



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## PROGRAM NA VÝPOČET TAHOVÝCH ZTRÁT

SOFTWARE FOR DETERMINATION OF AERODYNAMIC LOSSES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Ondrák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadaní diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Adam Ondrák**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Program na výpočet tahových ztrát

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stanovení aerodynamických ztrát je jednou z klíčových aktivit při návrhu kotlů. Ztráty závisí na celé řadě parametrů, zejména na konstrukci spalínového kanálu a rychlosti spalín. Snížení aerodynamických ztrát je důležité pro případné úspory energie u spalovacího ventilátoru. Matematické prostředí umožňující optimalizaci aerodynamických ztrát je proto velmi důležitý nástroj při návrhu kotle.

### Cíle diplomové práce:

Zpracovat popis výpočtu aerodynamických ztrát.  
Vytvořit program pro optimalizaci aerodynamických ztrát v kotli.  
Ověřit funkčnost programu měřením na reálném zařízení.  
Zpracovat citlivostní analýzu aerodynamických ztrát na základních parametrech kotle.

### Seznam doporučené literatury:

MALÁK, J. Tlakové ztráty a přestup tepla v kanálech nekruhových průřezů s hydraulicky hladkými stěnami. Řež: Ústav jaderného výzkumu, 1972. Práce ÚJV.

BUDAJ, Florian. Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet : Určeno pro posl. fak. strojní. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1979. Učební texty vysokých škol.

ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. Parní kotle. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá tvorbou programu pro výpočet tahových ztrát kotle. Práce je rozdělena do čtyř částí. V první části se práce zabývá teoretickým úvodem do problematiky tlakových ztrát. V druhé části jsou rozebrány všechny rovnice a postupy jakými byl program tvořen, stejně jako omezení a podmínky možnosti použití daného typu rovnice. Třetí část se skládá z ukázkového výpočtu tlakových ztrát reálného kotle. Dále je ve třetí části provedena kontrola správnosti funkce programu, kdy naměřené ztráty na reálném zařízení byly porovnány se ztrátami vypočítanými programem. Čtvrtá část se zabývá vlivy parametrů kotle na jeho tlakové ztráty, kdy jednotlivé ztráty byly graficky znázorněny a porovnány pro určení citlivostní analýzy. Výstupem této práce je funkční program, který byl optimalizován pro co nejjednodušší používání a nevyžaduje po uživateli téměř žádnou znalost problematiky.

### **Klíčová slova**

Tlaková ztráta, součinitel odporu, součinitel tření, korekční faktory tlakových ztrát.

## **ABSTRACT**

This work deals with the creation of a program for calculating the tensile losses of an industrial boiler. The work is divided into four parts. The first part of the thesis deals with a theoretical introduction to the issue of pressure losses. The second part deals with all equations and procedures by which the program was created, as well as the limitations and conditions of using a given type of equation. The third part consists of a sample calculation of pressure losses of a real boiler. Furthermore, in the third part, the correctness of the program function is checked, where the measured losses on the real device were compared with the losses calculated by the program. The fourth part deals with the influence of the boiler's parameters on its pressure losses, where the individual losses were graphically represented and compared to determine the sensitivity analysis. The output of this work is a functional program that has been optimized for ease of use and requires almost no knowledge of the user.

### **Key words**

Pressure loss, coefficient of resistance, coefficient of friction, correction factors of pressure losses.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ONDRÁK, Adam. *Program na výpočet tahových ztrát*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132497>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem *diplomovou* práci na téma Program na výpočet tahových ztrát vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

\_\_\_\_\_  
*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Martin Lisý, Ph.D. a Ing. Pavel Křemínský za cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování závěrečné práce.



## OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Aerodynamický výpočet kotle.....	12
1.1 Tlakové ztráty třením.....	12
1.2 Tlakové ztráty změnou výšky.....	14
1.3 Dynamické tlakové ztráty.....	14
1.4 Tlaková ztráta prašností spalin.....	14
1.5 Tlakové ztráty ve svazku trubek.....	15
1.6 Místní tlakové ztráty.....	20
1.6.1 Změna směru proudění.....	20
1.6.2 Náhlá změna průřezu.....	25
1.6.3 Pozvolná změna průřezu.....	27
2 Sestavení výpočtu v excelu.....	31
2.1 List1 (Třecí, výškové a dynamické ztráty).....	31
2.1.1 Třecí.....	31
2.1.2 Výškové.....	32
2.1.3 Dynamické.....	32
2.2 List2 (Proudění skrz výměník).....	33
2.3 List3 (Místní tlaková ztráta).....	37
3 Ověření funkčnosti programu.....	44
4 Citlivostní analýza vlivu parametrů kotle na tlakové ztráty.....	50
4.1 Citlivostní analýza vlivu teploty a průtoku spalin na tlakovou ztrátu.....	50
4.2 Citlivostní analýza vlivu hydraulického průměru na tlakovou ztrátu.....	50
4.3 Citlivostní analýza vlivu příčné rozteče na tlakovou ztrátu výměníku.....	51
4.4 Citlivostní analýza vlivu podélné rozteče na tlakovou ztrátu výměníku.....	51
4.5 Citlivostní analýza vlivu uspořádání trubkových řad na tlakovou ztrátu výměníku	52
ZÁVĚR.....	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	54
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	55
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	57
SEZNAM TABULEK.....	58
PŘÍLOHY.....	59



## **ÚVOD**

Cílem této práce je nastínit problematiku výpočtu tlakových ztrát v kotli a tvorba programu v programovatelném prostředí pro co nejobecnější používání. Snižování tlakových ztrát zařízení kotle je žádáno pro úsporu energie a zvýšení celkové účinnosti kotle.

Jako prostředí pro výpočet tlakových ztrát byla zvolena aplikace excel. Excel byl zvolen pro jeho rozšířenost a znalost používání, díky čemuž bude možno docílit tvorby programu, jenž bude schopný obsluhovat kdokoliv bez větší znalosti prostředí excelu nebo problematiky tlakových ztrát.

Správnost funkčnosti programu bude ověřena porovnáním vypočtených výsledků tlakové ztráty s naměřenými parametry na reálném zařízení, kdy typ kotle a přístup k němu bude udělen firmou PBS pro možnost osobního měření tlakových ztrát a parametrů kotle.

## 1 Aerodynamický výpočet kotle

Pro vypracování této kapitoly byly využity následující zdroje [1] – [8]

Aerodynamický výpočet kotle slouží k určení odporů při proudění spalin jednotlivými částmi spalínového traktu. Výpočet by měl být prováděn paralelně s tepelným výpočtem kotle, protože přestup tepla úzce souvisí s velikostí tlakového odporu. Odpor proudění je třeba znát pro správnou dimenzaci vzduchových a sacích ventilátorů. Velikost tlakových ztrát je také úzce spojena s rychlostí proudění. Rychlost proudění by měla být optimalizována tak, aby výsledné náklady na jednotku produkce byly co nejnižší.

Tlakovou ztrátu newtonovské tekutiny lze při laminárním a turbulentním proudění určit podle Darcy-Weisbachovy rovnice (1.1)

$$\Delta p = \xi * \frac{\rho * w_f^2}{2} \quad (1.1)$$

Kde	$\xi$	[-]	odporový součinitel
	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota média
	$w_f$	[m/s]	střední rychlost proudění

### 1.1 Tlakové ztráty třením

Při proudění tekutiny dochází ke vzniku tření mezi tekutinou a stěnou kanálu. Z tohoto důvodu tekutina ztrácí svoji kinetickou energii a nabývá na teplotě. Proto, aby tekutina mohla kanálem nadále protékat požadovanou rychlostí, získává kinetickou energii na úkor poklesu tlaku na druhé straně kanálu. Teplo vznikající uvnitř tekutiny vlivem tření se nazývá ztrátové teplo. Při stacionárním proudění je teplota konstantní, a to z toho důvodu, že ztrátové teplo je spotřebováno při expanzi (ochlazení) média na nový tlak na konci kanálu.

Pro výpočet třecích ztrát se rozepíše součinitel  $\xi$  podle rovnice (1.2) a po dosazení do původní Darcy-Weisbachovy rovnice vzniká rovnice pro výpočet třecích ztrát (1.3)

$$\xi = \lambda * \frac{L}{D_0} \quad (1.2)$$

$$\Delta p = \lambda * \frac{L}{D_0} * \frac{\rho * w_f^2}{2} \quad (1.3)$$

Kde	$\lambda$	[-]	součinitel tření
	$L$	[m]	délka kanálu
	$D_0$	[m]	průměr kanálu

Pro výpočet součinitele tření je nejprve nutné zjistit styl proudění a zda je uvažován kanál hladký nebo je známa jeho drsnost. Nejjednodušším způsobem určení stylu proudění je výpočet Reynoldsova čísla rovnice (1.4).

$$Re = \frac{\rho * w_f * d_h}{\mu} \quad (1.4)$$

Kde  $d_h$  [m] ekvivalentní hydraulický průměr  
 $\mu$  [Pa \* s] dynamická viskozita

Hodnotu  $d_e$  je možno spočítat jako poměr vnitřního průřezu a obvodu kanálu. Tento vztah je platný pro turbulentní proudění a laminární proudění při poměru stran a/b blízko k 1.

$$d_h = \frac{2 * a * b}{a + b} \quad (1.5)$$

Kde  $a, b$  [m] rozměry kanálu

Nyní je možno vypočítat součinitel tření  $\lambda$ , jenž pro laminární proudění má tvar (1.6). Pro turbulentní proudění v rozsahu  $Re=(3000-100000)$  je  $\lambda$  možno vypočítat pomocí Blasiusova vzorce (1.7). Pro turbulentní proudění v drsném kanále slouží rovnice (1.8) a pro proudění s hodnotou  $Re > 10^6$  je možno využít rovnice (1.9), odvozené z Prandtlovy a von Kármánovy rovnice.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.6)$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (1.7)$$

$$\lambda = \left( -2 * \log \left( \frac{k}{3,71 * d_e} \right) \right)^{-2} \quad (1.8)$$

$$\frac{1}{\lambda^{0,5}} = (-0,8 + 2 * \log (Re * \lambda^{0,5})) \quad (1.9)$$

Kde  $k$  [m] drsnost kanálu

## 1.2 Tlakové ztráty změnou výšky

Tlakové ztráty změnou výšky udává rovnice pro hydrostatický tlak

$$\Delta p_h = \Delta h * \rho * g \quad (1.10)$$

Kde  $\Delta h$  [m] výškový rozdíl začátku a konce kanálu  
 $g$  [m/s<sup>2</sup>] tíhové zrychlení

## 1.3 Dynamické tlakové ztráty

Vztah pro výpočet dynamického tlaku pro podzvukové rychlosti umožňuje vypočítat Bernoulliho rovnice (1.11), ze které byla vyjádřena rovnice (1.12) pro dynamický tlak.

$$\rho * \frac{w^2}{2} + p_{st} = konst \quad (1.11)$$

$$\Delta p_d = \rho * \frac{w^2}{2} \quad (1.12)$$

## 1.4 Tlaková ztráta prašností spalin

Dalším faktorem ovlivňujícím tlakovou ztrátu je prašnost spalin. Vliv prašnosti spalin na tlakovou ztrátu vyjadřuje rovnice (1.13).

$$\Delta p_p = \Delta p_0 * (1 + C) \quad (1.13)$$

Kde  $\Delta p_0$  [Pa] celková tlaková ztráta v kanálu  
 $C$  [ $\frac{kg}{kg}$ ] koncentrace prachu ve spalinách

## 1.5 Tlakové ztráty ve svazku trubek

Při proudění spalin skrz výměník dochází k mnoha faktorům, jenž mají za následek tlakovou ztrátu. Mezi nejhlavnější z nich patří tření, dělení proudu a změna průtočného průřezu. Pro výpočet tlakové ztráty byla použita rovnice (1.14).

$$\Delta p_v = \xi * n_R * \frac{\rho * w_e^2}{2} \quad (1.14)$$

Kde  $n_R$  [-] Počet trubkových řad  
 $w_e$  [-] Průměrná rychlost spalin ve výměníku

Při výpočtu  $w_e$  je třeba dbát na způsob uspořádání trubkových řad ve výměníku. Typické uspořádání trubkových svazků je popsáno v (obr. 1.1). Výpočet  $w_e$  je pro uspořádání za sebou a střídaně kolmo stejný.

$$w_e = \frac{A}{A-1} * w_f \quad (1.15)$$

Výpočet  $w_e$  pro uspořádání střídaně diagonálně se provede podle rovnice (1.16).

$$w_e = \frac{A}{2 * (C-1)} * w_f \quad (1.16)$$

Kde  $A$  [m] korekční faktor podélné rozteče  
 $C$  [m] korekční faktor diagonální rozteče

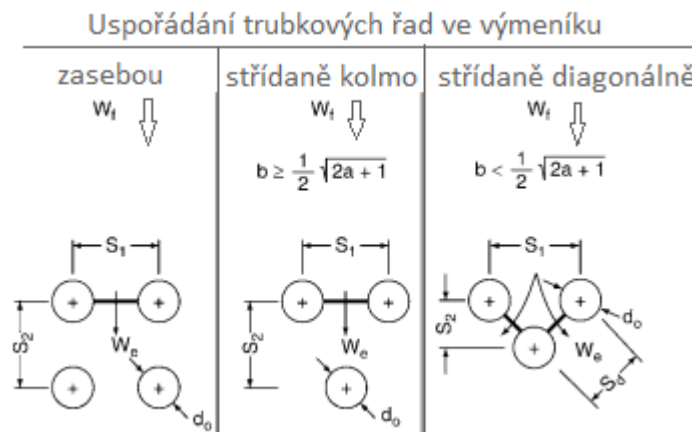
Dalším prvkem závislým na uspořádání trubkových řad je  $n_R$ , který pro uspořádání za sebou a střídaně kolmo odpovídá přímo počtu trubkových řad.

