VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PARAMETRY V TEPELNÉM VÝPOČTU ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ
SPECIFICATIONS IN THE HEAT CALCULATION OF ELECTROTHERMAL DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Mgr. Vladislav Mikmek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Mgr. Vladislav Mikmek ***ID:*** 89206
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Parametry v tepelném výpočtu elektrotepelných zařízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Základy sdílení tepla - kondukce, konvekce, radiace
2. Elektrotepelná zařízení - odporové kelímkové pece
3. Tepelný výpočet - výpočet parametrů topného elementu a jeho umístění
4. Volené parametry ve výpočtu - vliv na výsledné parametry

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018 ***Termín odevzdání:*** 29.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.
Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

MIKMEK, V. *Parametry v tepelném výpočtu elektrotepelných zařízení.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 64 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Parametry v tepelném výpočtu elektrotepelných zařízení* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 12. 5. 2018 ……

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí práce doc. Ing. Iloně Lázničkové, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tepelným výpočtem odporové kelímkové pece s důrazem na vliv volených parametrů.

Je popsán celý postup tepelného výpočtu. U konkrétního výpočtu uvedeného v této práci je předpokládána znalost některých veličin, jako materiál vsázky či její hmotnost, rozměry kelímku, topné spirály a další. Výsledkem výpočtu je teplo potřebné k roztavení vsázky, potřebný příkon pece, rozměry topné spirály, dovolené povrchové zatížení spirály a počet žlabů v peci k umístění topných článků. Jsou zmíněny body v postupu, kde lze postupovat různě k dosažení hodnot potřebných veličin.

Poslední kapitola na konkrétním příkladu odporové kelímkové pece ukazuje vliv volených parametrů na veličiny, které na těchto parametrech závisí. V daných zvolených bodech výpočtu, které mohou proběhnout alespoň dvěma odlišnými způsoby, je ukázáno, jaký vliv mají tyto volby na dílčí výsledek. V případě větších odlišností v hodnotách je ukázán i vliv na navazující výpočty a konečné výsledky.

Výsledkem práce je tedy shrnutí vlivu volených parametrů na výsledné hodnoty. Ukazuje také, že některé volené parametry mají vliv na výpočet minimální a jiné naopak značný.

KLÍČOVÁ SLOVA

tepelný výpočet, elektrotepelná zařízení, odporový ohřev, kelímková pec, dovolené povrchové zatížení, odporová spirála, tepelné ztráty

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the heat calculation of a resistance crucible furnace with emphasis on the influence of selected specifications.

The whole process of the heat calculation is described. The calculation used in this thesis requires inputs as the kind of material of the batch or it's weight, the dimensions of the crucible and of the heating elements and others. The output of the calculation is the heat necessary to melt the batch, power needed by the crucible, the dimensions of the resistance spiral, permitted surface load of the spiral and the number of supports in the furnace to hold the heating elements. Parts of the canculation where there is possible to choose different methods to acquire needed values are also mentioned.

The last chapter shows on a particular example of crucible furnace the influence of selected specifications on quantities dependent on these specifications. In selected parts of the calculation, that can be done by at least two diffent methods, is shown the influence of the choice on the partial result. In the case of a bigger differences of the results is shown even the influence on the subsequent parts of the calculation and final results.

The contribution of the thesis is a summarization of the influences of the selected specifications on the results of the heat calculation. It also shows that some selected specifications have minor and other major influence on the calculation.

KEY WORDS

heat calculation, electrothermal devices, resistive heating, crucible furnace, permitted surface load, resistance spiral, heat loss

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **10**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **11**

1 ÚVOD **14**

2 ZÁKLADNÍ VELIČINY A POJMY **15**

3 SDÍLENÍ TEPLA **17**
3.1 Sdílení tepla vedením 17
3.2 Sdílení tepla prouděním 18
3.3 Sdílení tepla zářením 18

4 ELEKTRICKÝ OHŘEV A ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ **21**
4.1 Odporová tepelná zařízení 21
4.2 Kelímková odporová pec 23

5 TEPELNÝ VÝPOČET PECÍ **25**
5.1 Základy návrhu odporových pecí 25
5.2 Příkon pece 26
5.3 Topné články 27
5.3.1 Výpočet základních rozměrů a hmotnosti topných článků 27
5.3.2 Dovolené povrchové zatížení 28

6 TEPELNÝ VÝPOČET ODPOROVÉ KELÍMKOVÉ PECE **30**
6.1 Veličiny a vlastnosti kelímkové pece a vsázky užité v tepelném výpočtu 30
6.2 Výpočet přestupové plochy 32
6.3 Výpočet potřebného dodávaného tepla a teploty odporového materiálu 33
6.4 Výpočet příkonu odporové kelímkové pece 34
6.5 Návrh vodiče topné spirály, nosníkové žlaby, dovolené povrchové zatížení 35

7 VLIV VOLENÝCH PARAMETRŮ NA TEPELNÝ VÝPOČET KELÍMKOVÉ ODPOROVÉ PECE **38**
7.1 Zadání výpočtu, vlastnosti pece a vsázky a volené parametry 38
7.2 Součinitel plnění 41
7.3 Tepelné ztráty 42
7.4 Součinitel bezpečnosti 43
7.5 Typ stěny pro výpočet teplotního spádu a vnější teploty stěny kelímku . . 45
7.6 Způsoby vypočtení délky topné spirály 47
7.7 Dovolené povrchové zatížení 49
7.7.1 Získání hodnoty povrchového zatížení podle zvoleného průměru . 49
7.7.2 Stanovení dovoleného povrchového zatížení, výpočet průměru . . 51

7.7.3 Přepočet dovoleného povrchového napětí na základně vypočítaného průměru . . . 53
7.7.4 Výpočet dovoleného povrchového zatížení přes ideální povrchové zatížení . . . 55
7.8 Stoupání spirály . . . 55
7.9 Vnější průměr spirály . . . 57

8 ZÁVĚR **59**

POUŽITÁ LITERATURA **60**

SEZNAM PŘÍLOH **62**

PŘÍLOHA A **63**

PŘÍLOHA B **64**

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 4.1 Průřez kelímkovou odporovou pecí [3] 23
Obrázek 4.2 Topná spirála [3] 24
Obrázek 7.1 Nosník odporové kelímkové pece [3] 39
Obrázek 7.2 Zadané rozměry kelímkové odporové pece [3] 40
Obrázek 8.1 Topné dráty KANTHAL A, AF, AE [3] 63
Obrázek 8.2 Průměr a dovolené povrchové zatížení drátů KANTHAL [3] . . . 64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 7.1 Zadání tepelného výpočtu 38
Tabulka 7.2 Pevně zvolené vlastnosti při výpočtu 39
Tabulka 7.3 Vliv změny součinitele plnění 41
Tabulka 7.4 Vliv změny tepelných ztrát 42
Tabulka 7.5 Vliv změny součinitele bezpečnosti na výpočet výkonu 44
Tabulka 7.6 Výpočet přes válcovou a rovinnou stěnu pro tři různá zadání tepelných ztrát 46
Tabulka 7.7 Vliv odlišného výpočtu na délku odporové spirály a navazující výpočty 48
Tabulka 7.8 Zvolený průměr a vliv odečteného dovoleného zatížení z tabulky 50
Tabulka 7.9 Vliv zvoleného dovoleného povrchového zatížení na tepelný výpočet 52
Tabulka 7.10 Přepočítané dovolené povrchové zatížení dle průměru 54
Tabulka 7.11 Výpočet ideálního povrchového zatížení 55
Tabulka 7.12 Vliv stoupání na výpočet topných článků a nosníků 56
Tabulka 7.13 Vliv průměru spirály na výpočet topných článků a nosníků 58

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

symbol	název	jednotka
c	měrná tepelná kapacita	$\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$
c_{Al}	měrná tepelná kapacita hliníkového kelímku	$\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$
c_B	sálání absolutně černého tělesa	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$
c_{celk}	celkové sálání v kelímkové peci	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$
c_k	měrná tepelná kapacita kapalné vsázky	$\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$
c_k	sálání kelímku	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$
c_p	měrná tepelná kapacita pevné vsázky	$\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$
c_s	měrné skupenské teplo vsázky	$\mathrm{J.kg^{-1}}$
c_{sp}	sálání spirály	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$
$c_{s,Al}$	měrné skupenské teplo hliníku	$\mathrm{J.kg^{-1}}$
d	průměr	m
d_{sk}	je střední průměr kelímku kelímkové pece	m
d_{zv}	průměr drátu zvolený z normalizované řady průměrů	m
h_{vs}	výška vsázky ve tvaru válce v kelímku	m
$\mathrm{grad}T$	teplotní gradient	$\mathrm{K.m^{-1}}$
k	součinitel plnění	-
l	délka	m
l_{1f}	délka topné spirály pro jednu fázi	m
l_{3f}	délka topné spirály pro všechny tři fáze	m
l_{1zn}	přepočítaná délka závitu spirály	m
$l_{dr1žl}$	délka topného článku v jednom žlabu	m
$l_{dr1žln}$	přepočítaná délka topného článku v jednom žlabu	m
$l_{žl}$	délka nosníkového žlabu	m
m	součinitel štíhlosti	-
$m_{tč}$	hmotnost topného článku	kg
m_{ts}	hmotnost topné spirály	kg
m_{vs}	hmotnost vsázky	kg
n_{1f}	počet žlabů pece na fázi	-
n_{1fz}	zaokrouhlený počet žlabů pece na fázi	-
$n_{1ž}$	počet závitů na žlab	-
$n_{1ž}$	nepřepočítaný počet závitů na žlab	-
$n_{1žn}$	přepočítaný počet závitů na žlab	-
o	obvod	m
p_{kontr}	kontrolní hodnota dovoleného povrchového zatížení	$\mathrm{W.m^{-2}}$
p_z	dovolené povrchové zatížení	$\mathrm{W.m^{-2}}$
s	stoupání spirály	m
s_k	tloušťka stěny kelímku kelímkové pece	m
s_n	přepočítané stoupání spirály	m
$s_{stř}$	vzdálenost středu spirály od vnější stěny kelímku	m

symbol	název	jednotka
t	čas	s
t_0	původní teplota vsázky	°C
t_p	požadovaná teplota vsázky	°C
t_{vs}	doba ohřívání vsázky	s
q	hustota tepelného toku	$\mathrm{W.m^{-2}}$
$\boldsymbol{q}$	vektor hustoty tepelného toku	$\mathrm{W.m^{-2}}$
$A_{\check{S}}$	poměrná pohltivost	-
E	energie	J
D	vnější průměr spirály	m
I	elektrický proud	A
K	součinitel bezpečnosti	-
M	intenzita vyzařování	$\mathrm{W.m^{-2}}$
$M_{\check{C}}$	intenzita vyzařování černého tělesa	$\mathrm{W.m^{-2}}$
$M_{\check{S}}$	intenzita vyzařování šedého tělesa	$\mathrm{W.m^{-2}}$
M_λ	spektrální intenzita záření	$\mathrm{W.m^{-2}.m^{-1}}$
S	plocha	$\mathrm{m^2}$
S	průřez	$\mathrm{m^2}$
T	termodynamická teplota	K
T_0	původní teplota vsázky	K
T_k	vnější teplota stěny kelímku	K
T_{kr}	vnější teplota stěny kelímku – rovinná stěna	K
T_{kv}	vnější teplota stěny kelímku – válcová stěna	K
T_p	požadovaná teplota vsázky	K
T_{sp}	teplota topných spirál	K
T_t	teplota tání vsázky	K
T_{vs}	teplota vsázky	K
ΔT	rozdíl teplot	K
ΔT_k	teplotní spád	K
ΔT_{kr}	teplotní spád rovinnou stěnou	K
ΔT_{kv}	teplotní spád válcovou stěnou	K
P	výkon, příkon	W
P_{1f}	příkon na jedné fázi třífázové pece	W
P_{3f}	příkon všech tří fází pece	W
$P_{t\check{c}}$	příkon topného článku	W
P_u	užitečný příkon	W
Q	teplo	J
Q_1	teplo potřebné k ohřevu vsázky na teplotu tavení	J
Q_2	teplo potřebné k roztavení vsázky	J
Q_3	teplo potřebné k ohřev vsázky na výslednou teplotu	J
Q_t	celkové teplo potřebné k roztavení vsázky	J
Q_u	užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky	J
Q_z	tepelné ztráty	J
R	elektrický odpor	Ω

symbol	**název**	**jednotka**
R_{T_1}	odpor při teplotě T_1	Ω
R_{T_2}	odpor při teplotě T_2	Ω
S_k	přestupová plocha kelímku	m^2
S_{vs}	plocha válce vsázky v kelímku	m^2
U	napětí	V
V_{vs}	objem válce vytvořeného vsázkou	m^3
W	práce	**J**
α	součinitel přestupu tepla	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$
α	teplotní součinitel odporu	$\mathrm{K^{-1}}$
δ_{kvr}	relativní odchylka T_{kr} a T_{kv}	%
$\varepsilon_{\check{S}}$	emisivita šedého tělesa	-
ε_{sp}	emisivita spirály	-
λ	tepelná vodivost	$\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$
λ	vlnová délka záření	m
λ_k	tepelná vodivost materiálu kelímku	$\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$
ψ	součinitel povrchového zatížení	-
π	Ludolfovo číslo	-
σ	Stefanova-Boltzmanova konstanta	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$
ϱ	rezistivita	$\mathrm{\Omega.mm^2.m^{-1}}$
ϱ_{Al}	hustota vsázky – hliníku	$\mathrm{kg.m^{-3}}$
ϱ_h	hustota	$\mathrm{kg.m^{-3}}$
ϱ_{sp}	rezistivita topné spirály	$\mathrm{\Omega.mm^2.m^{-1}}$
Φ	tepelný tok	**W**

1 Úvod

Elektrotepelná technika tvoří důležitou součást rozsáhlého oboru elektroenergetiky, který se neustále vyvíjí a přizpůsobuje zvyšujícím se potřebám společnosti, ve které žijeme a která je na elektrické energii, této ušlechtilé formě energie, vlastně závislá.

Elektrickou energii přeměňujeme na méně ušlechtilé, ale pro daný účel užitečné formy energie, jako je energie tepelná. Teplo využíváme z různých důvodů, ať už jsou to teplotní potřeby našeho těla, tedy vyhřívání obytných místností, nebo například tavení materiálů pro další zpracování. Součástí zájmu elektrotepelné techniky jsou i tepelné pece.

Tato bakalářská práce pojednává o odporových kelímkových pecích a tepelných výpočtech, které se jich týkají. Nejprve je však vysvětlen vznik tepla a druhy přenosu tepla, základní vztahy, které se jich týkají a které jsou poté potřeba k pochopení pokročilejší problematiky ohřevů. Po probrání základů tepelné techniky se práce již zabývá odporovými tepelnými zařízeními s důrazem na odporové pece, kde jsou popsány základní body výpočtu těchto pecí. Navazuje kapitola, ve které jsou rozebrány výpočty týkající se návrhu konkrétního typu pece – odporové kelímkové pece, a to od odporových článků přes množství tepla potřebného k tavení až po problematiku dovoleného povrchového zatížení.

Poslední kapitola je věnována konkrétnímu výpočtu kelímkové odporové pece. Místo jednoho výpočtu pro dané zadání je zvoleno několik volených parametrů a postupně zkoumán vliv jejich změny na tepelný výpočet pece. Parametry jsou různého druhu – od důležitého koeficientu přes vztah pro výpočet hledané hodnoty veličiny až po celý postup k určování důležitých vlastností částí pece.

Práce má tedy ukázat vliv těchto volených parametrů na výpočet, zda je vliv velký či spíše zanedbatelný, velikosti změn, které parametry mohou v různých případech způsobit, případně i to, zda nevhodná volba parametru může v některých případech vést i k nevhodným výsledkům výpočtu.

2 ZÁKLADNÍ VELIČINY A POJMY

Pro tepelné výpočty elektrotepelných zařízení je potřeba znát některé základní veličiny a pojmy z oblasti termodynamiky. Je uveden krátký přehled těchto veličin a pojmů, přičemž jejich znalost je zásadní pro pochopení následujícího textu jak v kapitolách týkajících se přenosu tepla, tak i v následujícím textu o tepelných pecích a u samotného tepelného výpočtu.

Energie *„je extenzivní stavová proměnná, která vyjadřuje schopnost termodynamické soustavy konat práci"* [8]. Můžeme popsat více druhů energií, dá se rozdělit na vnější a vnitřní energii.
$[E] = \mathrm{J}$

Teplota je skalární veličina. Běžně používanou jednotkou jsou stupně Celsia (°C), v oblasti fyziky i v dalším textu se užívá **termodynamická teplota** s vlastní stupnicí a jednotkou Kelvin (K).
$[T] = \mathrm{K}$

Teplotní rozdíl je podmínkou přenosu tepla. Teplotní rozdíl uvedený ve stupních Celsia i v Kelvinech má stejnou hodnotu díky stejné velikosti jednotky obou stupnic.

