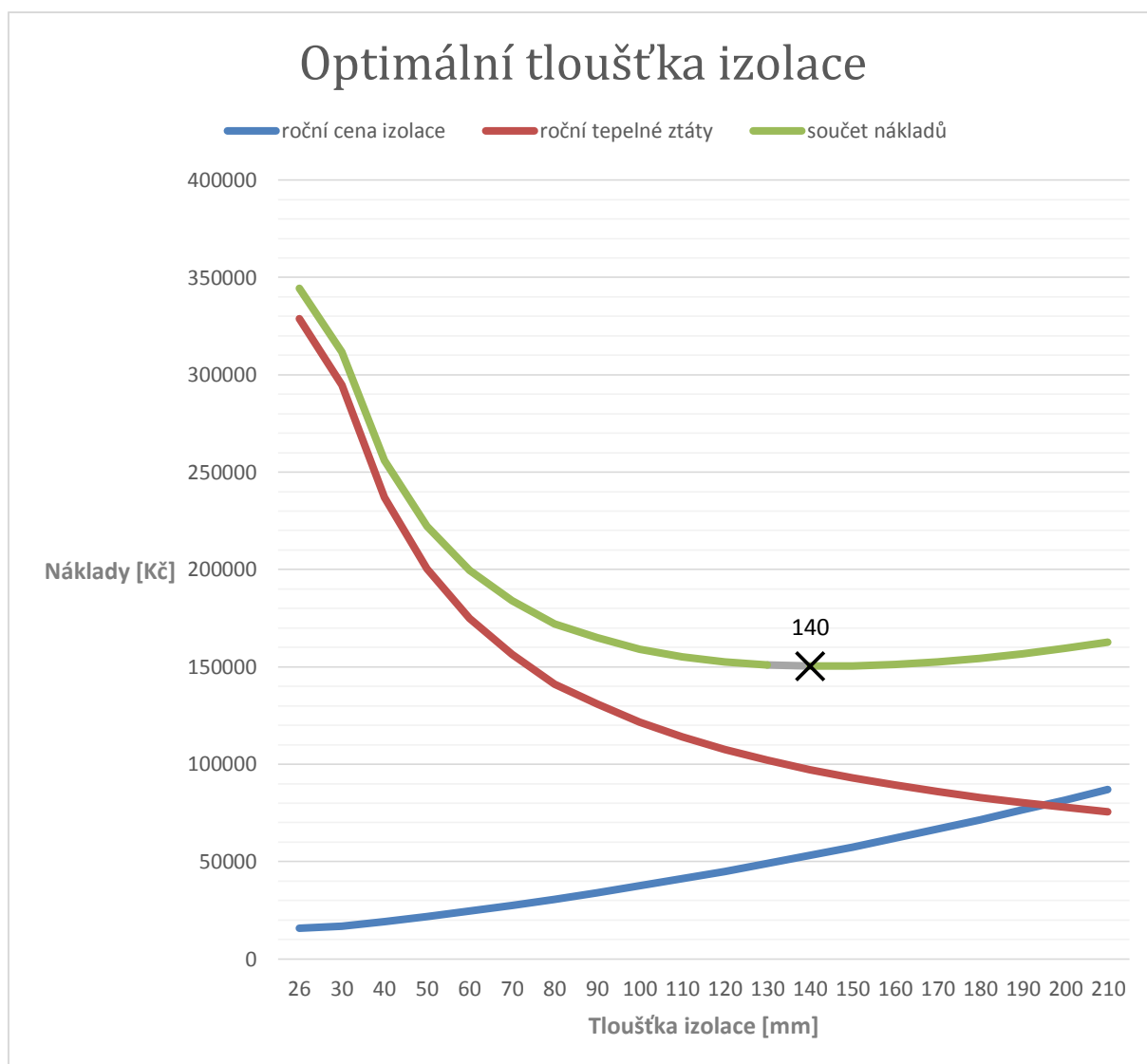


<b>VSTUPNÍ PARAMETRY</b>				
<b>SPOLEČNÉ VŠEM DRUHŮM ULOŽENÍ</b>				
<i>Název parametru</i>	<i>Označení</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Požadovaný/doporučený rozsah hodnoty</i>
Jmenovitý průměr potrubí	<b>DN</b>	<b>200</b>	<b>mm</b>	[10 - 500]
Délka potrubí	<b>L</b>	<b>150</b>	<b>m</b>	>50*DN
Absolutní tlak páry	<b>p</b>	<b>0,6</b>	<b>MPa</b>	[0,1 - 2,5]
Rychlost proudění páry	<b>w</b>	<b>45</b>	<b>m/s</b>	[5-80]
Teplota páry	<b>t_f1</b>	<b>158,8</b>	<b>°C</b>	[100-370]
Teplota okolní atmosféry	<b>t_f2</b>	<b>15</b>	<b>°C</b>	{-50 - [-20 - 100] - 1000}
Teplota ve vratné větví	<b>t_k</b>	<b>50</b>	<b>°C</b>	[50-80]
Procentuální množství spotřebované páry	<b>s</b>	<b>0</b>	<b>% hmot.</b>	
Tepelná vodivost mat. trubky	<b>λ_tr</b>	<b>50</b>	<b>W/mK</b>	[0,01 - 300]
Souč. tepelné vodivosti izolace	<b>λ_iz</b>	<b>0,048</b>	<b>W/mK</b>	[0,001 - 10]
Životnost izolace	<b>τ</b>	<b>20</b>	<b>let</b>	[5 - 50]
Objemová cena izolace (mat. + práce)	<b>c_iz</b>	<b>19000</b>	<b>Kč/m<sup>3</sup></b>	
Plošná cena pláště izolace (mat. + práce)	<b>c_pl</b>	<b>4000</b>	<b>Kč/m<sup>2</sup></b>	
Cena tepla	<b>c_t</b>	<b>450</b>	<b>Kč/GJ</b>	
Přirážkový součinitel tepelných ztrát	<b>k</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	>=1
<b>KONTROLA BEZPEČNÉ TEPLoty VNĚJŠÍHO POVRCHU</b>				
Bezpečná teplota vnějšího povrchu	<b>t_w2bezp</b>	<b>50</b>	<b>°C</b>	t_f1>t_w2 bezp>tf2 {~50}
<b>NADZEMNÍ ULOŽENÍ</b>				
Poměrná sálavost pláště izolace	<b>ε_pl</b>	<b>0,6</b>	<b>-</b>	[0 - 1]
Poměrná sálavost neizolované trubky	<b>ε_tr</b>	<b>0,97</b>	<b>-</b>	[0 - 1]
- V EXTERIERU	<b>(switch_ext)</b>	<b>PRAVDA</b>		
Střední roční rychlost větru	<b>w_f2</b>	<b>1,5</b>	<b>m/s</b>	[2 - 10]
<b>PODZEMNÍ BEZKANÁLOVÉ ULOŽENÍ</b>				
Hloubka uložení potrubí v zemině (k ose)	<b>h</b>	<b>1</b>	<b>m</b>	[0,8 - 3]
<b>ARMATURY</b>				
Počet patek typu ON130810	<b>n_A1</b>	<b>12</b>	<b>-</b>	
Počet patek typu ON130802	<b>n_A2</b>	<b>0</b>	<b>-</b>	
Opravný součinitel	<b>ε_A</b>	<b>0,9</b>	<b>-</b>	