$$n_R = n_{TR} \quad (1.17)$$

Kde  $n_{TR}$  [ks] počet trubkových řad

Pro uspořádání střídaně diagonálně je hodnota  $n_R$  rovna:

$$n_R = n_{TR} - 1 \quad (1.18)$$



Obrázek 1.1 Způsoby uspořádání trubkových řad ve výměníku [2]

Z jednotlivých roztečí je možno spočítat korekční faktory  $A, B$  a  $C$  pro hustotu uspořádání trubkových svazků

$$A = \frac{S_1}{D_0} \quad (1.19)$$

$$B = \frac{S_2}{D_0} \quad (1.20)$$

Uspořádání

Střídaně  
kolmo

$$C = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + B^2} \quad (1.21)$$

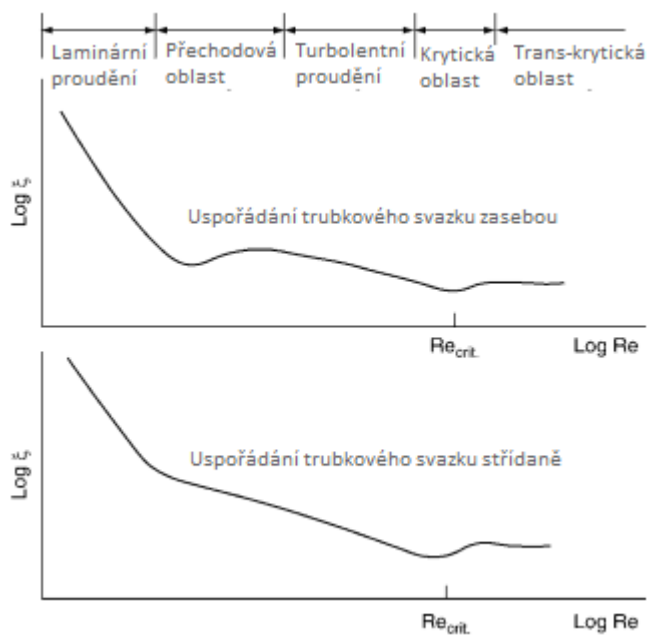
Střídaně  
diagonálně

$$C = \frac{S_d}{D_0} * \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + B^2}$$

Kde  $S_1$  [m] příčná rozteč  
 $S_2$  [m] podélná rozteč  
 $S_d$  [m] diagonální rozteč viz (obr. 1.1)

Ideální trubkový soubor je definován takto: „Fyzikální vlastnosti média jsou nezávislé na teplotě, počtu trubkových řad  $n_R \geq 10$ , počtu trubek v řadě  $> 10$ , poměru délky trubek k jejich průměru  $\geq 10$ , rychlostní profil je v celém průřezu stejný a stěny trubek jsou hladké“ [2], Odporový součinitel  $\xi$  je závislý na Reynoldsově čísle, tuto závislost je možno vidět na (obr. 1.2) a pro ideální trubkový soubor je hodnotu  $\xi$  možno spočítat dle rovnice (1.22).





Obrázek 1.2 Závislost odporového součinitele na Re [2]

$$\xi = \xi_{lam} + \xi_{turb} * F \quad (1.22)$$

$$\xi_{lam} = \frac{f_{a,l}}{Re} \quad (1.23)$$

Uspořádání

Za sebou

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t}}{Re^{0,1 * \frac{B}{A}}} \quad (1.24)$$

Střídaně

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t}}{Re^{0,25}}$$

Za sebou

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{Re + 1000}{2000}\right) \quad (1.25)$$

Střídaně

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{Re + 200}{1000}\right)$$

Za sebou,  
střídaně

$$f_{a,l} = \frac{280 * \pi * ((B^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75)}{(4 * A * B - \pi) * A^{1,6}} \quad (1.26)$$

Střídaně  
diagonálně

$$f_{a,l} = \frac{280 * \pi * ((B^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75)}{(4 * A * B - \pi) * C^{1,6}}$$

Za sebou

$$f_{a,t} = \left( 0,22 + 1,2 * \frac{\left(1 - \frac{0,94}{B}\right)^{0,6}}{(A - 0,85)^{1,3}} \right) * 10^{0,47 * \left(\frac{B}{A} - 1,5\right)} + (0,03 * (A - 1) * (B - 1)) \quad (1.27)$$

Střídane

$$f_{a,t} = 2,5 + \left(\frac{1,2}{(A - 0,85)^{1,08}}\right) + 0,4 * \left(\frac{B}{A} - 1\right)^3 - 0,01 * \left(\frac{A}{B} - 1\right)^3$$

Kde	$\xi_{lam}$	[-]	odporový součinitel laminárního proudění
	$\xi_{turb}$	[-]	odporový součinitel turbulentního proudění
	$F$	[-]	korekční faktor
	$f_{a,l}$	[-]	korekční faktor
	$f_{a,t}$	[-]	korekční faktor

V praxi se ovšem s ideálním trubkovým souborem nesetkáme, proto je potřeba rovnice upravit pomocí korekčních faktorů, které berou v potaz vliv teploty a vliv počtu trubek  $f_{zn,l}$ , vliv izotermického  $f_{n,t}$  a ne izotermického proudění  $f_{z,t}$ . Proto pro výpočet reálných prvků je třeba rovnici upravit na tvar (1.28)

$$\xi = \xi_{lam} * f_{zn,l} + (\xi_{turb} * f_{z,t} + f_{n,t}) * F \quad (1.28)$$

Korekční faktor pro počet trubkových řad  $f_{zn,l}$  byl vypočítán podle situace z rovnic (1.29-1.31)

Pro uspořádání za sebou nebo střídane kolmo a  $n_R < 10$ :

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\mu_w}{\mu_m}\right) \frac{0,57 * \left(\frac{n_R}{10}\right)^{0,25}}{\left(\left(\frac{4 * A * B}{\pi} - 1\right) * Re\right)^{0,25}} \quad (1.29)$$

Pro uspořádání střídane diagonálně a  $n_R < 10$ :

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\mu_w}{\mu_m}\right) \frac{0,57 * \left(\frac{n_R - 1}{10}\right)^{0,25}}{\left(\left(\frac{4 * A * B}{\pi} - 1\right) * Re\right)^{0,25}} \quad (1.30)$$

Pro  $n_R > 10$ :

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\mu_w}{\mu_m}\right) \frac{0,57}{\left(\left(\frac{4 * A * B}{\pi} - 1\right) * Re\right)^{0,25}} \quad (1.31)$$

Kde	$\mu_w$	[Pa * s]	viskozita media při teplotě $T_w$
	$\mu_m$	[Pa * s]	viskozita media při teplotě $T_m$

Korekční faktor pro izotermické proudění  $f_{n,t}$  je možno vypočítat podle rovnic (1.32-1.34)

Pro uspořádání za sebou nebo střídavě kolmo a  $n_R < 10$ :

$$f_{n,t} = \xi_0 * \left( \frac{1}{n_R} - \frac{1}{10} \right) \quad (1.32)$$

Pro střídavě diagonální uspořádání a  $n_R < 10$ :

$$f_{n,t} = \xi_0 * \left( \frac{1}{n_R - 1} - \frac{1}{10} \right) \quad (1.33)$$

Pro  $n_R > 10$ :

$$f_{n,t} = 0 \quad (1.34)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{n,t}$  je závislý na výpočtu korekčního faktoru  $\xi_0$ , jenž bere v potaz náhlou expanzi kanálu.

$\xi_0$  pro uspořádání za sebou nebo střídavě kolmo:

$$\xi_0 = \frac{1}{A^2} \quad (1.35)$$

$\xi_0$  pro uspořádání střídavě diagonálně:

$$\xi_0 = \left( \frac{2 * C - 1}{A * (A - 1)} \right)^2 \quad (1.36)$$

Korekční faktor pro ne izotermické proudění  $f_{z,t}$ :

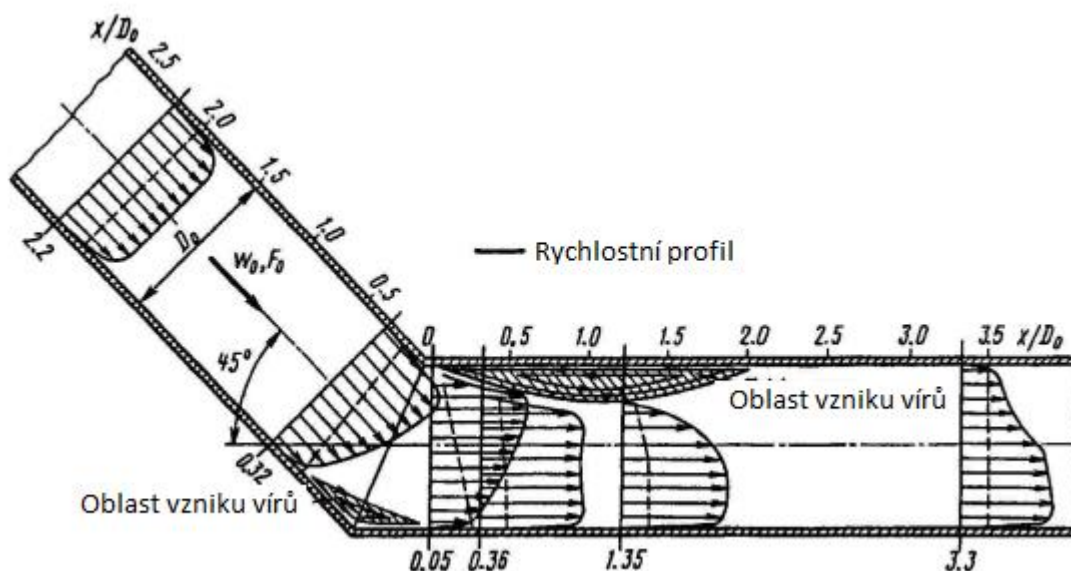
$$f_{z,t} = \left( \frac{\eta_w}{\eta_m} \right)^{0,14} \quad (1.37)$$

## 1.6 Místní tlakové ztráty

Místní tlaková ztráta je nejtěžší na vyčíslení, jelikož neexistuje univerzální vzorec pro její výpočet. Pro různé ohyby a zúžení existují vždy konkrétní vzorce pro parametry daného zařízení. Tyto rovnice se určují empiricky a různé zdroje uvádějí různé rovnice, proto dochází k nepřesnostem při výpočtu.

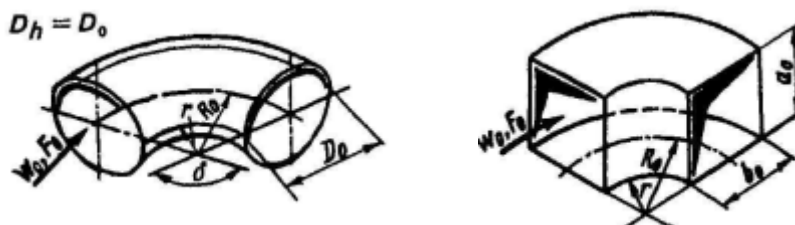
### 1.6.1 Změna směru proudění

Při změně směru proudění se začnou tvořit odstředivé síly, jenž působí od středu zakřivení k vnější straně trubky. Vliv těchto sil se začne projevovat jako nárůst tlaku u vnější stěny ohybu a pokles tlaku u vnitřní stěny. Stejně tak dochází ke změně rychlosti, poklesu na vnější straně a nárůstu na straně vnitřní. Tím dochází k deformaci profilu proudění a vzniku vírů, které mají za následek snížení průtočného průřezu viz (obr 1.3).



Obrázek 1.3 Znáornění profilu proudění při proudění dolů [3]

Pro koleno (obr. 1.4) o parametrech  $\frac{R_0}{D_0} < 3$  a  $\delta \in (0 - 180)^\circ$  se odporový součinitel určí z rovnice (1.38).



Obrázek 1.4 Koleno  $\frac{R_0}{D_0} < 3$  a  $\delta \in (0 - 180)^\circ$  [3]

$$\xi = \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (1.38)$$

$$\xi_{loc} = A * B * C \quad (1.39)$$

$$\xi_{fr} = 0,0175 * \delta * \lambda * \frac{R_0}{D_h} \quad (1.40)$$

Kde  $A$  je korekční faktor závislý na úhlu kolena dle rovnice (1.41-1.43):

$$\delta \leq 70^\circ \quad A = 0,9 * \sin(\delta) \quad (1.41)$$

$$\delta = 90^\circ \quad A = 1 \quad (1.42)$$

$$\delta \geq 100^\circ \quad A = 0,7 + 0,35 * \frac{\delta}{90^\circ} \quad (1.43)$$

Další korekční faktor  $B$  je závislý na poměru  $\frac{R_0}{D_0}$  dle rovnic (1.44 a 1.45):

$$\frac{R_0}{D_0} \in (0,5 - 1) \quad B = 0,21 * \left(\frac{R_0}{D_0}\right)^{-2,5} \quad (1.44)$$

$$\frac{R_0}{D_h} > 1 \quad B = 0,21 * \sqrt{\left(\frac{R_0}{D_0}\right)^{-0,5}} \quad (1.45)$$

Posledním korekčním faktorem je  $C$ , jenž je závislé na tvaru kanálu a poměru  $\frac{a}{b}$  dle rovnic (1.46 -1.48).

$$\text{kruh/čtverec} \quad C = 1 \quad (1.46)$$

$$\text{obdelník} \quad C = 0,85 + \frac{0,125}{a/b} \quad (1.47)$$

$$\frac{a}{b} \leq 4$$

$$\text{obdelník} \quad C = 1,115 - \frac{0,84}{a/b} \quad (1.48)$$

$$\frac{a}{b} \geq 4$$

V případě, že je uvažována i drsnost stěny, se do výpočtu odporového součinitele přiřadí dále i korekční faktory dle rovnice (1.49).

$$\xi = k_\Delta * k_{Re} * \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (1.49)$$

Kde  $k_{\Delta}$ , jenž je závislý na drsnosti a poměru  $\frac{R_0}{D_h}$  byl vyčíslen z (tab. 1.1).