Teplotní pole udává rozložení teplot v daném čase ve všech bodech sledovaného prostoru. Při konstantní teplotě v těchto bodech nazýváme pole stacionární, při změnách teploty je teplotní pole nestacionární [4].

Izotermické plochy či **izotermické čáry** jsou dle počtu rozměrů, který uvažujeme, množiny bodů o stejné teplotě. Jelikož každý bod má jen jednu teplotu, k protínání těchto ploch či čar nemůže docházet.

Teplotní gradient je vektorem, udávajícím maximální změnu teploty. K izotermickému povrchu je v postavení normály, při pohybu kolmém k izotermickému povrchu se teplota mění nejvíce. Jako kladný udává směr vzrůstající teploty, záporný vyjadřuje pokles, tzv. teplotní spád.
$[\mathrm{grad}\ T] = \mathrm{K.m^{-1}}$

Teplo je veličina, vyjadřující změnu vnitřní energie soustavy, pokud tato energie nevykonává práci a v případě, kdy nedochází ke změně skupenství či chemické reakce [7]. Teplo lze definovat také jako energii vyměněnou mezi systémem a okolím v důsledku teplotního rozdílu mezi těmito dvěma tělesy [5]. Kladné teplo je teplo systémem přijaté, záporné je teplem odevzdaným.
$[Q] = \mathrm{J}$

Tepelný tok vyjadřuje množství tepla přeneseného za jednotku času.
$[\Phi] = \mathrm{W}$

Hustota tepelného toku vyjadřuje množství energie procházející daným průřezem za daný čas. Nebo též tepelný tok vztažený na jednotku povrchu [8].
$[q] = \mathrm{W.m^{-2}}$

Měrná tepelná kapacita je materiálovou konstantou a vyjadřuje množství tepla, které je potřeba na ohřátí 1 kg o 1 K nebo 1 °C.
$[c] = \mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$

Součinitel přestupu tepla *„udává množství tepla, které přejde prouděním a vedením jednotkovou plochou do tekutiny či naopak za jednotku času při teplotním rozdílu 1 K mezi tekutinou a stěnou.“*
$[\alpha] = \mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$

3 SDÍLENÍ TEPLA

Při sdílení tepla přechází tepelná energie mezi dvěma různě teplými látkami. Mechanismy přenosu tepla jsou celkem tři: vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a zářením čili sáláním (radiací). Mohou se uplatňovat i všechny tři způsoby najednou, ne však vždy a v některých případech je alespoň jeden z nich natolik nevýznamný, že lze zcela zanedbat.

Jak je zmíněno například v [15], součástí přenosu tepla prouděním je vždy i přenos vedením, při proudění kapalin a plynů tedy mluvíme o konvekčně kondukčním přenosu tepla. U žhavých plynů můžeme zase tvrdit, že probíhá přenos energie konvekčně radiační.

Ve všech třech případech se má sdílením tepla docílit tepelné rovnováhy, tedy vyrovnání teplot všech látek, které se děje účastní.

3.1 Sdílení tepla vedením

V případě pevných látek hraje dominantní roli sdílení tepla vedením. Vnitřní částice se pohybují tepelným neuspořádaným pohybem, který se vzrůstající teplotou zvětšuje svoji amplitudu [5], částice do sebe narážejí a teplo se tak šíří dále. V [4] se ještě podrobněji uvádí, že zatímco v kapalinách a dielektrických tělesech se tato forma sdílení tepla děje pružným vlněním, v kovech probíhá difúze volných elektronů a v plynech difúze celých molekul a atomů.

Sdílení tepla vedením popisuje matematicky Fourierův zákon

$$\boldsymbol{q} = -\lambda \,\mathrm{grad} T, \tag{3.1}$$

kde $\boldsymbol{q}$ značí vektor hustoty tepelného toku, [$\boldsymbol{q}$] = $\mathrm{W.m^{-2}}$, λ je tepelná vodivost, [λ] = $\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$, a grad$T$ je gradient termodynamické teploty, [grad$T$] = $\mathrm{K.m^{-1}}$.

Zatímco teplotní gradient má směr vzrůstající teploty, hustota tepelného toku má směr opačný. Teplo totiž směřuje z oblasti s vyšší teplotou do oblasti s teplotou nižší, tedy jde o směr tepelného toku i jeho hustoty. Protože jde o vektor opačného smyslu ke gradientu a s odlišnou velikostí [13], píšeme znaménko minus.

Tepelná vodivost je vlastnost materiálu, závislá především na teplotě, méně pak na tlaku, jehož vliv bývá zanedbáván. Zajímavý je vliv teploty na tepelnou vodivost. U kovů, které mají vodivost nejvyšší, dochází se vzrůstající teplotou ke klesání, podobně u kapalin. U izolačních materiálů tepelná vodivost zpravidla roste, podobně jako u plynů [4]. Jak však uvádí [12], plyny vedou teplo nejhůře.

K určení tepelné vodivosti používáme experimentálních metod, například laserovou metodu, metodu horké desky a odporovou metodu [9].

3.2 Sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním se uplatňuje tam, kde dochází v makroskopickém měřítku k pohybu látky a tímto pohybem se teplo může předávat či přijímat. Účastníkem děje tedy musí být tekutina, tzn. kapalina či plyn. Je logické, že při sdílení tepla prouděním dochází také k předávání tepla vedením.

Proudění neboli konvekci můžeme rozdělit na dva typy:

- přirozená konvekce – k makroskopickému pohybu dochází z důvodu teplotních rozdílů,
- vynucená konvekce – k makroskopickému pohybu dochází vlivem vnějšího činitele.

Příkladem přirozené konvekce může být sdílení tepla v okolí plamene, u vynucené konvekce lze vzít za příklad vodu poháněnou čerpadlem. Za nejčastější důvod přirozené konvekce uvádí [10] vliv gravitačního pole na nerovnoměrně prohřátou tekutinu.

V odporových pecích se přisuzuje vyšší význam proudění tepla v případě nižších teplot. Tímto způsobem se provádí například výpočty ztrát ochlazováním skrze vnější povrch. Naopak při vyšších teplotách se více a více uplatňuje radiace tepla. Příkladem může být výpočet při zahřívání vsázky [6]. Význam proudění tepla je důležité připomenout především při cirkulaci atmosféry u odporových pecí.

Důležité je také zmínit význam tzv. teplotní mezní vrstvy mezi pevnou látkou a tekutinou. V teplotní vrstvě je proudění již laminární, částice kapaliny se pohybují rovnoběžně se stěnou, teplo tedy může procházet pouze vedením. V mezní vrstvě je kapalina v relativním klidu, je malá tepelné vodivosti a vzniká zde poměrně velký teplotní spád [13].

Teplo prošlé z tekutiny do stěny lze vyjádřit pomocí Newtonova vztahu [2]

$$Q = \alpha S(T_1 - T_0)t, \tag{3.2}$$

kde Q je teplo, které projde z kapaliny do stěny či naopak, [Q] = J, S je plocha stěny, [S] = m^2, T_1 je teplota tekutiny, [T_1] = K, T_0 je teplota stěny, [T_0] = K, a t je čas, [t] = s.

Součinitel přestupu tepla α není materiálovou konstantou, ale naopak závisí na mnoha parametrech, mezi nimi především na [12] hustotě tekutiny, teplotním rozdílu, rychlosti proudění, kinematické vazkosti tekutiny, tepelné vodivosti tekutiny, měrné tepelné kapacitě, součiniteli tepelné roztažnosti, intenzitě vnějšího silového pole, u nestacionárních dějů i na čase.

3.3 Sdílení tepla zářením

Podstatou sdílení tepla zářením je přeměna tepelné energie na energii zářivou a poté opět z energie zářivé na tepelnou. Jedná se o elektromagnetické vlnění, tedy vlnění šířící se rychlostí světla. Není potřeba, aby teplo tímto způsobem procházelo látkou, a může se

tedy šířit i ve vakuu [12]. V praxi je častější, a tedy důležitější především schopnost šíření vzduchem.

Při dopadu na povrch tělesa je základním faktem k dalším výpočtům to, že dle vlastností povrchu se část vlnění od tělesa odrazí, část se pohltí a část projde.

Mluvíme proto o takzvané tepelné pohltivosti, tepelné odrazivosti a tepelné prostupnosti. Relativní hodnoty těchto veličin vztažené na celkové dopadající záření musí po sečtení dávat hodnotu 1.

Dokonale pohlcujícím tělesem je těleso dokonale černé, které je však pouze teoretickým modelem. Dokonale bílé těleso má naopak relativní odrazivost rovnu jedné. Dokonale prostupný je vzduch či dvouatomové plyny, například kovy jsou jejich absolutním opakem s prostupností rovnou nule [7].

Každé těleso s termodynamickou teplotou větší než absolutní nula vyzařuje, každé těleso (kromě dokonalých modelů) také pohlcuje. Jde-li o samotné záření, pak lze tedy podle [6] říci, že pokud těleso více přijímá, než vyzařuje, pak se otepluje. Naopak, pokud těleso více vyzáří, než přijme, dochází k jeho ochlazování.

K problematice sdílení tepla zářením se vztahuje několik fyzikálních zákonů:

Stefanův-Boltzmanův zákon se věnuje dokonale černému tělesu. Jedná se o vztah popisující intenzitu vyzařování černého tělesa. Ta roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty

$$M = \sigma T^4. \tag{3.3}$$

V tomto vztahu je *M* intenzita vyzařování, [*M*] = $\mathrm{W.m^{-2}}$, σ je Stefanova-Boltzmanova konstanta, $\sigma = 5,67.10^{-8}\ \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$ a *T* je termodynamická teplota, [*T*] = K.

Planckův zákon ukazuje závislost spektrální intenzity záření dokonale pohlcujícího (černého) tělesa na teplotě povrchu tohoto tělesa

$$M_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1\right)}, \tag{3.4}$$

kde M_λ je spektrální intenzita záření, [M_λ] = $\mathrm{W.m^{-2}.m^{-1}}$, λ je vlnová délka záření, [λ] = m, a konstanty $C_1 = 3,73.10^{-16}\ \mathrm{W.m^2}$ a $C_2 = 1,438.10^{-2}\ \mathrm{m.K}$.

Výpočet je stanoven pro jedinou vlnovou délku. Po integraci vztahu podle vlnové délky od nuly do nekonečna dojdeme k zákonu Stefanovu-Boltzmanovu.

Kirchhoffův zákon popisuje záření šedého tělesa ve vztahu k absolutně černému tělesu:

$$M_{\check{S}} = A_{\check{S}} M_{\check{C}} = \varepsilon_{\check{S}} M_{\check{C}}, \tag{3.5}$$

tedy

$$M_{\check{S}} = \varepsilon_{\check{S}} \sigma T^4, \tag{3.6}$$

kde $M_{\check{S}}$ je intenzita vyzařování šedého tělesa, [$M_{\check{S}}$] = $\mathrm{W.m^{-2}}$, $M_{\check{C}}$ je intenzita vyzařování černého tělesa, [$M_{\check{C}}$] = $\mathrm{W.m^{-2}}$, $A_{\check{S}}$ je poměrná pohltivost a $\varepsilon_{\check{S}}$ emisivita.

Tedy absolutně černé těleso má nejen největší schopnost pohlcovat záření, ale taky jej vyzařovat [2]. To proto, že čím větší je pohltivost tělesa, tím je také větší jeho zářivost, jelikož emisivita je rovna poměrné pohltivosti.

Hodnota emisivity se pohybuje mezi hodnotami 0 a 1. Nízký emisní součinitel mají u pevných těles zrcadlově leštěné povrchy některých kovů a slitin (hliník, měď, bronz), nejvyšší hodnotu drsné povrchy (dřevo, omítka), ale třeba také sklo. Kapaliny mívají velký emisní součinitel, u plynů je větší vyzařovací schopnost jen u silnějších vrstev tří a víceatomových plynů. Výpočet intenzity zářením stěn pecí se vypočítá dle [4]

$$M = \varepsilon_{\check{S}} \sigma (T^4 - T_0^4), \tag{3.7}$$

kde T je teplota horkého povrchu, [T] = K, a T_0 je teplota okolního prostoru, [T_0] = K.

Rovnici (3.7) lze užít pro výpočet ztrát zářením stěn pecí.

4 ELEKTRICKÝ OHŘEV A ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ

Za elektrický ohřev se považuje děj, během kterého se z elektrické energie získává teplo užívané k ohřívání. Z výhod elektrického ohřevu lze vybrat především malé investiční náklady do zřízení i do údržby (oproti například naftě či plynu), malé rozměry takových zařízení, snadnou možnost regulace například přepínáním a nepřítomnost nebezpečných látek nebo ohně. Nevýhodou je především cena elektrické energie s tím, že má tendenci se spíše zvyšovat.

Tepelná zařízení dělíme podle toho, jakým způsobem v nich lze teplo vytvářet. Metod vytváření tepla existuje vícero s různými výhodami či nevýhodami. Další text bude zaměřen na odporová tepelná zařízení.

4.1 Odporová tepelná zařízení

Elektrony vykonávají v látce neuspořádaný tepelný pohyb, jehož rychlost je ve srovnání s usměrněným pohybem značná. Pomalejší usměrněný pohyb vzniká přiložením opačných polarit na vodivé těleso. Výsledný směr elektronů je kombinací pohybu neuspořádaného a usměrněného. Kovy mají veliké množství elektronů a právě počet volných elektronů je u kovů rozhodující v kvalitě jejich vodivosti. Také jejich pohyblivost a střední volná dráha hrají zásadní roli.

Do pevně usazených iontů v mřížce kovu narážejí usměrněné elektrony putující ke kladné polaritě. Mřížka klade elektronům a tedy elektrickému proudu odpor. Se vzrůstající teplotou se kmity mřížky zvětšují, zvyšuje se díky tomu i pravděpodobnost srážky s usměrněnými elektrony. Tedy se vzrůstající teplotou rezistivita kovu roste a roste i odpor daného konkrétního vodiče.

Vztah mezi rezistivitou, která je materiálovou vlastností, a rezistancí (odporem) je přímo úměrný

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{4.1}$$

kde *R* je odpor, [*R*] = Ω, ρ je rezistivita, [ρ] = $\Omega.\mathrm{mm}^2.\mathrm{m}^{-1}$, *l* je délka tělesa, [*l*] = m, a *S* je průřez tělesa, [*S*] = mm^2.

Odpor je závislý na teplotě a platí pro něj vztah, který je ve zjednodušené podobě lineární závislostí na teplotě

$$R_{T2} = R_{T1}(1 + \alpha \Delta T), \tag{4.2}$$

kde R_{T1} je odpor při teplotě T_1, [R_{T1}] = Ω, R_{T2} je odpor při teplotě T_2, [R_{T2}] = Ω, α je teplotní součinitel odporu, [α] = K^{-1}, a ΔT je rozdíl teplot T_1 a T_2, [ΔT] = K.

Vznik tepla u odporového ohřevu je založen na základním poznatku, že průchodem proudu materiálem o nenulové rezistivitě vzniká v tomto materiálu teplo. Toto tzv. Jouleovo teplo

je závislé na odporu tělesa daného materiálu, druhé mocnině proudu a času

$$Q = Pt = RI^2t, \tag{4.3}$$

kde Q je Jouleovo teplo, [Q] = J, P je výkon, [P] = W, I je procházející proud, [I] = A, a t čas, kdy prochází proud, [t] = s.

Odporový ohřev lze rozdělit na dva základní typy: odporový ohřev přímý a odporový ohřev nepřímý.

U **přímého odporového ohřevu** vzniká teplo přímým průchodem proudu vsázkou, která je ohřívaným materiálem. Zařízení můžeme rozdělit na dvě skupiny jako v [16], a to na zařízení pro ohřev pevné vsázky (například dráty, tyče, pásy apod.) a zařízení pro ohřev tekuté vsázky (například sklo, solná lázeň, voda apod.).

Fyzikální vlastnosti vsázky mají na teplotě nelineární závislost, totéž platí u elektrolytu.

Mezi užití přímého odporového ohřevu patří například ohřevy tyčí, výroba karbidu křemíku, tavení solí či ohřev skla. Blíže se lze s těmito procesy seznámit například v [3] a [13].

U **nepřímého odporového ohřevu** vzniká teplo v topných článcích, ze kterých se předává zářením, prouděním atmosféry, případně vedením.

Nepřímý odporový ohřev je druhem ohřevu, který je užíván v odporových pecích, jež jsou předmětem tepelného výpočtu v následujících kapitolách.

Odporové pece jsou zařízení, užívající se především k tepelnému zpracování kovů. Zvyšuje se hranice pevnosti a namáhání, tvar předmětu je zachován. Někdy se používá i chemický vliv prostředí při tzv. chemicko-tepelném zpracování. Mezi procesy, které probíhají v odporových pecích, patří například [7], [14] žíhání, kalení, popouštění, cementování, nitridování a zušlechťování.