Obr. P I/ 5: Pohled do výpočetního programu - vstupní parametry

Vyhodnocení			
<b>ROZMĚROVÉ VÝSLEDKY</b>			
Vnitřní průměr trubky	d_w1	0,203	m
Výpočtová tloušťka stěny trubky	t_výp	7,916	mm
Vnější průměr trubky	D_tr	0,219	m
<b>Optimální tloušťka izolace</b>	<b>s_opt</b>	<b>0,139</b>	<b>m</b>
Vnější průměr izolace	d_w2	0,497	m
<b>MINIMÁLNÍ BEZPEČNÁ TLOUŠŤKA IZOLACE</b>			
Minimální bezpečná tloušťka izolace	s_bezp	0,029	m
Vnější průměr izolace o min. bezp. tl.	d_w2bezp	0,277	m
<b>PRŮTOK</b>			
Hmotnostní průtok páry	m	1,79616	kg/s
Výkon přenášený proudem páry (s = 100%)	P	4950582,05	W
Výkon přenášený proudem páry (bez vráceného)	P_vr	4574580,30	W
Teplota sytosti	t_s	158,83	°C
Množství kondenzátu vzniklého ztrátami na trase	m_k	0,003728	kg/s
<b>POTŘEBA IZOLAČNÍHO MATERIÁLU</b>			
Vnější povrch izolace	S_pl	234,2529	m <sup>2</sup>
Objem potřebné deskové vaty	V_v	32,5611	m <sup>3</sup>
Objem potřebné pěny/skružené vaty	V_p	23,4563	m <sup>3</sup>
<b>TEPELNÉ VÝSLEDKY</b>			
Tepelný odpor:	Σ R	2,774	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q	51,839	W/m
<b>Teplota vnějšího povrchu</b>	<b>t_w2</b>	<b>20,32</b>	<b>°C</b>
Celkový tepelný tok:	Q	7775,795	W
Procentuální ztráty	z	0,17	%
Roční ztráta tepla	Q_zr	245,385	GJ
<b>Roční ztráta tepla s přírážkou</b>	<b>Q'_zr</b>	<b>245,385</b>	<b>GJ</b>
<b>Cena roční ztráty tepla s přírážkou</b>	<b>C_zr</b>	<b>110 423,45</b>	<b>Kč</b>
Ztrátový tepelný tok hodnocených armatur	Q_A	425,06	W
Roční ztráta tepla hodnocených armatur	Q_Ar	13,41	GJ
Cena ztrát hodnocenými armaturami	C_Ar	6 036,25	Kč
<b>PRO MINIMÁLNÍ BEZPEČNOU TLOUŠŤKU IZOLACE</b>			
Tepelný odpor:	Σ R_bezp	0,908	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q_bezp	158,442	W/m
Teplota vnějšího povrchu:	t'_w2bezp	49,58	°C
<b>PRO NEIZOLOVANOU TRUBKU</b>			
Tepelný odpor:	Σ R_n	0,227	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q_n	634,578	W/m
Teplota vnějšího povrchu:	T_w2n	81,73	°C
Celkový tepelný tok:	Q_n	95186,762	W
Procentuální ztráty	z_n	2,08	%
Roční ztráta tepla	Q_nzr	3003,866	GJ
Cena roční ztráty tepla	C_nzr	1 351 739,59	Kč
<b>FINANČNÍ VÝSLEDKY</b>			
Cena zaizolování a opláštění	C_iz	1 555 673,22	Kč
<b>Roční cena zaizolování a opláštění</b>	<b>C_izr</b>	<b>77 783,66</b>	<b>Kč</b>
Roční úspora při zaizolování	C_ru	1 241 316,14	Kč
<b>Součtové roční náklady</b>	<b>N</b>	<b>188 207,11</b>	<b>Kč</b>
Skutečná návratnost	n	1,253	roku
Celková úspora za dobu životnosti	C_U	24 826 322,78	Kč

Obr. P I/ 6: Pohled do výpočetního programu – hlavní výstupní hodnoty pro nadzemní potrubí



Obr. P I/ 7: Grafické znázornění optimalizace generované upraveným výpočetním programem

Kromě numerického výpočtu optimální tloušťky izolace bylo pomocí upraveného výpočetního programu (bez cyklického odkazu pro iterace optimální tloušťky) provedeno grafické určení optimální tloušťky izolace na základě součtových nákladů. Graf na obr. P I/ 8 potvrzuje správnost iteračního výpočtu a znázorňuje podobnou závislost jako Obr. 16, str. 49 v hlavní textové části práce.

Vyhodnocení			
<b>ROZMĚROVÉ VÝSLEDKY</b>			
Vnitřní průměr trubky	d_w1	0,203	m
Výpočtová tloušťka stěny trubky	t_výp	7,916	mm
Vnější průměr trubky	D_tr	0,219	m
<b>Optimální tloušťka izolace</b>	<b>s_opt</b>	<b>0,129</b>	<b>m</b>
Vnější průměr izolace	d_w2	0,477	m
<b>PRŮTOK</b>			
Hmotnostní průtok páry	m	1,79616	kg/s
Výkon přenášený proudem páry (s = 100%)	P	4950582,05	W
Výkon přenášený proudem páry (bez vráceného)	P_vr	4574580,30	W
Teplota sytosti	t_s	158,83	°C
Množství kondenzátu vzniklého ztrátami na trase	m_k	0,003619	kg/s
<b>POTŘEBA IZOLAČNÍHO MATERIÁLU</b>			
Vnější povrch izolace	S_pl	224,8281	m <sup>2</sup>
Objem potřebné deskové vaty	V_v	29,0028	m <sup>3</sup>
Objem potřebné pěny/skružené vaty	V_p	21,1609	m <sup>3</sup>
<b>TEPELNÉ VÝSLEDKY</b>			
Tepelný odpor:	Σ R	2,858	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q	50,317	W/m
Celkový tepelný tok:	Q	7547,520	W
Procentuální ztráty	z	0,15	%
Roční ztráta tepla	Q_zr	238,182	GJ
Cena roční ztráty tepla	C_zr	107 181,72	Kč
<b>Roční ztráta tepla s přírážkou</b>	<b>Q<sup>!</sup>_zr</b>	<b>238,182</b>	<b>GJ</b>
<b>Cena roční ztráty tepla s přírážkou</b>	<b>C_zr</b>	<b>107 181,72</b>	<b>Kč</b>
<b>PRO NEIZOLOVANOU TRUBKU</b>			
Tepelný odpor:	Σ R_n	0,278	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q_n	518,011	W/m
Celkový tepelný tok:	Q	77701,700	W
Procentuální ztráty	z_n	1,70	%
Roční ztráta tepla	Q_nzr	2452,079	GJ
Cena roční ztráty tepla	C_nzr	1 103 435,63	Kč
<b>FINANČNÍ VÝSLEDKY</b>			
Cena zaizolování a opláštění	C_iz	1 301 370,09	Kč
<b>Roční cena zaizolování a opláštění</b>	<b>C_izr</b>	<b>65 068,50</b>	<b>Kč</b>
Roční úspora při zaizolování	C_ru	996 253,90	Kč
<b>Součtové roční náklady</b>	<b>N</b>	<b>172 250,23</b>	<b>Kč</b>
Návratnost	n	1,306	roku
Celková úspora za dobu životnosti	C_U	19 925 078,07	Kč

Obr. P I/ 9: Pohled do výpočetního programu - hlavní výstupní parametry výpočtu podzemního potrubí