Tabulka 1.1 Korekční faktor  $k_{\Delta}$  závislý na drsnosti potrubí [3]

R <sub>0</sub> /D <sub>0</sub>					
k	0.5-0.55		>0.55		
	Re				
	3*10 <sup>3</sup> -4*10 <sup>4</sup>	>4*10 <sup>4</sup>	3*10 <sup>3</sup> -4*10 <sup>4</sup>	>4*10 <sup>4</sup> -2*10 <sup>5</sup>	>2*10 <sup>5</sup>
0	1	1	1	1	1
0-0.001	1	1+0.5*10 <sup>3</sup> *k	1	λ <sub>k</sub> /λ <sub>sm</sub>	1+k*10 <sup>3</sup>
>0.001	1	1.5	1	2	2

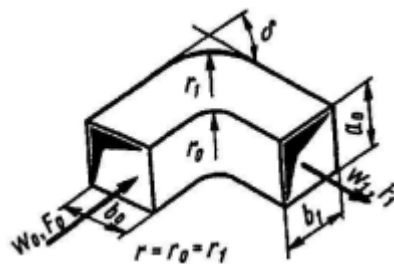
Pro výpočet  $k_{Re}$ , jenž je závislé na  $\frac{R_0}{D_0}$  byla použita rovnice (1.50-1.52).

$$\frac{R_0}{D_0} \in (0,5 - 0,55) \quad k_{Re} = 1 + \frac{4400}{Re} \quad (1.50)$$

$$\frac{R_0}{D_0} \in (0,55 - 0,7) \quad k_{Re} = \frac{5,45}{Re^{0,131}} \quad (1.51)$$

$$\frac{R_0}{D_0} > 0,7 \quad k_{Re} = 1,3 - 0,29 * \ln(Re * 10^{-5}) \quad (1.52)$$

Pro koleno se zaoblenými rohy a změnou průřetného průřezu o parametrech  $\delta \in (0 - 180)^\circ$  a  $\frac{l_0}{D_h} \geq 10$  (obr. 1.5) se odporový součinitel spočítá dle rovnic (1.53-1.55).



Obrázek 1.5 Koleno  $\delta \in (0 - 180)^\circ$  a  $\frac{l_0}{D_h} \geq 10$  [3]

$$\xi = A * C * \xi'' + \xi_{fr} \quad (1.53)$$

$$\xi_{fr} = \left(1 + 0,0175 * \frac{R_0}{D_h} * \delta\right) * \lambda \quad (1.54)$$

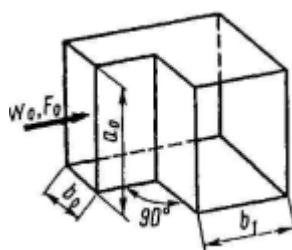
$$\xi'' = \exp\left(-\frac{\left(2,3 * \lg\left(\frac{1}{\xi_0}\right)\right)}{\frac{F_1}{F_0}}\right) \quad (1.55)$$

Kde  $R_0$  [m] radius kolena  
 $\xi_0$  [-] je odporový součinitel kolena o parametrech  $\frac{F_1}{F_0} = 1, \delta = 90^\circ$   
 $F_0, F_1$  [m<sup>2</sup>] obsah průřezu kanálu

V případě drsných stěn se rovnice (1.53) upraví na tvar (1.56) podobně jako rovnice (1.49)

$$\xi = k_\Delta * k_{Re} * A * C * \xi'' + \xi_{fr} \quad (1.56)$$

Pro případ výpočtu odporového součinitele kolena s ostrým ohybem, změnou rozměru pouze v směru  $b$  a úhlem ohybu  $90^\circ$  (obr. 1.6), je nutné použití rovnic (1.57-1.60)



Obrázek 1.6 Koleno s ostrým úhlem a změnou rozměru v jednom směru [3]

$$\frac{l_0}{D_h} \in (0 - 2) \quad \xi = \xi_{loc} \quad (1.57)$$

$$\frac{l_0}{D_h} \geq 10 \quad \xi = 1,05 * \xi_{loc} \quad (1.58)$$

Kde  $l_0$  [m] délka zařízení  
 $\xi_{loc}$  [-] odečteme z (tab. 1.2)

Tabulka 1.2 odporový součinitel  $\xi_{loc}$  pro koleno z obr. 1.6 [3]

a_0/b_0	b_1/b_0						
	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	2
0.25	1.76	1.43	1.24	1.14	1.09	1.06	1.06
1	1.7	1.36	1.15	1.02	0.95	0.9	0.84
4	1.46	1.1	0.9	0.81	0.76	0.72	0.66
1E+69	1.5	1.04	0.79	0.69	0.63	0.6	0.55

V případě, kdy je uvažována drsnost stěn se rovnice (1.57) upraví na tvar (1.59).

$$\xi = k_\Delta * k_{Re} * \xi_{loc} \quad (1.59)$$

$$k_{Re} = \frac{4,06}{Re^{0,118}} \quad (1.60)$$

Pro výpočet hodnoty  $k_{\Delta}$  je použita (tab. 1.3)

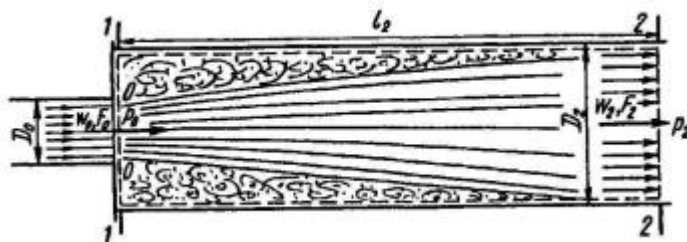
Tabulka 1.3 korekčního faktoru  $k_{\Delta}$  [3]

k	Re*10 <sup>3</sup>	
	3-40	>40
0	1	1
0-0.001	1	1+0.5*10 <sup>3</sup>
>0.001	1	1.5



### 1.6.2 Náhlá změna průřezu

Při náhlém zvětšení průtočného průřezu kanálu dochází ke vzniku tzv. skokových ztrát. Na (obr. 1.7) je vidět, jak v místě náhlého rozšíření dochází ke vzniku tryskového proudu. Při odtržení je proud oddělen od zbytku media silnými vířivými proudy. Vířivé proudy vznikají po délce  $l_2$  než se proudění ustálí po celém průřezu. Velikost  $l_2$  se běžně pohybuje v rozsahu  $8 - 12x D_{h.2}$



Obrázek 1.7 Znázornění proudění při náhlém rozšíření průtočného průměru [3]

Celkový odporový součinitel se spočítá pomocí rovnice (1.61)

$$\xi = \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (1.61)$$

$$\xi_{fr} = \frac{\xi''_{fr}}{n^2} \quad (1.62)$$

$$\xi''_{fr} = \lambda * \frac{l_2}{D_{h.2}} \quad (1.63)$$

Kde  $n$  [–] poměr výstupního a vstupního průtočného průřezu  $\frac{F_1}{F_0}$

V případě rovnoměrného rozložení rychlostního profilu a turbulentního proudění je velikost odporového součinitele  $\xi_{loc}$  úměrná poměru průtočných průřezů před a po rozšíření a může být spočítána z Borda-Carnotovy rovnice (1.64).

$$\xi_{loc} = \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 \quad (1.64)$$

Pro výpočet reálného případu je zapotřebí použít upravené rovnice (1.65) a to z toho důvodu, že rychlostní profil proudění není nikdy rovnoměrný.

$$\xi_{loc} = \frac{1}{n^2} + N - 2 * \frac{M}{n} \quad (1.65)$$

Kde  $N$  [–] Coriolisův koeficient kinetické energie proudu na výstupu užší části  
 $M$  [–] Bousinesquův koeficient hybnosti na výstupu užší části

Výpočet Coriolisova a Bousinesqova koeficientu je závislý na geometrii kanálu a geometrii proudění. Pro kruhový a čtvercový profil kanálu je na výpočet koeficientů použita rovnice (1.66 a 1.67) a pro případ obdélníkového profilu kanálu rovnice (1.68 a 1.69).

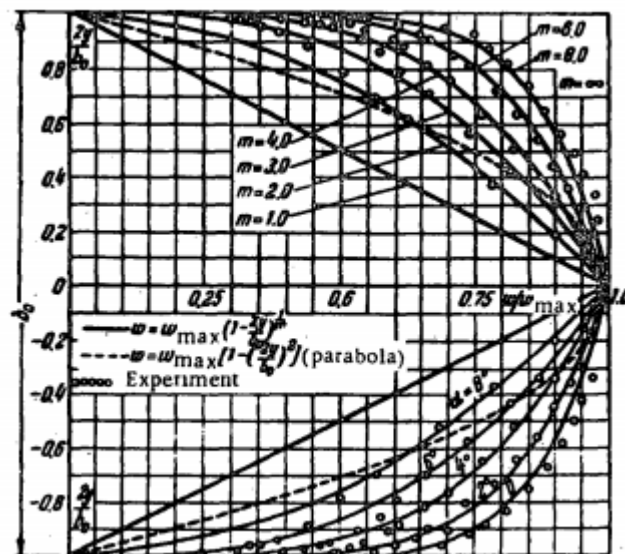
$$N = \frac{(2m + 1)^3 * (m + 1)^3}{4m^4 * (2m + 3) * (m + 3)} \quad (1.66)$$

$$M = \frac{(2m + 1)^2 * (m + 1)}{4m^2 * (m + 2)} \quad (1.67)$$

$$N = \frac{(m + 1)^3}{m^2 * (m + 3)} \quad (1.68)$$

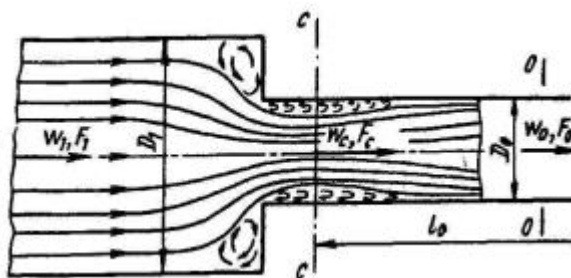
$$M = \frac{(m + 1)^2}{m * (m + 2)} \quad (1.69)$$

Kde  $m$  je koeficient zohledňující geometrii proudění. Nabývá hodnoty mezi 1 a  $\infty$ , kdy  $m = 1$  je trojúhelníkový rychlostní profil a  $m = \infty$  je obdélníkový rychlostní profil viz (obr. 1.8).



Obrázek 1.8 Rychlostní pole difuzoru s uhlím rozvěru do  $8^\circ$  [3]

Případ náhlého zúžení průřového profilu lze popsat stejnými principy jako v případě náhlého rozšíření, kdy v místě zúžení vzniká tryskový proud, který se odtrhává od stěn kanálu, přičemž dochází ke vzniku vířivých proudů, které mají negativní vlastnosti na tlakovou ztrátu viz (obr. 1.9).



Obrázek 1.9 Znárodnění proudění při náhlém zmenšení průtočného průřezu [3]

Celkový odporový součinitel se určí z rovnice (1.70) a odporový součinitel  $\xi''_{fr}$  se spočítá jako v předchozím případě z rovnice (1.63).

$$\xi = \xi_{loc} + \xi''_{fr} \quad (1.70)$$

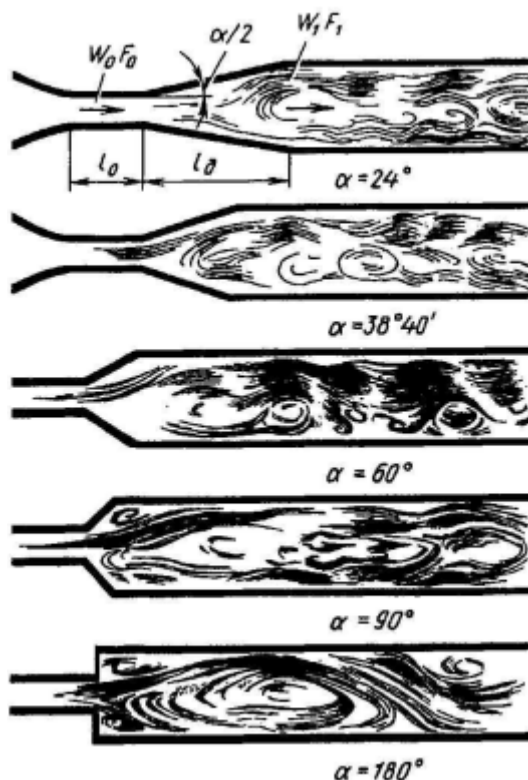
$$\xi_{loc} = 0,5 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (1.71)$$

### 1.6.3 Pozvolná změna průřezu

Difuzor je zařízení, jenž se používá pro přechod kanálu z menšího průměru na větší. Toto zařízení přeměňuje kinetickou energii proudu na energii potenciální nebo dynamický tlak na tlak statický s co nejmenší celkovou tlakovou ztrátou. S úhlem rozšíření difuzoru  $\alpha$  roste i odporový koeficient, a to z důvodu zvětšování turbulencí proudu, odtrhávání mezní vrstvy a vzniku značných vířivých proudů. Vliv velikosti úhlu na režim proudění je možno vidět na (obr. 1.10). Oddělení mezní vrstvy od stěny difuzoru zapříčiňuje nepříznivý gradient tlaku podél stěny difuzoru, jenž vzniká z poklesu rychlosti vyvolanou zvětšením průtočného průřezu.

