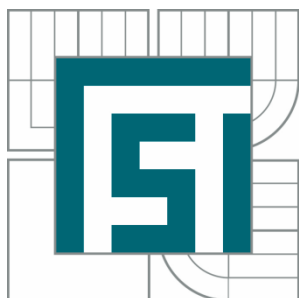


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

# VLIV PROVOZNÍCH PARAMETRŮ SPALOVÁNÍ A KONSTRUKČNÍCH PARAMETRŮ NÍZKOEMISNÍHO HOŘÁKU NA CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY SPALOVACÍCH PROCESŮ

THE INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS AND CONSTRUCTION PARAMETERS OF THE LOW-NO<sub>x</sub>  
BURNER ON CHARACTERISTIC PARAMETERS OF COMBUSTION PROCESSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JIŘÍ NYKODÝM

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PETR BĚLOHRADSKÝ, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jiří Nykodým

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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:

### **Vliv provozních parametrů spalování a konstrukčních parametrů nízkoemisního hořáku na charakteristické parametry spalovacích procesů**

v anglickém jazyce

### **The influence of operating parameters and construction parameters of the low-NO<sub>x</sub> burner on characteristic parameters combustion processes**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce úzce navazuje na vědecko-výzkumnou činnost v oblasti spalování plyných paliv, která probíhá na Ústavu procesního a ekologického inženýrství již celou řadu let. K provedení spalovacích zkoušek je k dispozici polo-průmyslová zkušebna hořáků. Cílem této práce je zhodnotit provoz nízkoemisního hořáku se stupňovitým přívodem paliva z hlediska tvorby emisí NO<sub>x</sub> a CO, teploty spalin, rozložení teplot uvnitř spalovací komory a tepelných toků do stěny pláště spalovací komory, stability a tvaru plamene. Provoz hořáku bude vyhodnocen z hlediska provozních podmínek spalování zahrnující výkon hořáku, přebytek spalovacího vzduchu a poměr rozdělení primární/sekundární palivo, a z hlediska konstrukce hořáku zahrnující geometrii a pozici sekundárních palivových trysek.

Úkolem studenta bude v prvním kroku provést rešerši v oblasti metod snižování tvorby NO<sub>x</sub> a v oblasti určování dalších charakteristických parametrů spalovacího procesu v závislosti na provozních podmínkách a konstrukci hořáku. S tímto krokem úzce souvisí i uvedení základních vztahů používaných při výpočtech spalovacích systémů zahrnující výpočet výkonu hořáku, teoretické a skutečné spotřeby spalovacího vzduchu, teoretické a adiabatické teploty spalování apod. V rámci

příprav na experimentální část bude zpracován plán zkoušek dle statistického přístupu "Plánování experimentu". Stěžejním bodem práce bude provedení vlastních spalovacích zkoušek dle připraveného experimentálního plánu. Měřenými veličinami budou emise  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}$ , teplota spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory, stabilita hoření, tvar a rozměry plamene. Vyhodnocení experimentálních dat bude mimo jiné zahrnovat vytvoření matematického modelu tvorby emisí  $\text{NO}_x$  v závislosti na provozních parametrech spalování a konstrukčních parametrech hořáku.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše v oblasti metod pro snižování tvorby  $\text{NO}_x$ .
2. Základní výpočtové vztahy z oblasti spalování.
3. Vytvoření plánu experimentu.
4. Provedení spalovacích zkoušek dle plánu experimentu.
5. Vyhodnocení naměřených dat a vytvoření matematického modelu pro popis tvorby emisí  $\text{NO}_x$ .

Seznam odborné literatury:

1. Baukal C.E., Industrial Combustion, Pollution and Control, USA, Marcel Dekker, 2004, ISBN0-8247-4694-5.
2. Baukal C.E., Industrial Burners Handbook, USA, CRC PRESS, 2004, ISBN 0-8493-1386-4.3. Kermes V., Skryja P., Stehlík P., Up to date experimental facility for testing low-NOx burners, 10th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2007, Ischia Porto, Itálie, 2007, Proceeding on CD-ROM.
4. Ballester J.M., Dopazo C., Fueyo N., Hernández M., Vidal P.J., Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion, Fuel 1997; 76:435-446.
5. Baltasar J., Carvalho M.G., Coelho P., Costa M., Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling, Fuel 1997; 76:919-929.
6. Bebar L., Kermes V., Stehlik P., Canek J., Oral J., Low NOx burners - prediction of emissions concentration based on design, measurements and modelling, Waste management 2002;22:443-451.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.  
V Brně, dne 24.11.2014

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
Ředitel ústavu

---

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

## ABSTRAKT

Hlavní náplní práce bylo vyšetření vlivu provozních parametrů spalování (přebytek spalovacího vzduchu, poměr paliva na primárním stupni) a konstrukčních parametrů nízkoemisního hořáku (úhel sklonu sekundárních trysek, natočení sekundárních trysek vzhledem k ose hořáku) na tvorbu emisí  $\text{NO}_x$  a CO, teplotu spalin, tvar, stabilitu a rozměry plamene, teploty v horizontální rovině symetrie spalovací komory a množství tepla odvedeného z horkých spalin do pláště spalovací komory. Vlastní experimentální činnost byla provedena v laboratoři Ústavu procesního a ekologického inženýrství, která je zaměřena na hořákové zkoušky. Pro zkoušky byl použit hořák se stupňovitým přívodem paliva. Na základě experimentálních dat byl vytvořen matematický model, který popisuje závislost  $\text{NO}_x$  na provozních parametrech spalování a konstrukčních parametrech hořáku. Podle modelu s rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu a rostoucím úhlem natočení sekundárních trysek klesá tvorba  $\text{NO}_x$ . Dále byla změřena teplotní pole v horizontální rovině symetrie spalovací komory, kde při vyšším přebytku spalovacího vzduchu klesaly teplotní špičky plamene. Vyhodnoceno bylo také tepelné zatížení pláště spalovací komory po délce plamene pro vybraná nastavení. Výsledky ukazují, že s rostoucím množstvím spalovacího vzduchu se snižovala účinnost přenosu tepla do stěn komory.

## ABSTRACT

The main aim of the work was the investigation of the effect of operational parameters of the combustion process (combustion air excess, primary fuel ratio) and burner constructional parameters (the pitch angle of secondary nozzles, tangential orientation of secondary nozzles towards the axis of the burner) on the formation of  $\text{NO}_x$  and CO, flue gas temperature, the shape, dimensions and stability of the flame, in-flame temperatures in the horizontal symmetry plane of the combustion chamber and the amount of heat extracted from the hot combustion gases in the combustion chamber's shell. Experimental activities were carried out in the laboratory of the Institute of Process and Environmental Engineering, which is focused on burners testing. The combustion tests were performed with the experimental low- $\text{NO}_x$  type burner, namely the two-gas-staged burner. Mathematical model developed based on the experimental data describes the dependency of  $\text{NO}_x$  on the operating parameters of the combustion process and burner constructional parameters. The model shows that increasing air excess and increasing angle of tangential orientation of the secondary nozzles reduce the formation of  $\text{NO}_x$ . The temperature peaks in the horizontal symmetry plane of the combustion chamber decreases with increasing combustion air excess. The thermal load to the combustion chamber's wall along the length of the flame was evaluated for selected settings. It was validated that the thermal efficiency of is reduced when higher air excess is used.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Oxidy dusíku, tepelné toky, teplota v plameni, plánování experimentu, nízkoemisní hořák, matematický model.

## **KEYWORDS**

Nitrogen oxides, heat transfer, in-flame temperature, design of experiments, low-NOx burner, mathematical model.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

NYKODÝM, J. *Vliv provozních parametrů spalování a konstrukčních parametrů nízkoemisního hořáku na charakteristické parametry spalovacích procesů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 87 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „*Vliv provozních parametrů spalování a konstrukčních parametrů nízkoemisního hořáku na charakteristické parametry spalovacích procesů*“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a zdrojů uvedených v seznamu, jenž je součástí této práce.

V Brně dne.....

.....  
podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Bělohradskému, Ph.D. za jeho odpornou pomoc a připomínky během vypracování práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým za jejich trpělivost a hlavně podporu během celého studia.

## Obsah

1	Úvod .....	14
1.1	Problematika spalování .....	14
1.2	Poznatky v oblasti spalování.....	14
1.3	Cíle práce .....	15
2	Spalování.....	16
2.1	Druhy paliv .....	17
2.2	Emisní limity .....	19
2.2.1	Legislativa dle Evropské unie .....	19
2.2.2	Specifické emisní limity.....	19
3	Vznik oxidů dusíku .....	22
3.1	Tvorba NO při spalování .....	23
3.1.1	Termický NO.....	23
3.1.2	Promptní NO.....	24
3.1.3	Palivový NO.....	25
3.2	Vznik NO <sub>2</sub> .....	26
3.3	Hlavní faktory ovlivňující tvorbu NO <sub>x</sub> .....	26
3.3.1	Teplota v plameni .....	26
3.3.2	Reakční doba .....	26
3.3.3	Vliv složení paliva .....	27
3.3.4	Poměr paliva a vzduchu .....	28
3.3.5	Konstrukce zařízení .....	28
4	Opatření pro tvorbu NO <sub>x</sub> .....	29
4.1	Primární opatření.....	29
4.1.1	Spalování paliva s nízkým přebytkem spalovacího vzduchu .....	29
4.1.2	Nižší teplota předehřátého spalovacího vzduchu .....	29
4.1.3	Nestechiometrické spalování .....	30
4.1.4	Vícestupňové spalování.....	30
4.1.5	chlazení plamene .....	32
4.1.6	Bezplamenné spalování .....	33
4.2	Sekundární opatření .....	33
4.2.1	Katalytické čištění spalin (SCR).....	34
4.2.2	Nekatalycké čištění spalin (SNCR) .....	34
4.2.3	Simultánní metody .....	34

---

5	Přenos tepla.....	35
5.1	Přenos tepla radiací.....	35
5.2	Přenos tepla prouděním.....	35
5.3	Přenos tepla vedením.....	36
6	Experimentální část.....	37
6.1	Zkušebna hořáků.....	37
6.2	Hořák.....	38
6.3	Plán zkoušek.....	39
7	Test A.....	40
7.1	Charakteristika DOE.....	40
7.2	Statistické plánování experimentu.....	41
7.3	Základní typy plánů experimentů.....	41
7.3.1	Experimenty s jedním faktorem.....	42
7.3.2	Faktorové experimenty.....	42
7.3.3	Experimenty pro odezvové plochy.....	43
7.4	Plán experimentu.....	44
7.5	Faktory.....	44
7.6	Měřené hodnoty (odezva).....	46
7.7	Cíl experimentu.....	46
8	Vyhodnocení TESTU A.....	47
8.1	Analýza naměřených dat - model 1.....	47
8.1.1	F-test model 1.....	48
8.1.2	Test reziduí.....	48
8.2	Model 2.....	50
8.2.1	F-test model 2.....	50
8.2.2	Test reziduí.....	51
8.3	Model 3.....	52
8.3.1	F-test model 3.....	53
8.3.2	Test reziduí.....	53
8.4	Zhodnocení modelů.....	54
8.5	Porovnání vstupních a výstupních faktorů (odezva).....	55
8.5.1	Vliv průměru clony.....	55
8.5.2	Vliv přebytku vzduchu.....	56
8.5.3	Vliv natočení sekundárních trysek.....	57
8.5.4	Vliv sklonu hlav sekundárních trysek.....	57

---

8.6	Koncentrace CO .....	58
9	Vyhodnocení TESTU B .....	59
9.1	Měření teploty v plameni .....	59
9.2	Vyhodnocení teplot v plameni .....	60
9.2.1	Měření č. 1 .....	60
9.2.2	Měření č. 2 a 3 .....	60
9.2.3	Měření č. 4 a 5 .....	61
9.2.4	Měření č. 6 a 7 .....	62
10	Vyhodnocení Testu C .....	64
10.1	Měření tepelných toků .....	64
10.2	Chybová Analýza experimentálních dat .....	64
10.3	Vyhodnocení tepelných toků .....	65
10.3.1	Měření č. 1 .....	65
10.3.2	Měření č. 2, 3 .....	66
10.3.3	Měření č. 4, 5 .....	67
10.3.4	Měření č. 6, 7 .....	68
10.3.5	Celkové porovnání .....	69
11	Závěr .....	70
	Seznam obrázků .....	72
	Seznam tabulek .....	73
	Seznam symbolů .....	74
	Seznam zkratk .....	76
	Seznam chemických prvků a sloučenin .....	76
	Seznam použité literatury .....	77
	Příloha A .....	81
	Příloha B .....	86

# 1 ÚVOD

Tepelná a elektrická energie je součástí každého provozu, technologie i domácnosti. V dnešní době je neodvratitelným způsobem spjata s životem obyvatel. Dominantním způsobem výroby tepla je spalovací proces. Spalování je proces výroby tepelné energie z fosilních či obnovitelných druhů paliv - uhlí, zemního plynu, biomasy a jiných zdrojů.

Vlivem industrializace a zvyšování komfortu a životní úrovně, množství spotřebované energie stále stoupá a v budoucnu bude stále narůstat. Se zvyšující se spotřebou tepelné energie souvisí také vznik emisí při spalování paliv. Hlavními složkami emisí jsou zejména oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ , oxidy síry  $\text{SO}_x$ , oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , popřípadě oxid uhelnatý  $\text{CO}$  a jiné nečistoty obsažené ve spalinách v závislosti na spalovaném palivu.