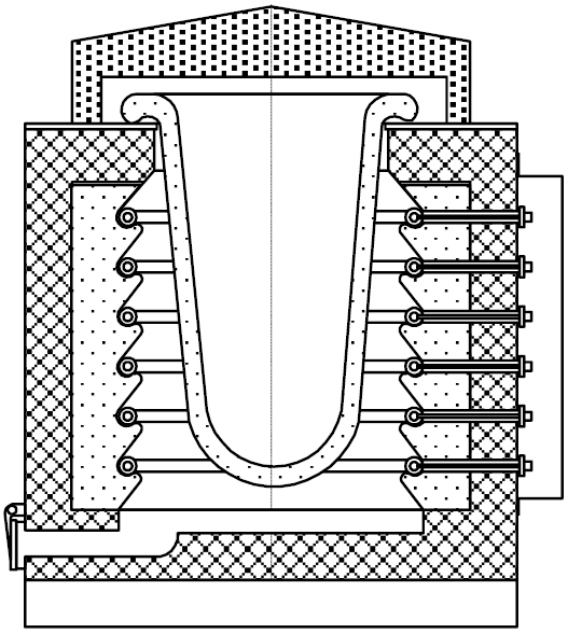
Existuje mnoho druhů odporových pecí, konstrukce a účel pecí se přitom může značně lišit. Základní rozdělení těchto pecí je na dvě skupiny podle vsázky a jejího pohybu, či naopak stability. Tzv. stacionární ohřevy mají nepohyblivý ohřívaný materiál a přerušovaný provoz, nestacionární ohřevy se vsázkou procházející pecí mívají pohyblivé dno a provoz je nepřerušovaný. Pece se stabilní vsázkou jsou například pec komorová, elevátorová, poklopová a kelímková, která je tématem této práce. Mezi pece s nestacionárním ohřevem se řadí například pec pásovou, narážecí a střádací [14].

Topné články v odporových pecích bývají z materiálů, které musejí splňovat jisté vlastnosti [10], [16]: velkou rezistivitu a odolnost proti žáru při pracovní teplotě, případně odolnost vůči vlivům atmosfér. Důležitý je také dostatečně malý součinitel teplotní roztažnosti a velká mechanická pevnost. Materiály topných článků můžeme rozdělit na materiály pro kovové topné články a materiály pro články nekovové. Podrobněji se o materiálech topných článků píše například v [6].

4.2 Kelímková odporová pec

Kelímková odporová pec, o které pojednává tato práce, patří mezi pece se stabilní vsázkou. Jak již název tohoto zařízení napovídá, uprostřed pece se nachází zpravidla keramický, také však kovový kelímek, kolem kterého je položeno topné vinutí. Řez kelímkovou pecí je zobrazen na obrázku 4.1 [3].

Kelímek, jenž se opírá o zbytek konstrukce pece pouze o límec, který tvoří jeho horní část, je přibližně válcového tvaru. Vnější plášť, tepelně izolační i žáruvzdorná vyzdívka jsou rovněž válcové. Ve výpočtech v této práci se bude tvar zjednodušovat na skutečný válec a užívat střední průměr kelímku.



Obrázek 4.1: Průřez kelímkovou odporovou pecí [3]

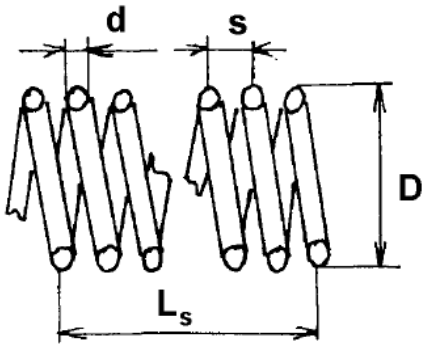
Topným článkem bývá zpravidla drát kruhového průřezu. Ten je zakroucen do tvaru spirály, kterou ukazuje v řezu i s ve výpočtu užívanými veličinami obrázek 4.2 [3]. Těchto spirál je více a bývají umístěny na nosnících po obvodu vnitřní strany pece okolo kelímku. Nosníky jsou umístěny nad sebou v daných vzdálenostech, počátky a konce spirál v nich položených jsou vyvedeny na vnější stěnu pro připojení přívodních kabelů [13].

Vyzdívka musí být dostatečně žáruvzdorná, nesmí být narušována při provozu a jeho změnách, které ústí ve změny teploty, které mají vliv na materiál vyzdívky. Proto je potřeba velká rezistivita pro izolaci topných článků a malou tepelnou vodivost, aby nedocházelo k tepelným ztrátám. Ke spojování kusů vyzdívky se používá žáruvzdorná malta, užívá se i žáruvzdorný beton.

V odporových pecích se používají především šamotové díly, které mají 38 % – 44 % oxidu hlinitého Al_2O_3 a zbylou částí je oxid křemičitý SiO_2. Pracovní teplota šamotových dílů je dle [6] 1300 – 1400 °C, jsou však žáruvzdorné do 1730 °C.

Z důvodu veliké tepelné vodivosti je potřeba více vrstev vyzdívky (až tři), vnější vrstva se užívá k tepelné izolaci od okolí. Izolace tepla je zajištěna například skleněnou vatou, azbestem, struskou, magnezitem či oxidem hlinitým.

Vnější část pece tvoří plášť, bývá z oceli či ocelolitiny. Pro teploty 700 – 750 °C se užívá chromová ocel s chromem mezi 13 % až 15 %, přidáme-li chrom až do 30 % obsahu, lze použít takovou ocel až do 1150 °C [6].



Obrázek 4.2: Topná spirála [3]

Velmi zjednodušeně pracuje kelímková odporová pec tak, že do kelímku se dá vsázka, která je zpravidla granulovaná. Teplo z topných článků přejde do kelímku, přes kelímek se přenese do vsázky a dojde k jejímu roztavení a dosažení požadované teploty.

S pecí je možno zpravidla manipulovat na jednu či více stran a vylévat tak z kelímku roztavenou vsázku. Tou bývá dle [14] zpravidla kov či slitiny kovu s nižším bodem tání (Sn, Pb, Al, ...). Tyto pece se užívají s oblibou pro [13] pokovování výrobků, například zinkování, cínování.

5 TEPELNÝ VÝPOČET PECÍ

Tato kapitola obsahuje teorii o tepelných výpočtech odporových zařízení. Počítá se především teplo potřebné na ohřání vsázky, potřebný příkon pece, rozměry topných článků nebo například doba potřebná k roztavení nově vložené vsázky.

Text této kapitoly se tedy bude zabývat odporovými tepelnými zařízeními a v následující kapitole poté konkrétně kelímkovými pecemi tohoto typu.

5.1 Základy návrhu odporových pecí

Aby šlo určit, jaký typ pece je nejvhodnější pro zvolenou aplikaci, je potřeba vzít v úvahu především několik základních aspektů, které při výběru pece k danému účelu určené omezují, případně určují její možnosti [7]:

1. materiál vsázky a její objem,
2. prostorové požadavky pece,
3. technologické požadavky, jak má být vsázka zpracována,
4. maximální teplotu, které má být dosaženo, přesnost dosažené teploty,
5. druh atmosféry v peci,
6. přerušovanost či nepřerušovanost plánovaného provozu,
7. cenu pece atd.

V praxi zpravidla není situace tak jednoduchá, že by po prvním výpočtu následovala konstrukce pece. Nejdříve se vypočtou základní parametry odporové pece, po konstrukčním návrhu pece se provádějí kontrolní výpočty a vytváří se přesnější návrh, který vzápětí následuje další kontrolní výpočet všech parametrů.

Jako u návrhů mnohých zařízení, i zde se bilancuje mezi technickou kvalitou a ekonomickými možnostmi. Například ztráty pece jsou přirozeně negativním jevem, na druhou stranu kvalitní materiál a silnější vrstvy stěn pece budou dražší. Je potřeba dle požadované teploty pece zvážit vhodné tloušťky i materiál vrstev.

Při tepelném výpočtu pece je potřeba zjistit především její příkon, parametry tepelných článků, dobu náběhu a další potřebné údaje. Základní výpočty a jejich popis a principy u odporových pecí popisují následující podkapitoly.

5.2 Příkon pece

Tepelné ztráty vznikají různými způsoby, kvalitnější pece mají tepelné ztráty menší, méně kvalitní pece pak větší. Uniká skrze samotné zdi pece, zde záleží především na materiálu, tloušťce a izolaci. Při otevírání a zavírání dveří a netěsnostmi u zavřených dveří také odchází nezanedbatelné množství tepla. U průběžných pecí se ztrácí veliké množství tepla na vstupu a výstupu otvory, a navíc ještě pásy či dalšími mechanismy.

Příkon pece se stanovuje z množství vsázky, kterou je třeba za jistou dobu ohřát na potřebnou teplotu. Počítá se s tím, že pec je již rozehřáta na potřebnou teplotu vsázky před jejím umístěním do pece [6].

Příkon pece lze vypočítat podle vztahu

$$P = K\frac{Q}{t}, \tag{5.1}$$

kde *P* je příkon, [*P*] = W, *K* je součinitel bezpečnosti, *Q* potřebné teplo na ohřev, [*Q*] = J a *t* čas potřebný k ohřevu, [*t*] = s.

Součinitel bezpečnosti *K* se volí zpravidla mezi 1,1 až 1,5 [3], někdy se uvádí mezi 1,2 až 1,7 [16]. To znamená, že potřebný výkon vypočítaný z tepla a času ještě se navýší z různých bezpečnostních důvodů až o 70 %. Těmito důvody mohou být zhoršení tepelné izolace či snížení napětí během provozu.

U odporových pecí nad 10 kW se užívá zpravidla vždy trojfázové napětí [6], je tedy třeba vypočtený příkon dělit třemi pro zatížení každé fáze.

Teplo potřebné k výpočtu se skládá ze tří částí. Potřebujeme teplo na ohřátí vsázky z původní teploty na teplotu tání:

$$Q_1 = m_{vs}c_p(T_t - T_0), \tag{5.2}$$

kde Q_1 je teplo potřebné na ohřev vsázky na teplotu tavení, [Q_1] = J, m_{vs} je hmotnost vsázky, [m_{vs}] = kg, c_p je měrná tepelná kapacita pevné vsázky, [c_p] = $\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$, T_0 je počáteční teplota vsázky, [T_0] = K, a T_t je teplota tání vsázky, [T_t] = K.

U vsázky musí dojít k jejímu roztavení (na teplotě tání), tedy změně skupenství. Teplo k tomu potřebné vypočítáme podle

$$Q_2 = m_{vs}c_s, \tag{5.3}$$

kde Q_2 je teplo potřebné k roztavení vsázky, [Q_2] = J a c_s je měrné skupenské teplo vsázky, [c_s] = $\mathrm{J.kg^{-1}}$

Roztavenou vsázku dále zahříváme na požadovanou teplotu. Teplo k tomu potřebné získáme výpočtem z

$$Q_3 = m_{vs}c_k(T_p - T_t), \tag{5.4}$$

kde Q_3 teplo potřebné na ohřev vsázky na výslednou teplotu, [Q_3] = J, c_k je měrná tepelná kapacita kapalné vsázky, [c_k] = $\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$ a T_p je požadovaná teplota vsázky, [T_p] = K.

Po sečtení těchto dvou dílčích tepel je potřeba ještě započítat celkové tepelné ztráty. Obdržíme proto ve výsledku

$$Q = m_{vs}c_p(T_t - T_0) + m_{vs}c_s + m_{vs}c_k(T_p - T_t) + Q_z. \tag{5.5}$$

Zbývající údaj k výpočtu příkonu odporové pece je čas potřebný k ohřevu. Někdy je zadán, často se ale jedná o neznámou.

5.3 Topné články

Topné články předávají svému okolí v peci teplo všemi třemi způsoby: vedením, prouděním atmosféry v peci a především sáláním. Jelikož je jejich účelem předávat teplo, činí je to nejteplejší součástí pece. U této důležité části odporové pece jsou nesmírně důležité její rozměry, které mají zásadní vliv na množství tepla předávaného do pece. Proto je výpočet rozměrů topných článků podstatnou součástí tepelného výpočtu odporové pece.

5.3.1 Výpočet základních rozměrů a hmotnosti topných článků

Jedním z nejdůležitějších parametrů topného článku je dovolené povrchové zatížení, což je vlastně maximální výkon, který vychází z jednotkového povrchu článku [3]. Můžeme ho také definovat jako poměr příkonu do jednoho článku děleného povrchem tohoto topného článku [6].

Dovolené povrchové zatížení lze zjistit z tabulek k tomu určených, případně lze i vypočítat. Podrobněji se problematikou dovoleného povrchového zatížení zabývá následující kapitola.

Topné články mají své základní rozměry: průřez a délku. U průřezu se rozlišuje mezi průřezem kruhovým a průřezem obdélníkovým, volí se tedy vzorce, které využívají typ článku, který se bude v peci používat.

Při odvození vztahu k výpočtu průřezu a délky pro oba typy průřezů se vychází z výpočtu příkonu celého článku, ve kterém se využije dovolené povrchové zatížení a plocha topného článku. Odvození se začíná pro oba průřezy a v dalších částech se přechází ke konkrétním typům průřezu. Příkon celého článku se vypočítá podle

$$P_{tč} = olp_z, \tag{5.6}$$

kde $P_{tč}$ je příkon topného článku, [$P_{tč}$] = W, o je obvod průřezu topného článku, [o] = m, l je délka topného článku, [l] = m a p_z je dovolené povrchové zatížení, [p_z] = $\mathrm{W.m^{-2}}$.

Do známého vzorce pro příkon

$$P_{tč} = \frac{U^2}{R} = RI^2 \tag{5.7}$$

se dosadí odpor ze vztahu mezi rezistivitou a rezistancí (4.1) a obdržíme nový vztah

$$P_{tč} = S\frac{U^2}{\varrho l}, \tag{5.8}$$

kde *S* je průřez článku, [*S*] = m^2, *U* je napětí na topném článku, [*U*] = V a ϱ je rezistivita materiálu topného článku, [ϱ] = $\Omega.\mathrm{m}^2.\mathrm{m}^{-1}$.

Vztahy (5.6) a (5.8), vztahy pro obsahy a obvody kruhu i obdélníka slouží k odvození následujících vztahů (5.9) až (5.13), podrobný postup lze nalézt například v [14].

U **kruhového průřezu** lze průměr spočítat dle

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_{tč}^2\varrho}{\pi^2 p_z U^2}}. \tag{5.9}$$

U **obdélníkového průřezu** při označení strany *a* a *b* a využití vztahu pro poměr *m* mezi oběma stranami *m=b/a* se vypočítá jednu ze stran obdélníka

$$a = \sqrt[3]{\frac{P_{tč}^2\varrho}{2m(m+1)p_z U^2}}. \tag{5.10}$$

Poměr *m* se nazývá součinitel štíhlosti a vždy platí, že *m* > 1. Pro druhou stranu *b* platí jednoduchý vztah

$$b = ma. \tag{5.11}$$

Dalším parametrem kromě průřezu je **délka topného článku**. Zde lze použít vztahy

$$l = \frac{P_{tč}}{\pi d p_z}, \tag{5.12}$$

$$l = \frac{P_{tč}}{2(a+b)p_z}. \tag{5.13}$$

První výraz slouží k výpočtu délky topného článku s kruhovým průřezem, druhý lze použít pro topné články s průřezem obdélníkovým.

Důležitým parametrem topného článku je také jeho **hmotnost**, kterou lze spočítat podle vzorce [6]

$$m_{tč} = \varrho_h l S. \tag{5.14}$$

Zde ϱ_h je hustota materiálu topného článku, [ϱ_h] = $\mathrm{kg}.\mathrm{m}^{-3}$.

5.3.2 Dovolené povrchové zatížení

Volba dovoleného povrchového zatížení má zásadní vliv na výsledky výpočtu. Zvolení jeho velikosti není ale tak jednoduché, jak se z předchozí kapitoly může zdát. Je proto důležité se na tuto proměnnou podívat blíže.

Velikost dovoleného povrchového zatížení lze nalézt v tabulkách. U spirál záleží na tvaru jejich vinutí [3], rovné dráty mají větší dovolené povrchové zatížení než dráty vinuté do spirály.