Podpěra kluzná přivařovací ON130810, prodloužená			Rozměrové řady						
Prodloužení p_A			DN	d	v	b	l	h	[mm]
	0,02 m		0,2	0,219	0,25	0,11	0,3	0,006	[m]
DN	200 mm		20	28	75	50	200	4	
L	0,0215 m		25	32	80	50	200	4	
S	0,003048 m <sup>2</sup>		32	38	80	50	200	4	
U	1,028 m		40	44,5	95	60	200	4	
			50	57	110	70	200	4	
α <sub>2</sub>	11,175 W/m <sup>2</sup> K		65	76	130	80	200	4	
			80	89	140	80	200	5	
m	8,682 1/m		100	108	160	90	250	5	
ε <sub>T</sub>	0,9 -		125	133	180	90	250	5	
			150	159	200	100	250	6	
q <sub>A1</sub>	35,42 W		200	219	250	110	300	6	
			250	273	280	110	300	8	
			300	324	310	120	300	8	
			350	377	340	120	300	10	
			400	407	430	350	210	10	
			500	508	500	350	210	10	
			600	610	560	400	260	12	
			700	711	630	400	260	12	
			800	813	700	400	260	12	

Obr. P I/ 10: Pohled do výpočetního programu - sekce výpočtu tepelných ztrát kluzné podpěry

### Závěry:

- Izolace nadzemního potrubí by byla provedena (dle obr. P I/ 11) v tloušťce 140 mm. Podle vyráběných rozměrů rohoží, uvedených na příloze P III, ze dvou vrstev rohože tloušťky 80 a 60 mm.
- Teplota vnějšího povrchu dosahuje bezpečných 20 °C, pro maximum bezpečné teploty by stačilo izolovat tloušťkou ~30 mm (dle obr. P I/ 12).
- Ostatní kontrolní hodnoty jako návratnost, množství vzniklého kondenzátu a procentuální množství ztrát pro optimální tloušťku izolace dosahují uspokojivých hodnot (dle obr. P I/ 13).
- Ztráty hodnocených armatur jsou uvedeny jen pro ilustraci postupu metody jejich výpočtu. Dosahují ale hodnot poměrně odpovídajících zkušenostem s běžnou praxí, kdy byly zjištěny ztráty armaturami v relacích 5-15% celkových ztrát. (dle obr. P I/ 14 a P I/ 8)
- Výpočet podzemního uložení (obr. P I/ 15) je uveden pouze pro ilustrování funkčního stavu této partie výpočtu.

## PŘÍLOHA II: Výpočet parovodního propojovacího potrubí RS7

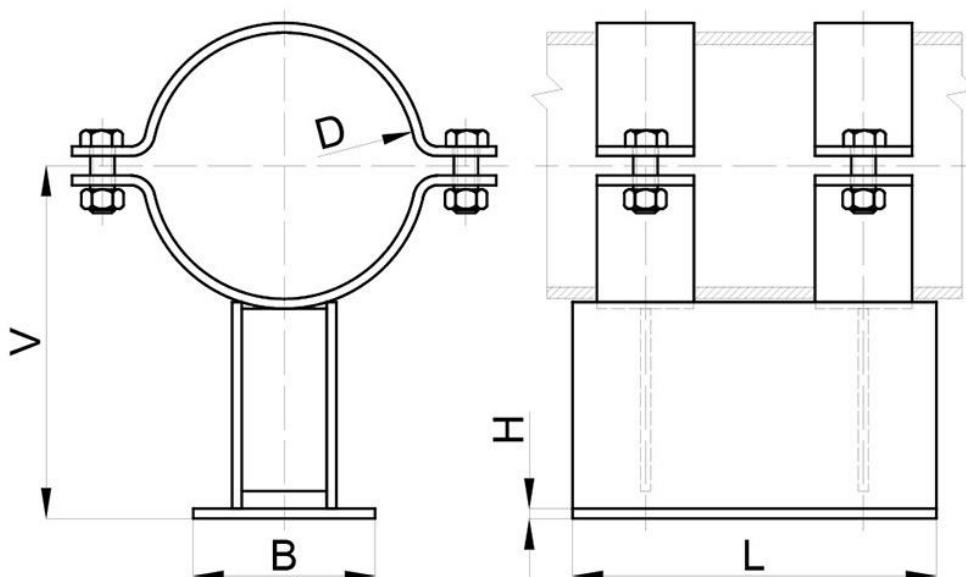
Délka potrubí a další vstupní parametry je odvozena z výkresů volně přiložených jako přílohy P 1 a P 2:

$$L = 600 \cdot \sqrt{2} + 95 + 230 + 1275 + 7425 + 3800 + 920 + 2980 \doteq 17574 \text{ mm} \doteq 17,6 \text{ m}$$

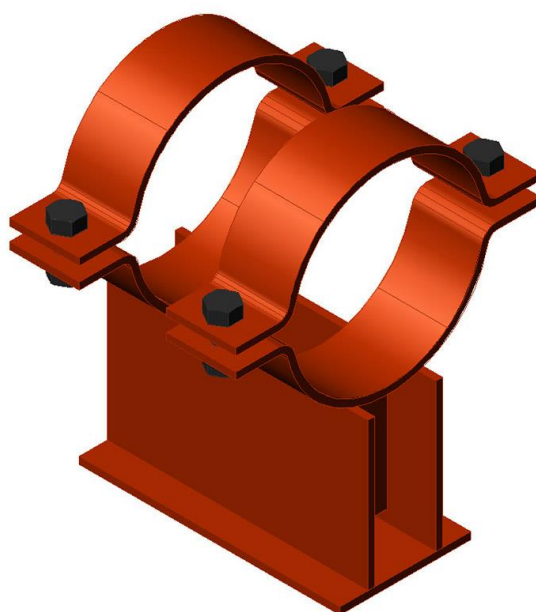
Zanedbáno je zde prodloužení ramena potrubí skloněného od kóty o  $9^\circ$ . Kolena jsou do délky započítána způsobem definovaným v kap. 4.4.1, tedy nahrazením rovným válcovým úsekem o celkové délce dvojnásobku osového poloměru ohybu kolena.

Vliv armatur je zohledněn pomocí součinitele  $k$ , pro podporu BQ01 je proveden ilustrační výpočet metodou tenké prizmatické tyče dle kap. 4.4.2. Typ podpory dle normy ON130802, vzhled podle obr. P II/ 1.

Typ uložení je zjevně dle dispozice [Příloha 2] nadzemní, interiérový.



Obr. P II/ 2: Rozměry kluzné podpěry ON130802 [18]



Obr. P II/ 3: Pohled na kluznou podpěru ON130802 [18]

Vstupní geometrické parametry pro metodu výpočtu pomocí teorie vedení v tenké prizmatické tyči (značení v obr. P II/ 4 je z kapitálek nahrazeno malými písmeny, rozměry jsou dosazovány v [m]):

$$L = v + p - \frac{d_{w2}}{2} - s_{opt} [m]$$

$$S = h \cdot (2l + b) [m^2]$$

$$U = 2 \cdot (2l + b) [m]$$

Další parametry jsou považovány za známé, viz obr. P II/ 3. Výpočet viz obr. P II/5 až P II/8.