Ochrana životního prostředí je v současné době jedním z podstatných témat na světové scéně. Důsledky nečistot ze spalování jsou klimatické změny, globální oteplování, zmenšování ozónové vrstvy, zhoršování zdravotního stavu obyvatel, smog, kyselá dešť. Snahou dnešní doby je co nejvíce zmírnit jejich dopad na životní prostředí. Z těchto důvodů rostou požadavky na návrh a konstrukci spalovacích (systémů) zařízení.

## 1.1 PROBLEMATIKA SPALOVÁNÍ

Spalování je chemický proces oxidace, při kterém se uvolňuje chemická energie vázaná v palivu na tepelnou energii. Je to o nejjednodušší metoda pro termickou přeměnu fosilních i obnovitelných paliv za dostatečného přístupu (nejčastěji atmosférického) kyslíku na tepelnou energii.

Při návrhu a konstrukci hořáku je nutné si uvědomit, že při větším výkonu hořáku se zvyšuje i tvorba emisí, zejména  $\text{NO}_x$ . Je tedy nutné sledovat objem emisí za dodržení emisních limitů. Nelze-li limity dodržet, je nutné spaliny před vypuštěním do atmosféry vyčistit. Při vyšším výkonu hořáku se také zvyšuje teplo - tepelné zatížení spalovací komory, zejména v jejich stěnách. Cílem návrhu hořáku je také zvýšit přenos tepla a hmoty, docílit intenzivnějšího promíchávání paliva se spalovacím vzduchem, minimalizovat spotřebu paliva a zvýšit účinnost. Souhrnně můžeme mluvit o tzv. intenzifikaci spalování.

Nově vyráběné hořáky se vyznačují konstrukcí, která aplikuje poznatky o podmínkách tvorby oxidů dusíku, zejména pokud se jedná o způsobu dávkování spalovacího vzduchu, případně recirkulace spalin. Spalování zde neprobíhá v celém spalovacím prostoru, ale jen v plameni, což umožňuje instalaci těchto hořáků i na starších jednotkách.

## 1.2 POZNATKY V OBLASTI SPALOVÁNÍ

Existuje mnoho důvodů, proč se zabývat dynamikou procesu spalování. V první řadě je nutné porozumět vlastnímu spalovacímu procesu, aby se dala problematika spalování intenzifikovat, tedy zvýšit přenos tepla a hmoty, docílit intenzivnějšího promíchávání paliva se spalovacím vzduchem, minimalizovat spotřebu paliva a zvýšit účinnost. Nepomíjitelnou součástí poznatků o dynamice spalování je vývoj nových a zdokonalování současných technologií výroby tepla.

Výzkum procesu spalování lze dělit na dva možné přístupy. Jednak jako experimentální výzkum plamene, který umožňuje nahlédnout, jak se určité zkušební zařízení

chová. Jde o velké množství informací zjištěných zejména pomocí optických metod měření, které detailně studují veličiny jako je teplota, rychlost proudění, chemické složení a hustota. Experimentální výzkum plamene je velmi spolehlivou a velmi účinnou metodou pro řešení dynamiky spalování. Tento přístup má ale také své nevýhody spojené zejména s náklady na výstavbu a provoz zkušebního zařízení.

V druhém případě jde o přístup pomocí počítačových simulací, tzv. počítačové modelování dynamiky tekutin užitím metod CFD (Computational fluid dynamics) [1]. Užití tohoto přístupu je levnější a rychlejší, než u experimentálních metod. Avšak modelování procesů pomocí CFD patří k velmi komplikované problematice. Je to dáno zejména geometrií hořáku, přenosem tepla, dynamikou tekutin i chemickými reakcemi v průběhu spalování.

### 1.3 CÍLE PRÁCE

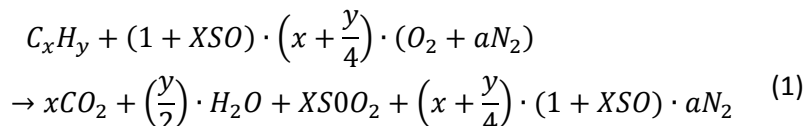
Tato práce úzce navazuje na vědecko-výzkumnou činnost v oblasti spalování plyných paliv, která probíhá na Ústavu procesního a ekologického inženýrství již řadu let. K provedení spalovacích zkoušek je k dispozici polo-průmyslová zkušebna hořáků. Cílem této práce bylo zhodnotit provoz nízkoemisního hořáku se stupňovitým přívodem paliva z hlediska tvorby emisí  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}$ , teploty spalin, rozložení teplot uvnitř spalovací komory a tepelných toků do stěny pláště spalovací komory, stability a tvaru plamene. Provoz hořáku bude vyhodnocen z hlediska provozních podmínek spalování.

#### Plánované cíle:

- Prvním úkolem bude tvorba rešerše v oblasti metod pro snižování tvorby  $\text{NO}_x$  a určení dalších charakteristických parametrů spalovacího procesu v závislosti na provozních podmínkách a konstrukci hořáku (viz kapitoly 3, 4 a 5).
- S předchozím krokem úzce souvisí i uvedení základních vztahů používaných při výpočtech spalovacích systémů zahrnující výpočet výkonu hořáku, teoretické a skutečné spotřeby spalovacího vzduchu, teoretické a adiabatické teploty spalování (viz kapitola 2).
- Neméně důležitou součástí před samotným experimentem je vytvoření plánu měření. Jedná se zejména o přípravu k provedení spalovacích zkoušek na polo-průmyslové zkušebně hořáků (viz kapitola 7).
- Stěžejním bodem práce bude provedení vlastních spalovacích zkoušek dle připraveného experimentálního plánu. Měřenými veličinami budou emise  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}$ , teplota spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory, stabilita hoření, tvar a rozměry plamene (viz kapitoly 8, 9, 10).
- Posledním bodem bude vyhodnocení experimentálních dat zahrnujících vytvoření matematického modelu tvorby emisí  $\text{NO}_x$  v závislosti na provozních parametrech spalování a konstrukčních parametrech hořáku (viz kapitola 8).

## 2 SPALOVÁNÍ

Při spalování dochází ke slučování hořlavých složek paliva, zejména uhlíku a vodíku s kyslíkem. V procesu spalování dochází k produkci tepla, a také k tvorbě oxidu uhličitého a vodní páry. Obecná reakce popisující spalování uhlovodíkového paliva s oxidačním činidlem má tvar [23]:

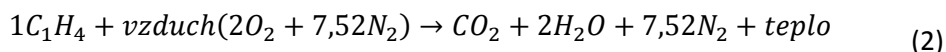


kde: XSO - je procentuální přebytek oxidačního činidla,

a - faktor, který se využívá pro výpočet množství dusíku v oxidačním činidle. Je-li složení vzduchu 79,1% N<sub>2</sub> a 20,9 % O<sub>2</sub>, znamená to, že na každou jednotku kyslíku připadá 0,791/0,209 = 3,78 jednotek dusíku, tedy a = 3,78.

### Příklad

Pro názornou ukázkou byl vybrán metan. Atmosférický vzduch obecně obsahuje přibližně 79 % N<sub>2</sub> a 21 % O<sub>2</sub>. Oba tyto plyny proudí do spalovací komory, kde následně reagují s uhlovodíkovým palivem. Hlavní složkou zemního plynu je metan (CH<sub>4</sub>). Při procesu spalování tyto plyny mezi sebou reagují a jako produkt vzniká oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), voda (H<sub>2</sub>O) a energie ve formě tepla. Zmíněná reakce je znázorněna v rovnici[23]:



V rovnici (2) je patrné, že ke spálení 1 m<sub>N</sub><sup>3</sup> paliva (metanu) za stechiometrických podmínek je zapotřebí asi 9,52 m<sub>N</sub><sup>3</sup> spalovacího vzduchu (O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>). Ve skutečnosti je však zapotřebí většího množství spalovacího vzduchu. Navýšené množství spalovacího vzduchu se nazývá přebytek vzduchu. Obecně se označuje jako λ a vypočítá se dle následujícího vztahu [23]:

$$\lambda = \frac{\text{skutečný objem } O_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}}{\text{stechiometrický objem } O_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}} \quad (3)$$

Přebytek vzduchu je nutný k zajištění dokonalého spálení veškerého paliva. V opačném případě se může ve spalinách vyskytovat oxid uhelnatý nebo nespálené uhlovodíky. Zvýšením množství spalovacího vzduchu nechtěný vznik CO potlačíme, ale má to za následek snížení účinnosti procesu, protože je v procesu spalování přivedeno také větší množství inertního dusíku, který se spalovacích reakcí neúčastní, ale pouze se ohřívá a odvádí tím teplo.

Další možností, jak vyjádřit množství nadbytečného vzduchu, je použití tzv. ekvivalenčního poměru („*equivalence ratio*“), který je inverzní k vyjádření přebytku vzduchu:

$$\Phi = \frac{\text{stechiometrický objem } O_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}}{\text{skutečný objem } O_2 \text{ ve spalovacím vzduchu}} \quad (4)$$

nebo



$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

## 2.1 DRUHY PALIV

Paliva lze obecně rozdělit na fosilní a obnovitelné. Fosilní (neobnovitelné) palivo vzniklo v dávných dobách z odumřelých rostlin a živočichů bez přístupu vzduchu - uhlí, zemní plyn. Tyto paliva obsahují uhlovodíky s různým poměrem uhlíku C a vodíku H. Dále obsahují příměsi dalších látek, např. síru S, různé nečistoty, případně vlhkost. Z hlediska obsahu poměru vodíku a uhlíku se paliva výrazně liší, například uhlí má poměr 0,5:1 a zemní plyn 4:1.

Z tohoto hlediska jsou plynná paliva a především zemní plyn relativně čistá paliva. Musíme si však uvědomit, že spalováním paliv s obsahem uhlíku nic méně škodlivého než CO<sub>2</sub> získat nelze. Pro snižování dopadu na životní prostředí je tedy nutné omezování spalování paliv s obsahem uhlíku.

### Zemní plyn

Zemní plyn je bezbarvý, sám o sobě nezapáchající, hořlavý plyn. Patří do skupiny topných plynů. Využívá se k vytápění, vaření a ohřevu vody, v elektrárnách, teplárnách, v kogeneračních jednotkách a v dopravě (jako pohon motorových vozidel). Na výhřevnost zemního plynu má vliv jeho složení. Velká část zemního plynu je tvořena metanem, jak je patrné z tab 1.

Tab. 1 - Složení plynu (RWE).

Název	Označení	Jednotka	
Metan	CH <sub>4</sub>	98,0	%
Vyšší uhlovodíky	C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	1,16	%
Oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,05	%
Dusík	N <sub>2</sub>	0,79	%
Síra	S	0,20	mg/m <sup>3</sup>

Tab. 2 - Charakteristické vlastnosti zemního plynu.

Název	Označení	Jednotka	
Hustota	suchý plynný	0,7	kg/m <sup>3</sup>
	kapalný	400	kg/m <sup>3</sup>
Zápalná teplota	t	650	°C
Výhřevnost	Q <sub>v</sub>	9,5	kWh/m <sup>3</sup>
Spalné teplo	Q <sub>s</sub>	10,5	kWh/m <sup>3</sup>
Dolní mez výbušnosti	DMV	4,3	%
Horní mez výbušnosti	HMV	15	%

### Spalné teplo a výhřevnost

Pro charakteristiku paliva je typická *výchřevnost* - množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na výchozí teplotu 20°C za vzniku vody ve formě páry [kJ.kg<sup>-1</sup>]:

$$Q_{v,\text{plynu}} = \sum \frac{x_i}{100} \cdot Q_{v,i} \quad (6)$$

$x_i$  - hmotnostní zlomek složky  $i$  [kg/kg],  
 $Q_{v,i}$  - výhřevnost složky  $i$  [kJ/kgmol].

*Spalné teplo* - teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20°C, dojde ke kondenzaci vodní páry. [kJ.kg<sup>-1</sup>].

Přepoččet mezi jednotlivými tepley vyjadřuje rovnice (7):

$$\text{výchřevnost} = \text{spalné teplo} - 2,45 \cdot (\text{vlhkost paliva} + 9 \cdot \text{obsah vodíku}) \quad (7)$$

### Teplota plamene

Teplota plamene je důležitou proměnnou při určování přenosu tepla z plamene na ohřívání materiál. Má zásadní význam, protože představuje mezní hodnotu, ke které se může teplota ohřívání materiálu blížit. Teplota plamene také ovlivňuje volbu materiálů při výstavbě spalovacího zařízení.

Rozlišujeme dva typy teplot plamene. Teoretická teplota plamene je maximální hodnotou teploty plamene při spalování paliva se vzduchem nebo s kyslíkem za adiabatických podmínek. Tato teplota předpokládá dokonalé spalování paliva s přesnou teoretickou hodnotou vzduchu nebo kyslíku, přičemž veškeré přivedené teplo se využívá na ohřev spalin.

Druhým typem je adiabatická teplota plamene, která se od teoretické teploty plamene odlišuje tím, že při dokonalém spalování je jistý definovaný přebytek vzduchu. Adiabatická teplota plamene také předpokládá nulové tepelné ztráty do okolí, tedy adiabatický průběh spalování. V porovnání s teoretickou má adiabatická teplota plamene nižší hodnoty z důvodu zvýšení množství použitého spalovacího vzduchu [23].