Po výpočtu rozměrů topného článku se musí zvolit nejbližší vyšší z řady normalizovaných průměrů či rozměrů obdélníka. V důsledku toho je dobré s novým rozměrem zpětně provést kontrolu dovoleného povrchového zatížení. Dovolené povrchové zatížení lze vyjádřit z obecné rovnice

$$p_z = \frac{P}{S}. \tag{5.15}$$

Pro kruhový a obdélníkový průřez po dosazení povrchu daného typu článku získáme vztahy

$$p_z = \frac{P}{\pi d l}, \tag{5.16}$$

$$p_z = \frac{P}{2(a+b)l}. \tag{5.17}$$

Pokud se zjišťuje dovolené povrchové zatížení z tabulek, je nutno takový údaj upravit. K tomu slouží součinitel ψ [6], který se získává na základě měření, je vždy menší než 1 a upravuje tedy dovolené povrchové zatížení na menší hodnotu. Tím se zohlední, že vyzařování není do všech stran. Topné články jsou umístěny zpravidla ve žlábcích bočních stěn, drážkách v horní části pece nebo na dně pece. Odlišné součinitele vyjadřují odlišná umístění. Menším součinitelem ψ se zvětší délka článku, prodlouží se tím však i jeho životnost.

Rozdíly mezi volbou dovoleného povrchového zatížení z tabulky či jeho získání výpočtem a jejich vliv na výsledek budou předmětem kapitoly o výpočtu kelímkové pece.

6 TEPELNÝ VÝPOČET ODPOROVÉ KELÍMKOVÉ PECE

U tepelného výpočtu odporové kelímkové pece se užívají obecné vztahy a postupy z předchozí kapitoly upravené pro tento typ pece. Bude se vycházet z teoretických předpokladů předchozí kapitoly tak, aby odpovídaly konstrukci odporové kelímkové pece, rovněž budou použity i postupy z [1] a [3]. Také přibudou nové vztahy, vzorce a souvislosti, nutné k dostatečně přesnému výpočtu.

Tepelný výpočet může mít více různých podob. Modelový příklad probíraný v této práci je pouze jedním způsobem. Za vstupní hodnoty zde budou považovány hmotnost vsázky, průměr pece, teploty vsázky počáteční a konečná a doba tavení vsázky. Výsledky jsou teplo potřebné na proběhnutí zadaného procesu a příkon, který je zapotřebí, dále parametry odporového článku včetně dovoleného povrchového zatížení a počet nosníkových žlabů potřebných v peci.

Při řešení návrhu konkrétní pece a jejích technických požadavků je však potřeba některé části výpočtu zjednodušit, aby výpočty nebyly příliš složité a obsáhlé. Budou proto uvažována některá zjednodušení konstrukční, například se bude uvažovat kelímek s rozměry rotačního válce nebo se výška kelímku bude ve výpočtech pro zjednodušení rovnat výšce vsázky. Bude se také počítat s ideálními podmínkami běhu pece. Protože by se však výsledky výpočtu mohly reálným vzdalovat nezanedbatelným způsobem, jsou ve výpočtu níže užívány konstanty a koeficienty, které matematické zjednodušení vyrovnávají.

6.1 Veličiny a vlastnosti kelímkové pece a vsázky užité v tepelném výpočtu

V tepelném výpočtu odporové kelímkové pece je třeba pracovat s veličinami a vlastnostmi, které charakterizují strukturu pece a jejích částí, vlastnosti vsázky nebo fyzikální procesy probíhající v peci. Lze je rozdělit do několika skupin podle jejich účelu ve výpočtu.

Zadané hodnoty pro tepelný výpočet jsou vstupními údaji výpočtu, ze kterých se zjišťují hodnoty výsledné.

K výpočtu jsou zadány následující hodnoty:

1. hmotnost m_{vs} vsázky vložené do kelímku pece,
2. střední průměr kelímku pece d_{sk},
3. požadovanou konečnou teplotu vsázky t_p či T_p,
4. teplotu okolí a tedy také počáteční teplotu vsázky t_0 či T_0,
5. tobu tavení vsázky t_{tav}.

Tyto hodnoty tvoří základ tepelného výpočtu, při jejich změně dochází již tedy k odlišnému příkladu výpočtu.

Pevně zvolené vlastnosti kelímkové pece či vsázky slouží jako konstanty u tepelného výpočtu odporové kelímkové pece a bývají použity pro různé příklady – různé zadané hodnoty. Jsou jimi

1. materiál vsázky: hliník, hustota $\rho_{Al} = 2700\ \mathrm{kg.m^{-3}}$,
2. tloušťka kelímku, $s_k = 20$ mm,
3. tepelná vodivost materiálu kelímku, $\lambda_k = 46,4\ \mathrm{W.m^{-1}K^{-1}}$,
4. materiál spirály: KANTHAL A, rezistivita při 20 °C: $\rho_{20} = 1,39\ \Omega.\mathrm{mm^2.m^{-1}}$,
5. napětí je třífázové, 400 V sdružené, zapojení napájení topných článků je do trojúhelníka,
6. vzdálenost středu spirály od vnější stěny kelímku $s_{stř}$.

Vypočtenými hodnotami, které jsou výstupem tepelného výpočtu, jsou:

1. užitečné teplo Q_u potřebné pro zpracování zadané vsázky,
2. potřebný příkon P odporové kelímkové pece a práce W potřebná na roztavení jedné vsázky,
3. průměr d_{zv} drátu topné spirály, průměr spirály D a její stoupání s,
4. délka topného vodiče při trojfázovém napájení l_{3f} a délka připadající na jednu fázi l_{1f}
5. hmotnost topné spirály m_{ts},
6. počet žlabů pece pro umístění topné spirály $n_{1žn}$.

Volené parametry výpočtu jsou některé koeficienty či postupy, které v průběhu tepelného výpočtu mění větší či menší měrou hodnoty dílčích výsledků i navazujících hodnot, které jsou očekávány jako výstup výpočtu.

Za volené parametry jsou v této práci vybrány:

1. součinitel plnění při výpočtu objemu vsázky,
2. tepelné ztráty při výpočtu užitečného tepla,
3. součinitel bezpečnosti pro výpočet potřebného příkonu,
4. tvar stěny užitý ve vztahu pro výpočet teplotního spádu ve stěně kelímkové pece – buď válcová, odpovídající tvaru kelímku, či stěna rovinná,

5. způsob výpočtu délky topné spirály,

6. dovolené povrchové zatížení zvolené, či odečtené z tabulek dle zvoleného průměru,

7. stoupání topné spirály,

8. velikost vnějšího průměru spirály.

Obsahem dalšího textu bude tedy popsat vztahy a postupy k výpočtu potřebných vlastností odporové kelímkové pece, případně fyzikálních veličin při procesu jejího fungování. Druhá část bude věnována i tomu, jak volba parametrů odporové pece nebo postupů při výpočtu ovlivní výsledné hodnoty tepelného výpočtu, a srovnání, která metoda je vhodnější, nebo naopak méně vhodná.

V následujících podkapitolách budou postupně popsány jednotlivé části tepelného výpočtu.

6.2 Výpočet přestupové plochy

Přestupová nebo také užitečná plocha je plochou kelímku, kterou prochází teplo do vsázky. Je velmi důležitým údajem, potřebným k dalším výpočtům v následujících kapitolách. Vzhledem k tomu, že zpravidla známe údaje k jejímu výpočtu, jako je hmotnost nebo materiál, je vhodné spočítat ji na počátku.

V první řadě je k výpočtu potřeba znát hmotnost užité vsázky daného materiálu, poté lze ve výpočtu potřebný objem válce vytvořeného vsázkou vypočítat pomocí hmotnosti a hustoty vsázky dle základního fyzikálního zákona

$$V_{vs} = k\frac{m_{vs}}{\varrho_h}, \tag{6.1}$$

kde *k* je součinitel plnění. Například hodnota 1,4 znamená, že se objem navýší o 40 %. Součinitel plnění se užívá především z důvodu teplotní roztažnosti materiálu a zohledňuje i granulovanost vsázky [2].

Vsázka v kelímku vytvoří tvar válce, jehož výšku je třeba dále spočítat. Tuto výšku lze získat ze vzorce pro válec

$$h_{vs} = \frac{4V_{vs}}{\pi d_{sk}^2}, \tag{6.2}$$

kde d_{sk} je vnitřní průměr kelímku, $[d_{sk}]$ = m. Vypočítanou výšku lze již využít pro výpočet plochy. Povrch vsázky je tedy možno vypočítat podle vzorce pro povrch válce

$$S_{vs} = h_{vs}\pi d_{sk}^2. \tag{6.3}$$

Samotný kelímek bude však ozařován na plochu

$$S_k = h_{vs}[\pi(d_{sk} + 2s_k)]. \tag{6.4}$$

Zde se k výpočtu užívá poprvé i tloušťka stěny kelímku, $[s_k]$ = m. Tím je tato základní část výpočtu skončena. Byla vypočtena přestupová plocha, která je vlastně plochou povrchu ozařovaného spirálou pece.

6.3 Výpočet potřebného dodávaného tepla a teploty odporového materiálu

Důležitou otázkou je, kolik tepla je vlastně potřeba na roztavení vsázky. Výpočet tohoto tepla se dělí na tři části, jak je podrobně popsáno v kapitole 5.2.

Při tepelném výpočtu odporové kelímkové pece dojde k malému zjednodušení: bude se předpokládat, že měrná tepelná kapacita nezávisí na teplotě ani na změně skupenství, tedy měrná tepelná kapacita pevné vsázky se rovná měrné tepelné kapacitě vsázky kapalné, $c_p = c_k$.

Za tohoto předpokladu jde vyjádřit teplo potřebné k zahřátí vsázky z počáteční teploty na teplotu požadovanou jako

$$Q_t = m_{vs} c (T_p - T_0) + m_{vs} c_s, \tag{6.5}$$

kde *c* je měrná tepelná kapacita vsázky, $[c]$ = $\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$.

Nesmí se však zapomenout na tepelné ztráty, ke kterým během provozu pece dochází a při nichž teplo uniká všemi směry, tedy víkem, dnem i stěnami. Tyto ztráty nejsou v žádném případě zanedbatelné a při výpočtech kelímkové pece se uvažují 15 % – 25 % tepla na tavení.

Výsledné tzv. užitečné teplo potřebné pro dané zpracování vsázky tedy se získá jako

$$Q_u = Q_t + Q_z. \tag{6.6}$$

Kelímek je ozařován topnými spirálami pece, ohříván a teplo z něj se dostává do vsázky za pomoci vlnění. Přenos tepla vlněním je vyjádřen pomocí Fourierova zákona (3.1). Kelímek je v této práci zjednodušen, jak psáno výše, na rotační válec. K vedení tepla skrze válcovou stěnu je tedy možné užít vztah

$$Q_u = \frac{2\pi h_{vs} \lambda_k \Delta T_k}{ln \frac{d_{sk}+2s_k}{d_{sk}}} t_{vs}, \tag{6.7}$$

kde ΔT_k je teplotní spád, $[\Delta T_k]$ = K, t_{vs} je doba ohřívání vsázky, $[t_{vs}]$ = s a λ_k tepelná vodivost materiálu kelímku, $[\lambda_k]$ = $\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$.

Pokud si z rovnice (6.7) vyjádříme teplotní spád ΔT_k, dostaneme vztah

$$\Delta T_k = \frac{Q_u}{2\pi h_{vs} \lambda_k t_{vs}} ln \frac{d_{sk} + 2s_k}{d_{sk}}. \tag{6.8}$$

Válcovou stěnu kelímku lze však nahradit ve výpočtech stěnou rovinnou. V takovém případě můžeme užít jednoduššího vztahu

$$Q_u = S_k \frac{\lambda_k}{s_k} \Delta T_k t_{vs}. \tag{6.9}$$

Ve vzorci je použita přestupová plocha kelímku dle (6.4), $[S_k] = \mathrm{m}^2$.

Vztah pro výpočet teplotního spádu je také značně jednodušší:

$$\Delta T_k = \frac{Q_u}{\lambda_k t_{vs} S_k} s_k. \tag{6.10}$$

Vnější teplotu stěny kelímku lze poté v obou případech vyjádřit vztahem

$$T_k = T_{vs} + \Delta T_k, \tag{6.11}$$

kde T_{vs} je teplota vsázky.

Zatímco kelímek předává vsázce potřebné teplo vlněním, do kelímku je předáváno teplo především sáláním z topných spirál kelímkové odporové pece. Vztah pro teplo předávané sáláním z odporových spirál se určí ze vztahu [3]

$$Q_u = c_{celk} \left[\left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right] S_k t_{vs}. \tag{6.12}$$

V tomto vztahu je T_{sp} teplota odporových topných spirál, $[T_{sp}]$ = K, c_{celk} je součinitel vyzařování, $[c_{celk}] = \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$, přičemž součinitel vyzařování vyjádříme jako

$$c_{celk} = \left(\frac{1}{c_{sp}} + \frac{1}{c_k} - \frac{1}{c_B} \right)^{-1}. \tag{6.13}$$

Ve vztahu pro součinitel vyzařování jsou užity materiálové konstanty: součinitel vyzařování spirály c_{sp}, $[c_{sp}] = \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$, součinitel vyzařování kelímku c_k, $[c_k] = \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$, součinitel vyzařování absolutně černého tělesa c_B, $[c_B] = \mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$.

Teplotu odporových spirál lze získat ze vztahu (6.12) jako

$$T_{sp} = 100 \sqrt[4]{\frac{Q_u}{c_{celk} S_k t_{vs}} + \left(\frac{T_k}{100} \right)^4}. \tag{6.14}$$

6.4 Výpočet příkonu odporové kelímkové pece

Pomocí získané hodnoty potřebného tepla na ohřev lze přikročit k výpočtu potřebného příkonu. Ten se vypočítá podle (5.1)

$$P_u = \frac{Q_u}{t_{tav}}. \tag{6.15}$$

Po započítání výkonové rezervy vynásobením součinitelem bezpečnosti se vyjádří potřebný příkon

$$P = KP_u. \tag{6.16}$$

Zde *K* jako součinitel bezpečnosti může mít například hodnotu 1,08, předpokládá se tedy v takovém případě rezerva 8 %.

Další možností získání potřebného příkonu by bylo vypočítat ztráty dnem a pláštěm válce kelímku a ty přičíst k příkonu potřebnému pouze ohřátí a roztavení vsázky. V této práci však bude použit postup uvedený výše. Spotřeba elektrické energie na jednu vsázku je

$$W = Pt_{tav}. \tag{6.17}$$

6.5 Návrh vodiče topné spirály, nosníkové žlaby, dovolené povrchové zatížení

U odporové kelímkové pece se bude v této práci uvažovat vodič topné spirály s kruhovým průřezem, tedy podle vztahu (5.9) je možné vypočítat průměr vodiče spirály

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P_{1f}^2 \varrho_{sp}}{\pi^2 p_z U^2}}. \tag{6.18}$$

P_{1f} je zde příkon na jedné fázi třífázové pece a *U* je napětí při zapojení do trojúhelníku, jedná se o sdruženou hodnotu napětí.

Tento vypočtený průměr však nelze použít, jelikož je potřeba se řídit skutečně vyráběnými průměry, které nabízejí výrobci. Zvolí se tedy vyšší průměr, než vyšel výpočtem, označený jako d_{zv}.

Do obecného vzorce pro délku topného článku (5.12) se dosadí za průřez obsah kruhu a výsledkem je výraz pro délku topného článku jedné fáze

$$l_{1f} = \frac{\pi U^2 d_{zv}^2}{4P_{1f}\varrho_{sp}}. \tag{6.19}$$

Délka topného článku jedné fáze lze též vypočítat ze vztahu

$$l_{1f} = \sqrt[3]{\frac{U^2 P_{1f}}{4\pi \varrho_{sp} p_z^2}}, \tag{6.20}$$

kde délka nezávisí na zvoleném průměru článku. K výpočtu délky článku lze použít i rovnici

$$l_{1f} = \frac{P_{1f}}{\pi d_{zv} p_z} \tag{6.21}$$

s tím, že všechny získané hodnoty ze vzorců (6.19), (6.20) a (6.21) se mírně odlišují.

Jelikož je však u pece v této práci užíván trojfázový systém, je potřeba mít délku topného vodiče trojnásobnou

$$l_{3f} = 3l_{1f}. \tag{6.22}$$

Z obecného vzorce pro hmotnost (5.14) lze získat po dosazení vzorce pro kruhový průřez vztah

$$m_{ts} = \varrho_h l_{3f} \pi \frac{d_{zv}^2}{4}. \tag{6.23}$$

S použitím délky l_{3f} topné spirály pro všechny tři fáze je tím vyjádřena celková hmotnost odporové spirály pece.