<b>VSTUPNÍ PARAMETRY</b>			
<b>SPOLEČNÉ VŠEM DRUHŮM ULOŽENÍ</b>			
Název parametru	Označení	Hodnota	Jednotka
			Požadovaný/doporučený rozsah hodnoty
Jmenovitý průměr potrubí	<b>DN</b>	<b>150</b>	<b>mm</b>
Délka potrubí	<b>L</b>	<b>17,6</b>	<b>m</b>
Absolutní tlak páry	<b>p</b>	<b>1,18</b>	<b>MPa</b>
Rychlost proudění páry	<b>w</b>	<b>45</b>	<b>m/s</b>
Teplota páry	<b>t_f1</b>	<b>260</b>	<b>°C</b>
Teplota okolní atmosféry	<b>t_f2</b>	<b>20</b>	<b>°C</b>
Teplota ve vratné větvi	<b>t_k</b>	<b>50</b>	<b>°C</b>
Procentuální množství spotřebované páry	<b>s</b>	<b>100</b>	<b>% hmot.</b>
Tepelná vodivost mat. trubky	<b>λ_tr</b>	<b>50</b>	<b>W/mK</b>
Souč. tepelné vodivosti izolace	<b>λ_iz</b>	<b>0,043</b>	<b>W/mK</b>
Životnost izolace	<b>τ</b>	<b>15</b>	<b>let</b>
Objemová cena izolace (mat. + práce)	<b>c_iz</b>	<b>18000</b>	<b>Kč/m<sup>3</sup></b>
Plošná cena pláště izolace (mat. + práce)	<b>c_pl</b>	<b>2000</b>	<b>Kč/m<sup>2</sup></b>
Cena tepla	<b>c_t</b>	<b>450</b>	<b>Kč/GJ</b>
Přirážkový součinitel tepelných ztrát	<b>k</b>	<b>1,05</b>	<b>-</b>
<b>KONTROLA BEZPEČNÉ TEPLoty VNĚJŠÍHO POVRCHU</b>			
Bezpečná teplota vnějšího povrchu	<b>t_w2bezp</b>	<b>50</b>	<b>°C</b>
<b>NADZEMNÍ ULOŽENÍ</b>			
Poměrná sálavost pláště izolace	<b>ε_pl</b>	<b>0,5</b>	<b>-</b>
Poměrná sálavost neizolované trubky	<b>ε_tr</b>	<b>0,97</b>	<b>-</b>
- V EXTERIERU	<b>(switch_ext)</b>	<b>NEPRAVDA</b>	
Střední roční rychlost větru	<b>w_f2</b>	<b>1,5</b>	<b>m/s</b>
<b>PODZEMNÍ BEZKANÁLOVÉ ULOŽENÍ</b>			
Hloubka uložení potrubí v zemině (k ose)	<b>h</b>	<b>1</b>	<b>m</b>
<b>ARMATURY</b>			
Počet patek typu ON130810	<b>n_A1</b>	<b>0</b>	<b>-</b>
Počet patek typu ON130802	<b>n_A2</b>	<b>1</b>	<b>-</b>
Opravný součinitel	<b>ε_A</b>	<b>0,9</b>	<b>-</b>

Obr. P II/ 6: Pohled do výpočetního programu – vstupní parametry

Vyhodnocení			
<b>ROZMĚROVÉ VÝSLEDKY</b>			
Vnitřní průměr trubky	d_w1	0,141	m
Výpočtová tloušťka stěny trubky	t_výp	13,69	mm
Vnější průměr trubky	D_tr	0,168	m
<b>Optimální tloušťka izolace</b>	<b>s_opt</b>	<b>0,149</b>	<b>m</b>
Vnější průměr izolace	d_w2	0,466	m
<b>MINIMÁLNÍ BEZPEČNÁ TLOUŠŤKA IZOLACE</b>			
Minimální bezpečná tloušťka izolace	s_bezp	0,052	m
Vnější průměr izolace o min. bezp. tl.	d_w2bezp	0,272	m
<b>PRŮTOK</b>			
Hmotnostní průtok páry	m	0,83380	kg/s
Výkon přenášený proudem páry (s = 100%)	P	2331233,30	W
Výkon přenášený proudem páry (bez vráceného)	P_vr	2331233,30	W
Teplota sytosti	t_s	187,21	°C
Množství kondenzátu vzniklého ztrátami na trase	m_k	0,000000	kg/s
<b>POTŘEBA IZOLAČNÍHO MATERIÁLU</b>			
Vnější povrch izolace	S_pl	25,7827	m <sup>2</sup>
Objem potřebné deskové vaty	V_v	3,8416	m <sup>3</sup>
Objem potřebné pěny/skružené vaty	V_p	2,6141	m <sup>3</sup>
<b>TEPELNÉ VÝSLEDKY</b>			
Tepebný odpor:	Σ R	3,901	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q	61,526	W/m
<b>Teplota vnějšího povrchu</b>	<b>t_w2</b>	<b>26,91</b>	<b>°C</b>
Celkový tepelný tok:	Q	1082,850	W
Procentuální ztráty	z	0,05	%
Roční ztráta tepla	Q_zr	34,172	GJ
<b>Roční ztráta tepla s přírůzkou</b>	<b>Q'_zr</b>	<b>35,881</b>	<b>GJ</b>
<b>Cena roční ztráty tepla s přírůzkou</b>	<b>C_zr</b>	<b>16 146,33</b>	<b>Kč</b>
Ztrátový tepelný tok hodnocených armatur	Q_A	58,15	W
Roční ztráta tepla hodnocených armatur	Q_Ar	1,84	GJ
Cena ztrát hodnocenými armaturami	C_Ar	825,79	Kč
<b>PRO MINIMÁLNÍ BEZPEČNOU TLOUŠŤKU IZOLACE</b>			
Tepebný odpor:	Σ R_bezp	1,922	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q_bezp	124,869	W/m
Teplota vnějšího povrchu:	t'_w2bezp	49,55	°C
<b>PRO NEIZOLOVANOU TRUBKU</b>			
Tepebný odpor:	Σ R_n	0,263	mK/W
Celk. měrný tepelný tok:	q_n	912,832	W/m
Teplota vnějšího povrchu:	T_w2n	124,56	°C
Celkový tepelný tok:	Q_n	16065,835	W
Procentuální ztráty	z_n	0,69	%
Roční ztráta tepla	Q_nzr	506,999	GJ
Cena roční ztráty tepla	C_nzr	228 149,64	Kč
<b>FINANČNÍ VÝSLEDKY</b>			
Cena zaizolování a opláštění	C_iz	120 714,48	Kč
<b>Roční cena zaizolování a opláštění</b>	<b>C_izr</b>	<b>8 047,63</b>	<b>Kč</b>
Roční úspora při zaizolování	C_ru	212 003,31	Kč
<b>Součtové roční náklady</b>	<b>N</b>	<b>24 193,96</b>	<b>Kč</b>
Skutečná návratnost	n	0,569	roku
Celková úspora za dobu životnosti	C_U	3 180 049,61	Kč

Obr. P II/ 7: Pohled do výpočetního programu – hlavní výstupní hodnoty



Podpěra kluzná ON130802, prodloužená			Rozměrové řady						
Prodloužení p_A	0 m		DN	d	v	b	l	h	[mm]
			0,15	0,1683	0,27	0,27	0,15	0,008	[m]
DN	150 mm		150	168,3	270	270	150	8	
L	0,03585 m		200	219	290	300	150	8	
S	0,00456 m <sup>2</sup>		250	273	330	300	150	8	
U	1,14 m		300	324	380	300	190	10	
			350	377	400	300	190	10	
α <sub>2</sub>	6,077219537 W/m <sup>2</sup> K		400	426	430	350	210	10	
			500	530	500	350	210	10	
m	5,512358632 1/m		600	630	560	400	260	12	
ε <sub>A</sub>	0,9 -		700	720	630	400	260	12	
			800	820	700	400	260	12	
q <sub>A2</sub>	58,15015348 W								

Obr. P II/ 8: Pohled do výpočetního programu – sekce výpočtu tepelných ztrát kluzné podpěry

Nezáporná hodnota  $L$  v obr. P II/ 9 určuje, že se může postupovat v dalším výpočtu, aniž by bylo zaváděno prodloužení a tím odklonění od standardizované rozměrové řady armatury.