### Výkon hořáku

Hlavním úkolem spalovacího procesu je využití chemické energie obsažené v palivu, která se přemění na tepelnou energii a následně dochází k jejímu přenosu do ohřívání materiálu nebo do samotné pece. Tepelná účinnost procesu je tím větší, čím větší je míra přenosu tepla z produktů na ohřívání materiál, respektive spalovací komoru. Po opuštění plamene, produkty spalování v plynném stavu obvykle ztrácejí teplo prouděním a radiací během jejich přechodu spalovací komorou. Z toho důvodu je teplota spalin mnohem nižší než teplota plamene v tepelně efektivním procesu. Složení produktů spalování se proto může měnit v závislosti na teplotě [23]. Pro výkon hořáku [kW] lze použít vztah:

$$P = \frac{\dot{V} \cdot Q_v}{3600} \quad (8)$$

kde:  $\dot{V}$  - objemový průtok plynu [m<sup>3</sup>/h],  
 $Q_v$  - výhřevnost paliva [kJ/m<sup>3</sup>].

## 2.2 EMISNÍ LIMITY

V České republice je v současné době v právní moci zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, platný od 1. 9. 2012. Tento zákon nahradil zákon č. 86/2002 Sb. a také zrušil prakticky veškeré prováděcí předpisy podle zákona č. 86/2002 Sb [42].

Hlavním cílem zákona o ochraně ovzduší je zásadní zlepšení kvality ovzduší a především efektivnější ochrana obyvatel před imisní zátěží. Důvodem je pokračující stagnace na úrovni stavu znečištění ovzduší, které má přímé negativní dopady na zdraví i životy lidí [41].

Zákon o ovzduší č. 201/2012 Sb. zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje [41]:

1. přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší
2. způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení
3. nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší
4. práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší
5. práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě

Problematika nakládání s tzv. regulovanými látkami a fluorovanými skleníkovými plyny, která byla součástí zákona č. 86/2002 Sb. je nyní upravena v samostatné právní úpravě v zákoně č. 73/2012 Sb. o látkách, které poškozují ozonovou vrstvu, a o fluorovaných skleníkových plynech a v jeho prováděcím předpise [39].

### 2.2.1 LEGISLATIVA DLE EVROPSKÉ UNIE

Česká republika se po vstupu do EU řídí emisními limity dle směrnice Evropského Parlamentu a rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění), která sjednocuje systém environmentálních inspekcí vymezených průmyslových zařízení v rámci EU. Směrnice stanovuje s platností od 1.1 2016 přísnější emisní limity pro spalovací zařízení s tepelným příkonem nad 50 MW<sub>t</sub> [38].

Emisní limit můžeme definovat jako nejvýše přípustné množství znečišťující látky nebo stanovené skupiny znečišťujících látek vypouštěné do ovzduší ze zdroje znečišťování ovzduší vyjádřené jako hmotnostní koncentrace znečišťující látky v odpadních plynech nebo hmotnostní tok znečišťující látky za jednotku času [40]. Emisní limity jsou dány vyhláškou 415/2012 Sb. ze dne 21. listopadu 2012. Tato vyhláška stanovuje obecné a specifické emisní limity, technické podmínky provozu stacionárních zdrojů a činností nebo technologií souvisejících s provozem stacionárního zdroje [37].

### 2.2.2 SPECIFICKÉ EMISNÍ LIMITY

Pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu vyšším než 0,3 MW a nižším než 50 MW platí tyto specifické limity:

Tab. 3 - Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2017 (vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky).

Druh paliva	Specifické emisní limity [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]		
	> 0,3-1 MW	> 1-5 MW	> 5-50 MW
	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_x$
Pevné palivo obecně	650	650	650
	1100	1100	500
			1100
Kapalné palivo	500	500	450
Plynné palivo a zkapalněný plyn	200	200	200
	300	300	300

Tab. 4 - Specifické emisní limity platné od 1. ledna 2018.

Druh paliva	Specifické emisní limity [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]		
	> 0,3-1 MW	> 1-5 MW	> 5-50 MW
	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_x$	$\text{NO}_x$
Pevné palivo	600	500	500
Kapalné palivo	130	130	130
		450	450
Plynné palivo a zkapalněný plyn	100	100	100

### 2.2.3 Emisní limity dle evropské směrnice

Následující emisní limity platí pro veškerá povolení pro zařízení zahrnující spalovací zařízení, kterým bylo uděleno povolení nebo jejichž provozovatelé podali úplnou žádost o povolení před 7. lednem 2013, pokud bylo takové zařízení uvedeno do provozu do 7. ledna 2014.

Tab. 5 - Mezní hodnoty emisí ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) pro  $\text{NO}_x$  pro spalovací zařízení spalující plyn.

	$\text{NO}_x$
Spalovací zařízení spalující zemní plyn, s výjimkou plynových turbín a plynových motorů	100
Spalovací zařízení spalující vysokopeční plyn, plyn z koksárenských pecí nebo plyny ze zplyňování rafinérských zbytků s nízkou výhřevností, s výjimkou plynových turbín a plynových motorů	200
Spalovací zařízení spalující jiné plyny, s výjimkou plynových turbín a plynových motorů	200
Plynové turbíny využívající jako palivo zemní plyn	50
Plynové turbíny využívající jako palivo jiné plyny	120
Plynové motory	100

### 3 VZNIK OXIDŮ DUSÍKU

Většinu procesů spalování doprovází vznik oxidů dusíku společně s dalšími znečišťujícími látkami. Obecně jako oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) je souhrnné označení pro oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ). Oxidy dusíku se vytvářejí oxidací dusíku obsaženého v palivech vzdušným kyslíkem. Při vyšších teplotách se  $\text{NO}_x$  tvoří přímo ze součástí vzduchu. Obsah jednotlivých složek  $\text{NO}_x$  ve spalinách připadá asi z 90-95% na oxid dusnatý (NO) a z 5-10% na oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ). Zbylé oxidy dusíku jsou ve spalinách přítomny jen z malé části a většinou vznikají reakcemi mezi NO a  $\text{NO}_2$ . Krátce po vzniku spalin je tedy obsah NO nejvyšší a z něj se dále v průběhu procesu chladnutí vytvářejí vlivem oxidace další složky následně smog.

Abychom zjistili množství  $\text{NO}_x$  ve spalinách, je nutné přepočít koncentraci NO na ekvivalent  $\text{NO}_2$ .

#### Přepočet NO na ekvivalent $\text{NO}_2$ :

$$\text{NO}_2[\text{ppm}] = \frac{M(\text{NO}_2)}{M(\text{NO})} \cdot \text{NO}[\text{ppm}] \quad (9)$$

kde:  $M(\text{NO})$  - molární hmotnost NO,  
 $M(\text{NO}_2)$  - molární hmotnost  $\text{NO}_2$ ,  
 NO [ppm],  $\text{NO}_2$  [ppm] - koncentrace NO a  $\text{NO}_2$  vyjádřená v jednotkách [ppm].

Výpočet celkového množství  $\text{NO}_x$  ve spalinách:

$$\text{NO}_x[\text{ppm}] = \frac{M(\text{NO}_2)}{M(\text{NO})} \cdot \text{NO}[\text{ppm}] + \text{NO}_2[\text{ppm}] \quad (10)$$

kde:  $M(\text{NO})$  - molární hmotnost NO [g/mol],  
 $M(\text{NO}_2)$  - molární hmotnost  $\text{NO}_2$  [g/mol],  
 NO [ppm],  $\text{NO}_2$  [ppm] – koncentrace NO a  $\text{NO}_2$  vyjádřená v jednotkách [ppm].

Množství  $\text{NO}_x$  ve spalinách je uvedeno v rovnici (11) s přepočtem na jednotku [ $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ]:

$$\text{NO}_x \left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{M(\text{NO})}{V_m} \cdot \frac{M(\text{NO}_2)}{M(\text{NO})} \cdot \text{NO}[\text{ppm}] + \frac{M(\text{NO}_2)}{V_m} \cdot \text{NO}_2[\text{ppm}] \quad (11)$$

kde:  $M(\text{NO})$  - molární hmotnost NO (30,01 g/mol),  
 $M(\text{NO}_2)$  - molární hmotnost  $\text{NO}_2$  (46,06 g/mol),  
 $V_m$  - molární objem (22,414 l/mol),  
 NO [ppm],  $\text{NO}_2$  [ppm] - koncentrace NO a  $\text{NO}_2$  vyjádřená v jednotkách [ppm].

#### Koncentrace spalin vztážená na referenční přebytek vzduchu

Pro možnost porovnávání koncentrace škodlivin emitovaných spalovacím zařízením při různém přebytku vzduchu, používáme přepočet hodnot koncentrace na referenční přebytek vzduchu. Za referenční stav se pokládá přebytek vzduchu, při kterém je poměrný

objem kyslíku ve spalínách. Při spalování plyných paliv jsou za referenční hodnotu považována 3% kyslíku. Obecný vztah pro tento přepočítání má tvar:

$$[C]_{ref} = [C]_{měř} \cdot \frac{20,9 - [O_2]_{ref}}{20,9 - [O_2]_{měř}} = [C]_{měř} \cdot \frac{\lambda_{měř}}{\lambda_{ref}} \quad (12)$$

kde:  $[C]_{ref}$  - referenční stav látky při 3%  $O_2$ ,  
 $[O_2]_{ref}$  - referenční stav kyslíku (3%),  
 $[C]_{měř}$  - naměřená koncentrace látky v [ppm] či  $[mg/m^3]$ ,  
 $[O_2]_{měř}$  - naměřené množství kyslíku v [ppm] či  $[mg/m^3]$ .

### 3.1 TVORBA NO PŘI SPALOVÁNÍ

Oxid dusnatý je tvořen třemi různými mechanismy vzniku. Dělíme je na:

- termické
- promptní
- palivové

#### 3.1.1 TERMICKÝ NO

Termický NO vzniká uvnitř reakčních zón chudých na palivo radikálovou reakcí mezi atmosférickým dusíkem a kyslíkem. Emise  $NO_x$  proto lze snížit vhodným uspořádáním spalování. Z toho plynou základní směry omezování tvorby NO během spalovacího procesu: snížení teplotních špiček, zkrácení doby zdržení v pásmu vysoké teploty a snížení lokální koncentrace kyslíku. Hlavní reakce popisující vznik termického NO podle Zeldovičova mechanismu [4]:



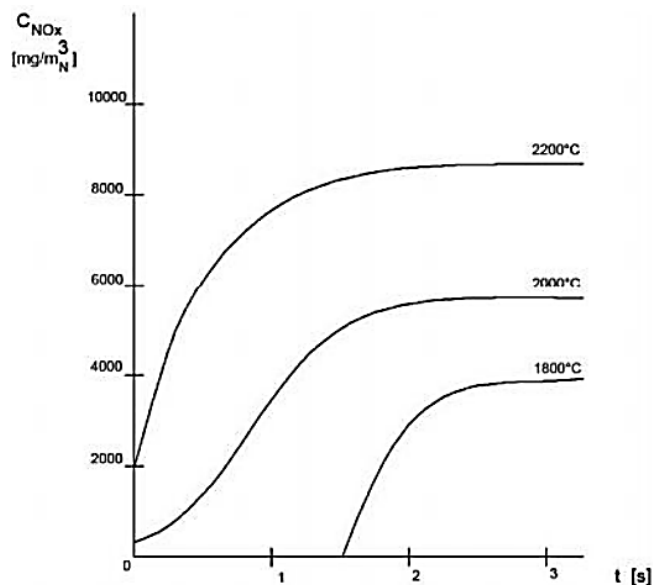
První reakce, která je považována za řídicí reakci, je citlivá na teplotu kvůli vysoké vazebné energii molekuly dusíku a množství kyslíku. Proto i množství spalovacího vzduchu, ve kterém je obsažen kyslík, ovlivňuje tvorbu NO. Třetí reakce má zanedbatelný vliv na výslednou koncentraci NO. Tato reakce začíná být citelná v případě spalování směsi bohaté na palivo, kde je první reakce pro nízkou koncentraci kyslíku omezena.

Budeme-li brát první rovnici jako řídicí, se zanedbáním zbyvajících, můžeme princip vzniku termických NO zapsat ve tvaru:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k[N_2][O] \quad (16)$$

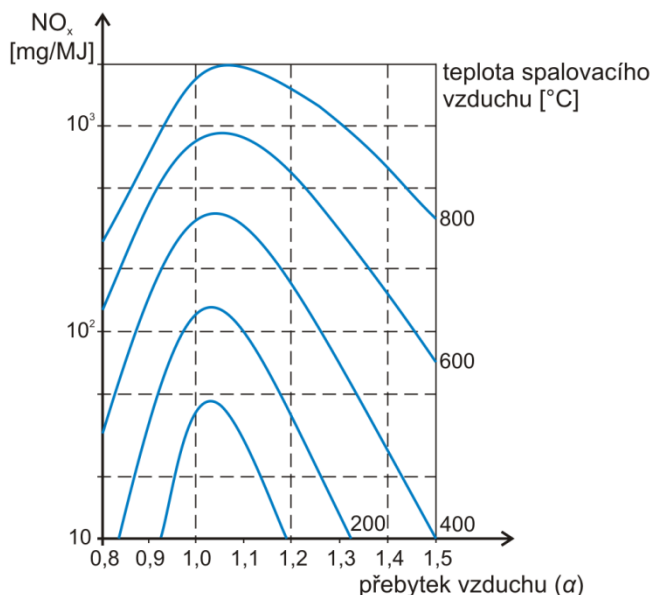
kde:  $[NO]$ ,  $[N_2]$ ,  $[O]$  - molární koncentrace složek  $[mol/m^3]$ ,  
 $k$  - rychlostní konstanta  $[m^3/mol \cdot s \cdot K]$ ,  
 $t$  - doba reakce  $[s]$ .