Pro případ konstantního proudění na vstupu do difuzoru, konstantní délky nebo poměru  $n = \frac{F_1}{F_0}$ , zvyšování úhlu  $\alpha$  od  $\alpha = 0$  vede ke 4 typům proudění:

1. Stabilní režim bez odtrhávání proudu
2. Režim s vysoce nerozvinutým odtrháváním proudu, kde velikost a intenzita odtrhávání je proměnná v čase



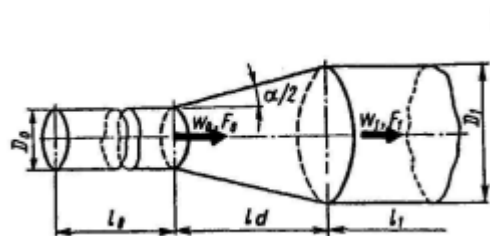
Obrázek 1.10 Rychlostní profily pro difuzory různých úhlů [3]

3. Režim plně vyvinutého odtrhávání proudu, kde majorita difuzoru je vyplněna rozsáhlým zpětným prouděním
4. Režim tryskového proudění, kde hlavní proud je odtržen od stěn difuzoru po celém průřezu

Výpočet odporového koeficientu pro kruhový difuzor s  $\alpha < 40^\circ$  a laminárním prouděním je možno provést podle rovnic (1.72-1.73). Ovšem laminární proudění v reálných případech s největší pravděpodobností nenastane, proto je třeba zvolit jiný postup výpočtu. Pro výpočet obecného konického difuzoru s maximálním úhlem  $\alpha = 40^\circ$  (obr. 1.11), bude zapotřebí rovnice (1.74-1.76) a pro případ obdélníkového profilu (obr. 1.12) rovnice (1.77-1.79).

$$\xi = \frac{A}{Re} \quad (1.72)$$

$$A = \frac{20 * n^{0,33}}{\tan \alpha^{0,75}} \quad (1.73)$$

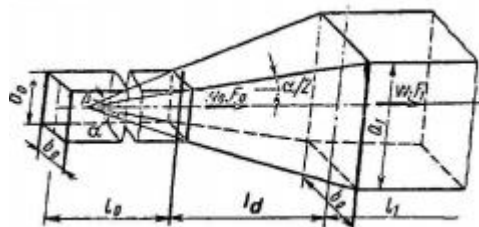


Obrázek 1.11 Konický difuzor s maximálním úhlem  $\alpha = 40^\circ$  [3]

$$\xi = \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (1.74)$$

$$\xi_{loc} = 3,2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \sqrt[4]{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2} \quad (1.75)$$

$$\xi_{fr} = \frac{\lambda}{8 * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} * \left(1 - \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) \quad (1.76)$$



Obrázek 1.12 Obdélníkový difuzor s maximálním úhlem  $\alpha = 40^\circ$  [3]

$$\xi = \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (1.77)$$

$$\xi_{loc} = 4 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \sqrt[4]{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2} \quad (1.78)$$

$$\xi_{fr} = \frac{\lambda}{16 * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} * \left(1 - \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) + \frac{\lambda}{16 * \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} * \left(1 - \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) \quad (1.79)$$

Tyto rovnice mají to omezení, že fungují pouze pro  $\alpha \leq 40^\circ$ . Pro případy použití difuzoru o větším rozvěrném úhlu, je třeba použít výpočtu z (tab. 1.4) pro konický tvar a z (tab. 1.5) pro obdélníkový tvar. Nevýhodou tabulek je, že jsou vázány na konkrétní poměr vstupního a výstupního průřezu, proto výpočet z tabulkových hodnot je nepřesný a v případech, kdy to lze učinit, je vhodné se mu vyhnout.

Tabulka 1.4 Tabulka hodnot součinitele odporu pro konický difuzor s  $\frac{F_1}{F_0} = 2$  [3]

ξ pro případ, kdy (F_1/F_0)=2								
Re*10 <sup>5</sup>	α							
	3	4	6	8	10	12	14	16
0.5	0.148	0.135	0.121	0.112	0.107	0.109	0.12	0.141
1	0.12	0.106	0.09	0.083	0.08	0.088	0.102	0.122
2	0.093	0.082	0.07	0.068	0.062	0.062	0.063	0.073
>4	0.079	0.068	0.056	0.048	0.048	0.048	0.051	0.051

ξ pro případ, kdy (F_1/F_0)=2								
Re*10 <sup>5</sup>	α							
	20	30	45	60	90	120	180	
0.5	0.191	0.315	0.331	0.326	0.315	0.308	0.298	
1	0.196	0.298	0.297	0.286	0.283	0.279	0.276	
2	0.12	0.229	0.279	0.268	0.268	0.265	0.263	
>4	0.068	0.12	0.271	0.272	0.272	0.268	0.268	

Tabulka 1.5 Tabulka hodnot součinitele odporu pro obdélníkový difuzor s  $\frac{F_1}{F_0} = 2$  [3]

ξ pro případ, kdy (F_1/F_0)=2							
Re*10 <sup>5</sup>	α						
	4	6	8	10	12	14	16
0.5	0.14	0.136	0.135	0.152	0.175	0.2	0.235
1	0.11	0.11	0.105	0.13	0.16	0.185	0.2
2	0.095	0.09	0.095	0.116	0.15	0.175	0.18
>4	0.085	0.085	0.09	0.112	0.145	0.175	0.185

ξ pro případ, kdy (F <sub>1</sub> /F <sub>0</sub> )=2							
Re*10 <sup>5</sup>	α						
	20	30	45	60	90	120	180
0.5	0.25	0.3	0.235	0.326	0.325	0.32	0.3
1	0.23	0.27	0.3	0.315	0.31	0.31	0.3
2	0.216	0.25	0.285	0.31	0.315	0.325	0.3
>4	0.22	0.25	0.285	0.31	0.315	0.325	0.31

Opakem difuzoru je konfuzor, což je zařízení sloužící pro přechod z většího průřezu na menší. Odporový součinitel konfuzorů s přímým profilem stěn závisí na uhlu zúžení, na poměru vstupního a výstupního průřezu a při nízkých rychlostech na Re. Pro laminární proudění a  $\alpha < 40^\circ$  můžeme pro výpočet konfuzoru použít rovnice (1.80-1.81). Pro více obecné použití použijeme rovnice (1.82-1.83)

$$\xi = \frac{A}{Re} \quad (1.80)$$

$$A = \frac{20,5}{n^{0,5} * \tan \alpha^{0,75}} \quad (1.81)$$

$$\xi = (-0,0125 * n^4 + 0,0224 * n^3 - 0,00723 * n^2 + 0,0044 * n - 0,00745) * (\alpha^3 - 2 * \pi * \alpha^2 - 10 * \alpha) * \xi_{fr} \quad (1.82)$$

$$\xi_{fr} = \frac{\lambda}{8 * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} * \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \quad (1.83)$$

## 2 Sestavení výpočtu v excelu

Jako prostředí pro vytvoření programu byl zvolen excel, není to nejvhodnější prostředí pro tvoření programů tohoto typu, ovšem excel je velmi rozšířený a obsluhovat jej umí většina populace. To byl jeden z nejdůležitějších faktorů pro výběr prostředí programu, aby po jeho kompletaci mohl být používán libovolnou osobou. Program je pomocí příkazů „když“ větven tak, že stačí pro uživatele zadat pouze vstupní parametry, které program zpracuje a vybírá vhodné rovnice a konstanty v závislosti na vstupu uživatele.

### 2.1 List1 (Třecí, výškové a dynamické ztráty)

V prvním listu byl sestaven výpočet pro třecí, výškové a dynamické ztráty.

#### 2.1.1 Třecí

Pro výpočet třecích ztrát je nejprve zapotřebí znát tyto vstupní parametry:

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok

$T_m$  – průměrná teplota spalin v úseku

$T_w$  – průměrná teplota stěny v úseku; v případě, že není známo  $T_w$ , lze použít

$T_w = T_m + 50$

$\mu_0$  – dynamická viskozita

$\rho$  – hustota spalin

$L$  – délka úseku

$a(D_0)$  – rozměr spalinovodu

$b$  – rozměr spalinovodu

$k$  – drsnost povrchu

Jakmile jsou známy všechny vstupní parametry, je možno začít s výpočtem třecích ztrát. Nejprve je zapotřebí přepočítat viskozitu a objemový průtok spalin pro danou teplotu  $T_m$ .

$$Q_v = Q_v^n * \frac{T_m + 273,15}{273,15} \quad (2.1)$$

Pro výpočet viskozity byl použit Sutherlandův vzorec, kde  $C$  je konstanta specifická pro daný plyn. Pro jednoduchost výpočtu je uvažováno, že se spaliny skládají pouze z  $CO_2$ , jehož hodnota je  $C = 254$ .

$$\mu = \mu_0 * \frac{273,15 + C}{T_m + C} * \left( \frac{T_m}{273,15} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.2)$$

Pokud by bylo žádáno docílit přesnějších výpočtů, bylo by potřeba znát chemické složení spalin a hmotnostní koncentrace jednotlivých složek. Pak by hodnota  $C$  mohla být vypočtena dle rovnice:

$$C = \frac{\sum_{i=1} (C_i * m_i)}{\sum_{i=1} m_i} \quad (2.3)$$

Dále je určen ekvivalentní hydraulický průměr kanálu  $d_e$ , jenž je závislý na tvaru kanálu. Pro kruhový a čtvercový kanál je hodnota  $d_e = D_0$ , pro obdélníkový kanál:

$$d_e = \frac{2 * a * b}{a + b} \quad (2.4)$$

Dalším krokem je výpočet rychlosti proudění spalin ve spalinovém kanálu:

$$w_f = \frac{Q_v}{S} \quad (2.5)$$

Kde  $S$  [ $m^2$ ] je průřez kanálu

Z rychlosti je nadále spočítáno Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{\rho * w_f * d_e}{\mu} \quad (2.6)$$

Dále výpočet ztrátového součinitele  $\lambda$ :

$$\lambda = -2 * \log\left(\frac{k}{3,71 * d_e}\right)^{-2} \quad (2.7)$$

A nakonec výpočet tlakové ztráty třením:

$$\Delta p_t = \lambda * \frac{L}{d_e} * \frac{w_f^2}{2} * \rho_m * \left(\frac{T_m}{T_w}\right)^{0,583} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 Výškové

Pro výpočet ztrát změnou výšky je nejprve potřeba znát tyto vstupní parametry:

$\Delta h$  – výškový rozdíl úseku

$\rho$  – hustota spalin

Ze vstupních parametrů pak podle rovnice (2.9) byly vyčísleny ztráty změnou výšky:

$$\Delta p_h = 9,81 * \rho_m * \Delta h \quad (2.9)$$

### 2.1.3 Dynamické

Pro výpočet dynamické ztráty je nejprve potřeba znát tyto vstupní parametry:

$\rho$  – hustota spalin

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok

$a(D_0)$  – rozměr spalinovodu

$b$  – rozměr spalinovodu

$T_m$  – průměrná teplota spalin v úseku



Nejprve je opět potřeba přepočítat objemový průtok pro danou teplotu  $T_m$  dle rovnice (2.1), dále spočítat rychlost proudění spalin dle rovnice (2.5) a nakonec je proveden výpočet pro dynamickou ztrátu  $\Delta p_d$ .

$$\Delta p_d = \rho_m * \frac{w_f^2}{2} \quad (2.10)$$

## 2.2 List2 (Proudění skrz výměník)

Vstupní parametry pro výpočet tlakové ztráty při proudění skrz výměník:

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok

$T_m$  – průměrná teplota spalin v úseku

$T_w$  – průměrná teplota stěny v úseku; v případě, že není známo  $T_w$ , lze použít

$T_w = T_m + 50$

$\mu_0$  – dynamická viskozita

$\rho$  – hustota spalin

$a$  – rozměr spalinovodu

$b$  – rozměr spalinovodu

$S_1$  – příčná rozteč trubek výměníku

$S_2$  – podélná rozteč trubek výměníku

$S_d$  – diagonální rozteč trubek výměníku

$d_0$  – průměr trubek

$n_R$  – počet trubkových řad

Také je zapotřebí znát způsob uspořádání trubek viz (obr. 1.1). Jakmile jsou známy všechny vstupní parametry, je možno započít výpočet. Nejprve byly vypočítány poměry jednotlivých roztečí svazku trubek

Poměr příčné rozteče:

$$A = \frac{S_1}{d_0} \quad (2.11)$$

Poměr podélné rozteče:

$$B = \frac{S_2}{d_0} \quad (2.12)$$

Poměr diagonální rozteče pro uspořádání střídavě kolmo:

$$C = \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + B^2} \quad (2.13)$$

Poměr diagonální rozteče pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále:

$$C = \frac{S_d}{d_0} * \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + B^2} \quad (2.14)$$

Jakmile jsou spočítány poměry roztečí, následuje vyčíslení přepočtu normálového objemového průtoku na teplotu  $T_m$  dle rovnice (2.1), dále výpočet hodnoty rychlosti proudění spalin před vstupem na výměník rovnice (1.5). Jakmile jsou známy rychlost proudění provede se výpočet rychlosti proudění spalin skrz výměník.