Jelikož se velká část potrubí nachází ve svislé poloze, je třeba zkontrolovat, zda je splněna podmínka turbulentního proudění při volné konvekci, při kterém nevzniká dle kap. 4.3.1 chyba výpočtu oproti vodorovnému potrubí. Splnění této podmínky ve všech paralelních částech výpočtu je zřejmé z listů „s\_opt“, „s\_bezp“ a „R\_neiz“ jejichž výřezy jsou na obrázcích P II/6-8.

PŘESTUP NA VNĚJŠÍ STRANĚ TRUBKY V INTERIÉRU				
VZDUCH (f2)				
ρ	1,188 kg/m <sup>3</sup>			
c <sub>p</sub>	1010 J/kgK			
γ	0,003660992 1/K			
v	0,00001532 m <sup>2</sup> /s			
λ	0,0252 W/mK			
Pr	0,727			
			GrPr	log (GrPr)
			78233041	7,89
	Konstanty Kalčík			
	Lam	Přech	Turb	
GrPr	>10 <sup>-3</sup> <5*10 <sup>2</sup>	>5*10 <sup>5</sup>	>2*10 <sup>7</sup>	
c	1,18	0,54	0,135	
n	8	4	3	

Obr. P II/ 10: Kontrola režimu kritériální rovnice na pozadí výpočtu, list „s\_opt“

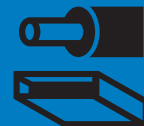


## **PŘÍLOHA III: Technický list Orstech DP 65 – Rohož na pletivu**

(viz další list)

# Orstech DP 65

## Rohož na pletivu



Kód specifikace: MW – EN 14303 – T2 – ST(+)-560 – WS1 – CL10

### CHARAKTERISTIKA VÝROBKU

Rohož Orstech DP 65 přišitá pozinkovaným drátem k pozinkovanému pletivu je vyrobena z kamenné vlny. AS kvalita dle AGI Q 132, ČSN EN 13468 a ASTM C 795 – možnost použití na nerezových potrubích a plochách. Hydrofobizace dle ČSN EN 1609.

### POUŽITÍ

Rohož na pletivu Orstech DP 65 je vhodná pro izolaci potrubí a technologických zařízení. Na vyžádání, pro teploty vyšší než 400 °C, lze podle AGI Q 132 nabídnout rohož šitou nerezovým drátem na pozinkovaném pletivu (označení Orstech DP 65 X) nebo rohož šitou nerezovým drátem na nerezovém pletivu (označení Orstech DP 65 X-X) podle ČSN EN 10223-2. Na vyžádání lze dodat úpravu ALU (vložená hliníková fólie pod pletivem) jako ochranu proti prachu. Rohož je nutně v konstrukci vhodným způsobem chránit před vlhkem a případným mechanickým poškozením. Pro venkovní použití je nutné použít oplechování.

Nejvyšší provozní teplota ve smyslu normy ČSN EN 14706 je 560 °C. Tloušťka rohože musí být volena tak, aby max. teplota na straně hliníkové fólie nepřesáhla 100 °C. V části izolace, která je vystavená teplotám

vyšším než 150 °C dochází jednorázově k uvolňování pojiva. V oblastech s nižší teplotou k tomuto jevu nedochází.

### BALENÍ, TRANSPORT, SKLADOVÁNÍ

Výrobky Orstech DP 65 jsou baleny do PE fólie a musí být dopravovány v krytých dopravních prostředcích za podmínek vylučujících jejich navlhnutí nebo jiné znehodnocení. Skladují se v krytých prostorách nalezato.

### PŘEDNOSTI

- velmi dobré tepelné izolační vlastnosti (nízká tepelná vodivost)
- požární ochrana – nehořlavý materiál
- vysoká teplotní odolnost (možnost použití až do nejvyšší provozní teploty 560 °C)
- velmi dobrá pohltivost zvuku (vysoký číselný pohltivost)
- ekologická a hygienická nezávadnost
- vodoodpudivost – izolační materiály Isover jsou hydrofobizované
- dlouhá životnost
- odolnost proti dřevokazným škůdcům, hlodavcům a hmyzu
- AS kvalita – vhodné pro izolaci nerezových povrchů

### SOUVISEJÍCÍ DOKUMENTY

- ES certifikát shody 1390-CPD-0313/11/P

### ROZMĚRY

Označení	Tloušťka (mm) <sup>1)</sup>	Rozměry (mm)	Balení (m <sup>2</sup> )
Orstech DP 65	40	3000 x 1000	3,0
Orstech DP 65	50	3000 x 1000	3,0
Orstech DP 65	60	3000 x 1000	3,0
Orstech DP 65	80	2500 x 1000	2,5
Orstech DP 65	100	2500 x 1000	2,5
Orstech DP 65	120*	2300 x 1000	2,3