Dovolené povrchové zatížení lze získat dvěma základními způsoby. Buď zvolíme vyhledání v tabulkách, nebo výpočet. Při výpočtu uváděném v [11] je třeba vyjít z ideálního povrchového zatížení. Výsledek výpočtu

$$p_{z,id} = \varepsilon_{sp} C_B \left[\left(\frac{T_{sp}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_k}{100} \right)^4 \right], \tag{6.24}$$

kde ε_{sp} je součinitelem vyzařování spirály, tvoří základ pro výpočet skutečného dovoleného povrchového zatížení p_z. To musí být menší než zatížení ideální a získat lze vynásobením koeficienty zohledňujícími účinnost výměny tepla mezi článkem a vsázkou a rozmístění topných článků. Je vhodné spočítat podle (5.16) kontrolní hodnotu dovoleného povrchového zatížení pro vodič

$$p_{kontr} = \frac{P_{1f}}{\pi d_{zv} l_{1f}} < p_z. \tag{6.25}$$

Spočítané kontrolní dovolené povrchové zatížení z (6.25) přitom musí mít menší velikost než skutečné dovolené povrchové zatížení p_z.

Jak již bylo zmíněno, topné články v kelímkové peci tvoří tvar spirály, kterou je potřeba také navrhnout, jak se popisuje např. v [3]. Délka jednoho závitu spirály lze vypočítat jako

$$l_{1z} = \sqrt{s^2 + [\pi(D - d_{zv})]^2}, \tag{6.26}$$

kde l_{1z} je délka jednoho závitu spirály, [l_{1z}] = m, *s* je stoupání spirály, [*s*] = m, *D* je vnější průměr spirály, [*D*] = m, a d_{zv} průměr vodiče spirály, [d_{zv}] = m.

Máme-li drát s průměrem menším než 1 mm, volí se *D* mezi (5 až 7) x d_{zv}. Podobně *s* se volí, a to mezi (2 až 2,5) x d_{zv}. Závity tak mají vhodnou vzdálenost a nejsou příliš blízko u sebe. U úlohy v této práci se budou výše uvedené násobky průměru uvažovat vždy, tedy bez ohledu na průměr vodiče. Další metodou, která se může použít k získání velikosti vnějšího průměru spirály a stoupání spirály, je odečtení jejich hodnot z grafu.

U délky nosníkového žlabu je potřeba uvažovat rozměry pece, v této úloze se pracuje s tvarem válce, tedy lze vyjádřit

$$l_{žl} = \pi(d_{sk} + 2s_k + 2s_{stř}), \tag{6.27}$$

kde se poprvé užívá i $s_{stř}$, [$s_{stř}$] = m, což je vzdálenost středu spirály ve žlabu od kelímku. Když se nyní podělí délka nosníkového žlabu stoupáním spirály, je výsledkem počet závitů na jeden žlab

$$n_{1ž} = \frac{l_{žl}}{s}. \tag{6.28}$$

Toto číslo ze zaokrouhluje podle menší změny směrem nahoru či dolů na celé číslo, počítá se totiž vždy s celými závity. Vynásobením počtu závitů na jeden žlab s délkou jednoho závitu se vyjádří délka topného článku v jednom žlabu

$$l_{dr1žl} = n_{1ž} l_{1z}. \tag{6.29}$$

Počet žlabů pece, které připadají na jednu fázi, lze získat tak, že se podělí celková délka topného článku pro jednu fázi délkou drátu v jednom žlabu:

$$n_{1f} = \frac{l_{1f}}{l_{dr1žl}}. \tag{6.30}$$

I toto číslo je třeba zaokrouhlit na celé. Zaokrouhlování však má za následek změnu parametrů spirály k vytápění kelímkové pece.

Je potřeba se vrátit k předchozím výpočtům, týkajícím se výpočtu topné spirály, a přepočítat je od vztahu (6.26) dále. Shodné zůstanou celková délka vodiče jedné fáze, délka jednoho žlabu po obvodu kelímku pece, průměr vodiče i spirály a počet žlabů na jednu fázi. Nové stoupání závitů lze vypočítat podle

$$s_n = \frac{\pi(D - d_{zv})}{\sqrt{\left(\frac{1_{1f}}{n_{1f} l_{žl}}\right)^2 - 1}}. \tag{6.31}$$

Je potřeba zkontrolovat [3] některé body výpočtu – že stoupání je větší než násobek průměru spirál dle vztahu uvedeného dříve (s_n > (2 až 2,5) x d_{zv}) a přepočítat délku jednoho závitu spirály l_{1z}, počet závitů na jeden nosníkový žlab $n_{1ž}$ a délku vodiče na jeden žlab $l_{dr1žl}$. Tím je postup výpočtu nosníků v kelímkové odporové peci hotov.

7 VLIV VOLENÝCH PARAMETRŮ NA TEPELNÝ VÝPOČET KELÍMKOVÉ ODPOROVÉ PECE

Výpočty této kapitoly vycházejí z teorie uvedené v kapitole 6 a z postupu tepelného výpočtu, který je v ní popsán.

Nejdříve budou uvedeny konkrétní hodnoty zadání výpočtu, obecně popsaného v předchozí kapitole. Dále budou zmíněny i vlastnosti pece a vsázky, získané z matematicko-chemikálních tabulek, případně byly též užity hodnoty z [7] a [3].

Další podkapitoly se budou vždy věnovat jednotlivým voleným parametrům výpočtu. Zpravidla bude vždy volba parametru navržena pro hranice voleného intervalu, jsou-li k dispozici, a hodnotu přibližně ze středu tohoto intervalu. V jiných případech budou zvoleny takové hodnoty, které budou považovány za vhodné a demonstrující výrazněji změny navazujících částí tepelného výpočtu.

V přehledných tabulkách bude pro zvolené hodnoty parametrů vypsáno, které navazující veličiny tepelného výpočtu se změnily, jestli se změnily přímo či nepřímo úměrně a do jaké míry. Budou také uvedeny speciální odchylky, které mohou díky některým hodnotám parametrů nastat či další zvláštní vlivy na výpočet.

Výpočet byl proveden v tabulkovém procesoru Calc z LibreOffice, a přestože jsou číselné hodnoty v tabulkách této práce vhodně zaokrouhleny, pracuje tabulkový procesor se svojí naprogramovanou přesností a hodnoty mezivýsledků nebyly zaokrouhlovány. Výjimkou je normalizovaný průměr vodiče, počet závitů na jeden žlab, počet žlabů na jednu fázi a přepočítaná hodnota stoupání spirály.

7.1 Zadání výpočtu, vlastnosti pece a vsázky a volené parametry

Podle kapitoly 6.1 zde budou shrnuty konkrétní hodnoty zadání výpočtu a zvolených pevných vlastností pece i vsázky. Zadání tepelného výpočtu shrnuje přehledně tabulka 7.1.

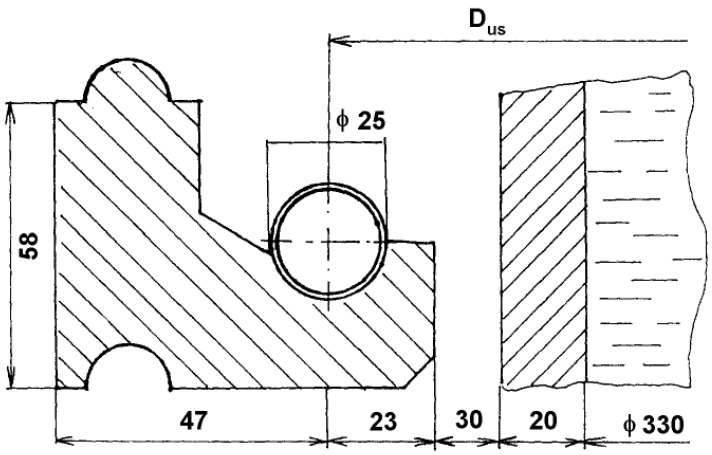
Tabulka 7.1: Zadání tepelného výpočtu

symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
m_{vs}	hmotnost vsázky	50	kg
d_{sk}	střední průměr kelímku	300	mm
t_p	požadovaná teplota vsázky	710	°C
t_0	počáteční teplota vsázky	25	°C
t_{tav}	doba tavení	1	h

Tyto hodnoty jsou neměnné a tvoří základ celého konkrétního tepelného výpočtu, zvolený pro tuto práci, v reálné situaci tedy tvoří základ konkrétního procesu probíhajícího v peci.

Pevně zvolené vlastnosti pece a vsázky jsou zpravidla hodnoty odečtené z tabulek a cha-

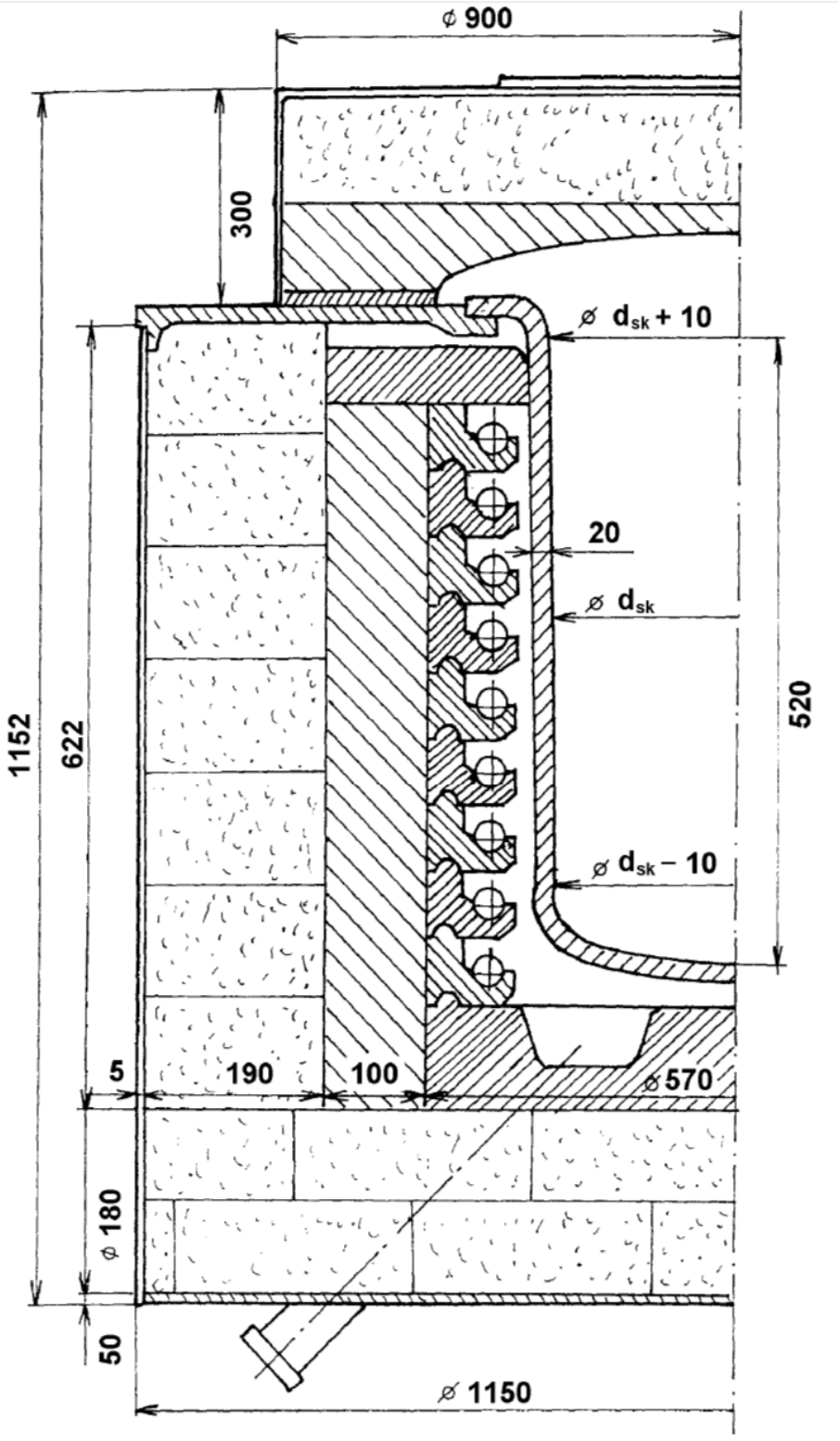
rakterizují většinou materiál či rozměr, se kterým se pracuje. Na obrázku 7.1 [3] lze názorně vidět polohu jednoho nosníku vůči vnější stěně kelímku, kde lze z pevně zvolených vlastností vidět především vzdálenost středu spirály od vnější stěny kelímku. Velkou část hodnot potřebných k výpočtu lze vyčíst z obrázku 7.2 [3]. Materiálem vsázky byl zvolen hliník. Pevně zvolené vlastnosti výpočtu jsou uvedeny v tabulce 7.2.



Obrázek 7.1: Nosník odporové kelímkové pece [3]

Tabulka 7.2: Pevně zvolené vlastnosti při výpočtu

symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
ϱ_{Al}	hustota materiálu vsázky, hliníku	2700	$\mathrm{kg.m^{-3}}$
s_k	tloušťka kelímku	20	mm
c_{Al}	měrná tepelná kapacita hliníku	895,98	$\mathrm{J.kg^{-1}K^{-1}}$
$c_{s,Al}$	skupenské teplo hliníku	386 860	$\mathrm{J.kg^{-1}}$
λ_k	tepelná vodivost kelímku	46,4	$\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$
c_{sp}	sálání spirály	3,663	$\mathrm{W.m^{-2}K^{-4}}$
c_k	sálání kelímku	5,408	$\mathrm{W.m^{-2}K^{-4}}$
ϱ_{20}	rezistivita materiálu spirály	1,39	$\Omega.\mathrm{mm^2.m^{-1}}$
U	napětí	400	V
$s_{stř}$	vzdálenost středu spirály od povrchu kelímku	53	mm



Obrázek 7.2: Zadané rozměry kelímkové odporové pece [3]

Pro výpočet užitečného tepla, příkonu, rozměrů a hmotnosti topné spirály a počtu žlabů je potřeba použít dle kapitoly 6.1 ještě řadu vlastností, které jsou v této práci brány jako volené parametry. Jejich vliv je popsán v následujících kapitolách, seřazených podle částí tepelného výpočtu, jak byl popsán v kapitolách 6.2 až 6.5.

7.2 Součinitel plnění

Součinitel plnění je prvním voleným parametrem, který se v tepelném výpočtu odporové kelímkové pece vyskytuje. Jelikož zohledňuje kromě granulovanosti vsázky i teplotní roztažnost, je závislý na materiálu vsázky. Pro hliník se udává zpravidla součinitel k = 1,4 [3], tedy rezerva 40 %. Bude srovnán výpočet se součiniteli 1,3 a 1,5, tedy s rezervami 30 % a 50 %.

Při výpočtech teplot a v důsledku i dovoleného povrchového zatížení se počítá s vypočteným užitečným teplem 60,0368 MJ, na které nemá tento volený parametr vliv. Bude se rovněž počítat s výpočtem teplotního spádu přes válcovou, nikoli zjednodušenou rovinnou stěnu.

Tabulka 7.3: Vliv změny součinitele plnění

k = 1,3			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
V_{vs}	objem vsázky	24,07	dm^3
h_{vs}	výška vsázky	341	mm
T_k	vnější teplota kelímku	1004	K
T_{sp}	teplota spirál	1232	K
k = 1,4			
V_{vs}	objem vsázky	25,93	dm^3
h_{vs}	výška vsázky	367	mm
T_k	vnější teplota kelímku	1003	K
T_{sp}	teplota spirál	1219	K
k = 1,5			
V_{vs}	objem vsázky	27,78	dm^3
h_{vs}	výška vsázky	393	mm
T_k	vnější teplota kelímku	1001	K
T_{sp}	teplota spirál	1207	K

Při srovnání hodnot v tabulce 7.3 je na první pohled vidět logický přímý důsledek vzrůstajícího součinitele plnění – větší objem vsázky. Rovněž výška vsázky díky konstantnímu průměru vzroste vždy přibližně o 25 mm za desetinu hodnoty součinitele.

Naopak lze vypozorovat nepřímou úměru mezi součinitelem plnění (a tedy objemem vsázky) a vnější teplotou kelímku. To proto, že se vzrůstající přestupovou plochou kelímku klesá teplotní spád a tedy i vnější teplota kelímku. Rozdíl v teplotách kelímku, který lze pozorovat, je však velmi malý.

Větší rozdíl – a také v nepřímé úměrnosti – lze vidět u teploty spirál. Tento rozdíl již zanedbatelný není, rozdíl je asi třináct Kelvinů za desetinu součinitele plnění.

Tedy součinitel plnění má ve výsledku významné požadavky na prostor v kelímku pece, může mít v některých případech i vliv na volbu materiálu topné spirály díky její odlišné teplotě.

7.3 Tepelné ztráty

Tepelné ztráty odporové kelímkové pece se volí mezi 15 % až 25 % tepla na tavení. V této kapitole budou zkoumány tři příklady. Dolní hranice, tedy 15 %, horní hranice, což je 25 %, a prostřední hodnota odpovídající 20 % tepla na tavení.

U výpočtu tepelných ztrát se bude počítat se základním teplem potřebným na tavení v hodnotě 50,03 MJ.