Pro uspořádání za sebou a střídaně:

$$w_e = \frac{A * w_f}{A - 1} \quad (2.15)$$

Pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále:

$$w_e = \frac{A * w_f}{2 * (C - 1)} \quad (2.16)$$

Další na řadě je výpočet součinitele odporu  $\xi_0$ , jenž se spočítá pro uspořádání za sebou a střídaně:

$$\xi_0 = \frac{1}{A^2} \quad (2.17)$$

A pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále:

$$\xi_0 = \left( \frac{2 * C - 1}{A * (A - 1)} \right)^2 \quad (2.18)$$

Přepočet dynamické viskozity a výpočet Reynoldsova čísla se provede dle rovnic (2.2 a 2.6). Dále se výpočty budou věnovat korekčním faktorům.

Faktor  $f_{a,l}$  pro uspořádání za sebou a střídaně:

$$f_{a,l} = \frac{280 * \pi * ((B^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75)}{(4 * A * B - \pi) * A^{1,6}} \quad (2.19)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{a,l}$  pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále:

$$f_{a,l} = \frac{280 * \pi * ((B^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75)}{(4 * A * B - \pi) * C^{1,6}} \quad (2.20)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{a,t}$  pro uspořádání za sebou:

$$f_{a,t} = \left( 0,22 + 1,2 * \frac{\left(1 - \frac{0,94}{B}\right)^{0,6}}{(A - 0,85)^{1,3}} \right) * 10^{0,47 * \left(\frac{B}{A} - 1,5\right)} + (0,03 * (A - 1) * (B - 1)) \quad (2.21)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{a,t}$  pro střídavé uspořádání:

$$f_{a,t} = 2,5 + \left( \frac{1,2}{(A - 0,85)^{1,08}} \right) + 0,4 * \left( \frac{B}{A} - 1 \right)^3 - 0,01 * \left( \frac{A}{B} - 1 \right)^3 \quad (2.22)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{z,t}$ :

$$f_{z,t} = \left(\frac{\eta_w}{\eta_m}\right)^{0,14} \quad (2.23)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{zn,l}$  pro uspořádání za sebou nebo střídavě a  $n_R < 10$ :

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\eta_w}{\eta_m}\right)^{\frac{0,57 * \left(\frac{n_R}{10}\right)^{0,25}}{\left(\left(\frac{4 * A * B}{\pi} - 1\right) * Re\right)^{0,25}}} \quad (2.24)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{zn,l}$  pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále a  $n_R < 10$ :

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\eta_w}{\eta_m}\right)^{\frac{0,57 * \left(\frac{n_R - 1}{10}\right)^{0,25}}{\left(\left(\frac{4 * A * B}{\pi} - 1\right) * Re\right)^{0,25}}} \quad (2.25)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{zn,l}$  pro  $n_R > 10$ :

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\eta_w}{\eta_m}\right)^{\frac{0,57}{\left(\left(\frac{4 * A * B}{\pi} - 1\right) * Re\right)^{0,25}}} \quad (2.26)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{n,t}$  pro uspořádání za sebou nebo střídavě a  $n_R < 10$ :

$$f_{n,t} = \xi_0 * \left(\frac{1}{n_R} - \frac{1}{10}\right) \quad (2.27)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{n,t}$  pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále a  $n_R < 10$ :

$$f_{n,t} = \xi_0 * \left(\frac{1}{n_R - 1} - \frac{1}{10}\right) \quad (2.28)$$

Výpočet korekčního faktoru  $f_{n,t}$  pro  $n_R > 10$ :

$$f_{n,t} = 0 \quad (2.29)$$

Výpočet korekčního faktoru  $F$  pro uspořádání za sebou:

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{Re + 1000}{2000}\right) \quad (2.30)$$

Výpočet korekčního faktoru  $F$  pro uspořádání střídaně:

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{Re + 200}{1000}\right) \quad (2.31)$$

Výpočet odporového součinitele  $\xi_{lam}$ :

$$\xi_{lam} = \frac{f_{a,l}}{Re} \quad (2.32)$$

Výpočet odporového součinitele  $\xi_{turb}$  pro uspořádání za sebou:

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t}}{Re^{0,1 \cdot \frac{B}{A}}} \quad (2.33)$$

Výpočet odporového součinitele  $\xi_{turb}$  pro uspořádání střídaně:

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t}}{Re^{0,25}} \quad (2.34)$$

Výpočet výsledného odporového součinitele  $\lambda$ :

$$\lambda = \xi_{lam} * f_{zn,l} + (\xi_{turb} * f_{z,t} + f_{n,t}) * F \quad (2.35)$$

Výpočet tlakové ztráty  $\Delta p_v$  pro uspořádání za sebou a střídaně:

$$\Delta p_v = \lambda * n_R * \frac{\rho_m * w_e^2}{2} \quad (2.36)$$

Výpočet tlakové ztráty  $\Delta p_v$  pro střídavé uspořádání s nejužším průtokem v diagonále:

$$\Delta p_v = \lambda * (n_R - 1) * \frac{\rho_m * w_e^2}{2} \quad (2.37)$$

### 2.3 List3 (Místní tlaková ztráta)

Výpočet místní tlakové ztráty je nejsložitější, jelikož existuje mnoho rovnic pro výpočet součinitele odporu  $\xi$  pro různé typy změn průřezu a směru proudění. Pro tento program bylo vybráno těchto 7 případů místních odporů, jelikož toto jsou jedny z nejčastějších případů místních ztrát, jež mohou ve spalínovodu nastat.

Místní tlaková ztráta  $\Delta p_m$  se vypočítá podle rovnice (1.1). Nejprve je však nutné určit hodnotu součinitele odporu  $\xi$ . Jako první je výpočet odporového součinitele pro koleno o  $90^\circ$ . Pro výpočet tohoto odporu jsou potřeba tyto vstupní parametry:

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok  
 $T_m$  – průměrná teplota spalín v úseku  
 $T_w$  – průměrná teplota stěny v úseku  
 $\mu$  – kinematičká viskozita  
 $\rho$  – hustota spalín  
 $a_0(D_0)$  – rozměr spalínovodu  
 $b_0$  – rozměr spalínovodu  
 $R_0$  – radius kolena  
 $Re$  – Reynoldsovo číslo  
 $k$  – drsnost kanálu  
 $F_0, F_1$  – obsah průřezu kanálu

Jako první se vypočítá poměr  $R_0/D_0$ , dále korekční faktory A a C, jenž jsou oba pro čtvercový a kruhový průměr = 1. Korekční faktor B je závislý na poměru  $R_0/D_0$  dle rovnic:

$$\frac{R_0}{D_0} > 1 \quad B = 0,21 * \left(\frac{R_0}{D_0}\right)^{-\frac{1}{0,5}} \quad (2.38)$$

$$\frac{R_0}{D_0} \in (0,5 - 1) \quad B = 0,21 * \left(\frac{R_0}{D_0}\right)^{-2,5} \quad (2.39)$$

V případě obdélníkového průřezu je hodnota koeficientu C závislá na poměru  $a_0/b_0$ :

$$\frac{a_0}{b_0} < 4 \quad C = 0,85 + \left(\frac{0,125}{\frac{a_0}{b_0}}\right) \quad (2.40)$$

$$\frac{a_0}{b_0} > 4 \quad C = 1,115 - \left(\frac{0,84}{\frac{a_0}{b_0}}\right) \quad (2.41)$$

Po výpočtu všech tří korekčních faktorů je spočítán třetí součinitel odporu  $\xi_{loc}$ :

$$\xi_{loc} = A * B * C \quad (2.42)$$

Poté součinitel odporu  $\xi_{fr}$ :

$$\xi_{fr} = 0,0175 * 90 * \lambda * \left(\frac{R_0}{D_h}\right) \quad (2.43)$$

Konečný součinitel odporu  $\xi$  se spočítá:

$$\xi = \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (2.45)$$

Místní tlaková ztráta  $\Delta p_m$  je poté:

$$\Delta p_m = \xi * \rho * \frac{w^2}{2} \quad (2.46)$$

Pokud je známa drsnost  $k$  je možno spočítat odporový součinitel z rovnice:

$$\xi = k_{\Delta} * k_{Re} * \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (2.47)$$

Kde  $k_{\Delta}$  je závislé na poměru  $R_0/D_0$  a velikosti  $Re$ , pro:

$$\begin{array}{l} \frac{R_0}{D_0} < 0,55 \\ Re < 4 * 10^4 \end{array} \quad k_{\Delta} = 1 \quad (2.48)$$

$$\begin{array}{l} \frac{R_0}{D_0} < 0,55 \\ Re > 4 * 10^4 \end{array} \quad k_{\Delta} = 1 + 0,5 * 10^3 * k \quad (2.49)$$

$$\begin{array}{l} \frac{R_0}{D_0} > 0,55 \\ Re < 4 * 10^4 \end{array} \quad k_{\Delta} = 1 \quad (2.50)$$

$$\begin{array}{l} \frac{R_0}{D_0} > 0,55 \\ Re > 4 * 10^4 \end{array} \quad k_{\Delta} = 1 + k * 10^3 \quad (2.51)$$

Dále  $k_{Re}$  je závislé na poměru  $R_0/D_0$  pro:

$$\frac{R_0}{D_0} \in (0,5 - 0,55) \quad k_{Re} = 1 + \frac{4400}{Re} \quad (2.52)$$

$$\frac{R_0}{D_0} \in (0,55 - 0,7) \quad k_{Re} = \frac{5,45}{Re^{0,131}} \quad (2.53)$$

$$\frac{R_0}{D_0} > 0,7 \quad k_{Re} = 1,3 - 0,29 * \ln(Re * 10^{-5}) \quad (2.54)$$

Druhý případ koleno o úhlu 90° se změnou průřezu, pro výpočet tohoto odporu jsou potřeba tyto vstupní parametry:

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok  
 $T_m$  – průměrná teplota spalin v úseku  
 $T_w$  – průměrná teplota stěny v úseku  $\mu$  – kinematická viskozita  
 $\rho$  – hustota spalin  
 $a_0(D_0)$  – rozměr spalinovodu  
 $b_0$  – rozměr spalinovodu  
 $a_1$  – rozměr spalinovodu  
 $b_1$  – rozměr spalinovodu  
 $R_0$  – radius kolena  
 $Re$  – Reynoldsovo číslo  
 $k$  – drsnost kanálu

Postup výpočtu je podobný jako u minulého případu. Vypočteny byly všechny hodnoty až po konečný součinitel odporu  $\xi_0$ , poté je třeba vyčíslit hodnotu součinitele odporu  $\xi_{fr.1}$ .

$$\xi_{fr.1} = 1 + 0,0175 * 90 * \lambda * \left(\frac{R_0}{D_h}\right) \quad (2.55)$$

Dále hodnotu součinitele  $\xi'$ :

$$\xi' = EXP\left(-\frac{\left(2,3 * \ln\left(\frac{1}{\xi_0}\right)\right)}{\frac{F_1}{F_0}}\right) \quad (2.56)$$

A nakonec je možno spočítat výsledný odporový součinitel  $\xi$ :

$$\xi = \xi_{fr.1} + \xi' * A * C \quad (2.57)$$

Pokud se jedná o drsné potrubí je třeba využít vztah:

$$\xi = \xi_{fr.1} + \xi' * A * C * k_\Delta * k_{Re} \quad (2.58)$$

Třetím případem je ostré koleno se změnou rozměru pouze v směru  $b$  a úhlem ohybu 90°. Pro výpočet tohoto případu jsou potřeba tyto vstupní parametry:

$a_0(D_0)$  – rozměr spalinovodu  
 $b_0$  – rozměr spalinovodu  
 $b_1$  – rozměr spalinovodu  
 $Re$  – Reynoldsovo číslo  
 $k$  – drsnost kanálu

Pro výpočet tohoto typu místního odporového součinitele je třeba využít kombinaci výpočtu z rovnic a odečtu z tabulek, kdy jako první byla odečtena hodnota  $\xi_{loc}$  z (tab. 1.2) a hodnota  $k_{\Delta}$  z (tab. 1.3). Poté je z odečtených hodnot spočítán celkový odporový součinitel:

$$\frac{l_0}{D_h} \in (0 - 2) \quad \xi = k_{\Delta} * k_{Re} * \xi_{loc} \quad (2.59)$$

$$\frac{l_0}{D_h} \geq 10 \quad \xi = 1,05 * k_{\Delta} * k_{Re} * \xi_{loc} \quad (2.60)$$

$$k_{Re} = \frac{4,06}{Re^{0,118}} \quad (2.61)$$

Pro případ, že se neuvažuje drsnost stěn se hodnoty  $k_{\Delta}$  a  $k_{Re} = 1$

Čtvrtým případem je náhlé zvětšení průřezu. Pro výpočet tohoto typu odporu je potřeba znát tyto parametry:

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok

$T_m$  – průměrná teplota spalin v úseku

$T_w$  – průměrná teplota stěny v úseku, v případě, že není známo  $T_w$ , lze použít

$$T_w = T_m + 50$$

$\mu$  – kinematická viskozita

$\rho$  – hustota spalin

$a_0(D_0)$  – rozměr spalinovodu

$b_0$  – rozměr spalinovodu

$a_1$  – rozměr spalinovodu

$b_1$  – rozměr spalinovodu

$l$  – délka zařízení

$Re$  – Reynoldsovo číslo

$F_0, F_1$  – obsah průřezu kanálu

Jako první je spočítáno  $n_{ar}$ :

$$n_{ar} = \frac{F_1}{F_0} \quad (2.62)$$

Dále  $\xi_{loc}$ , jež je závislé na  $Re$ , pro:

$$Re > 3,3 * 10^3 \quad \xi_{loc} = \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 \quad (2.63)$$



$$\begin{aligned} \xi_{loc} = & -8,44556 - 26,163 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 - 5,38086 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4 \\ & + \ln(Re) * \left(6,007 + 18,5372 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 + 3,9978 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4\right) \\ & + \ln(Re)^2 * \left(-1,02318 - 3,0916 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 - 0,680943 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4\right) \end{aligned} \quad (2.64)$$

$500 < Re < 3,3 * 10^3$

$$\begin{aligned} \xi_{loc} = & 3,62536 + 10,744 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 - 4,41041 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4 \\ & + \frac{1}{\ln(Re)} * \left(-18,13 - 56,77855 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 + 33,40344 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4\right) \\ & + \frac{1}{\ln(Re)^2} * \left(30,8558 + 99,9542 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 - 62,78 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4\right) \\ & + \frac{1}{\ln(Re)^3} * \left(-13,217 - 53,9555 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^2 + 33,8053 * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^4\right) \end{aligned} \quad (2.65)$$

$10 < Re < 500$

$$Re < 10 \quad \xi_{loc} = \frac{30}{Re} \quad (2.66)$$

Poté je spočítán odporový součinitel  $\xi_{fr}$ :

$$\xi_{fr} = \lambda * \frac{l}{D_{h.1}} \quad (2.67)$$

Nakonec se vyčíslí výsledný odporový součinitel  $\xi$ :

$$\xi = \xi_{loc} + \frac{\xi_{fr}}{n_{ar}^2} \quad (2.68)$$

Případ pět, náhlé zmenšení průřezu s  $Re < 10$ . Pro výpočet tohoto typu odporu je potřeba znát tyto parametry:

$Q_v^n$  – normálový objemový průtok

$T_m$  – průměrná teplota spalin v úseku

$T_w$  – průměrná teplota stěny v úseku, v případě, že není známo  $T_w$ , lze použít

$T_w = T_m + 50$

$\mu$  – kinematická viskozita

$\rho$  – hustota spalin

$a_0(D_0)$  – rozměr spalinovodu

$b_0$  – rozměr spalinovodu

$a_1$  – rozměr spalinovodu

$b_1$  – rozměr spalinovodu

$l$  – délka zařízení

$Re$  – Reynoldsovo číslo

$F_0, F_1$  – obsah průřezu kanálu

Začne se s výpočtem součinitele  $\xi_{loc}$ :

$$\xi_{loc} = \frac{30}{Re} \quad (2.69)$$

Dále se spočítá součinitel  $\xi_{fr}$ :

$$\xi_{fr} = \lambda * \frac{l}{D_{h,1}} \quad (2.70)$$

A nakonec výsledný odporový součinitel  $\xi$ :

$$\xi = \xi_{loc} + \xi_{fr} \quad (2.71)$$

Pro případ náhlého zmenšení průřezu a  $10 < Re < 10^4$  se postupuje podobně jako u předchozího případu, kdy požadované vstupní parametry jsou stejné. Stejně tak výpočet  $\xi_{fr}$  a  $\xi$  je také stejný. Rovnice se změní jen pro výpočet  $\xi_{loc}$ :

$$\xi_{loc} = A * B * \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right) \quad (2.72)$$

Výpočet hodnot  $A$  je proveden podle rovnice:

$$A = -25,12458 * \ln(Re)^0 + 118,5076 * \ln(Re)^1 - 170,4147 * \ln(Re)^2 + 118,1949 * \ln(Re)^3 - 44,4214 * \ln(Re)^4 + 9,09524 * \ln(Re)^5 - 0,9244027 * \ln(Re)^6 + 0,03408265 * \ln(Re)^7 \quad (2.73)$$

Výpočet hodnoty  $B$  je závislý na hodnotě  $Re$ :

$$B = \left(1,07 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^0 + 0,05 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^1 + 0 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) * \ln(Re)^0 + \left(1,22 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^0 - 0,51668 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^1 + 0 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) * \ln(Re)^1 + \left(2,9333 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^0 + 0,8333 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^1 + 0 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) * \ln(Re)^2 \quad (2.74)$$

$10 < Re < 2 * 10^3$

$$B = \left(0,5443 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^0 - 0,06518 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^1 + 0,05239 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) * \ln(Re)^0 + \left(-17,298 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^0 + 8,7616 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^1 - 1,1093 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) * \ln(Re)^1 + \left(-40,715 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^0 + 22,782 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^1 - 3,1509 * \left(\frac{F_0}{F_1}\right)^2\right) * \ln(Re)^2 \quad (2.75)$$

$B2 * 10^3 < Re < 10^4$

Poslední případy šest a sedm se zabývají konfuzorem a difuzorem kruhového průřezu pro oba případy max hodnota  $\alpha = 40^\circ$ . Vstupní parametry potřebné pro výpočet:

$D_0$  – průměr užší části  
 $D_1$  – průměr širší části  
 $\alpha$  – úhel difuzoru  
 $F_0, F_1$  – obsah průřezu kanálu

Pro difuzor se začne s výpočtem  $n_{ar}$ :

$$n_{ar} = \frac{F_1}{F_0} \quad (2.76)$$

Poté se vypočítá hodnota  $A$  dle:

$$A = \frac{20 * n_{ar}^{0,33}}{tg(\alpha)^{0,75}} \quad (2.77)$$

A nakonec vypočet  $\xi$ :

$$\xi = \frac{A}{Re} \quad (2.78)$$

Pro konfuzor se změní výpočet hodnoty  $A$  jinak ostatní rovnice zůstávají stejné.

$$A = \frac{20,5}{n_{ar}^{0,5} * tg(\alpha)^{0,75}} \quad (2.79)$$

### 3 Ověření funkčnosti programu

Pro ověření funkčnosti programu byl vybrán kotel na spalování slámy  $M_p = \frac{30t}{h}$ ,  $p_p = 4MPa$ ,  $T_p = 400^\circ C$  od firmy PBS umístěný v Kutné Hoře. Firmou PBS byly poskytnuty všechny potřebné vstupní informace nutné pro výpočet tahových ztrát. Výpočet byl proveden po cestě spalin. Jednotlivé odpory jsou rozděleny do několika úseků  $U_i$ , dle výkresu kotle viz (obr. 3.1). Jako první byla vypočítána ztráta na mříži při vstupu do prvního tahu  $U_1$ , dále místní ztráta změnou směru  $U_2$  a nakonec byla vyčíslena ztráta pro celý první tah  $U_3$ . Při přechodu mezi prvním a druhým tahem je potřeba vypočítat ztrátu obrátové komory, v níž dochází i ke změně průtočného průřezu  $U_4$ . Druhý tah je vyplněn přehříváky páry, pro něž byla spočítána tlaková ztráta pro výměník  $U_5$  a pro meziprostor mezi výměníky je potřeba spočítat třecí ztrátu a dynamickou ztrátu druhého tahu  $U_6$ . Na konci druhého tahu je opět obrátová komora se změnou průtočného průřezu  $U_7$ . Za obrátovou komorou ve třetím tahu následuje soubor ekonomizérů  $U_8$ . Opět je vypočítána ztráta třením pro meziprostor výměníků třetího tahu a dynamická ztráta  $U_9$ . Na konci třetího tahu se nachází změna směru proudění a průtočného průřezu  $U_{10}$ . Všechny hodnoty vypočtené programem a porovnané s naměřenou tlakovou ztrátou, jsou uvedeny v (tab. 3.1). Odchylka 4 % je přijatelná, a proto je možno program prohlásit za funkční.

Tabulka 3.1 Tabulka hodnot tlakových ztrát tahu kotle viz obr. 3.1

Značení úseku	Tlaková ztráta úseku	
U_1	19.96	Pa
U_2	21.494	Pa
U_3	26.51	Pa
U_4	37.058	Pa
U_5	115.189	Pa
U_6	8.424	Pa
U_7	249.769	Pa
U_8	126.273	Pa
U_9	4.853	Pa
U_10	4.63	Pa
$\Delta p_h$	-204.048	Pa
Vypočtená tlaková ztráta	410.112	Pa
Naměřená tlaková ztráta	425	Pa
Odchylka	4%	-

Pro ukázkové výpočty tlakových ztrát byly zvoleny první tři úseky  $U_1, U_2$  a  $U_3$ .

Výpočet úseku  $U_1$

Vstupní parametry:	$T_m$	756,45	°C
	$Q_v^n$	11,78	$Nm^3/s$
	$\mu$	0,000147	$Pa \cdot s$
	$\rho$	1,294	$kg/m^3$
	$a$	3,7	$m$
	$b$	2,55	$m$
	$S_1$	0,27	$m$
	$S_2$	0,1	$m$
	$d_0$	0,0603	$m$
	$n_R$	3	$ks$
	Řazení	Zasebou	-

$$Q_v = Q_v^n * \frac{T_m + 273,15}{273,15} = 11,78 * \frac{756,45 + 273,15}{273,15} = 44,386 \text{ m}^3/s$$

$$A = \frac{S_1}{d_0} = \frac{0,27}{0,0603} = 4,478$$

$$B = \frac{S_2}{d_0} = \frac{0,1}{0,0603} = 1,658$$

$$w_f = \frac{Q_v}{a * b} = \frac{44,386}{3,7 * 2,55} = 4,704 \text{ m/s}$$

$$w_e = \frac{A * w_f}{A - 1} = \frac{4,487 * 4,704}{4,487 - 1} = 6,057 \text{ m/s}$$

$$d_h = \frac{2 * a * b}{a + b} - \frac{2 * n_{tr,\check{r}} * d_0 * l_{tr}}{n_{tr,\check{r}} * (d_0 + l_{tr})} = \frac{2 * 3,7 * 2,55}{3,7 + 2,55} - \frac{2 * 7 * 0,0603 * 2,95}{7 * (0,0603 + 2,95)} = 2,901 \text{ m}$$

$$Re = \frac{\rho * w_e * d_h}{\mu} = \frac{1,294 * 6,057 * 2,901}{0,000147} = 154675$$

$$\xi_0 = \frac{1}{A^2} = \frac{1}{4,478^2} = 0,05$$

$$f_{a,l} = \frac{280 * \pi * ((B^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75)}{(4 * A * B - \pi) * A^{1,6}} = \frac{280 * \pi * ((1,658^{0,5} - 0,6)^2 + 0,75)}{(4 * 4,478 * 1,658 - \pi) * 4,478^{1,6}} = 3,68$$

$$f_{a,t} = \left( 0,22 + 1,2 * \frac{\left(1 - \frac{0,94}{B}\right)^{0,6}}{(A - 0,85)^{1,3}} \right) * 10^{0,47 * \left(\frac{B}{A} - 1,5\right)} + (0,03 * (A - 1) * (B - 1)) =$$

$$\left( 0,22 + 1,2 * \frac{\left(1 - \frac{0,94}{1,658}\right)^{0,6}}{(4,478 - 0,85)^{1,3}} \right) * 10^{0,47 * \left(\frac{1,658}{4,478} - 1,5\right)} + (0,03 * (4,487 - 1) * (1,658 - 1))$$

$$= 0,416$$

$$f_{z,t} = \left(\frac{\eta_w}{\eta_m}\right)^{0,14} = \left(\frac{0,00037}{0,00035}\right)^{0,14} = 1,007$$

$$f_{zn,l} = \left(\frac{0,00037}{0,00035}\right)^{\frac{0,57 * \left(\frac{3}{10}\right)^{0,25}}{\left(\frac{4 * 4,478 * 1,658}{\pi} - 1\right) * 154675}} = 1,001$$

$$f_{n,t} = \xi_0 * \left(\frac{1}{n_R} - \frac{1}{10}\right) = 0,05 * \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{10}\right) = 0,012$$

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{Re + 1000}{2000}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{154675 + 1000}{2000}\right) = 1,000$$

$$\xi_{lam} = \frac{f_{a,l}}{Re} = \frac{3,68}{154675} = 2,379 * 10^{-5}$$

$$\xi_{turb} = \frac{f_{a,t}}{Re^{0,1 * \frac{B}{A}}} = \frac{0,416}{154675^{0,1 * \frac{1,658}{4,478}}} = 0,267$$

$$\lambda = \xi_{lam} * f_{zn,l} + (\xi_{turb} * f_{z,t} + f_{n,t}) * F =$$

$$= 2,379 * 10^{-5} * 1,001 + (0,267 * 1,007 + 0,012) * 1,000 = 0,28$$

$$\Delta p_v = \lambda * n_R * \frac{\rho * w_e^2}{2} = 0,28 * 3 * \frac{1,294 * 6,057^2}{2}$$

$$\underline{\Delta p_v = 19,96 Pa}$$

Výpočet úseku  $U_2$

Vstupní parametry:

$T_m$	740,6	°C
$Q_v^n$	11,78	$Nm^3/s$
$\mu$	0,000147	$Pa \cdot s$
$\rho$	1,294	$kg/m^3$
$a$	3,6	$m$
$b_0$	2,55	$m$
$b_1$	1,83	$m$
$l_1$	2	$m$
Tvar kanálu	Obdélník	-

$$Q_v = Q_v^n * \frac{T_m + 273,15}{273,15} = 11,78 * \frac{740,6 + 273,15}{273,15} = 43,719 \text{ m}^3/s$$

$$d_h = \frac{2 * a * b}{a + b} = \frac{2 * 3,6 * 2,55}{3,6 + 2,55} = 2,985 \text{ m}$$

$$w_f = \frac{Q_v}{a * b} = \frac{43,719}{3,6 * 2,55} = 4,762 \text{ m/s}$$

$$\frac{l_1}{d_h} = \frac{2}{2,985} = 0,67$$

$$\frac{a_0}{b_0} = \frac{3,6}{2,55} = 1,412$$

$$\frac{b_1}{b_0} = \frac{1,83}{2,55} = 0,718$$

Pro  $\frac{a_0}{b_0} = 1,412$  a  $\frac{b_1}{b_0} = 0,718$  je dle přepočtu z (tab. 1.2) odporový součinitel roven

$$\xi = 1,465$$

$$\Delta p_m = \xi * \frac{\rho * w_f^2}{2} = 1,465 * \frac{1,294 * 4,762^2}{2}$$

$$\underline{\Delta p_m = 21,494 \text{ Pa}}$$

Výpočet úseku  $U_3$

Vstupní parametry:	$T_m$	683,1	°C
	$Q_v^n$	11,78	$Nm^3/s$
	$\mu$	0,000147	$Pa \cdot s$
	$\rho$	1,294	$kg/m^3$
	$a, D_0$	3,6	m
	$b$	1,83	m
	$L, h$	8,38	m
	Tvar kanálu	Obdelník	-

$$Q_v = Q_v^n * \frac{T_m + 273,15}{273,15} = 11,78 * \frac{683,1 + 273,15}{273,15} = 41,224 \text{ m}^3/s$$

$$d_h = \frac{2 * a * b}{a + b} = \frac{2 * 3,6 * 1,83}{3,6 + 1,83} = 2,427 \text{ m}$$

$$w_f = \frac{Q_v}{a * b} = \frac{41,224}{3,6 * 1,83} = 6,257 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho * w_f * d_h}{\mu} = \frac{1,294 * 6,257 * 2,427}{0,000147} = 60134$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} = \frac{0,3164}{60134^{0,25}} = 0,02$$

$$\Delta p = \lambda * \frac{L}{D_0} * \frac{\rho * w_f^2}{2} = 0,02 * \frac{8,38}{3,6} * \frac{1,294 * 6,257^2}{2}$$

$$\underline{\underline{\Delta p = 1,18 \text{ Pa}}}$$

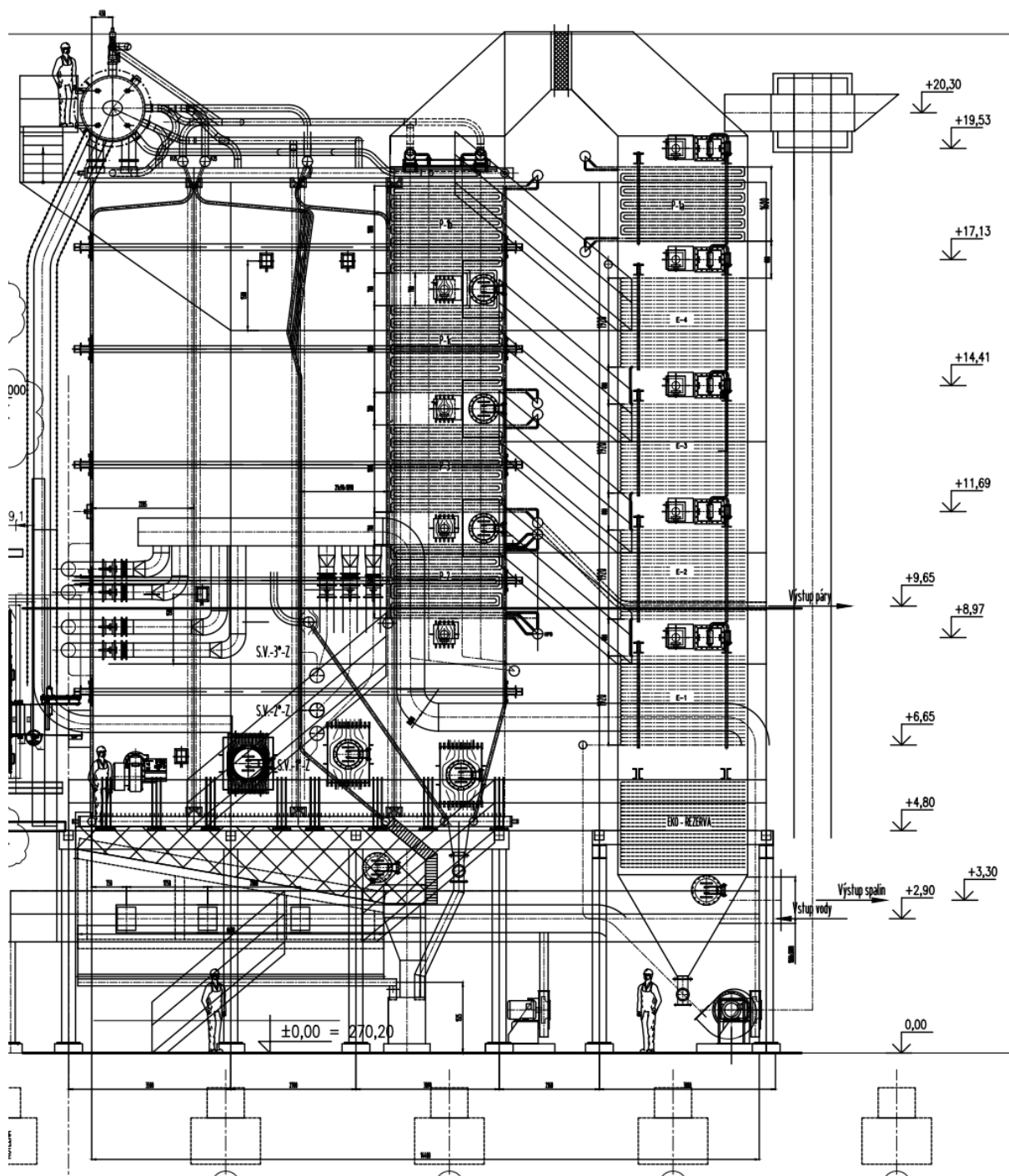
$$\Delta p_d = \rho * \frac{w^2}{2} = 1,294 * \frac{6,257^2}{2}$$

$$\underline{\underline{\Delta p_d = 25,33 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_h = h * \rho * g = -8,38 * 1,294 * 9,81$$

$$\underline{\underline{\Delta p_h = -106,377 \text{ Pa}}}$$





Obrázek 3.1 Výkres kotle použitého pro ověření funkčnosti programu poskytnutý firmou PBS

## 4 Citlivostní analýza vlivu parametrů kotle na tlakové ztráty

Pro citlivostní analýzu vlivu parametrů kotle na tlakové ztráty byly jako vstupní hodnoty použity parametry kotle z kapitoly 3. Grafy byly vytvořeny z lineární interpolace hodnot vypočítaných pomocí programu, kdy pro každý parametr byla zhotovena škála hodnot. Testované hodnoty a jejich škály jsou uvedeny v (tab. 4.1) Pro porovnání byly všechny ztráty posuzovány vůči třecím, kdy pro třecí ztráty platí v každém grafu pravá y-osa. Levá y-osa je vždy pro druhý typ ztrát. Výškové ztráty nebyly v citlivostní analýze zahrnuty, a to z důvodu závislosti pouze na parametrech  $h$ ,  $g$  a  $\rho$ .

Tabulka 4.1 Tabulka testovaných hodnot a jejich rozsah

Parametr	Od	Do
T_m	145°C	1000°C
Q_v	5nm <sup>3</sup> /s	43 nm <sup>3</sup> /s
D_h	0,85 m	3,3 m
S_1	0,04 m	0,4 m
S_2	0,04 m	0,4 m
Uspořádání trubek výměníku	Typ 1 (dle kapitoly 1.5)	Typ 3 (dle kapitoly 1.5)

### 4.1 Citlivostní analýza vlivu teploty a průtoku spalin na tlakovou ztrátu

Vliv teploty a průtoku na tlakovou ztrátu je možno vidět v grafech pro dané parametry v příloze.

Tlakové ztráty dle očekávání rostou exponenciálně s rostoucí teplotou. Z grafu je možné vyčíst, že všechny ověřované ztráty rostou dle stejného trendu, což je dokázáno překrýváním křivek.

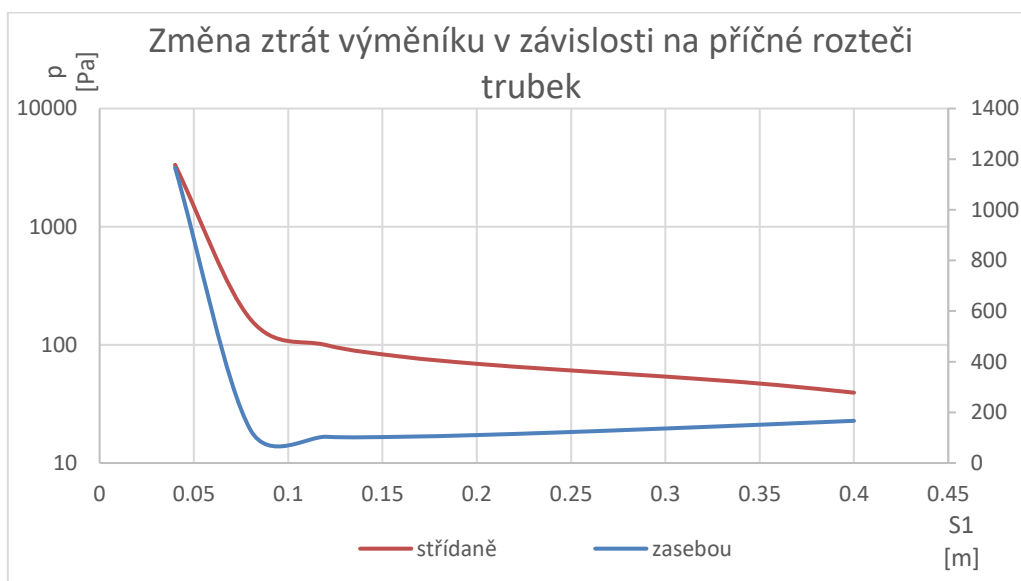
Ztráty pro průtok spalin mají také přímou exponenciální závislost, s rostoucím průtokem rostou ztráty. Stejně jako pro vliv teploty je vidět, že všechny měřené ztráty rostou opět dle stejného trendu.

### 4.2 Citlivostní analýza vlivu hydraulického průměru na tlakovou ztrátu

Z grafů pro závislost tlakových ztrát na hydraulickém průměru je vidět, že pro téměř nulový průtok existuje nekonečná ztráta a pro nekonečně velký hydraulický průměr téměř nulová ztráta. To znamená, že se hodnoty pro osu y limitně blíží nekonečnu a pro osu x se hodnoty limitně blíží k nule.

### 4.3 Citlivostní analýza vlivu příčné rozteče na tlakovou ztrátu výměníku

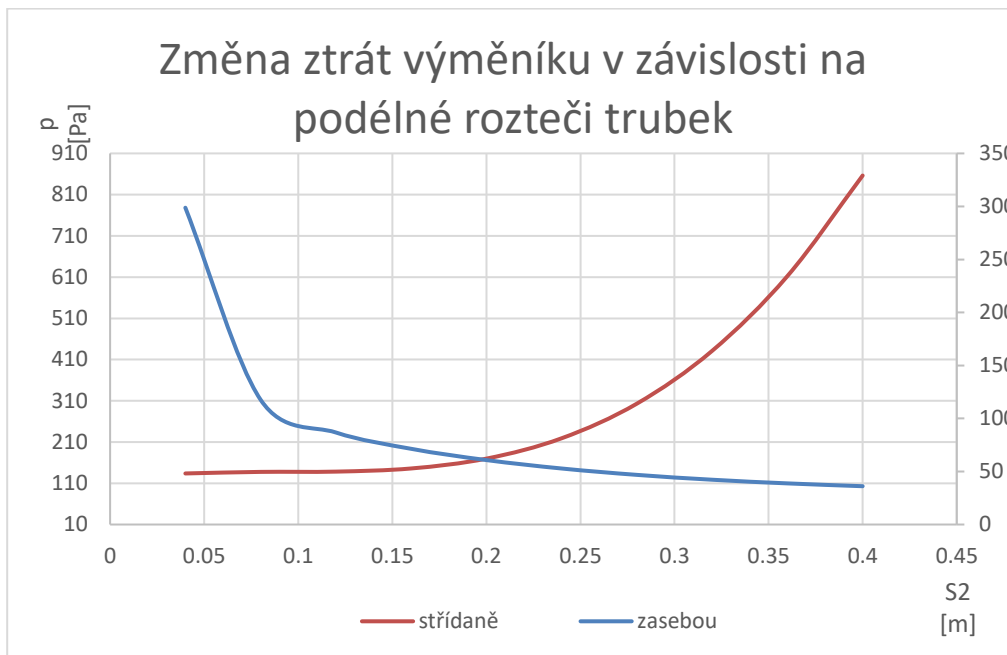
Zajímavá je závislost roztečí na tlakovou ztrátu. Pro příčnou rozteč je vidět podobnou závislost jako pro hydraulický průměr s tím rozdílem, že u příčné rozteče dochází k prudkému poklesu ztrát se zvětšující se roztečí, ale pouze do hodnoty 0,1 m. Za hodnotou rozteče 0,1 m je pokles ztrát střídáního uspořádání pozvolnější. Z toho je možno vyvodit, že pokud to je možné tak se v praxi vyhýbáme příčným roztečím menším než 0,1m aby bylo docíleno co nejmenších ztrát. Zajímavým úkazem je, že pro uspořádání za sebou dochází u hodnoty příčné rozteče cca 0,12 m k obratu nepřímé závislosti na přímou. To by v praxi znamenalo, že se snažíme pro uspořádání za sebou držet hodnotu příčné rozteče co nejbližší k bodu obratu, popřípadě v oblasti přímé závislosti, kdy nedochází k tak rychlému nárůstu tlaku.