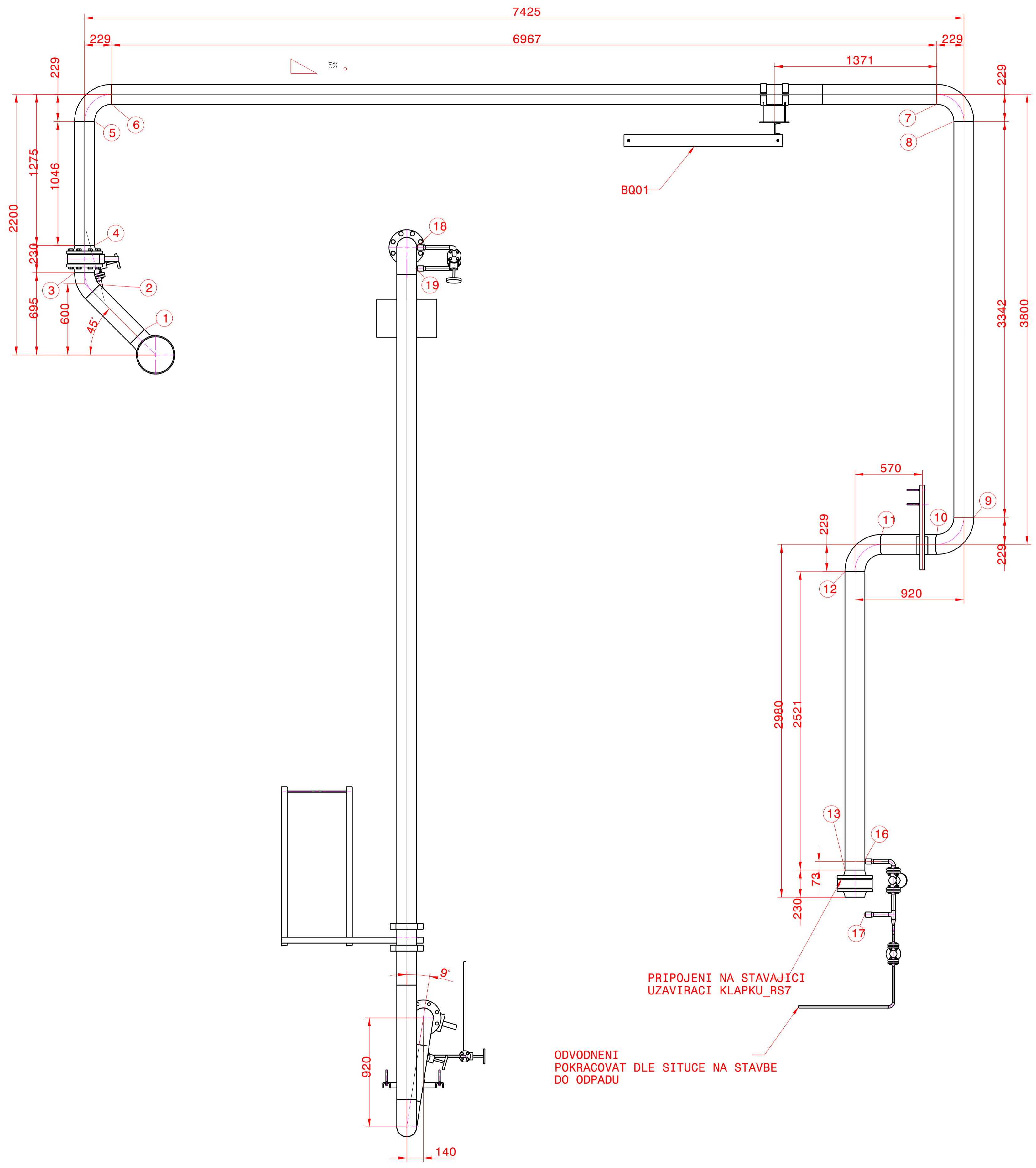
Doplňkové označení povrchové úpravy: ALU - vložení armované hliníkové fólie mezi izolaci a drátěné pletivo. Tolerance tloušťky dle ČSN EN 823: -5 mm a +5 mm. <sup>1)</sup> Měřeno pod zátěží 1000 Pa. Při montáži je proto nutné počítat s větší tloušťkou izolace, než jaká je udávána v tabulce. \* Minimální množství nutno konzultovat s výrobcem.

### TECHNICKÉ PARAMETRY

Parametr	Jednotka	Hodnota										Norma
TEPELNÉ VLASTNOSTI												
Deklarovaná hodnota součinitele tepelné vodivosti $\lambda_D$ dle ČSN EN ISO 13787	°C	50	100	150	200	250	300	400	500	550		
	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0,041	0,048	0,058	0,069	0,083	0,100	0,142	0,196	0,228		
Měřená hodnota souč. tepelné vodivosti podle ČSN EN 12667	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0,039	0,048	0,058	0,069	0,081	0,095	0,128	0,171	0,197		
Nejvyšší provozní teplota / na straně hliníkové fólie	°C	560 / max. 100					ČSN EN 14706					
Měrná tepelná kapacita $c_p$	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	800					-					
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI												
Objemová hmotnost	kg.m <sup>-3</sup>	65					ČSN EN 1602, ČSN EN 13470					
Krátkodobá nasákavost $W_p$	kg.m <sup>-2</sup>	<< 1					ČSN EN 1609					
Faktor difuzního odporu minerální vlny bez polepu $\mu$	-	1,3					ČSN EN 12086					
Odpor proti proudění vzduchu $\Xi$	kPa.s.m <sup>-2</sup>	16					ČSN EN 29053					
PROTIPOŽÁRNÍ VLASTNOSTI												
Reakce na oheň	-	A1					ČSN EN 13501-1					
Bod tání $t_i$	°C	≥ 1000					DIN 4102 díl 17					

Součinitel tepelné vodivosti pro 0 °C:  $\lambda_0 = 0,034 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Hodnota slouží pouze pro porovnání produktů podle vyhlášky 193/2007 Sb. – dle § 5, odst. 8 (pro tepelné izolace rozvodů) a § 8, odst. 1 a 2 (pro tepelné izolace zásobníků teplé vody a expanzních nádob). Uvedená tepelná vodivost neslouží k návrhu, protože rohože na pletivu z minerální vlny nejsou vhodné na chladicí rozvody, ani na zásobníky chladu.

31. 10. 2013 Uvedené informace jsou platné v době vydání technického listu. Výrobce si vyhrazuje právo tyto údaje měnit.