Tabulka 7.4: Vliv změny tepelných ztrát

tepelné ztráty 15 %			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
Q_z	tepelné ztráty	7,505	MJ
Q_u	užitečné teplo	57,535	MJ
T_k	vnější teplota kelímku	1002	K
T_{sp}	teplota spirál	1212	K
tepelné ztráty 20 %			
Q_z	tepelné ztráty	10,006	MJ
Q_u	užitečné teplo	60,036	MJ
T_k	vnější teplota kelímku	1003	K
T_{sp}	teplota spirál	1219	K
tepelné ztráty 25 %			
Q_z	tepelné ztráty	12,508	MJ
Q_u	užitečné teplo	62,538	MJ
T_k	vnější teplota kelímku	1003	K
T_{sp}	teplota spirál	1226	K

Tepelné ztráty Q_z v tabulce 7.4 se navyšují dle procent z Q_t, tepla na tavení. Údaj o užitečném teple je uveden jen na doplnění, protože se jedná o prostý součet tepla potřebného na tavení a ztrát. Navyšuje se tedy podobně jako Q_z.

Teplota kelímku se mění jen velmi málo, změny závislé na zvolených tepelných ztrátách lze zcela zanedbat. Teplota spirál se již mění znatelněji. Na rozdíl od vlivu součinitele plnění závisí na zvolených tepelných ztrátách přímo úměrně.

Teplota spirál má vliv na pozdější části výpočtu. Projevuje se u výpočtu dovoleného povrchového zatížení, a to jak v případě, že se volí z tabulky, tak pokud dojde k rozhodnutí nezvolit ho z tabulky, ale počítat přes dovolené povrchové zatížení ideální. Jelikož se však jedná o složitější problematiku, jsou důsledky změny teploty odporových spirál popsány v samostatné kapitole o dovoleném povrchovém zatížení.

7.4 Součinitel bezpečnosti

Součinitel bezpečnosti, zahrnující potřebu zvýšeného výkonu pece, se rovněž může volit různě, zpravidla dle typu pece, ale i pro jeden typ pece dle uvážení – například zhoršení tepelné izolace vyzdívky, snížení napájecího napětí apod. Hodnota 1,08, uvedená v [3], je spíše u spodní hranice, může se volit až 30 % u periodicky pracujících pecí, jak uvádí [6]. Zde budou zvoleny součinitele bezpečnosti 1,08, 1,15 a maximální 1,30.

Všechny výpočty jsou počítány pro užitečné teplo 60,03 MJ, užitečný výkon 16,676 kW, zvolené dovolené povrchové zatížení 8,27 $\mathrm{W.cm^{-2}}$, kontrola na dovolené zatížení je vždy v pořádku.

Z tabulky 7.5 lze vidět předpokládaný výsledek, že se zvyšujícím se součinitelem bezpečnosti se zvyšuje i výkon všech tří fází i jedné fáze.

Změna součinitele bezpečnosti má vliv i na vypočítaný průměr vodiče, jehož zvolená hodnota z normalizovaných hodnot má v důsledku nemalý vliv na následující výpočty, délka vodiče se prodlužuje a hmotnost topné spirály vzrůstá.

Naopak s narůstajícím výkonem se zmenšuje počet závitů na jeden žlab, přičemž počet žlabů na jednu fázi zůstává stejný.

Přepočtený počet závitů na žlab už se na rozdíl od nepřepočteného tolik nemění. Výsledná přepočtená délka topného článku v jednom žlabu je přímo úměrná narůstajícímu součiniteli bezpečnosti a výkonu. Změna v počítaném rozsahu koeficientů přesahuje délku jednoho metru.

Tabulka 7.5: Vliv změny součinitele bezpečnosti na výpočet výkonu

K= 1,08			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
P_{3f}	výkon, 3 fáze	18,010	kW
P_{1f}	výkon, 1 fáze	6,003	kW
d_{zv}	zvolený průměr	1,2	mm
l_{1f}	délka vodiče jedné fáze	20,554	m
m_{ts}	hmotnost topné spirály	499	g
$n_{1ž}$	počet závitů na jeden žlab	519	–
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,59	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	19,0	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	541	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	10,293	m
K= 1,15			
P_{3f}	výkon, 3 fáze	19,178	kW
P_{1f}	výkon, 1 fáze	6,393	kW
d_{zv}	zvolený průměr	1,25	mm
l_{1f}	délka vodiče jedné fáze	20,944	m
m_{ts}	hmotnost topné spirály	551	g
$n_{1ž}$	počet závitů na jeden žlab	498	–
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,65	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	19,8	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	529	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	10,476	m
K= 1,30			
P_{3f}	výkon, 3 fáze	21,680	kW
P_{1f}	výkon, 1 fáze	7,227	kW
d_{zv}	zvolený průměr	1,40	mm
l_{1f}	délka vodiče jedné fáze	23,242	m
m_{ts}	hmotnost topné spirály	767	g
$n_{1ž}$	počet závitů na jeden žlab	445	–
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,67	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	22,2	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	525	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	11,625	m

7.5 Typ stěny pro výpočet teplotního spádu a vnější teploty stěny kelímku

Důležitou veličinou pro tepelný výpočet odporové kelímkové pece je vnější teplota stěny kelímku. Tuto hodnotu lze získat za pomoci výpočtu teplotního spádu, ke kterému dojde skrze stěnu kelímku, tedy mezi vnější stěnou kelímku a vsázkou.

Kelímek odporové pece má přibližně válcové rozměry. V této práci, jak zmíněno výše, se předpokládají rozměry rotačního válce a ve výpočtu se pracuje se středním průměrem kelímku. Výpočet teplotního spádu pro takový případ lze provést dle vztahu (6.8).

Jednodušší rovinná stěna neodpovídá vůbec tvaru kelímkové pece. Přesto bude poněkud jednodušší vztah pro výpočet teplotního spádu tuto stěnu využívající (6.10) rovněž použit k výpočtu a výsledky srovnány.

Teplotní spád závisí na užitečném teple a na přestupové ploše kelímku, obě tyto veličiny jsou závislé na volených parametrech. Přestupová plocha kelímku bude zvolena 39,17 dm^2 (volený parametr součinitel plnění k = 1,4 pro výpočet objemu vsázky). Užitečné teplo závisí na procentech ztrát, kde budou brány stejně jako v kapitole 7.3 procentní ztráty 15 %, 20 % a 25 % a tím vyzkoušeny tři varianty pro oba typy stěn.

Vliv tepelných ztrát na užitečné teplo z prvního řádku tabulky 7.6 je zřetelný ze základního vztahu a z kapitoly 7.3.

Na tepelných spádech i vnějších teplotách kelímku u obou stěn lze v tabulce vidět jen malé rozdíly v teplotách.

Srovnáme-li všechny tři zkoušené případy tepelných ztrát a tedy užitečného tepla, zjistíme, že s rostoucím užitečným teplem roste rozdíl mezi výpočtem přes válcovou stěnu, odpovídající přibližně skutečnosti, a stěnou rovinnou, která se v peci nenachází. Tuto skutečnost nejlépe ukazuje relativní odchylka v posledním řádku tabulky.

U relativní odchylky je potřeba si uvědomit, že je uvedena v procentech, tedy je ve všech případech na úrovni přibližně desetiny procenta.

Z hodnot relativních odchylek lze snadno usoudit, že hodnota užitečného tepla (na základě parametru tepelných ztrát), potřebná k výpočtu teploty kelímku, má v dané variantě zadání výpočtu malý vliv na odchylku výsledků vypočítanou přes oba typy zdí. Jedná se o přímo úměrnou závislost. Rozdíl mezi typy výpočtů vyjádřený touto relativní odchylkou je navíc ve všech případech velice malý.

Lze tedy říci, že ve výsledku nezáleží na typu stěny užité ve výpočtu. Oba typy výpočtu – přes válcovou i rovinnou stěnu – jsou zaměnitelné bez jakýchkoli důsledků. Není tedy ani třeba počítat výsledky výpočtů následných, hodnoty se totiž už neliší vůbec.

Tabulka 7.6: Výpočet přes válcovou a rovinnou stěnu pro tři různá zadání tepelných ztrát

tepelné ztráty 15 %			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
Q_u	užitečné teplo	57,535	MJ
ΔT_{kv}	teplotní spád – válcová stěna	18,71	K
T_{kv}	vnější teplota kelímku – válcová stěna	1001,86	K
ΔT_{kr}	teplotní spád – rovinná stěna	17,58	K
T_{kr}	vnější teplota kelímku – rovinná stěna	1000,73	K
δ_{kvr}	relativní odchylka teplot kelímku vztažená na teplotu dle válcové stěny	0,112	%
tepelné ztráty 20 %			
Q_u	užitečné teplo	60,036	MJ
ΔT_{kv}	teplotní spád – válcová stěna	19,52	K
T_{kv}	vnější teplota kelímku – válcová stěna	1002,67	K
ΔT_{kr}	teplotní spád – rovinná stěna	18,35	K
T_{kr}	vnější teplota kelímku – rovinná stěna	1001,50	K
δ_{kvr}	relativní odchylka teplot kelímku vztažená na teplotu dle válcové stěny	0,117	%
tepelné ztráty 25 %			
Q_u	užitečné teplo	62,538	MJ
ΔT_{kv}	teplotní spád – válcová stěna	20,33	K
T_{kv}	vnější teplota kelímku – válcová stěna	1003,48	K
ΔT_{kr}	teplotní spád – rovinná stěna	19,11	K
T_{kr}	vnější teplota kelímku – rovinná stěna	1002,26	K
δ_{kvr}	relativní odchylka teplot kelímku vztažená na teplotu dle válcové stěny	0,122	%

7.6 Způsoby vypočtení délky topné spirály

V kapitole 6.5, zabývající se návrhem vodiče topné spirály, byly zmíněny tři způsoby výpočtu délky topné spirály (6.19), (6.20) a (6.21). Všechny tři vedou k obdobným, ale přesto nezanedbatelně odlišným délkám spirál odporové kelímkové pece. Navazující výpočty mohou být ovlivněny opět do různé míry.

Výpočet bude proveden pro velikost příkonu jedné fáze P_{1f} = 6003 W, zvolené dovolené povrchové zatížení p_z = 8 $\mathrm{W.cm^{-2}}$ a zvolený průměr d_{zv} = 1,2 mm. Stoupání bylo zvoleno $s = 2{,}7$ mm a vnější průměr spirály $D = 7{,}2$ mm.

Srovnání vlivu volby výpočtu délky topné spirály na důležité navazující veličiny ukazuje tabulka 7.7. U výpočtu nosníků jsou uvedeny pouze ty hodnoty, které jsou na délce spirály závislé.

Z tabulky lze vyčíst, že délka vodiče jedné fáze se u všech tří použitých vztahů neliší na první pohled významně, tedy délka celé spirály také neukazuje veliké rozdíly. U prvních dvou vzorců si lze všimnout, že zatímco v prvním případě se jedná o závislost na zvoleném průměru, ve druhém jde o závislost na dovoleném povrchovém zatížení. Všechny ostatní veličiny jsou stejné. Rozdíl ve výsledku těchto dvou výpočtů je způsoben pouze zaokrouhlením průměru resp. změnou vypočítaného průměru na průměr normalizovaný. Jelikož se vždy volí nejbližší vyšší hodnota udávaná výrobcem, je výsledná hodnota délky vodiče v prvním případě vyšší.

Počet žlabů na jednu fázi zůstává u všech výpočtů stejný. Je sice pravda, že jistou úlohu hraje zaokrouhlování, ke kterému zde vždy dochází, ale v tomto případě je velmi zanedbatelná.

Jisté rozdíly lze vidět u přepočteného stoupání, které se poté projeví do následujících řádků tabulky. Se snižující se délkou vodiče se přepočtené stoupání zvyšuje. Zatímco přepočítaná délka závitu spirály se nemění, dochází k významnějším rozdílům v počtu závitů na žlab. Jelikož je stoupání větší, musí se přirozeně počet závitů ze žlabu snižovat. Délka topného článku v jednom žlabu se opět liší jen o desetiny metru a opět se se zvyšujícím stoupáním snižuje.

Rozdíly ve výpočtech jsou ve všech případech malé, jediným větším rozdílem je přepočítaný počet závitů na žlab. Lze tedy říct, že užití odlišných vztahů neovlivní významně vodič spirály ani nosníky. Snad nejdůležitější údaj, kde by změna měla největší vliv na návrh pece – tedy počet žlabů na jednu fázi – zůstává stejný. Změna počtu závitů na žlab, přestože největší změna v tabulce, nemá ve výsledku významný vliv.

Tabulka 7.7: Vliv odlišného výpočtu na délku odporové spirály a navazující výpočty

$$l_{1f} = \frac{\pi U^2 d_{zv}^2}{4 P_{1f} \varrho_{sp}}$$

symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
l_{1f}	délka vodiče jedné fáze	20,554	m
l_{3f}	délka vodiče všech tří fází	61,661	m
m_{ts}	hmotnost topné spirály	499	g
n_{1fz}	žlaby na jednu fázi, zaokrouhleno	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,59	mm
l_{zn}	přepočítaná délka závitu spirály	19	mm
$n_{1žn}$	přepočítaný počet závitů na žlab	541	–
$l_{dr1žln}$	délka topného článku v 1 žlabu	10,293	m

$$l_{1f} = \sqrt[3]{\frac{U^2 P_{1f}}{4\pi \varrho_{sp} p_z^2}}$$

l_{1f}	délka vodiče jedné fáze	20,120	m
l_{3f}	délka vodiče všech tří fází	60,360	m
m_{ts}	hmotnost topné spirály	488	g
n_{1fz}	žlaby na jednu fázi, zaokrouhleno	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,65	mm
l_{zn}	přepočítaná délka závitu spirály	19	mm
$n_{1žn}$	přepočítaný počet závitů na žlab	529	–
$l_{dr1žln}$	délka topného článku v 1 žlabu	10,064	m

$$l_{1f} = \frac{P_{1f}}{\pi d_{zv} p_z}$$

l_{1f}	délka vodiče jedné fáze	19,906	m
l_{3f}	délka vodiče všech tří fází	59,719	m
m_{ts}	hmotnost topné spirály	483	g
n_{1fz}	žlaby na jednu fázi, zaokrouhleno	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,68	mm
l_{zn}	přepočítaná délka závitu spirály	19	mm
$n_{1žn}$	přepočítaný počet závitů na žlab	523	–
$l_{dr1žln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,954	m

7.7 Dovolené povrchové zatížení

Dovolené povrchové zatížení je důležitým parametrem, jehož hodnotu lze získat několika různými způsoby a dojít k velmi odlišným hodnotám, které ještě musí být podrobeny v každém případě kontrole podle vztahu (6.25). Hodnota dovoleného povrchového zatížení je v úzkém vztahu s průměrem vodiče, ve výsledku především s průměrem normalizovaným, s jehož velikostí se lze u daného materiálu skutečně setkat. Ve výpočtu v této práci je užíván materiál KANTHAL A, podrobnější informace lze nalézt na obrázcích 8.1 [3] a 8.2 [3] v příloze.

Základními postupy jsou:

- zvolení požadovaného průměru vodiče a zjištění potřebného dovoleného povrchového zatížení,
- zvolení dovoleného povrchového zatížení a výpočet potřebného průměru,
- zvolení dovoleného povrchového zatížení, výpočet potřebného průměru a zpětně z tabulky pro daný průměr odečtení dovoleného povrchového zatížení.

Zcela samostatnou možností je dovolené povrchové zatížení spočítat z vlastností materiálu kelímku a topných spirál. Dovolené povrchové zatížení může nabývat velmi odlišných hodnot.

V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány zmíněné postupy a uvedeny výsledky pro různé vstupní hodnoty.

7.7.1 Získání hodnoty povrchového zatížení podle zvoleného průměru

První ze zvolených metod bude získání dovoleného povrchového zatížení z tabulky 8.2 [3]. Bude zvoleno několik normalizovaných průměrů a pro teplotu 945 °C, která se nachází mezi 900 °C a 1000 °C, získána hodnota z tabulky. Předpokládá se lineární změna povrchového zatížení mezi hodnotami teplot, které jsou uvedeny v tabulce, pro jednodušší získání dovoleného povrchového zatížení pro teploty v tabulce neuvedené.

Délka topné spirály se bude počítat dle vzorce (6.20), takto vypočtená délka je nezávislá na zvoleném průměru, závisí však na zvoleném dovoleném povrchovém zatížení.