Obrázek 4.1 Grafické znázornění závislosti ztrát výměníku na změně příčné rozteče

### 4.4 Citlivostní analýza vlivu podélné rozteče na tlakovou ztrátu výměníku

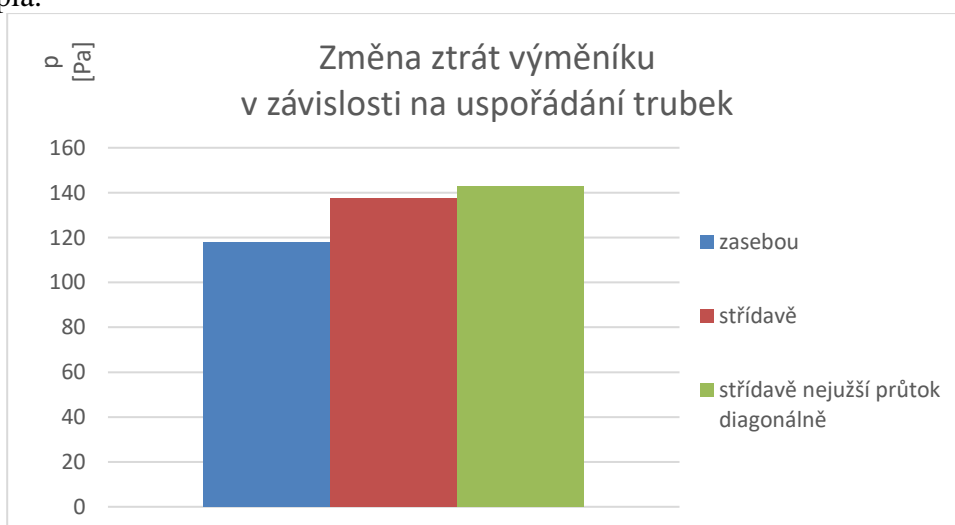
Závislost ztrát na podélné rozteči se pro uspořádání za sebou chová podobně jako závislost ztrát na příčné rozteči střídání. Zvláštním chováním je však závislost ztrát na podélné rozteči pro střídáního uspořádání, kdy dle grafu 4.2 je vidět, že tlaková ztráta exponenciálně roste z nenulové hodnoty s rostoucí roztečí. Toto chování je zvláštní a jde proti intuici, kdy větší smysl by dávalo, aby ztráty s rostoucí roztečí klesaly.



Obrázek 4.2 Grafické znázornění závislosti ztrát výměníku na změně podélné rozteče

#### 4.5 Citlivostní analýza vlivu uspořádání trubkových řad na tlakovou ztrátu výměníku

Jako poslední citlivostní analýza byla zhotovena analýza vlivu typu uspořádání na tlakovou ztrátu, kdy z grafu 4.3 je vidět, že nejnižší tlakové ztráty mají výměníky s uspořádáním za sebou. Pokud by ztráty byly jediným faktorem, na který by se při volbě uspořádání výměníku nahlíželo, pak nejvhodnějším uspořádáním výměníkových trubek by bylo vždy za sebou. Ovšem tlakové ztráty nejsou jediným parametrem, na který se při volbě uspořádání výměníku nahlíží. Například efektivnost výměny tepla je pro střídavé zapojení vyšší. Proto při návrhu výměníkových řad je žádané docílit kombinace co nejnižších ztrát a co největší účinnosti výměny tepla.



Obrázek 4.3 Grafické znázornění závislosti ztrát výměníku na způsobu uspořádání trubek

## ZÁVĚR

V této práci byla rozebrána problematika výpočtu jednotlivých typů tlakových ztrát v tahu kotle. Cílem bylo zhotovit program pro výpočet tlakových ztrát v tahu kotle za použití programu MS Excel.

Prostředí Excelu se ukázalo pro tvoření takto rozsáhlého programu jako nevhodné. I přesto, že je program zhotoven tak, že je možné do něj kdykoliv přidat další zařízení pro výpočet místních ztrát. Za vhodné se do budoucna jeví změnit prostředí MS Excel na jiný programovací jazyk, jenž by umožnil větší volnost při tvorbě programu, jednoduchost a přehlednost pro opravování chyb a případně přidání dalších zařízení.

Nevhodnost použití Excelu se nejvíce prokázala při počítání ztrát pro ostré koleno se změnou rozměru v jednom směru, kdy pro docílení univerzálnosti výpočtu bylo potřeba vytvořit podmínku za použití funkce když, jenž se do sebe vnořovala více než 20x, což mělo za následek nepřehlednost této funkce a jakékoliv úpravy a zásahy do této funkce byly téměř nemožné.

Z důvodu epidemické situace mi nebylo umožněno provést osobní měření na kotli, jenž byl použit pro kontrolu výpočtu, proto bylo nutné si vystačit s daty poskytnutými firmou PBS. Navzdory komplikovanosti tvorby programu v prostředí Excelu bylo docíleno zhotovení funkčního programu. Po porovnání tlakové ztráty vypočtené programem a tlakové ztráty naměřené na reálném zařízení bylo zjištěno, že program se od reality odlišuje o přibližně 4 %, což vzhledem ke mnoha variacím rovnic pro výpočet téže veličiny je přijatelná odchylka. Pokud bychom chtěli tuto odchylku ještě snížit, bylo by potřeba udělat porovnání všech možných rovnic a výběr té nejvhodnější. Rovnice, které jsou použity v této práci, byly vybrány z důvodu prověřenosti a dlouhodobého používání firmou PBS.

Jako finální krok byla zhotovena citlivostní analýza vlivu parametrů kotle na tlakové ztráty. Tato analýza nám umožňuje optimalizovat parametry kotle tak, abychom docílili co možná nejnižších tlakových ztrát v tahu kotle.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007, c1999. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [2] *VDI heat atlas*. 2nd ed. New York: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-77876-9.
- [3] IDELCHIK, I.E., STEINBERG, M.O., *Handbook of hydraulic resistance*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1994 0849399084 (alk. paper).
- [4] ČERNÝ, Václav, Břetislav JANEBA a Jiří TEYSSLER. *Parní kotle*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1983. Technický průvodce.
- [5] MALÁK, J. *Tlakové ztráty a přestup tepla v kanálech nekrhových průřezů s hydraulicky hladkými stěnami*. Řež: Ústav jaderného výzkumu, 1972. Práce ÚJV.
- [6] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: Podklady pro tepelný výpočet : Určeno pro posl. fak. strojní. 2., přeprac. vyd.* Praha: SNTL, 1979. Učební texty vysokých škol.
- [7] ŠKORPÍK, J. *Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny* [online].[cit. 14-5-2018]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/38.html>
- [8] WILKE, C.R., *A Viscosity Equation for Gas Mixtures*, *The Journal of Chemical Physics*. 1950, vol. 18, issue 4, pp. 517-519, 10.1063/1.1747673.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\alpha$	Úhel	[-]
$\lambda$	Odporový součinitel	[-]
$\mu$	Viskozita	[Pa * s]
$\mu_m$	Viskozita při teplotě T_m	[Pa * s]
$\mu_w$	Viskozita při teplotě T_w	[Pa * s]
$\zeta$	Celkový odporový součinitel	[-]
$\zeta_0$	Počáteční odporový součinitel	[-]
$\zeta_{lam}$	Odporový součinitel laminárního proudění	[-]
$\zeta_{turb}$	Odporový součinitel turbulentního proudění	[-]
$\zeta_{loc}$	Odporový součinitel lokální	[-]
$\zeta_{fr}$	Odporový součinitel tření	[-]
$\rho$	Hustota	$[\frac{kg}{m^3}]$
$a$	Délka strany a	[m]
$b$	Délka strany b	[m]
$A$	Koeficient	[-]
$B$	Koeficient	[-]
$C$	Koeficient	[-]
$d_h$	Hydraulický průměr	[m]
$d_0$	Průměr trubky	[m]
$F$	Koeficient	[-]
$F_i$	Průřez	[m <sup>2</sup> ]
$f_{a,l}$	Koeficient	[-]
$f_{a,t}$	Koeficient	[-]
$f_{z,t}$	Koeficient	[-]
$f_{zn,l}$	Koeficient	[-]
$f_{n,t}$	Koeficient	[-]
$g$	Tíhové zrychlení	$[\frac{m}{s^2}]$
$h$	Výška	[m]
$k$	Drsnost	[m]
$k_\Delta$	Koeficient vlivu drsnosti kanálu	[-]
$k_{Re}$	Koeficient vlivu Reynoldsova čísla	[-]
$l$	Délka	[m]
$M$	Koeficient	[-]
$N$	Koeficient	[-]
$\Delta p$	Celková tlaková ztráta	[Pa]
$\Delta p_d$	Tlaková ztráta dynamická	[Pa]
$\Delta p_h$	Tlaková ztráta rozdílem výšek	[Pa]
$\Delta p_m$	Tlaková ztráta místní	[Pa]
$\Delta p_t$	Tlaková ztráta třením	[Pa]

$\Delta p_v$	Tlaková ztráta výměníku	[Pa]
$Q^n_v$	Normálový průtok	$[\frac{Nm^3}{s}]$
$Q_v$	Průtok pro teplotu $T_m$	$[\frac{m^3}{s}]$
$R_0$	Rádus kolena	[m]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$S_1$	Příčná rozteč	[m]
$S_2$	Podélná rozteč	[m]
$S_d$	Diagonální rozteč	[m]
$T_m$	Průměrná teplota spalin v úseku	[°C]
$T_w$	Teplota steny	[°C]
$w_f$	Rychlost proudění	$[\frac{m}{s}]$
$w_e$	Rychlost proudění ve výměníku	$[\frac{m}{s}]$



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Způsoby uspořádání trubkových řad ve výměníku [2] .....	16
Obrázek 1.2 Závislost odporového součinitele na Re [2] .....	17
Obrázek 1.3 Znázornění profilu proudění při proudění dolů [3] .....	20
Obrázek 1.4 Koleno $R/D0 < 3$ a $\delta \in 0 - 180^\circ$ [3].....	20
Obrázek 1.5 Koleno $\delta \in 0 - 180^\circ$ a $l0/Dh \geq 10$ [3].....	22
Obrázek 1.6 Koleno s ostrým uhlem a změnou rozměru v jednom směru [3].....	23
Obrázek 1.7 Znázornění proudění při náhlém rozšíření průtočného průměru [3] .....	25
Obrázek 1.8 Rychlostní pole difuzoru s uhlem rozvěru do $8^\circ$ [3] .....	26
Obrázek 1.9 Znázornění proudění při náhlém zmenšení průtočného průřezu [3].....	27
Obrázek 1.10 Rychlostní profily pro difuzory různých uhlů [3] .....	27
Obrázek 1.11 Konický difuzor s maximálním uhlem $\alpha = 40^\circ$ [3].....	28
Obrázek 1.12 Obdélníkový difuzor s maximálním uhlem $\alpha = 40^\circ$ [3].....	28
Obrázek 3.1 Výkres kotle použitého pro ověření funkčnosti programu poskytnutý firmou PBS.....	49
Obrázek 4.1 Grafické znázornění závislosti ztrát výměníku na změně příčné rozteče ....	51
Obrázek 4.2 Grafické znázornění závislosti ztrát výměníku na změně podélné rozteče	52
Obrázek 4.3 Grafické znázornění závislosti ztrát výměníku na způsobu uspořádání trubek.....	52

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Korekční faktor $k\Delta$ závislý na drsnosti potrubí [3] .....	22
Tabulka 1.2 odporový součinitel $\xi_{loc}$ pro koleno z obr. 1.6 [3] .....	23
Tabulka 1.3 korekčního faktoru $k\Delta$ [3] .....	24
Tabulka 1.4 Tabulka hodnot součinitele odporu pro konický difuzor s $F1/F0 = 2$ [3] 29	
Tabulka 1.5 Tabulka hodnot součinitele odporu pro obdelníkový difuzor s $F1/F0 = 2$ [3] .....	29
Tabulka 3.1 Tabulka hodnot tlakových ztrát tahu kotle viz obr. 3.1 .....	44
Tabulka 4.1 Tabulka testovaných hodnot a jejich rozsah.....	50

## PŘÍLOHY