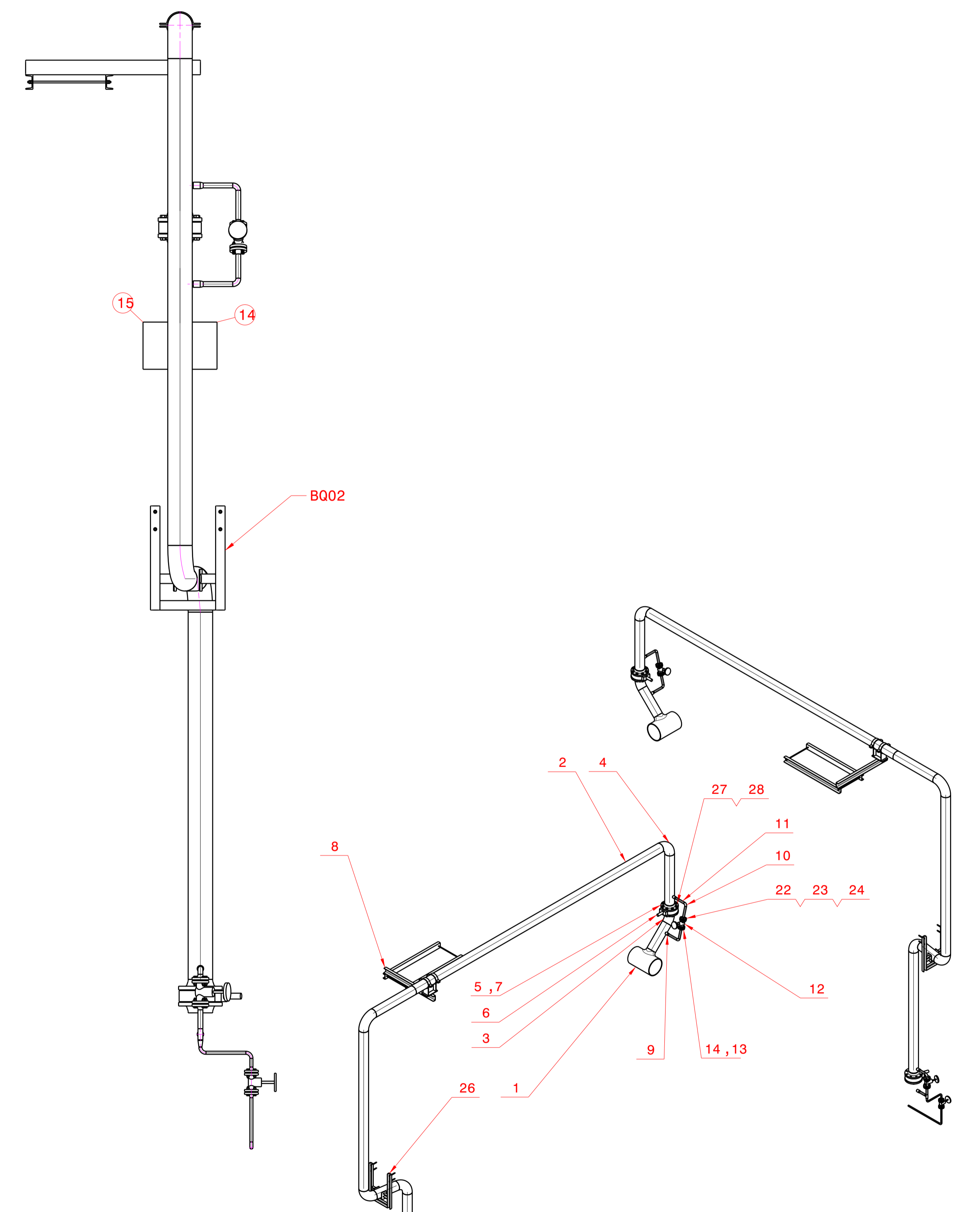


PRIPOJENI NA STAVAJICI  
UZAVIRACI KLAPKU\_RS7

ODVODNENI  
POKRACOVAT DLE SITUCE NA STAVBE  
DO ODPADU

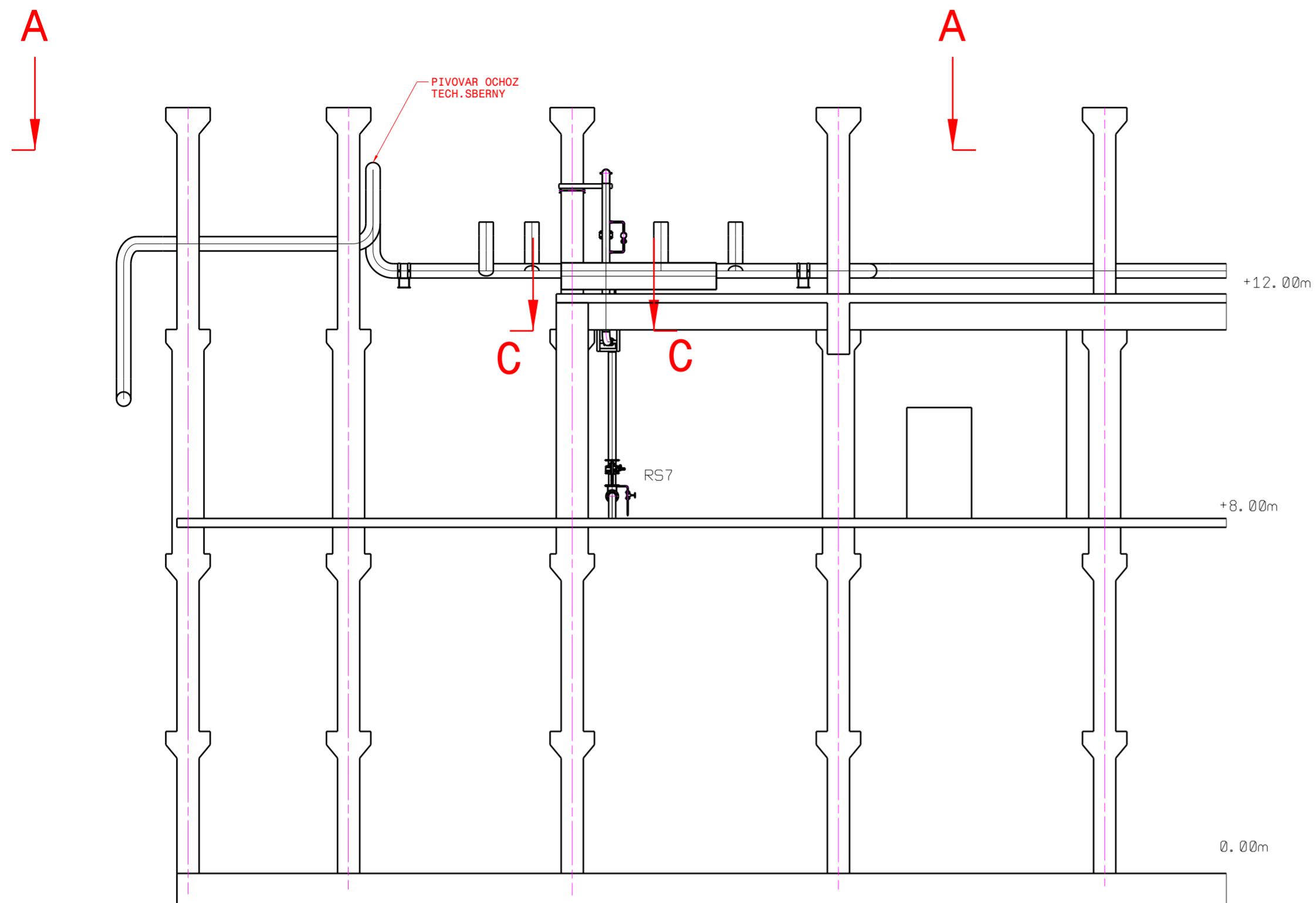
POZNAMKY:  
 (X) SVAR  
 (XX) POZICE

TRASA	MEDIUM	Dxt	MATERIAL	PC-PS (bar g)	TC (°C)	PO (bar g)	TO (°C)	PT (bar g)	POLYMER OHYBU	to	do	KATEGORIE POTR. DLE ES 97/23 EC
PROPOJ RS7	PARA	323,9x8,8	1.0345	11,8	260					3,2	307,5	II
		168,3x4,5	1.0345	11,8	260					2,1	159,5	I