Na obr. 1 je znázorněna závislost koncentrace termického NO v závislosti na čase pro různé teploty spalování. Názorně zde vyplývá úzká závislost tvorby termických NO na teplotě plamene.



Obr. 1 - Vývoj koncentrace oxidů dusíku ( $C_{NOx}$ ) za čas ( $t$ ) pro různé teploty spalování [8].

Obr. 2 znázorňuje úzkou závislost koncentrace vzniklého termického NO na přebytku vzduchu, při různé teplotě spalovacího vzduchu. Je zřejmé, že nejvíce termického oxidu dusného se tvoří při přebytku vzduchu  $\alpha = 1-1,05$ . Při přebytku spalovacího vzduchu  $\alpha \geq 1,1$  je tendence snižování koncentrace termického NO kvůli snižování teploty v plameni vzduchem.



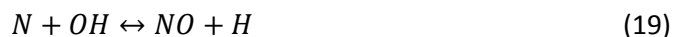
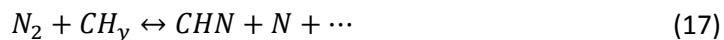
Obr. 2 - Tvorba termického NO v závislosti na přebytku vzduchu [30].

### 3.1.2 PROMPTNÍ NO

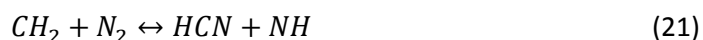
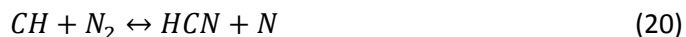
Promptní (rychlý) oxid dusnatý vzniká reakcí atmosférického dusíku, který je přeměňován přes meziproducty na NO. Probíhá na rozhraní plamene radikálovými reakcemi



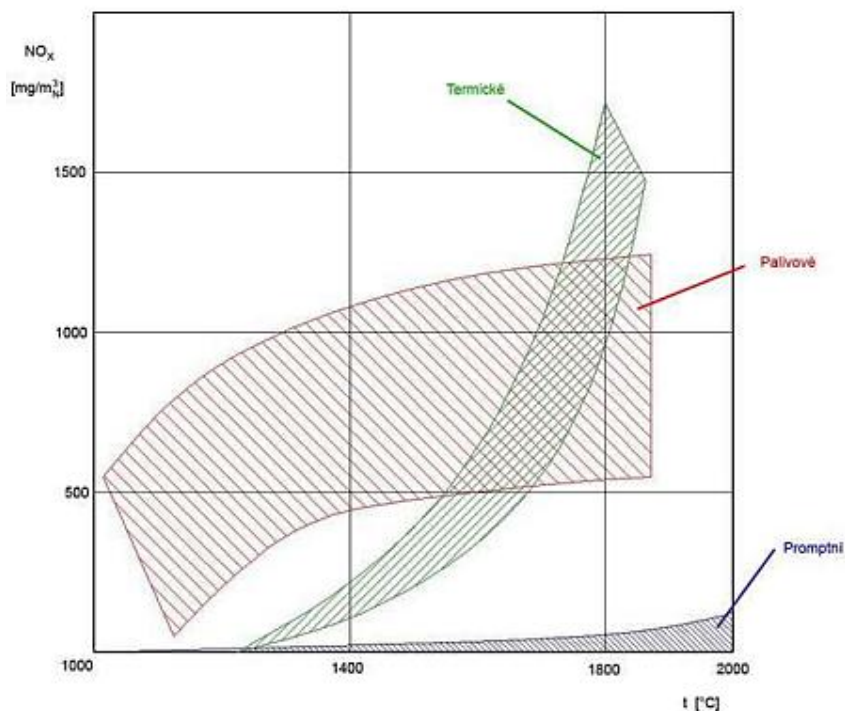
v oblastech bohatých na palivo. Množství vzniklého NO lze snížit obtížně, avšak podíl je obvykle malý. Hlavní reakce popisující vznik promptního NO - podle pozorování Fenimoreho [4]:



První reakce je považována za hlavní, tvoří se v ní přibližně 90 % promptních NO. Reakce  $CH_y$  radikálů s dusíkem je tedy nejdůležitější.



Tvorba promptních NO se vyznačuje nízkou spotřebou energie, krátkodobostí procesu a nízkou závislostí na teplotě plamene. Promptní NO se vytváří ve větší míře až při teplotách nad 2000 °C a proto je v mnoha modelech zanedbatelná.



Obr. 3 - Závislost vzniku  $NO_x$  na teplotě [7].

### 3.1.3 PALIVOVÝ NO

Hlavním zdrojem těchto oxidů dusíku jsou paliva obsahující dusíkaté látky. Tento dusík je pak během hoření oxidován a odchází společně s dalšími produkty do ovzduší. Mluvíme-li o spalování plyných paliv, jako je například propan nebo zemní plyn, je tvorba těchto oxidů dusíku nevýznamná, protože palivo neobsahuje vázaný dusík. Mluvíme-li o spalování tuhých paliv (uhlí, koks) a kapalných (topné oleje, odpadní oleje), roste význam

a tvorba palivového NO v důsledku velkého množství vázaného dusíku v palivu. Tento druh oxidů dusíku může tvořit až 50% z celkové produkce oxidů dusíku při spalování lehkých topných olejů (LTO) a při spalování uhlí až 80 %.

Ústřední reakce popisující vznik palivového NO, vznik poprvé popsal De Soete [4]:



### 3.2 VZNIK NO<sub>2</sub>

Další z oxidů dusíku tvořících se ze spalin je oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>). Vzniká při nižších teplotách než NO. NO<sub>2</sub> vzniká při prudkém ochlazení spalin podle níže uvedené rovnice, kdy reaguje peroxidový radikál (HO<sub>2</sub><sup>\*</sup>) popřípadě radikál kyslíku (O<sup>\*</sup>) s NO.



Jiná možnost vzniku NO<sub>2</sub> je reakce NO s volnými radikály kyslíku. Tato reakce probíhá v kouřovodech a komínech, pokud je teplota spalin menší než 65 °C a je dostatečně velký přebytek kyslíku.



Z celkového množství vypouštěných oxidů dusíku, je poměr mezi NO<sub>2</sub> a NO nízký, obvykle dosahuje jen málo procent z celkového obsahu.

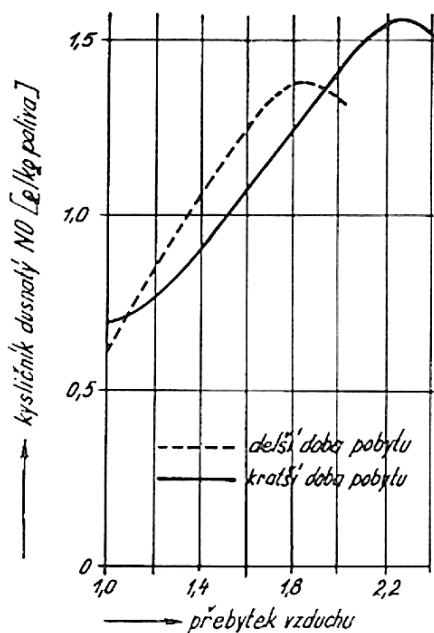
### 3.3 HLAVNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TVORBU NO<sub>x</sub>

#### 3.3.1 TEPLOTA V PLAMENI

Teplota ve velké míře ovlivňuje tvorbu oxidů dusíku. Jak bylo uvedeno výše v podobě vznikajících druhů NO (palivový, termický, promptní). Platí, že s rostoucí teplotou vzrůstá i množství vzniklého NO<sub>x</sub> vzniklého oxidací palivového i atmosférického dusíku.

#### 3.3.2 REAKČNÍ DOBA

Bylo zjištěno, že doba pobytu hořlavé směsi (paliva) v prostoru spalovací komory je úměrná s tvorbou NO<sub>x</sub>. Tedy, delší doba pobytu paliva v komoře má za následek více vytvořených oxidů dusíku.

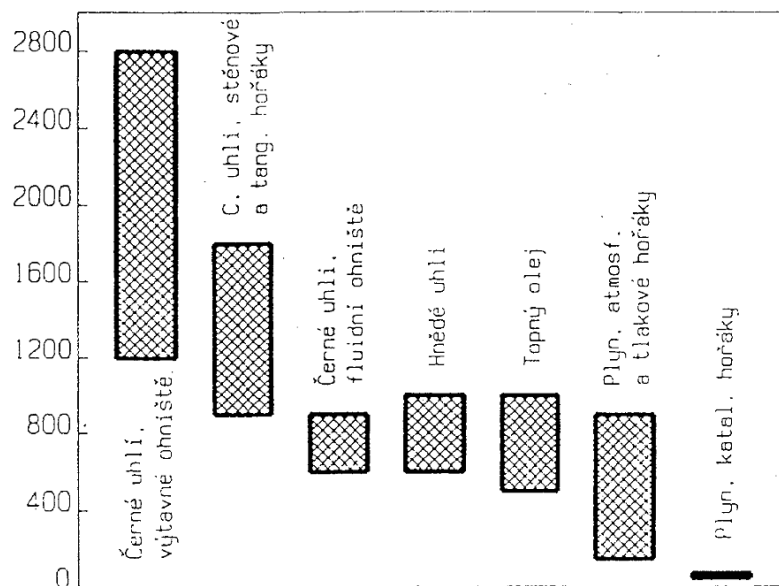


Obr. 4 - Reakční doba závisící na přebytku vzduchu [7].

### 3.3.3 VLIV SLOŽENÍ PALIVA

Každý druh paliva má své specifické vlastnosti a svůj vliv na spalování a tedy tvorbu oxidů dusíku. Nejmenší koncentraci  $\text{NO}_x$  při spalování má plyn, největší koncentraci má uhlí [7].

Samotná teplota spalování má velký vliv na tvorbu  $\text{NO}_x$ . Nemalý vliv mají také chemické vazby v palivu. Vazebná energie molekulárního dusíku je větší než vazebná energie oxidů dusíku, proto se dusík častěji a ve větším množství vyskytuje v  $\text{NO}_x$ . Paliva neobsahující dusík (benzín, nafta), díky svému složení se nepodílejí ve velké míře na tvorbě  $\text{NO}_x$ .

Obr. 5 - Emise  $\text{NO}_x$  [mg/m<sup>3</sup>] při spalování různých paliv [7].

### 3.3.4 POMĚR PALIVA A VZDUCHU

Vyšší množství vzduchu ve spalovací komoře má za následek nižší koncentraci  $\text{NO}_x$  ve spalinách. Nejvíce se tvoří při přebytku vzduchu  $\lambda = 1 - 1,05$ . Při vyšším množství  $\lambda \geq 1,1$  je tendence snižování koncentrace, kvůli snižování teploty vzduchem.

### 3.3.5 KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ

Množství vzniklého  $\text{NO}_x$  ve spalinách je dále závislé na konstrukci a nastavení hořáku a konstrukci spalovací komory. Hlavní parametry, kterými se řídí výběr hořáku:

- druh spalovaného paliva
- konstrukce spalovací komory
- velikost (objem) spalovací komory

## 4 OPATŘENÍ PRO TVORBU NO<sub>x</sub>

Obecně lze snižovat množství dusíku dvěma způsoby. Jednak snížením tvorby při samotném procesu spalování. Zejména technologií spalování, kvalitou spalování a konstrukcí spalovacího zařízení. Souhrnně se tyto zásahy do procesu spalování nazývají primární. Další způsob ovlivnění množství je způsob sekundární, kdy se provádí úprava spalin, které jdou ze spalovací komory. Zde se provádí odstranění nežádoucí složky, například NO<sub>x</sub>. Tedy separace probíhá až po samotném spalovacím procesu.

Primární a sekundární opatření se liší ve způsobu konstrukce, provozu a nákladech na pořízení a provoz. Je to základní způsob pro snížení oxidů dusíku. K sekundárnímu opatření se přistupuje v případě, že při použití primárních opatření není možné snížit koncentraci NO<sub>x</sub> na požadovanou hodnotu nebo je konstrukce omezena či znemožněna [7].

### 4.1 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ

Primární opatření (redukční metody) mají omezit vznik NO<sub>x</sub> při spalovacím procesu. Obecně můžeme říct, že primární opatření jsou jednoduchá, dají se kombinovat a v určité míře se dají použít i na stávající spalovací zařízení. Hlavní faktory, které se velkou mírou podílejí na vzniku NO<sub>x</sub>, jsou zmíněné v kap. 3.3.