Tabulka 7.8: Zvolený průměr a vliv odečteného dovoleného zatížení z tabulky

$d_{zv} = 1{,}10\ \mathrm{mm}$			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
p_z	dovolené povrchové zatížení	8,70	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,026	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	9,13	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	387	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,57	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	545	$-$
$l_{dr1\check{z}ln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,524	m
$d_{zv} = 1{,}30\ \mathrm{mm}$			
p_z	dovolené povrchové zatížení	8,49	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,338	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	7,60	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	551	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,99	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	469	$-$
$l_{dr1\check{z}ln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,671	m
$d_{zv} = 2{,}20\ \mathrm{mm}$			
p_z	dovolené povrchové zatížení	7,97	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	20,170	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	4,31	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	1645	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	4,85	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	289	$-$
$l_{dr1\check{z}ln}$	délka topného článku v 1 žlabu	10,081	m

Z tabulky 7.8 lze vidět, že se zvyšujícím se průměrem – byly vybrány tři průměry od nejmenšího po největší – se snižuje dovolené povrchové zatížení, které nalezneme v tabulce, případně spočítáme z nalezených hodnot pro nevypsanou teplotu, jako v tomto případě. Změna dovoleného povrchového zatížení se může zdát malá, má však nezanedbatelný vliv na následující výpočty. Změna délky spirály se pohybuje na celém rozsahu přibližně o jeden metr. V prvním případě u průměru 1,1 mm však lze vidět, že kontrolní povrchové zatížení je větší než to, které bylo nalezeno v tabulce. Přestože jsou u daného příkladu vypsány i navazující výsledky, kontrolní povrchové zatížení jasně signalizuje, že odečtené není pro zadání tepelného výpočtu vhodné. U dalších dvou zvolených průměrů je již nerovnost splněna, kontrolní dovolené povrchové zatížení je menší než užité.

Není ani překvapující, že se zvyšujícím se průměrem se zvyšuje i hmotnost topné spirály, a to velikou měrou. Důvodem je, že se délky drátu pohybují okolo dvaceti metrů na fázi. Uvážíme-li, že fáze jsou tři, jedná se o velký nárůst materiálu, a tedy o velmi finančně náročné řešení.

Počet žlabů na jednu fázi zůstává stejný, stoupání se však díky zvětšenému průměru zvyšuje, aby byly od sebe dráty jednotlivých závitů se vzrůstajícím průměrem dostatečně vzdáleny. To snižuje i počet závitů na žlab. Zajímavé zde je, že přestože se počet závitů na žlab se vzrůstajícím průměrem snižuje, délka topného článku v jednom žlabu se zvětšuje.

7.7.2 Stanovení dovoleného povrchového zatížení, výpočet průměru

Bude uvažován materiál KANTHAL A s rezistivitou při 20 °C ϱ_{20} = 1,39 $\Omega.\mathrm{mm}^2\mathrm{m}^{-1}$, teplota spirál bude $t_{sp} = 945$ °C a příkon jedné fáze $P_{1f} = 6003$ W.

V tabulce 8.2 [3] lze vidět hodnoty pro sloupce 900 °C a 1000 °C, při předpokladu lineární změny povrchového zatížení lze snadno vypočítat, že se pro 945 °C budeme pohybovat mezi 7,97 $\mathrm{W.cm}^{-2}$ a 8,70 $\mathrm{W.cm}^{-2}$.

To jsou tedy hodnoty, které jsou pevně zvolené za vstup tohoto typu výpočtu a jako výsledek bude očekáván průměr drátu, po jehož upravení na normalizovanou hodnotu budou získány oba potřebné údaje.

Průměr vodiče spirály se spočítá podle vztahu (6.18). Délka topné spirály se bude počítat dle vzorce (6.20), takto vypočtená délka je nezávislá na zvoleném průměru, závisí však na zvoleném dovoleném povrchovém zatížení. V tabulce jsou uvedeny pouze hodnoty tepelného výpočtu, které na změnách parametru závisejí.

Tabulka 7.9: Vliv zvoleného dovoleného povrchového zatížení na tepelný výpočet

$p_z = 7{,}97\ \mathrm{W.cm^{-2}}$			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
d	vypočítaný průměr	1,189	mm
d_{zv}	normalizovaný průměr	1,2	mm
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	20,170	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	7,90	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	489	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,64	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	531	$-$
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	10,102	m
$p_z = 8{,}38\ \mathrm{W.cm^{-2}}$			
d	vypočítaný průměr	1,169	mm
d_{zv}	normalizovaný průměr	1,2	mm
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,507	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	8,16	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	473	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,74	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	511	$-$
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,740	m
$p_z = 8{,}70\ \mathrm{W.cm^{-2}}$			
d	vypočítaný průměr	1,155	mm
d_{zv}	normalizovaný průměr	1,2	mm
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,026	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	8,37	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	462	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,81	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	499	$-$
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,503	m

V tabulce 7.9 je vidět, že byly vybrány tři hodnoty dovoleného povrchového zatížení, tedy nejnižší 8,10 $\mathrm{W.cm^{-2}}$, střední 7,97 $\mathrm{W.cm^{-2}}$ a nejvyšší 8,7 $\mathrm{W.cm^{-2}}$. Přestože má zjištěné povrchové zatížení jistý vliv na výpočet průměru drátu, normalizovaný průměr změněn není. Vliv na délku topné spirály je již větší, ta se se zvětšujícím povrchovým zatížením (na průměru není výpočet závislý) snižuje přes celou tabulku až o 1 metr.

Kontrolní zatížení pro všechna zvolená povrchová zatížení vyhovuje, tedy je menší než zvolené. Není rovněž překvapením, že se snižující se délkou se snižuje při konstantním průměru i hmotnost, přestože změna v této tabulce není výrazná, jedná se u vyšších dovolených povrchových zatížení o ekonomickou výhodu.

Přepočtené stoupání spirály se se zvětšujícím dovoleným povrchovým zatížením také zvyšuje a má větší vliv na počet závitů na žlab, nepřímo úměrný. Délka topného článku na žlab se tedy také snižuje, ve zvoleném rozsahu až o půl metru.

7.7.3 Přepočet dovoleného povrchového napětí na základně vypočítaného průměru

Na základě dvou předchozích kapitol se nabízí také využít jejich kombinace – nejdříve si zvolit dovolené povrchové zatížení, vypočítat průměr a dle normalizované hodnoty průměru pak vyhledat v tabulce dovolené povrchové napětí, které této možnosti odpovídá, případně lineární interpolací získat hodnoty pro danou teplotu.

V následujících výpočtech bude vstupní dovolené povrchové napětí uvažováno v širším intervalu než v předchozí kapitole. Pro teplotu spirál 945 °C budou vybrány hodnoty ze sloupců pro 900 °C i 1000 °C, což je užívaný způsob. Přestože nebyla ze sloupce 1000 °C zvolena nejvyšší hodnota dovoleného povrchového zatížení, vznikl poměrně velký interval 3 $\mathrm{W.cm^{-2}}$. Důvodem je ukázka větší rozdílnosti ve výsledcích výpočtu, konkrétně z důvodu odlišného normalizovaného průměru, který v předchozí kapitole vyšel vždy stejný. Při přepočítávaném dovoleném povrchovém zatížení však již bude užita hodnota odpovídající 945 °C. Podobně jako v předchozí kapitole bude zvolen výpočet délky topného drátu nezávisle na průměru.

Po výpočtu průměrů a následném zvolení normalizovaného průměru nepřekvapí v tabulce 7.10 snižování velikosti průměru se zvyšujícím dovoleným povrchovým zatížením.

Nové dovolené povrchové zatížení je zvoleno z tabulky. Toto nové zatížení se přímo úměrně mění s původně zvoleným. Zatímco však rozsah výchozího dovoleného povrchového zatížení byl přes 3 $\mathrm{W.cm^{-2}}$, nově zvolené se pohybuje v daleko menším rozsahu, tedy mezi 8,49 $\mathrm{W.cm^{-2}}$ a 8,67 $\mathrm{W.cm^{-2}}$. Kontrolní povrchové zatížení vyhovuje nerovnosti pouze ve dvou případech ze tří.

Tabulka 7.10: Přepočítané dovolené povrchové zatížení dle průměru

$p_z = 6{,}80\ \mathrm{W.cm^{-2}}$			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
d	vypočítaný průměr	1,253	mm
d_{zv}	normalizovaný průměr	1,3	mm
p_{zn}	nové dovolené povrchové zatížení	8,49	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,338	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	7,60	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	551	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,99	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	469	$-$
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,671	m
$p_z = 8{,}38\ \mathrm{W.cm^{-2}}$			
d	vypočítaný průměr	1,169	mm
d_{zv}	normalizovaný průměr	1,2	mm
p_{zn}	nové dovolené povrchové zatížení	8,60	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,173	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	8,31	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	465	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,78	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	504	$-$
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,603	m
$p_z = 9{,}5\ \mathrm{W.cm^{-2}}$			
d	vypočítaný průměr	1,121	mm
d_{zv}	normalizovaný průměr	1,15	mm
p_{zn}	nové dovolené povrchové zatížení	8,67	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
l_{1f}	délka topné spirály jedné fáze	19,070	m
p_{kontr}	kontrolní povrchové zatížení	8,71	$\mathrm{W.cm^{-2}}$
m_{ts}	hmotnost topné spirály	425	g
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	$-$
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,68	mm
n_{1n}	přepočítaný počet závitů na žlab	523	$-$
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,548	m

Zbývající hodnoty v tabulkách jsou uvedeny jen pro úplnost a jejich závislosti odpovídají změnám vstupního průměru a dovoleného povrchového zatížení stejně jako v předchozích kapitolách. Při pohledu na celý tento výpočet a rozsah počáteční volby dovoleného povrchového zatížení lze ale říci, že se délka spirály mění jen málo, stejně jako její délka v jednom žlabu. I zde platí, že přestože se počet závitů na žlab se vzrůstajícím průměrem snižuje, délka topného článku v jednom žlabu se zvětšuje. Ostatní veličiny se již mění více, k největším změnám dochází v hmotnosti topné spirály a počtu závitů na žlab.

7.7.4 Výpočet dovoleného povrchového zatížení přes ideální povrchové zatížení

Výpočet ideálního povrchového zatížení je další z možností, jak obdržet potřebné dovolené povrchové zatížení. Hodnotu ideálního povrchového zatížení lze získat ze vztahu (6.24).

Při pokusném výpočtu bude použita hodnota sálání spirály uvedená v neměnných vlastnostech pece c_{sp} = 3,663 $\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$, teplota spirály 1219 K a vnější teplota kelímku 1003 K. Výsledky výpočtu uvádí tabulka 7.11.

Tabulka 7.11: Výpočet ideálního povrchového zatížení

symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
c_{sp}	sálání spirály	3,663	$\mathrm{W.m^{-2}.K^{-4}}$
T_{sp}	teplota spirály	1219	K
T_k	vnější teplota kelímku	1003	K
$p_{z,id}$	ideální povrchové zatížení	4,39	$\mathrm{W.cm^{-2}}$

Přestože tento způsob výpočtu, který uvádí [11], vede k hodnotám, které jsou na první pohled obdobné jako tabulkové, není tento výsledek vhodný. Uvážíme-li navíc, že skutečné dovolené povrchové zatížení je vždy menší než ideální a hodnota by tak byla ještě menší, při pohledu do tabulky 8.2 [3] lze vidět, že bychom se pohybovali v oblasti příliš nízkých teplot, pod 700 °C. To ovšem vůbec neodpovídá požadované teplotě spirály, která je 945 °C. Tedy výpočet dovoleného povrchového zatížení není pro tuto konkrétní pec vhodným řešením a je lepší se přidržet údajů výrobce a postupovat dle předchozích kapitol.

7.8 Stoupání spirály

Stoupání spirály je zobrazeno na obrázku 4.2 [3] a ovlivňuje tvar spirály, v důsledku pak především počet závitů na jeden žlab, tedy také délku topného článku v jednom žlabu. To se může v případě větších změn promítnout do počtu žlabů, které budou v peci potřeba.

V následujícím výpočtu bude uvažován: průměr topného drátu 1,3 mm, koeficient průměru spirály roven 6 a tedy průměr spirály bude 7,8 mm. Délka topného drátu jedné fáze je rovna 23,107 m. Měnit se tentokrát bude stoupání spirály v rozsahu od 2 do 2,5 násobku d_{zv}.

Tabulka 7.12: Vliv stoupání na výpočet topných článků a nosníků

$s = 2d_{zv} = 2,6\text{mm}$			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
l_{1z}	délka závitu spirály	20,6	mm
$n_{1ž}$	počet závitů na jeden žlab	539	–
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	11,095	m
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,49	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	20,6	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	563	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	11,576	m
$s = 2,25d_{zv} = 2,925\text{mm}$			
l_{1z}	délka závitu spirály	20,6	mm
$n_{1ž}$	počet závitů na jeden žlab	479	–
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,881	m
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	2	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	2,49	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	20,6	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	563	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	11,576	m
$s = 2,5d_{zv} = 3,25\text{mm}$			
l_{1z}	délka závitu spirály	20,7	mm
$n_{1ž}$	počet závitů na jeden žlab	431	–
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	8,912	m
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	3	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	3,78	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	20,8	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	371	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	7,698	m

Z vypočtených veličin v tabulce 7.12 lze vidět, že zatímco délka závitu se mění jen velmi málo (v prvních dvou případech se rovnají díky zaokrouhlení), počet závitů na jeden žlab se mění velmi. Závislost je nepřímo úměrná – se zvyšujícím se stoupáním spirály se snižuje počet závitů na jeden žlab.

Z toho vyplývá, že nepřepočítaná délka topného článku v jednom žlabu se tedy také úměrně zmenšuje. U s = 2,6 mm a s = 2,952 mm jsou následující údaje stejné. Zaokrouhlený počet žlabů na fázi je v obou případech roven jedné.

Zajímavější je ve srovnání s nimi však výpočet pro hodnotu s = 3,25 mm. Počet žlabů na jednu fázi se zde po zaokrouhlení již rovná třem. Tato hodnota značně mění navazující výpočty: přepočtené stoupání se zvýšilo o více než 1 mm a zatímco přepočtená délka závitu spirály se mnoho nezměnila, došlo k výraznému snížení přepočteného počtu závitů na žlab o téměř 200 závitů. Rovněž přepočtená délka topného článku v jednom žlabu se zmenšila o přibližně čtyři metry.

Tento výpočet ukazuje na významný důsledek při volbě stoupání spirály. Ukazuje se, že vliv stoupání na všechny hodnoty v tabulce je buď velmi malý až nulový, nebo naopak velmi výrazný. Rozhodujícím činitelem je právě to, zda dojde vlivem změny stoupání po zaokrouhlení původně desetinného výsledku na jiné celé číslo – tedy zda se změní zmíněný počet žlabů na fázi. Počet žlabů na jednu fázi má totiž velmi výrazný vliv na navazující výpočty a tedy na návrh tvaru a dílčí délky spirály.

7.9 Vnější průměr spirály

Vnější průměr spirály ovlivňuje tvar spirály a má obdobný vliv na výpočet, jako je tomu u stoupání spirály.

Průměr topného drátu se bude uvažovat 1,5 mm, stoupání spirály bude 2,25násobek d_{zv}, tedy 3,3755 mm. Koeficient průměru spirály se bude pohybovat od 5 do 7 a s ním i průměr spirály. Délka topného drátu jedné fáze je rovna 31,938 m.

Výsledky výpočtů ukazuje tabulka 7.13. Se zvětšujícím se vnějším průměrem spirály se přímo úměrně zvětšuje délka závitu spirály i délka topného článku v jednom žlabu, což je logicky předpokládaná závislost.

Na příkladu je však především zajímavá změna počtu žlabů na jednu fázi. Se zvětšujícím průměrem spirály se počet žlabů na jednu fázi zmenšuje. V tomto případě se ze čtyř nosníků stanou tři. Jak již bylo zjištěno v předchozí kapitole, změna počtu nosníků má významný vliv na přepočítané hodnoty veličin v další fázi výpočtu.

Ve srovnání se stoupáním předchozí kapitoly je však důležité upozornit na jednu významnou odlišnost. Když byl při změně stoupání spirály stejný počet žlabů na jednu fázi, neměnily se následující hodnoty vůbec nebo téměř vůbec. Zde však dochází ke změně přepočítaných hodnot i v případě stejného počtu žlabů.