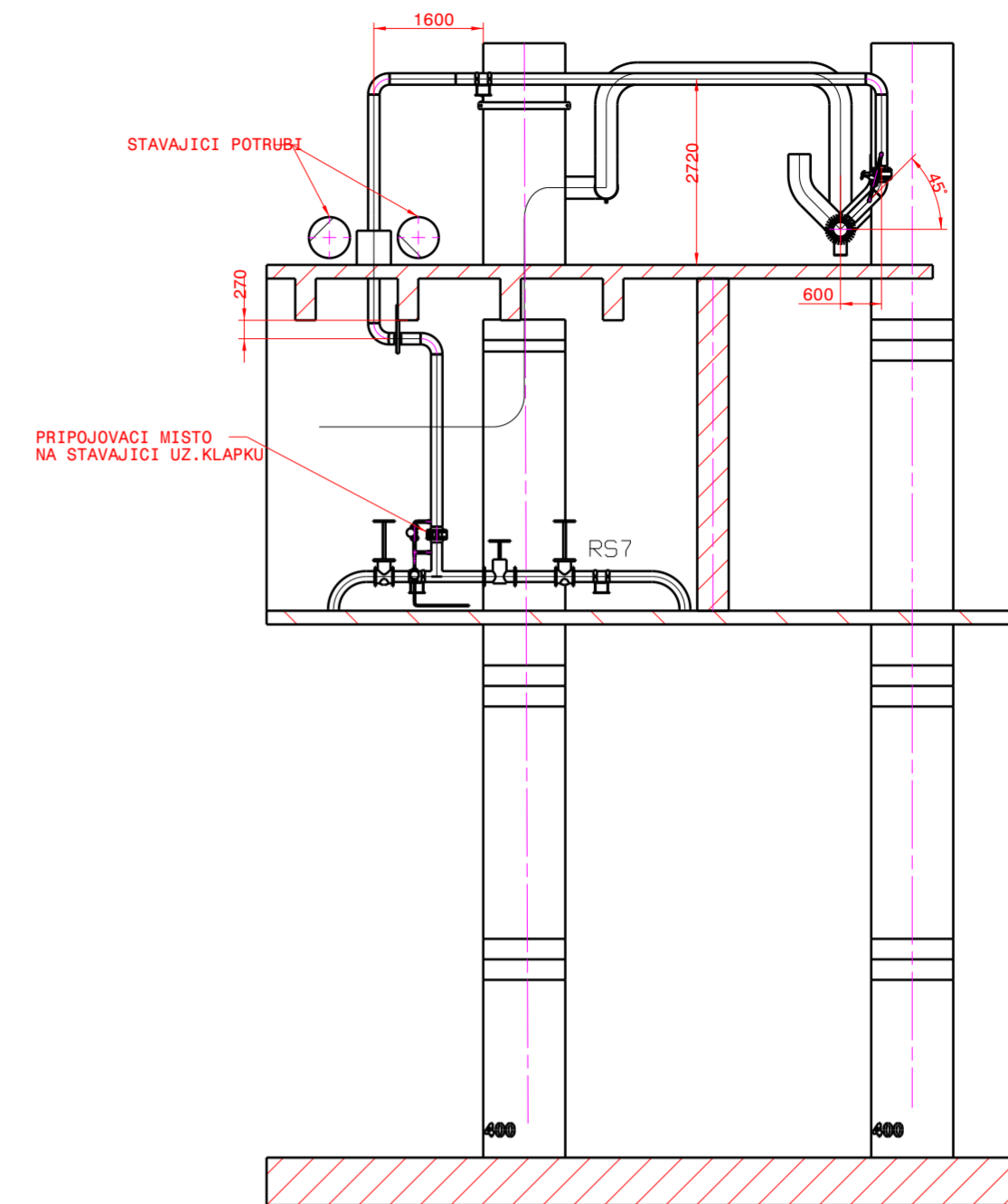


VYKRES BYL UPRAVEN DLE DOKUMENTACE PREDANE KONZULTANTEM.

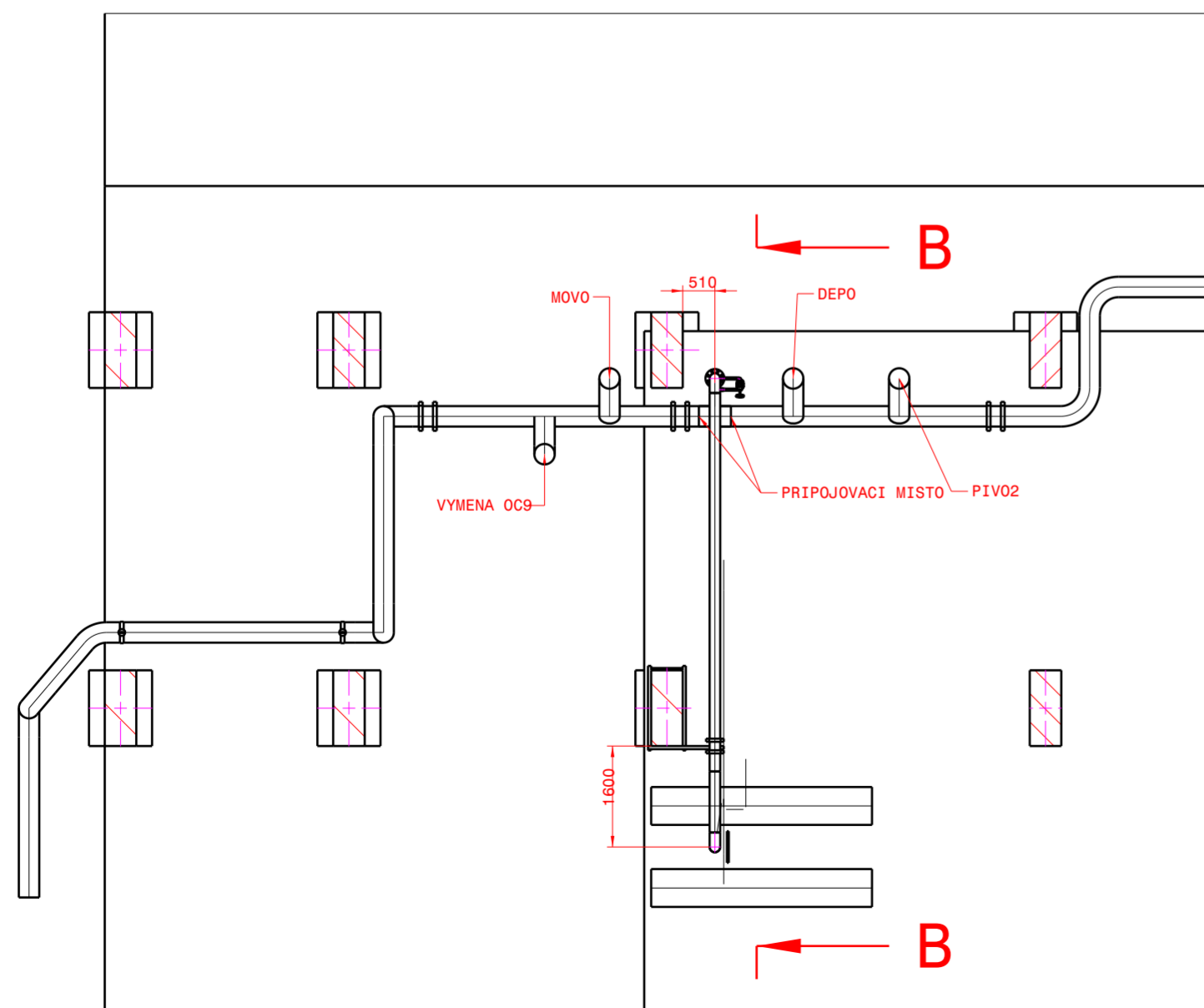
ISO 128		ZCU v Plzni	
SCHVALIL		NAZEV	
ING. HRUBY		PROPOJOVACI POTRUBI RS7	
KONTROLOVAL		SOUBOR	
ING. HRUBY		FORMALISLO VYKRESU	
KRESTIL		PRILOHA 1	
HURDA		MERITKO 1:1	
DATUM		HMDNOST (kg)	
25.2.2014		LIST 1/1	



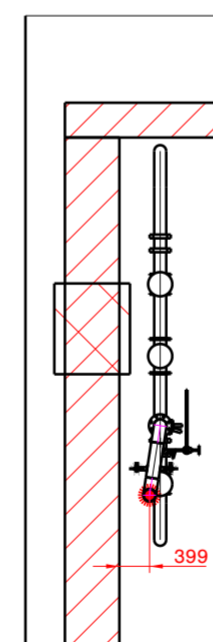
**REZ A-A**



**REZ B-B**



**REZ C-C**



VYKRES BYL UPRAVEN DLE DOKUMENTACE PREDANE KONZULTANTEM.

 ISO 128		ZCU v Plzni		
SCHVALIL	DATUM	NAZEV DISPOZICE POTRUBI RS7		
ING. HRUBY	25.2.2014	SOUBOR	Dispozice.dwg	
KONTROLOVAL	DATUM	FORMA	CISLO VYKRESU	REV
ING. HRUBY	25.2.2014	A2	PRILOHA 2	0
KRESTIL	DATUM	MERITKO 1:1	HMOTNOST (kg)	LIST 1/1
HURDA	23.2.2014			