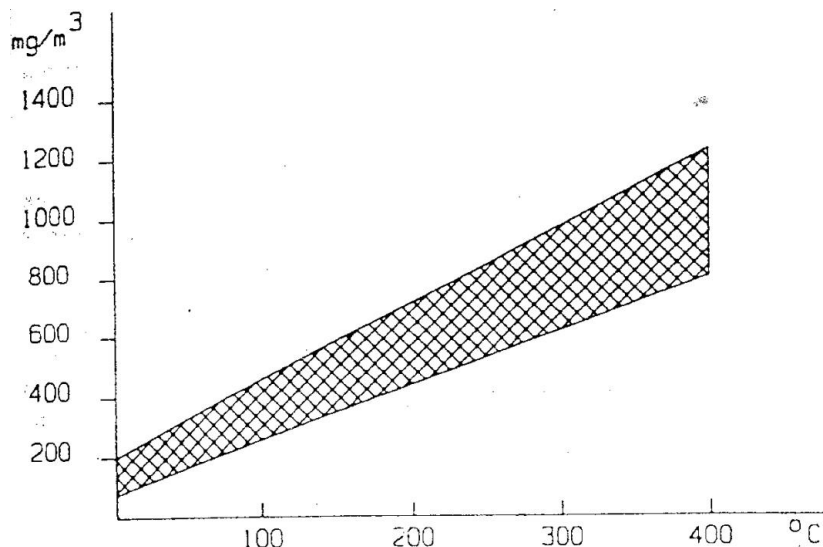
Je známo, že nejvíce NO<sub>x</sub> vzniká v teplotách vyšších než 1100 °C, kde roste množství oxidů téměř exponenciálně. Většina primárních opatření se snaží redukovat teplotní špičky, tedy snížit maximální dosaženou teplotu spalování. Proto jsou používány různé metody na potlačení, či omezení tvorby NO<sub>x</sub> [7].

#### 4.1.1 SPALOVÁNÍ PALIVA S NÍZKÝM PŘEBYTKEM SPALOVACÍHO VZDUCHU

Jednoduché opatření, při kterém nejsou nutné významné konstrukční změny spalovacího aparátu. Za určitých podmínek lze docílit i větší účinnosti. Nevýhodami této metody je, že nemusí docházet k úplnému spálení paliva nebo může dojít k nestabilitě hoření.

#### 4.1.2 NIŽŠÍ TEPLOTA PŘEDEHŘÁTÉHO SPALOVACÍHO VZDUCHU

Tato metoda zahrnuje snížení teplotního maxima předeřátého vzduchu, což má za důsledek snížení teploty v primární zóně spalovacího procesu. Opatření u stávajících spalovacích jednotek má ale za důsledek snížení účinnosti, proto se nepoužívá. Opakem jsou nová spalovací zařízení, kde je možné tento způsob redukce použít.



Obr. 6 - Tvorba NO<sub>x</sub> v závislosti na teplotě spalovacího vzduchu [8].

#### 4.1.3 NESTECHEIOMETRICKÉ SPALOVÁNÍ

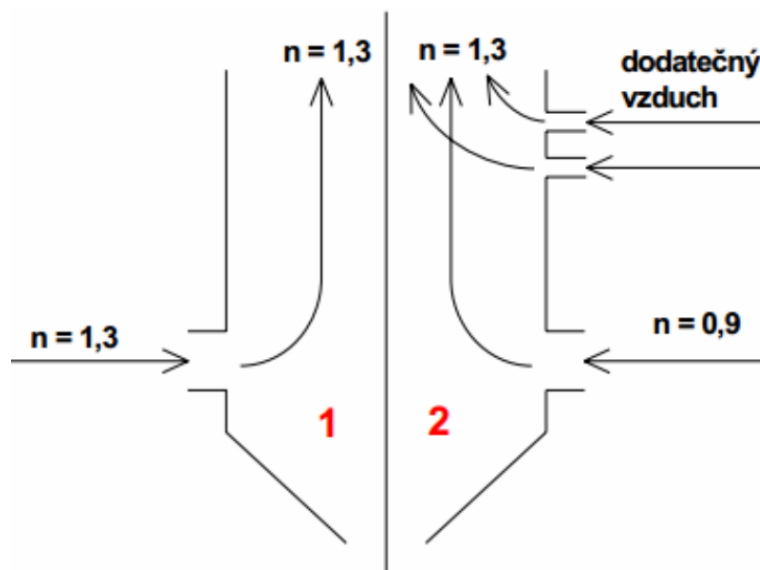
Představuje dávkování spalovacího vzduchu ve dvou úrovních. V první úrovni proběhne spalování za nedostatku spalovacího vzduchu a tedy při nízké spalovací teplotě, v druhém stupni se zbytek paliva a zplodiny nedokonalého spalování spálí s relativním přebytkem vzduchu.

Tento způsob je používán u hořáků na nízký obsah NO<sub>x</sub> a lze jej použít s drobnými úpravami i u stávajících spalovacích zařízení. Jednou z možností úpravy je zavedení sekundárního vzduchu zvláštními přívody do prostoru nad hořáky. Tímto způsobem lze dosáhnout snížení tvorby NO<sub>x</sub> až o 30 % [8]. Další možností je rozdělit funkce hořáků, kdy spodní řady pracují se sníženým obsahem spalovacího vzduchu a horní řady přivádějí palivo s přebytkem vzduchu, popřípadě jen vzduch.

#### 4.1.4 VÍCESTUPŇOVÉ SPALOVÁNÍ

Jedná se o velmi účinnou metodu snižování NO<sub>x</sub>. Konstrukčně jednoduchá metoda, využívá se jí hlavně u tepláren a vytopen. Jedná se o stupňovitý přívod paliva a spalovacího vzduchu, čímž se sníží teplota ve spalovacím prostoru a rozfázuje se spalovací proces [9].

U metody stupňového přívodu spalovacího vzduchu se ovlivňuje množství přítomného kyslíku, který se podílí na tvorbě nežádoucích NO<sub>x</sub>. Hlavní princip je vytvoření tzv. dvou spalovacích zón - primární a sekundární. V primární zóně se přivádí kyslík v podstechiometrické oblasti, tedy s jeho nedostatkem ( $\lambda = 0,9$ ). Ostatní, zbylé nespálené palivo je přivedeno do sekundární zóny spalování, kde se spalovací proces dokončí, tentokrát ale za mírného přebytku kyslíku ( $\lambda = 1,3$ ), při nižší spalovací teplotě. Touto metodou lze omezit tvorbu oxidů dusíku až o 50% [10], [11] oproti jednostupňovému spalování. Jedná se hlavně o omezení vzniku palivového NO a částečně termického NO.



Obr. 7 - Znázornění metody jednostupňového a stupňového přívodu vzduchu [20].

Při spalování v první zóně, kde je nedostatek vzduchu (kyslíku) dojde k rychlejšímu zapálení přítomného paliva. To má za následek zvýšení teploty v oblasti blízké hořáku, poté teplota klesá vlivem tepla, které odchází do stěn spalovací komory. Nedostatek kyslíku má za následek zvýšení tvorby oxidu uhelnatého, který podle rovnice redukuje produkovaný NO [15].

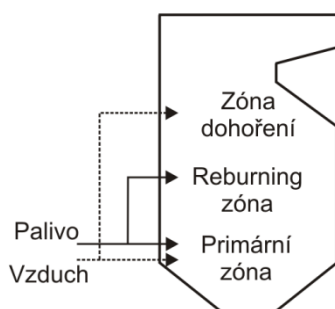


Podobný princip redukce  $NO_x$  jakou stupňovitěho přívodu vzduchu je stupňovitý přívod paliva, kde v první zóně spalování se přivede podstechometrické množství paliva a v druhé zóně se spalování dokončí.

Obě tyto metody (stupňovitý přívod vzduchu/paliva) jsou podstatou u tzv. nízkoemisních hořáků. Nestechiometrické spalování lze použít s určitými obměnami i u stávajících spalovacích systémů.

### „Reburning“

Varianta podobná stupňovitému přívodu vzduchu/paliva je metoda „reburning“. Jde o princip nástřiku paliva nad zónou hoření, kde mají spaliny nižší teplotu. Nástřikem se vytvoří uhlovodíkové radikály, které reagují s NO za vzniku KCN, ze kterého se redukuje  $N_2$ . Změnou od předchozích metod je, že „reburning“ využívá tři zóny hoření, tím lze dosáhnout až 30-70 % redukce  $NO_x$  v závislosti na konstrukci zařízení (velikosti spalovací komory) a primárním palivu [12], [13]. Nevýhodou této metody je požadavek na velkokapacitní komoru pro dosažení maximálního spalování uhlíkových sloučenin. Z tohoto důvodu se „reburning“ nepoužívá na stávajících zařízeních. Ovšem při výstavbě nových zařízení je tato metoda upřednostňována.



Obr. 8 - Princip metody „reburning“ [30].

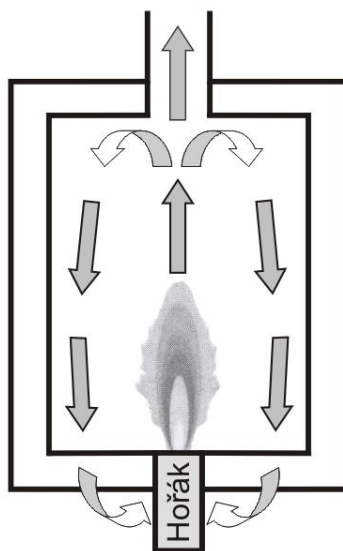
#### 4.1.5 CHLAZENÍ PLAMENE

Existuje několik možností, kterými lze dosáhnout chlazení plamene, tj. snížení teplotních špiček v oblasti plamene [6]:

- recirkulace spalin,
- nástřik vody nebo vodní páry,
- přebytek vzduchu.

#### Recirkulace spalin

Princip spočívá v přívodu části spalin zpět do prostoru spalovací komory. Vlivem recirkulovaných spalin dochází ke snížení koncentrace kyslíku v zóně spalování a následně ke snížení spalovací teploty. Recirkulace spalin je nejúčinnější z metod podobného opatření, její využití je ale omezeno na vysokoteplotní spalování [14]. Recirkulace spalin má v zásadě dvě možná provedení - vnitřní a vnější. Při vnitřní recirkulaci je nutná vlastní konstrukce hořáku, kdy se část spalin vrací po vnitřním obvodu spalovací komory zpátky k hořáku, kde dochází k tzv. ejekčnímu účinku.

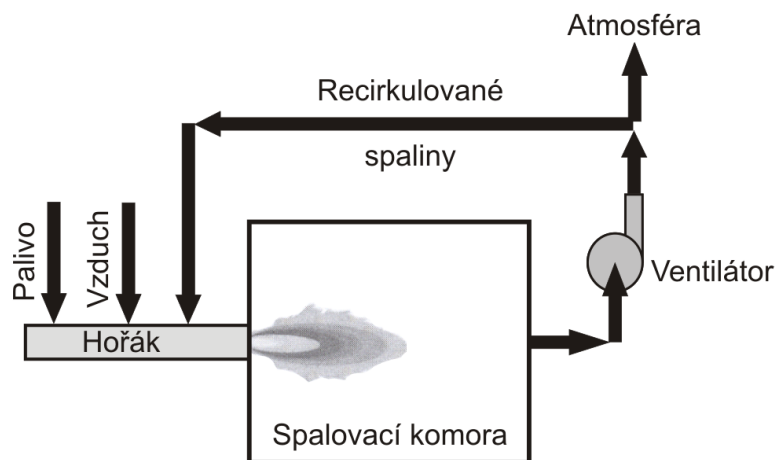


Obr. 9 - Znázornění vnitřní recirkulace spalin [23].

Vnější recirkulace spalin je méně závislá na konstrukci spalovací komory, část spalin je odebírána z odtahu a následně za pomoci spalinového ventilátoru dopravována k sání



hořáku, popřípadě přímo do místa hoření. Množství recirkulovaných spalín by nemělo přesáhnout 30%. Nad touto hranicí se, dochází k nestabilitě plamene [21].



Obr. 10 - Znáornění vnější recirkulace spalín [23].

### Nástřik vody do plamene

Podobnou možností jako recirkulace spalín je nástřik vody nebo vodní páry do plamene či prostoru spalovací komory. V zásadě jde také o snížení teploty spalování. Je potřebné dát pozor na nedokonalé spalování a tedy na tvorbu CO při přílišném zředění reakční směsi [16], [17].

### Přebytek spalovacího vzduchu

Další metodou je použití přebytku spalovacího vzduchu, většího než je stechiometrické množství. Přidáním většího množství spalovacího vzduchu do spalovací komory se teplota plamene sníží a tím se zmenší i tvorba termického NO.

#### 4.1.6 BEZPLAMENNÉ SPALOVÁNÍ

Jak název napovídá, základem této metody je předehřátí vzduchu, který vstupuje do hořáku na určitou teplotu. Obecně se jimi dosahuje zvýšení efektivity a ekonomičnosti provozu a také snížení produkovaných oxidů dusíku. Významné metody používající předehřátý vzduch jsou FLOX („*flameless oxidation*“) [33] a HiTAC („*High temperature air combustion*“) [34]. V těchto metodách se vzduch ohřívá až nad teplotu samovznícení paliva, vzniká tzv. bezplamenné spalování.

Při metodě HiTAC lze použitím dvou hořáků předehřát vstupní vzduch pomocí moderního regeneračního systému na teplotu o 100-150°C nižší oproti teplotě v kotli. Výhodou je až 60 % ušetření paliva [26], tím i nízká produkce CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a CO. Dalšími příznivými vlastnostmi bezplamenného spalování jsou rovnoměrné teplotní pole a nízká hlučnost spalování.