Tabulka 7.13: Vliv průměru spirály na výpočet topných článků a nosníků

$D = 5d_{zv} = 7,5\text{mm}$			
symbol	**název veličiny**	**hodnota**	**jednotka**
l_{1z}	délka závitu spirály	19,1	mm
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	7,947	m
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	4	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	3,36	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	19,1	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	417	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	7,984	m
$D = 6d_{zv} = 9\text{mm}$			
l_{1z}	délka závitu spirály	23,8	mm
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	9,878	m
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	3	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	3,13	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	23,8	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	448	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	10,640	m
$D = 7d_{zv} = 10,5\text{mm}$			
l_{1z}	délka závitu spirály	28,5	mm
$l_{držln}$	délka topného článku v 1 žlabu	11,817	m
n_{1fz}	počet žlabů na jednu fázi	3	–
s_n	přepočtené stoupání, zaokrouhleno	3,75	mm
l_{1zn}	přepočtená délka závitu spirály	28,5	mm
$n_{1žn}$	přepočtený počet závitů na žlab	374	–
$l_{držln}$	přepočtená délka topného článku v 1 žlabu	10,657	m

Ještě zajímavější je, že se převrací úměrnost. Zatímco se zvyšujícím se průměrem spirály se při stejném počtu nosníků zvětšuje přepočtené stoupání i přepočtená délka závitu spirály (tedy ze 9 mm na 10,5 mm se jedná o přímou úměrnost), při změněném počtu nosníků je vliv na výpočet natolik velký, že při zvyšujícím se průměru spirály se přepočtené stoupání i přepočtená délka závitu spirály zmenšuje (tedy ze 7,5 mm na 9 mm se jedná o nepřímou úměrnost). Podobně se mění počet přepočteného počtu závitů na žlab – se zvyšujícím se průměrem spirály nejdříve roste a poté významně klesá, opět vlivem počtu žlabů na fázi.

Přepočtená délka topného článku v jednom žlabu se navyšuje se snížením počtu nosníků, v případě stejného počtu nosníků se u odlišného průměru přepočtená délka topného článku v jednom žlabu (na rozdíl od nepřepočtené) mění jen minimálně.

8 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřena na vliv volených parametrů v postupu tepelného výpočtu odporové kelímkové pece. Významná část práce byla zasvěcena popisu teorie tepelného výpočtu tohoto typu pece od zadaných vstupních hodnot přes všechna místa, která byla zvolena za volené parametry, až po výsledné hodnoty výpočtu. Těžištěm práce však byla až kapitola poslední, kde proběhl konkrétní výpočet kelímkové odporové pece nikoli jednoduše od začátku do konce, ale ve vybraných místech výpočtu docházelo ke změně zmíněných parametrů a sledování jejich vlivu.

S pomocí tabulkového procesoru Calc z kancelářského balíku LibreOffice proto byla provedena řada výpočtů, které měly za úkol prověřit vliv volených parametrů na navazující části tepelného výpočtu a výsledné hodnoty. Pro jedno konkrétní zadání výpočtu byly tedy u vybraných hodnot volených parametrů vyjádřeny do přehledných tabulek hodnoty veličin na těchto parametrech závislé.

Za volené parametry byly v této práci vybrány součinitel plnění, tepelné ztráty, součinitel bezpečnosti, typ stěny pro výpočet vnější teploty stěny kelímku, způsob vypočtení délky topné spirály, dovolené povrchové zatížení a průměr vodiče, stoupání spirály a její vnější průměr. U každého voleného parametru a veličin, které ovlivnil, bylo popsáno, do jaké míry je změna významná či zanedbatelná, jestli se mění hodnoty přímo či nepřímo úměrně volenému parametru a speciální případy, kdy volba parametru výpočet ovlivnila k hodnotám, které třeba již ani nešlo dále použít.

Podrobněji bylo zkoumáno povrchové zatížení a průměr drátu topné spirály, metody získání těchto hodnot a vliv na následující výpočty. U všech metod bylo mimo jiné zjištěno, že nemají v zadaném příkladu ve výsledku žádný vliv na počet žlabů na jednu fázi, délka topné spirály se neměnila příliš. Je však potřeba sledovat vždy hodnotu průměru drátu spirály, jehož změna má významný vliv na hmotnost a tedy i cenu topného článku. Pouze u jedné metody (a u ní zkoušených hodnot) prošla všechna dovolená povrchová zatížení kontrolním výpočtem. Z dalších volených parametrů lze například uvést, že bylo jasně ověřeno, že vůbec nezáleží na typu stěny užité ve výpočtu. Výpočty přes válcovou i rovinnou stěnu jsou zcela zaměnitelné. Co se týče tvarování spirály, změny jejího průměru i stoupání hrají ve výpočtu zásadní roli a promítají se dokonce i do počtu žlabů na jednu fázi, což u jiných volených parametrů pro hodnoty zkoušené v této práci nikdy nenastalo.

Práce může posloužit zájemcům o tepelné výpočty odporových, obzvláště kelímkových pecí k hlubšímu pochopení souvislostí v tomto výpočtu a vztahů jednotlivých veličin a jejich vliv na výsledný návrh částí pece. Tato práce však může být užitečná i zájemcům, kteří o problematice odporových pecí a tepelných výpočtů nevědí vůbec nic, tedy jako úvod do problematiky, protože obsahuje části objasňující celou teorii od základů přenosu tepla až po kompletní tepelný výpočet ve variantě, která byla použita v této práci pro zkoušení vlivu volených parametrů.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] BAXANT, Petr. *Elektrické teplo a světlo.* 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 190 s. ISBN 80-214-2761-2.

[2] BAXANT, Petr a DRÁPELA, Jiří. *Užití elektrické energie* [online]. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007 [cit. 28.10.2017]. 186 s.

[3] BAXANT, Petr, DRÁPELA, Jiří a LÁZNIČKOVÁ, Ilona. *Elektrotepelná technika.* Brno: FEKT VUT v Brně, 2006. 173 s.

[4] BLAHOŽ, Vladimír a KADLEC, Zdeněk. *Základy sdílení tepla.* 2. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2000. 110 s. ISBN 80-902001-1-7.

[5] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika. Část 2. Termodynamika. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky.* Brno: VUT v Brně, VUTIUM, 2000.

[6] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektrické teplo.* Ostrava: VŠB Ostrava, 1979. 247 s.

[7] HRADÍLEK, Zdeněk, LÁZNIČKOVÁ Ilona a KRÁL Vladimír. *Elektrotepelná technika.* 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 2011. 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.

[8] LÁZNIČKOVÁ, Ilona. *Technická mechanika. Mechanika poddajných těles. Termomechanika.* Brno: FEKT VUT v Brně, 2014. 140 s.

[9] MACHÁČKOVÁ, Adéla a KOCICH, Radim. *Sdílení tepla a proudění.* 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012. 187 s.

[10] MACHÁČKOVÁ, Adéla a MRŇKOVÁ, Lenka. *Průmyslové pece.* 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. 101 s.

[11] NOVÁK, Pavol a KOLESÁR, Juraj: *Elektrotepelná technika. Návody na cvičenia.* 1. vyd. Košice: VŠT v Košiciach, 1988.

[12] NOŽIČKA, Jiří a kolektiv. *Mechanika a termomechanika pro elektroenergetiku.* 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1987. 441 s.

[13] PLCH, Jiří. *Elektrické teplo.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1988. 192 s.

[14] RADA, Josef a kolektiv. *Elektrotepelná technika.* 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., 1985. 344 s.

[15] ŠORIN, S. N. *Sdílení tepla.* 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1968. 398 s.

[16] VRÁNA, Václav. *Elektrické teplo*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. 22 s.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Topné dráty KANTHAL A, AF, AE

Příloha B – Průměr a dovolené povrchové zatížení drátů KANTHAL

PŘÍLOHA A – TOPNÉ DRÁTY KANTHAL A, AF, AE

KANTHAL A, AF, AE
Wire

Standard stock items	Alloy	Diameter range mm	Resistivity Ωmm²m⁻¹	Density gcm⁻³
■	KANTHAL A	10.0-0.05	1.39	7.15
■	KANTHAL AF	10.0-0.10	1.39	7.15
–	KANTHAL AE	10.0-0.20	1.39	7.15

To obtain resistance at working temperature, multiply by the factor C_t in the following table:

°C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
C_t	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06

Diameter mm A	AF	at 20 °C Ω/m	Resistance cm²/Ω¹⁾ at 20 °C	Weight g/m	Surface area cm²/m	Cross sectional area mm²
10	10.0	0.0177	17751	562	314	78.
	8.25	0.0260	9968	382	259	53.5
	8.0	0.0277	9089	359	251	50.3
	7.5	0.0315	7489	316	236	44.2
	7.35	0.0328	7048	303	231	42.4
	7.0	0.0361	6089	275	220	38.5
	6.54	0.0414	4965	240	205	33.6
	6.5	0.0419	4875	237	204	33.2
	6.0	0.0492	3834	202	188	28.3
	5.83	0.0521	3517	191	183	26.7
	5.5	0.0585	2953	170	173	23.8
	5.2	0.0655	2496	152	163	21.2
	5.0	0.0708	2219	140	157	19.6
	4.75	0.0784	1902	127	149	17.7
	4.62	0.0829	1750	120	145	16.8
	4.5	0.0874	1618	114	141	15.9
	4.25	0.0980	1363	101	134	14.2
	4.11	0.105	1232	94.9	129	13.3
	4.0	0.111	1136	89.8	126	12.6
	3.75	0.126	936	79.0	118	11.0
	3.65	0.133	863	74.8	115	10.5
	3.5	0.144	761	68.8	110	9.62
	3.25	0.168	609	59.3	102	8.30
	3.2	0.173	582	57.5	101	8.04
	3.0	0.197	479	50.5	94.2	7.07
	2.9	0.210	433	47.2	91.1	6.61
	2.8	0.226	390	44.0	88.0	6.16
	2.6	0.262	312	38.0	81.7	5.31
	2.5	0.283	277	35.1	78.5	4.91
	2.4	0.307	245	32.3	75.4	4.52
	2.3	0.335	216	29.7	72.3	4.15

Diameter mm A	AF	at 20 °C Ω/m	Resistance cm²/Ω¹⁾ at 20 °C	Weight g/m	Surface area cm²/m	Cross sectional area mm²
	2.25	0.350	202	28.4	70.7	3.98
	2.2	0.366	189	27.2	69.1	3.80
	2.0	0.442	142	22.5	62.8	3.14
	1.8	0.546	104	18.2	56.5	2.54
	1.7	0.612	87.2	16.2	53.4	2.27
	1.65	0.650	79.7	15.3	51.8	2.14
	1.6	0.691	72.7	14.4	50.3	2.01
	1.5	0.787	59.9	12.6	47.1	1.77
	1.4	0.903	48.7	11.0	44.0	1.54
	1.3	1.05	39.0	9.49	40.8	1.33
	1.2	1.23	30.7	8.09	37.7	1.13
	1.1	1.46	23.6	6.79	34.6	0.950
	1.0	1.77	17.8	5.62	31.4	0.785
	0.95	1.96	15.2	5.07	29.8	0.709
0.90	0.90	2.18	12.9	4.55	28.3	0.636
0.85	0.85	2.45	10.9	4.06	26.7	0.567
0.80	0.80	2.77	9.09	3.59	25.1	0.503
0.75	0.75	3.15	7.49	3.16	23.6	0.442
0.70	0.70	3.61	6.09	2.75	22.0	0.385
0.65	0.65	4.19	4.87	2.37	20.4	0.332
0.60	0.60	4.92	3.83	2.02	18.8	0.283
0.55	0.55	5.85	2.95	1.70	17.3	0.238
0.50	0.50	7.08	2.22	1.40	15.7	0.196
0.45	0.45	8.74	1.62	1.14	14.1	0.159
0.40	0.40	11.1	1.14	0.898	12.6	0.126
0.35	0.35	14.4	0.761	0.688	11.0	0.0962
0.30	0.30	19.7	0.479	0.505	9.42	0.0707
0.25		28.3	0.277	0.351	7.85	0.0491
0.20		44.2	0.142	0.225	6.28	0.0314
0.15		78.7	0.0599	0.126	4.71	0.0177

Obrázek 8.1: Topné dráty KANTHAL A, AF, AE [3]

PŘÍLOHA B – PRŮMĚR A DOVOLENÉ POVRCHOVÉ ZATÍŽENÍ DRÁTŮ KANTHAL

Proudové zatížení drátů vinutých do spirál na trn o průměru $^3/_{16}$" (4.763 mm). Okolí: Klidný vzduch o teplotě cca 20° C.

Ø mm	200° C			400° C			600° C			700° C			800° C		
	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²
2.20	7.64	2.81	0.310	12.7	4.84	0.920	20.4	7.61	2.25	25.0	9.40	3.40	30.2	11.4	5.00
2.10	7.14	2.86	0.312	12.3	4.98	0.924	19.0	7.84	2.26	23.4	9.64	3.42	28.2	11.7	5.02
2.00	6.66	2.96	0.314	11.4	5.11	0.928	18.7	8.05	2.27	21.8	9.89	3.44	26.4	12.0	5.04
1.90	6.15	3.05	0.316	10.6	5.26	0.932	16.5	8.30	2.29	20.3	10.1	3.46	24.5	12.3	5.06
1.80	5.72	3.14	0.318	9.79	5.41	0.936	15.3	8.53	2.31	18.8	10.5	3.48	22.6	12.7	5.08
1.70	5.27	3.24	0.320	9.00	5.58	0.940	14.1	8.82	2.33	17.2	10.8	3.50	20.8	13.1	5.10
1.60	4.83	3.35	0.322	8.25	5.68	0.948	12.9	9.14	2.35	15.8	11.2	3.53	19.1	13.6	5.14
1.50	4.39	3.47	0.324	7.53	5.98	0.956	11.8	9.48	2.37	14.4	11.6	3.56	17.2	14.1	5.18
1.40	3.98	3.61	0.326	6.81	6.23	0.964	10.7	9.86	2.39	13.1	12.1	3.60	15.7	14.6	5.22
1.30	3.77	3.75	0.328	6.13	6.49	0.972	9.58	10.2	2.41	11.8	12.6	3.64	14.1	15.2	5.26
1.25	3.37	3.87	0.330	5.79	6.64	0.980	9.07	10.5	2.43	11.2	12.9	3.68	13.4	15.6	5.30
1.20	3.19	3.99	0.333	5.48	6.80	0.987	8.56	10.7	2.44	10.5	13.2	3.70	12.6	15.9	5.33
1.15	3.00	4.00	0.336	5.15	6.97	0.994	8.04	11.0	2.45	9.90	13.6	3.72	11.9	16.3	5.36
1.10	2.83	4.13	0.340	4.83	7.15	1.000	7.56	11.3	2.47	9.29	13.9	3.74	11.1	16.8	5.40

KANTHAL A-1 Potřebné údaje v ampérech pro KANTHAL A-1 minus 2%
Potřebné údaje ve voltech pro KANTHAL A-1 plus 2%

KANTHAL DS Potřebné údaje v ampérech pro KANTHAL DS plus 1.5%
Potřebné údaje ve voltech pro KANTHAL DS minus 1.5%

Po navinutí jsou spirály roztaženy na dvojnásobnou délku. Jako podložky je použito šamotu.

Ø mm	900° C			1000° C			1100° C			1200° C			1300° C		
	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²	A	V/m	W/cm²
2.20	34.9	13.4	6.80	41.2	15.8	9.40	46.5	17.8	12.0	51.3	19.8	14.8	56.7	22.0	18.0
2.10	32.8	13.6	6.82	38.5	16.2	9.44	43.5	18.3	12.1	48.2	20.4	14.9	53.0	22.5	18.1
2.00	30.6	14.1	6.84	35.9	16.6	9.48	40.5	18.8	12.1	44.9	20.9	15.0	49.3	23.2	18.2
1.90	27.2	14.4	6.86	33.3	17.1	9.52	37.6	19.4	12.2	41.8	21.6	15.1	46.0	23.8	18.3
1.80	26.2	14.8	6.88	30.8	17.6	9.56	34.7	19.9	12.2	38.6	22.2	15.2	42.7	24.5	18.4
1.70	24.2	15.4	7.00	28.3	18.1	9.60	32.0	20.6	12.3	35.6	22.9	15.3	39.1	25.3	18.6
1.60	22.2	16.0	7.08	25.9	18.8	9.68	29.3	21.3	12.4	32.7	23.8	15.5	35.8	26.3	18.7
1.50	20.3	16.6	7.16	23.6	19.5	9.76	26.7	22.1	12.5	29.9	24.8	15.7	32.8	27.4	19.0
1.40	18.4	17.3	7.24	21.4	20.2	9.84	24.2	22.9	12.6	27.1	25.9	15.9	29.6	28.2	19.1
1.30	16.6	18.0	7.32	19.3	21.1	9.92	21.8	23.9	12.7	24.4	26.9	16.1	26.6	29.5	19.2
1.25	15.7	18.5	7.40	18.2	21.6	10.0	20.6	24.4	12.8	23.1	27.6	16.2	24.7	30.1	19.3
1.20	14.8	18.9	7.45	17.1	22.0	10.0	19.4	25.1	12.9	21.7	28.1	16.2	23.7	30.8	19.4
1.15	13.9	19.4	7.50	16.1	22.6	10.1	18.4	25.5	12.9	20.5	28.9	16.3	22.3	31.7	19.6
1.10	13.1	19.9	7.55	15.1	23.1	10.1	17.1	26.2	13.0	19.2	29.6	16.4	21.0	32.6	19.8

Obrázek 8.2: Průměr a dovolené povrchové zatížení drátů KANTHAL [3]