## 4.2 SEKUNDÁRNÍ OPATŘENÍ

Pokud provedená primární opatření nedosáhnou na požadovanou hodnotu obsahu oxidů dusíku ve spalínách, je třeba aplikovat tzv. sekundární redukční metody [18]. Princip je většinou založen na vstřikování redukčního činidla do spalín a vzniku molekulárního dusíku.

Nejrozšířenější metodou je selektivní redukce, která se dále rozděluje na katalytickou (SCR) a nekatalytickou (SNCR).

#### 4.2.1 KATALYTICKÉ ČIŠTĚNÍ SPALIN (SCR)

Metoda využívá redukčního činidla, které se nastříkuje do proudu spalin za přítomnosti katalyzátoru. Dochází k přeměně  $\text{NO}_x$  na molekulární dusík a vodu. Činidla na bázi dusíku reagují hlavně s oxidy dusíku, jen výjimečně s jinými sloučeninami. Běžně se používá jako redukční činidlo močovina a amoniak. SCR probíhá při výrazně nižších teplotách mezi 170 až 510 °C, ve srovnání se SNCR. Katalyzátory obecně přispívají k rychlému průběhu reakce tak, že snižují aktivační energii chemických reakcí, které potom probíhají dostatečně rychle i při výrazně nižších teplotách. Katalyzátor vstupuje do chemické reakce, adsorbuje na svůj povrch příslušné molekuly plynů a váže je na sebe.

#### 4.2.2 NEKATALYTICKÉ ČIŠTĚNÍ SPALIN (SNCR)

Při SNCR je redukční činidlo vstříkováno bez přítomnosti katalyzátoru do prostoru spalovací komory při teplotě 850 – 1100 °C. Jako nosič redukčního činidla je často využit stlačený vzduch, či pára a voda. Nejběžnějšími typy SNCR jsou:

- DeNO<sub>x</sub> - jako činidlo se využívá amoniak ( $\text{NH}_3$ ) nebo vhodněji vodný roztok hydroxidu amonného ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )
- NO<sub>x</sub>OUT - jako činidlo se používá močovina ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ )
- RAPRENO - jako činidlo se používá kyselina kyanurová ( $\text{HOCN}$ )<sub>2</sub>

#### 4.2.3 SIMULTÁNNÍ METODY

Další metodou jsou takzvané simultánní metody, s nimiž lze odstraňovat ze spalin současně oxidy dusíku a oxidy síry. Hlavní typy simultánních metod jsou mokré, polosuché a suché vypírky. Mokré vypírky fungují na principu navázání znečišťujících látek na kapalinu a následný odvod a filtraci. Nevýhodami této metody jsou: (1) přečištěné spaliny mají nízkou teplotu a je nutné je před vstupem do komína přehřívát a (2) musí se čistit odpadní vody vycházející z tohoto procesu.

Výhody sekundárních metod [25]:

- nezávislost systému na konstrukci spalovny
- vysoká účinnost odstranění  $\text{NO}_x$  ze spalin (až 90 %)
- nízké provozní náklady (mimo redukční činidlo)
- nízké prostorové nároky

Nevýhody sekundárních metod [25]:

- nutnost likvidace odpadního produktu u mokrých vypírek
- investiční náklady
- přehřívání spalin u mokrých vypírek

## 5 PŘENOS TEPLA

Energie může být přenesena interakcí systému s jeho okolím. Tyto interakce jsou buď práce nebo teplo. Pro přenos tepla z okolí do soustavy a naopak však musí existovat teplotní gradient nebo rozdíl teplot. Jinak nedojde k přenosu tepla. U spalování se jedná o teplotu plamene a teplotu spalovací komory, tedy jde o přenos tepla z horkých spalin do ohřívávaného materiálu nebo do procesních trubek. Sdílení tepla pak můžeme rozčlenit podle mechanismu přestupu na:

- tepelná výměna sáláním (zářením, radiací)
- tepelná výměna prouděním (konvekci)
- tepelná výměna vedením (kondukcí)

Přenos tepla v reálných situacích v různých zařízeních je obvykle kombinací dvou nebo i všech tří uvedených způsobů. Dominantním typem přenosu tepla ve spalovacím zařízení je sálání (radiace).

### 5.1 PŘENOS TEPLA RADIACÍ

Z každého povrchu, který má nějakou konečnou teplotu, je vyzařována energie. Tomuto procesu říkáme tepelné záření (radiace). Je to hlavní mechanismus přenosu tepla u spalování, jelikož je teplota závislá na čtvrté mocnině. Na rozdíl od konvekce a kondukcce není radiace závislá na existenci hmotného prostředí. Záření je tedy proces, který může probíhat i v absolutním vakuu. Jako dominantní složky produktů při hoření plyných směsí je směs plynů  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Tyto plyny jsou značnými zářiči tepelné radiace i silnými absorbenty a ve velké míře se podílí na přenosu tepla radiací. Přenos tepla, který může být z povrchu emitován, je dán tzv. Stefan-Boltzmannovým zákonem [21]:

$$Q = \sigma \cdot S \cdot \epsilon \cdot T^4 \quad (27)$$

kde:  $Q$  - je teplo [W·s],  
 $\epsilon$  - emisivita (poměrná zářivost) [-],  
 $\sigma$  - Stefan-Boltzmannova konstanta ( $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$ ) [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)],  
 $S$  - plocha povrchu [m<sup>2</sup>],  
 $T$  - teplota [K].

Poměrná zářivost nabývá hodnot v rozmezí  $0 \leq \epsilon \leq 1$  a říká, jak efektivní je záření z povrchu v porovnání s ideálním zářičem - absolutně černým tělesem. Přenos tepla radiací roste úměrně se čtvrtou mocninou, proto se s rostoucí teplotou ve spalovacím zařízení stává oproti kondukcí a konvekci dominantním.

### 5.2 PŘENOS TEPLA PROUDĚNÍM

Přenos tepla prouděním (konvekci) je složen ze dvou mechanismů. Základní je náhodný pohyb molekul (difúze) jako u kondukcce. Druhým mechanismem je objemový pohyb tekutiny. To značí, že v kterémkoliv okamžiku se množství molekul pohybuje kolektivně, ve velkých objemech.

Nejtypičtější je přenos tepla konvekcí mezi proudící tekutinou a omezujícím povrchem, za jejich různých teplot. V blízkosti povrchu se tvoří vrstva tekutiny, v níž se rychlost proudění mění od 0 až po rychlost nazývanou rychlost volného proudu. Zde mechanismus dominuje v blízkosti povrchu, kde je rychlost tekutiny nízká, na povrchu rychlost klesá na nulu. Druhý mechanismus se uplatňuje tak, že tekutina je strhávána z volného proudu do mezní vrstvy, kde odeberá teplo [27].

Konvekce může být klasifikována podle povahy proudění:

- nucená – vyvozená ventilátorem, kompresorem, čerpadlem
- přirozená – vyvozená rozdílem hustot (v důsledku rozdílu teplot)

Pro určení přenosu tepla konvekcí platí tato zjednodušená Newtonova rovnice:

$$Q = S \cdot \alpha \cdot (T - T_w) \quad (28)$$

kde:  $Q$  - přenos tepla [W·s],  
 $S$  - plocha přestupu tepla [m<sup>2</sup>],  
 $\alpha$  - součinitel přestupu tepla [W/(m<sup>2</sup>·K)],  
 $T$  - teplota tekutiny [K],  
 $T_w$  - teplota povrchu tělesa, které je v přímém kontaktu s tekutinou [K].

### 5.3 PŘENOS TEPLA VEDENÍM

Přenos (sdílení) tepla vedením spočívá v přenosu tepla ve směru klesající teploty; tedy ději způsobených interakcí mezi bezprostředně sousedícími částicemi v daném tělese. V kapalinách a plynech se k tomuto sdílení tepla připojuje také sdílení tepla prouděním.

Vedení tepla lze charakterizovat jako přenos energie od více energetických k méně energetickým částicím. Vyšší teplota je spojena s vyšší energií částice. Existuje-li v látce teplotní gradient, pak se přenos tepla uskutečňuje ve směru klesající teploty. U kapalin lze pozorovat náhodný pohyb molekul z oblastí s vyšší energií do oblastí s nižší energií. Tomuto pohybu s předáváním energie říkáme difúze energie, a proto se také vedení tepla často označuje jako proces tepelné difúze. Podle Fourierova zákona platí [27]:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (29)$$

kde:  $q_x$  - měrný tepelný tok [W/m<sup>2</sup>],  
 $k$  - tepelná vodivost [W/(m · K)],  
 $dT$  - rozdíl teplot mezi dvěma místy [K],  
 $dx$  - vzdálenost mezi dvěma místy [K].

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Stěžejní částí práce byla vlastní experimentální činnost. Tato činnost byla zaměřena na získání a zpracování dat ze spalovacích zkoušek hořáku se stupňovitým přívodem paliva. U tohoto hořáku byla provedena detailní zkouška, při které byl sledován vliv konstrukčních prvků a provozních parametrů hořáku na řadu parametrů.

### 6.1 ZKUŠEBNA HOŘÁKŮ

Experimentální data byla získána na zkušebně hořáků ÚPEI určené pro zkoušky, výzkum a vývoj průmyslových hořáků [26]. Technologie je navržena pro instalaci hořáků na plynná a kapalná paliva do maximálního výkonu 1,8 MW.



Obr. 11 - Foto zkušebny.

Stěžejním aparátem zkušebny je dvouplášťová horizontální vodou chlazená spalovací komora o vnitřním průměru 1 m a variabilní délce 2 až 4 m. Čela spalovací komory jsou izolovány vysokoteplotní vláknitou vyzdívkou o tloušťce 100 mm. Vnitřní plášť spalovací komory není ze strany plamene nijak izolován, je pouze chlazen vodou. Cirkulující chladicí voda je čerpána ze zásobníku s kontinuálním dopouštěním a po průchodu spalovací komorou, kde dojde k jejímu oteplení, je vedena na chladicí věž. Po ochlazení v chladicí věži je voda svedena zpět do zásobníku.

Chlazení spalovací komory umožňuje částečně simulovat podmínky podobné podmínkám v ohřevných pecích procesního průmyslu. Meziplášťový prostor spalovací komory je rozdělen na sedm samostatných sekcí, ve kterých proudí chladicí voda. Délka prvních šesti sekcí je 0,5 m, poslední sekce má délku 1 m. Pro usměrnění toku chladicí vody a tím i k rovnoměrnému obtékání celého ochlazovaného povrchu je v meziplášťovém prostoru použita šroubovice.

Každá sekce je vybavena senzory teploty a průtoku vody. To nabízí možnost vyhodnotit přenos tepla do stěny spalovací komory po délce plamene. Dalším pozitivním efektem rozdělení meziplášťového prostoru do sekcí je zlepšení cirkulace vody, čímž se

sníží riziko vzniku lokálního varu. Spalovací komora je opatřena podélně inspekčními otvory ve vzdálenosti 0,5 m od sebe, tj. osm inspekčních otvorů na každé straně, a dvěma inspekčními otvory na protilehlém čele, kterými lze pozorovat plamen na hořáku. Inspekční otvory mohou být dále využity k instalaci přídatné měřicí techniky (termočlánky, radiační sondy).

Spalovací vzduch je přiváděn k hořáku vzduchotechnickým potrubím o čtvercovém průřezu. Maximální výkon ventilátoru je přibližně  $2700 \text{ m}_N^3/\text{h}$  při maximálním přetlaku 7 kPa. Na potrubí je umístěno snímání teploty, tlaku a průtoku vzduchu. Samotné napojení hořáku je řešeno přechodovým kusem mezi přírubami.

Podtlak ve spalovací komoře je udržován pomocí ejektoru, který je umístěn ve spodní části komína. Jako hnací médium je používán vzduch přiváděný vysokotlakým ventilátorem doplněným o frekvenční měnič. U zařízení je možné dosáhnout podtlaku až  $-600 \text{ Pa}$ . Ejektor dále plní funkci chlazení spalin odcházejících ze spalovací komory.

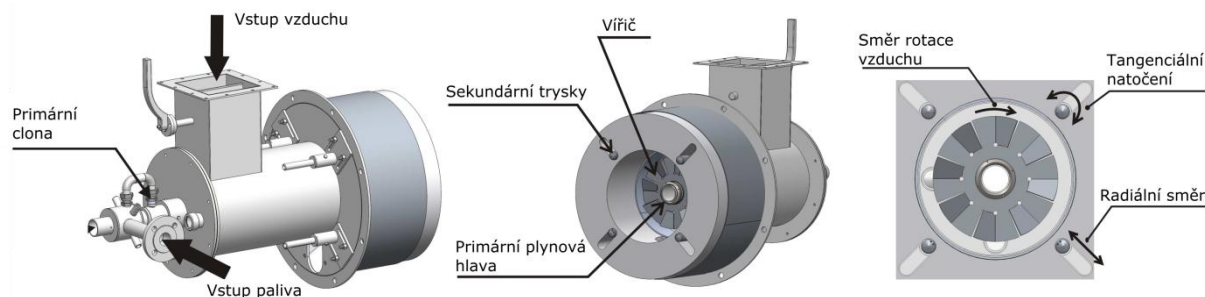
Do prostoru zkušebny je přiveden středotlaký zemní plyn o přetlaku cca 100 kPa a kapacitě  $250 \text{ m}_N^3/\text{h}$ . Plyn prochází plynoměrem, který slouží pro měření spotřeby plynu zkoušeného hořáku a pro výpočet a nastavování výkonu hořáku. Přívod zemního plynu pro výkonové hořáky je řízen regulačním ventilem. Kromě hořáků na plynná paliva umožňuje zkušebna rovněž zkoušky hořáků na lehké a těžké topné oleje.

Na komoře je umístěno snímání tlaku uvnitř komory. Na kouřovodu je měřena teplota spalin a je zde umístěna sonda pro odběr spalin pro analýzu. Sonda je napojena hadicí na analyzátor spalin Testo 350-XL. Před vstupem spalin do analyzátoru je ze spalin vyloučena voda. Analyzační box Testo 350-XL je vybaven elektrochemickými čidly pro stanovení koncentrace následujících sloučenin obsažených ve spalinách, a to  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ , a  $\text{NO}_2$ .

Zkušebna je vybavena sofistikovaným systémem pro sběr dat a bezpečnostním systémem. Systém pro sběr dat umožňuje jednak automatický sběr dat po vteřině nebo po dvou minutách, a jednak zápis dat na povel operátora. Systém sbírá data všech měřených veličin zahrnující průtoky spalovacího vzduchu, paliva a chladicí vody, teploty spalovacího vzduchu, paliva a chladicí vody, tlaky v přívodních potrubích a složení a teplotu spalin na výstupu ze spalovací komory. Všechny měřené a dopočítané veličiny řídicí jednotkou pak lze odečíst i z ovládacího panelu.

## 6.2 HOŘÁK

Pro účely spalovacích zkoušek byl použit hořák s dvoustupňovým přívodem zemního plynu a jednostupňovým přívodem spalovacího vzduchu. Jedná se o difuzní typ hořáku, tj. palivo se spalovacím vzduchem jsou přiváděny do spalovacího prostoru odděleně a nejsou předmíseny před vlastním spalováním. Do prostoru spalovací komory vstupuje spalovací vzduch centrální vzduchovou trubicí, na kterou navazuje hořáková tvarovka, tzv. hořákový kámen. Vnitřní průměr hořákového kamene je 300 mm, vnější průměr je 600 mm.



Obr. 12 - Model hořáku s dvojestupňovým přívodem plynu.

Přívod paliva je tvořen dvanácti primárními tryskami a osmi sekundárními tryskami. Primární trysky jsou vyvrtané v primární hlavě a jsou rozmístěny ve dvou kruhových polích. První sada je tvořena čtyřmi tryskami o průměru 3 mm, druhá sada je tvořena zbývajících osmi tryskami o průměru 2,6 mm. Maximální výkon primárního stupně je regulován vyměnitelnou primární clonou různých průměrů. Omezovací clona je umístěna před vstupem do hořáku.

Sekundární přívod plynu je zajištěn čtyřmi sekundárními hlavami. K dispozici jsou hlavy s různým úhlem sklonu hlavy. V každé hlavě jsou vyvrtány dvě trysky, každá o průměru 3,3 mm. Hořák je zkonstruován tak, aby bylo možné změnit polohu sekundárních trysek vzhledem k hořákovému kameni v axiálním, tangenciálním i radiálním směru. Referenční tangenciální poloha trysky odpovídá poloze, při které jsou trysky orientované přímo do osy hořáku. Orientaci lze měnit buď po směru hodinových ručiček (ve směru víření spalovacího vzduchu - pozitivní úhel) nebo proti směru hodinových ručiček (negativní úhel). V referenční radiální poloze je vzdálenost sekundárních trysek od osy hořáku 180 mm a může být zvětšena až o 50 mm. Polohu sekundárních hlav vzhledem k hořákovému kameni lze také měnit v axiálním směru, avšak již dříve bylo vyhodnoceno [30], že změna této polohy nemá významný vliv z hlediska tvorby  $\text{NO}_x$ . Mimo to vysunutí sekundárních hlav do spalovacího prostoru by mohlo znamenat při dlouhodobém provozu jejich zničení.

Hořák je osazen poutačem plamene typu víříč. Víříč se skládá z osmi lopatek a byl namontovaný na centrální hořákové trubce. Víříč uděluje proudu spalovacího proudu tangenciální složku rychlosti, tj. zajišťuje turbulentní proudění spalovacího vzduchu a tím podporuje intenzivní promíchávání primárního plynu se spalovacím vzduchem. Kromě toho také zabraňuje utržení či zhasnutí plamene. Pro zapálení plamene byl použit hořák o výkonu cca 20 kW s přirozeným přívodem vzduchu spalující zemní plyn.

### 6.3 PLÁN ZKOUŠEK

Spalovací zkoušky se skládaly ze tří testů. V prvním testu - TEST A - bylo měření zaměřeno na měření množství  $\text{NO}_x$  ve spalinách v závislosti na nastavení parametrů. V druhém testu - TEST B - se pozornost soustředila na vyhodnocení tepelných toků do stěn jednotlivých sekcí spalovací komory. Oproti prvním testu nebyly hodnoty měřeny na všech nastaveních hořáku, ale pouze pro vybraná nastavení. Třetí test - TEST C - byl zaměřen na měření rozložení teplot v plameni v horizontální rovině symetrie spalovací komory. TEST C také probíhal jen pro určitá nastavení hořáku. Hlavní parametry, které se měnily, zahrnovaly: velikost clony, přebytek vzduchu, sklon trysek a natočení trysek.

## 7 TEST A

Cílem prvního testu bylo zjistit závislost koncentrace  $\text{NO}_x$  ve spalínách na různých parametrech hořáku. Jednalo se jednak o parametry konstrukční, tak i o parametry provozní. Výsledkem tohoto testu byl matematický model pro predikci koncentrace  $\text{NO}_x$  ve spalínách na základě zadaných vstupních parametrech.

Protože vlastní zkoušky zkušebního hořáku jsou finančně i časově náročné experimenty, ve kterých je snaha získat co možná nejvíce experimentálních dat v co možná nejmenším nákladu, bylo modelování vybraného spalování založeno na statistické analýze experimentálních dat. Bylo tedy možné analyzovat velké objemy naměřených dat.

Užitím metod aplikované statistiky se zefektivnilo hledání důležitých, pro experiment stěžejních dat vedoucích na správné popsání charakteristik a chování hořáku při změnách jednoho či více parametrů při spalování. Aplikací statistických metod, konkrétně metody plánování experimentu, lze při zkoušce hořáku naměřit data jen pro určitou oblast nastavení hořáku a pro zbývající nastavení data aproximovat modelem zkonstruovaným z naměřených dat. Takto lze minimalizovat náklady a přitom obdržet věrohodné výstupy zkoumaných veličin.

Uspořádání experimentu závisí na konkrétním řešeném problému, a to na počtu faktorů a na počtu úrovní faktorů, na cíli experimentu, na homogenitě experimentálních podmínek a v neposlední řadě je třeba vzít v úvahu i ekonomická kritéria.

V podstatě lze říci, že je nutné vytvořit takové podmínky, aby rozsah experimentu byl minimální a současně množství a kvalita informací byla maximální. Tento požadavek se uplatňuje mnohem výrazněji u experimentů s vysokým počtem faktorů. Důsledné respektování tohoto požadavku vedlo k vytvoření samostatného odvětví aplikované statistiky, tzv. plánovaného (řízeného) experimentu. V literatuře se označuje jako „*Design of Experiments*“ (DOE).

### 7.1 CHARAKTERISTIKA DOE

Pojmem statisticky navržený experiment označujeme strategii řešení úloh pomocí vhodně navržených a vyhodnocených experimentů. V literatuře bývá takový experiment nejčastěji označován již zmíněnou zkratkou DOE.

Experimentování představuje vlastně testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů, o nichž si myslíme, že mají vliv na odezvu (charakteristiku jakosti). Protože testování všech variant představuje neúměrně veliký počet zkoušek, používají se pro experimentování zkrácené metody, které zkoumají pouze určitou frakci všech možných kombinací. DOE používající „*Taguchiho*“ přístup představuje postup, který výrazně redukuje nutný počet zkoušek a přináší mnoho dalších výhod.

**Obecně DOE přináší tyto užitky:**

- zlepšování (optimalizaci) jakosti
- snižování nákladů
- redukci neshodných výrobků
- vyšší spokojenost zákazníka



## Oblasti použití DOE

- analytické simulace
- návrh a vývoj výrobku
- návrh a vývoj procesu
- zlepšování procesu
- testování a validace
- řešení problémů s jakostí ve výrobě
- efektivní použití
- pro analýzu a zlepšování systému měření

## 7.2 STATISTICKÉ PLÁNOVÁNÍ EXPERIMENTU

Statistické plánování experimentu je takový proces navrhování experimentu, při kterém jsou získána vhodná data, která jsou dále zpracována statistickými metodami. Výsledkem jsou pak platné a objektivní závěry. Plánování experimentu je postaveno na třech základních principech [29], a to replikace, znáhodnění a blokování.

- *Replikace* - opakování celého základního experimentu nebo části experimentu při stejné úrovni nebo kombinaci úrovní faktorů. Důležitou vlastností replikace je, že umožňuje odhadnout experimentální chybu a tím přispívá k přesnosti odhadů a spolehlivosti závěrů.
- *Znáhodnění* - základní kámen užití statistických metod v plánování experimentu. Jejím cílem je zabránit systematickému působení nějakého rušivého vlivu (např. únava operátora) na odezvu. Realizuje se náhodným střídáním kombinací úrovní faktorů během experimentu.
- *Blokování* - technika, která zvyšuje přesnost experimentu. Blokování spočívá v rozdělení celého experimentu do bloků tak, že v rámci jednoho bloku je dosaženo stejnorodějších experimentálních podmínek než v rámci celého experimentu. Blokování se uplatňuje zejména při experimentech v poloprovozním nebo provozním měřítku, kde při opakování pokusů bývá obtížné udržet pokaždé stejné podmínky vlivem kolísání hodnot proměnných, které do experimentu nejsou zahrnuty (vnější, rušivé proměnné).

## 7.3 ZÁKLADNÍ TYPY PLÁNŮ EXPERIMENTŮ

Plán experimentu je v podstatě matice vytvořená ze sloupců normovaných faktorů, např. výkon hořáku, průměr víříče apod. Úrovně faktorů se normují z toho důvodu, že při použití normovaných (kódovaných, bezrozměrných) úrovní faktorů se při analýze dat eliminuje jakýkoliv falešný statistický výsledek vzniklý v důsledku různých rozměrů každého z faktorů. V případě dvouúrovňových systémů nabývají po normování spodní a horní úrovně faktorů hodnot -1 a +1. Normovaná úroveň faktoru  $X$  se určí podle vztahu:

$$\text{normovaná úroveň} = \frac{X - \frac{(\text{spodní úroveň} + \text{horní úroveň})}{2}}{\frac{(\text{horní úroveň} - \text{spodní úroveň})}{2}} = \frac{X - AVG}{MID} \quad (30)$$

kde:  $AVG$  - průměrná hodnota úrovní faktoru,  
 $MID$  - poloviční rozsah úrovní faktoru.

Normované proměnné budou dále označeny jako  $x_1, x_2, \dots, x_k$ . Pro matici plánu experimentu platí, že první sloupec je tvořen fiktivní proměnnou  $x_0$ , pro niž platí  $x_{i0} = 1$ . Např. matice  $\mathbf{X}$  plánu pro dva faktory může mít níže uvedený tvar:

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} & x_0 & x_1 & x_2 \\ \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} & & & \end{matrix} \quad (31)$$

Při výběru plánu experimentu je nezbytné uvažovat velikost experimentu (tj. určit počet replikací), zda zahrnout blokování či ne a zejména mít na paměti jaký je cíl experimentu. Základní typy experimentů jsou uvedeny v následujících kapitolách.

### 7.3.1 EXPERIMENTY S JEDNÍM FAKTOREM

Tyto experimenty jsou nejjednodušším případem experimentu. Faktor můžeme uvažovat se dvěma nebo více úrovněmi. Počet úrovní faktoru je buď dán povahou řešeného problému, nebo jej volíme. Výsledky měření mohou být ovlivněny nejen zkoumaným faktorem, jehož úroveň v experimentu aktivně měníme, ale i dalšími příčinami. Kromě náhodných vlivů, které jsou součástí každého procesu, působí i vymezitelné příčiny, které nejsou přímo předmětem našeho zájmu, ale které je výhodné zahrnout do experimentu jako blokové faktory. Úrovně blokového faktoru jsou často určeny dosažitelnými experimentálními podmínkami. Avšak i v případech, kdy by bylo možné provést experiment při jediné úrovni blokového faktoru, je výhodné volit úrovní několik a rozšířit tak platnost závěrů [31].

### 7.3.2 FAKTOROVÉ EXPERIMENTY

Jsou nejefektivnější pro experimenty vyšetřující vliv dvou a více faktorů na odezvu. Rozlišují se dva základní typy faktorových experimentů – úplný a zkrácený. Úplný faktorový experiment zahrnuje všechny možné kombinace úrovní zkoumaných faktorů, zato ve zkráceném faktorovém experimentu jsou některé kombinace vynechány. V praxi se často používají faktorové experimenty se dvěma či třemi úrovněmi faktorů a značí se  $2^k$  nebo  $3^k$  v případě úplných experimentů, kde číslo  $k$  udává počet zkoumaných faktorů. Při větším počtu faktorů lze využít zkráceného experimentu  $2^{k-p}$ , kde číslo  $p$  udává stupeň zkrácení. Např. pro  $p = 1$  se jedná o experiment s polovičním počtem měření apod.

U experimentů se dvěma úrovněmi pro každý faktor ( $2^k$ ) se předpokládá, že odezva je přibližně lineární pro oblast danou úrovněmi faktorů. Výsledky experimentu lze vyjádřit lineárním regresním modelem prvního řádu, který znázorňuje závislost sledované veličiny na měřitelných faktorech.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad (32)$$

kde:  $\beta_i$  - lineární účinek faktoru  $x_i$ ,  
 $\beta_{ij}$  - bilineární interakci mezi faktory  $x_i$  a  $x_j$ .

Pro určení odhadu neznámých regresních koeficientů se používá metoda nejmenších čtverců. Užitím tohoto modelu pak lze např. určit, při kterých nastavení zkoumaných faktorů

je dosaženo optimální hodnoty sledované veličiny. Aby bylo možné odhadnout experimentální chybu, doplňuje se experiment několika měřeními ve středu plánu, čemuž odpovídá normovaná úroveň faktoru nula. Tato přidaná pozorování neovlivní odhady regresních koeficientů (kromě regresní konstanty  $\beta_0$ ) a navíc umožní posoudit adekvátnost modelu.

Když se model prvního řádu z předchozí rovnice projevil jako neadekvátní vzhledem k naměřeným veličinám, anebo se při hledání modelu již předem očekávají nelineární závislosti odezvy na některých faktorech, musí se hledat složitější tvar modelu, tj. model druhého řádu (tzn. polynom obsahující kvadratické členy). Regresní model druhého řádu s  $k$ -faktory má tvar:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \varepsilon \quad (33)$$

kde  $\beta_{ii}$  - vyjadřuje kvadratický účinek faktoru  $x_i$ ,  
 $\varepsilon$  - náhodná chyba, o níž se předpokládá, že má nulovou střední hodnotu, konstantní rozptyl a normální rozdělení.

Aby bylo možné odhadnout všechny regresní parametry modelu druhého řádu, je zapotřebí zahrnout v plánu experimentu alespoň tři úrovně pro každý faktor. V případě provedení úplného faktorového experimentu by bylo zapotřebí provést  $3k$  měření (všechny kombinace úrovní faktorů). Avšak v případě vysokého počtu vstupních faktorů ( $>5$ ) by počet měření závažně narostl a to by znamenalo v případě zkoušek hořáku nesmírně náročný experiment jak po stránce časové, tak i po stránce finanční. Z tohoto důvodu se v praxi používají ke konstrukci modelů druhého řádu sofistikovanější plány.

### 7.3.3 EXPERIMENTY PRO ODEZVOVÉ PLOCHY

V průmyslových aplikacích patří k vysoce efektivním nástrojům pro nalezení adekvátního modelu experimenty pro odezvové plochy („*Response Surface Methodology*“, RSM) [32]. Jedná se o matematické a statistické techniky, které jsou velmi užitečné při modelování a analýze problému, ve kterém je odezva ovlivňována několika proměnnými a cílem je popsat vliv jednotlivých proměnných na zkoumanou veličinu nebo nalézt optimální hodnoty sledované veličiny. Populárním plánem pro konstrukci odezvoových ploch druhého řádu je tzv. centrálně kompoziční plán („*Central Composite Design*“, CCD). Výhodou tohoto plánu je, že umožňuje konstrukci odezvové plochy, bez toho aniž by bylo zapotřebí provést úplný faktorový experiment  $3^k$ . Centrálně kompoziční plán se skládá ze tří částí:

1. Jádrem plánu je buď úplný faktorový plán  $2k$  nebo zkrácený faktorový  $2^{k-p}$ , kde  $k$  je počet vstupních faktorů a  $p$  je stupeň zkrácení. Nutnou podmínkou je, aby jádro plánu zabezpečilo odhad všech koeficientů modelu. U modelu druhého řádu se jedná o odhad  $(k+1)(k+2)/2$  koeficientů.
2. Hvězdicovité body leží na osách jednotlivých faktorů ve vzdálenosti  $a$  od středu plánu (průsečík os) na obě strany.
3. Centrální body jsou body ve středu plánu se souřadnicemi  $(0, 0, \dots, 0)$ .

Pak celkový počet měření centrálně kompozičního plánu je roven:

$$N = N_0 + 2k + n_c \quad (34)$$

kde:  $N_0$  - počet měření úplného, resp. zkráceného, faktorového experimentu,  
 $2k$  - počet hvězdicovitých bodů,  
 $n_c$  - počet centrálních bodů.

Tento celkový počet je obvykle méně než  $3k$ , takže v případě centrálně kompozičního plánu je vyžadováno méně měření než v případě  $3k$  faktorového experimentu.

## 7.4 PLÁN EXPERIMENTU

Plán experimentu byl navržen prostřednictvím statistického software MINITAB [28], který disponuje nástrojem DOE pro navrhování plánů experimentu a následnou analýzu dat. Byl zvolen centrální kompoziční plán.

Daný plán experimentu měl následující strukturu:

- Jádru plánu je tvořeno úplným faktorovým experimentem  $2^k$ . Tedy pro  $k = 4$  vstupních faktorů jádro plánu obsahuje  $2^4 = 16$  měření.
- Počet hvězdicovitých bodů je  $2k = 8$ .
- Počet centrálních bodů bylo pomocí MINITAB určeno  $n_c = 7$ .

Podle rovnice (34) byl pak počet měření bez opakování roven  $N = 16 + 8 + 7 = 31$ . Aby bylo možné rozhodnout o adekvátnosti nalezeného modelu a zvýšit spolehlivost závěrů, byl základní experiment zopakován třikrát. Plán experimentu společně s naměřenými hodnotami koncentrace NO je uveden v příloze A.

## 7.5 FAKTORY

U testovaného typu hořáku lze měnit různé parametry a jejich úrovně. Jejich vysoká variabilita tak umožňuje provedení detailní zkoušky. Dále lze ovlivnit spalování v hořáku i širokou škálou konstrukčních prvků, které mají nemalý vliv na spalování.

Parametry, kterými lze ovlivnit spalování v komoře spalovacího zařízení:

- výkon hořáku [kW]
- průměr víříče [mm]
- úhel natočení lopatek víříče [°]
- průměr clony na primárním přívodu plynu [mm]
- přebytek spalovacího vzduchu [-]
- úhel sklonu hlavy sekundárních trysek [°]
- tangenciální natočení sekundárních hlav [°]
- radiální vzdálenost sekundárních hlav [mm]
- axiální vzdálenost sekundárních hlav [mm]

Z časových důvodů byl proveden výběr hlavních faktorů, které budou měněny v průběhu experimentu. Dané parametry byly zvoleny na základě [30] s ohledem na provozní možnosti, konstrukční řešení hořáku a také rychlost změny nastavení jednotlivých faktorů

s co možná nejmenším zásahem do rozebrání hořáku, což má za následek ušetření doby prodlevy mezi jednotlivými měřeními. Zvolené proměnné parametry jsou shrnuty v tab. 6.

Tab. 6 - Proměnné faktory.

Faktory			úroveň				
označení		jednotka	1	2	3	4	5
X <sub>1</sub>	Průměr clony	mm	4	5,5	7	8,5	10
X <sub>2</sub>	Přebytek spalovacího vzduchu	-	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
X <sub>3</sub>	Tangenciální natočení sek. hlav	°	-60	-30	0	30	60
X <sub>4</sub>	Sklon sekundárních hlav	°	10	20	30	40	50

**Průměr clony na primárním přívodu plynu:** Průměr omezovací clony na primárním přívodu plynu ovlivňuje nejen rozdělení paliva na primární a sekundární stupeň, ale také značně ovlivňuje celkový výkon hořáku. Z toho důvodu bylo nutné zvolit takové průměry omezovací clony, při kterých bude ještě možné dosáhnout požadované úrovně výkonu hořáku.

**Přebytek vzduchu:** Rozsah přebytku vzduchu byl zvolen s ohledem na praktické zkušenosti z provozu na úrovních 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 a 1,5 násobku stechiometrického množství spalovacího vzduchu. To odpovídá objemové koncentraci kyslíku v suchých spalínách 2,1 %, 3,83 %, 5,26 %, 6,48 % a 7,52 %.

**Tangenciální natočení:** Při experimentu byly sekundární trysky otáčeny po směru (tj. ve směru rotace spalovacího vzduchu) i proti směru hodinových ručiček (tj. proti směru rotace spalovacího vzduchu). Trysky byly otáčeny v pěti polohách -60, -30, 0, 30, 60 stupňů.

**Úhel sklonu hlavy sekundárních trysek:** Úrovně tohoto faktoru byly zvoleny podle hlav, které jsou k dispozici. K dispozici byly hlavy s úhly sklonu 10, 20, 30, 40, 50 stupňů. Na základě vyhodnocení dat v [21] byly zvoleny faktory, které byly v průběhu spalovacích zkoušek neměnné. Tyto parametry jsou shrnuty v tab. 7.

Tab. 7 - Konstantní faktory.

Faktory	hodnota	jednotka
Výkon	1000	kW
Průměr vířiče	240	mm
Sklon lopatek vířiče	35	°
Radiální vzdálenost sekundárních hlav	230	mm
Axiální vzdálenost sekundárních hlav	0	mm

**Výkon hořáku:** Maximální výkon primárního stupně hořáku bez omezovací clony je přibližně 825 kW a maximální výkon sekundárního stupně hořáku je přibližně 760 kW při přetlaku plynu před vstupem do hořáku 80 kPa. Hodnota výkonu, při níž experiment probíhal, byla fixně nastavena na 1000 kW.

**Průměr vířiče a úhel natočení lopatek vířiče:** Jako další konstantní faktor byl zvolen vířič o průměru 240 mm a sklonu lopatek 35°.

**Radiální vzdálenost:** Po zkušenostech z předchozích měření [30], byla zvolena maximální vzdálenost nastavení radiálních trysek. Jde o radiální vzdálenost 230 mm od osy hořáku, kdy dochází k nejnižší tvorbě NO.

**Axiální vzdálenost sekundárních trysek:** Jako další konstantní hodnota byla zvolena hodnota axiální vzdálenosti sekundárních trysek. Z údajů v [30] je patrné, že při změně axiální vzdálenosti sekundárních trysek je změna tvorby NO minimální a proto lze vliv tohoto faktoru zanedbat. Mimoto v reálných zařízeních by vysunutí trysek do prostoru spalovací komory znamenalo výrazné zkrácení jejich životnosti v důsledku vysokých teplot.

## 7.6 MĚŘENÉ HODNOTY (ODEZVA)

Při určitých podmínkách spalovacího experimentu byla měřena koncentrace  $\text{NO}_x$  na výstupu ze spalovací komory tzv. odezva systému. Zkušební zařízení umožňuje zaznamenávat velký počet parametrů jednak na vstupu do spalovací komory tak i na výstupu spalin z ní. Hlavními odezvami byly NO a  $\text{NO}_2$ , které se následně přepočítaly na  $\text{NO}_x$  a dále na  $\text{NO}_x$  při 3 %  $\text{O}_2$  ve spalinách.

Na výstupu spalin ze spalovací komory byly měřeny následující hodnoty:

- teplota spalin na výstupu ze spalovací komory [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- koncentrace kyslíku v suchých spalinách [%]
- koncentrace CO v suchých spalinách [ppm]
- koncentrace NO v suchých spalinách [ppm]
- koncentrace  $\text{NO}_2$  v suchých spalinách [ppm]

Pro každé měření byly dále zaznamenávány na vstupu následující hodnoty:

- průtok plynu plynoměrem [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- tlak plynu v potrubí [kPa]
- tlak plynu před hořákem [kPa]
- teplota plynu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- podtlak v prostoru spalovací komory [Pa]
- průtok spalovacího vzduchu [ $\text{m}_N^3/\text{h}$ ]
- teplota spalovacího vzduchu [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- přetlak za ventilátorem [Pa]

Dále byla monitorována vizuální charakteristika plamene pomocí průhledítek ve spalovací komoře zahrnující průměr, délku, tvar a stabilitu plamene.

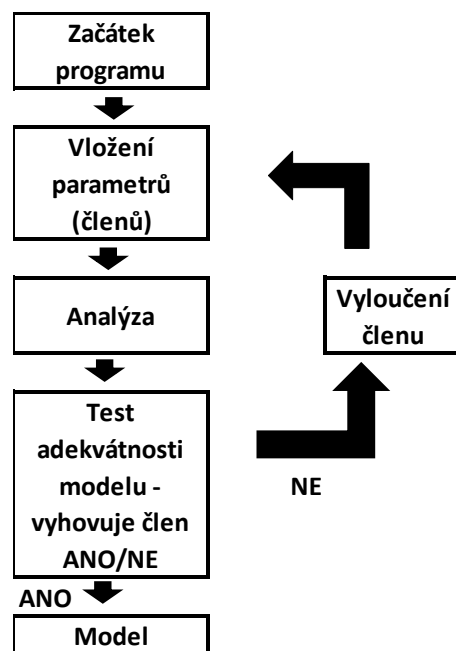
## 7.7 CÍL EXPERIMENTU

Výstupem experimentu bylo vyšetřit vliv skupiny konstrukčních prvků a provozních parametrů hořáku na tvorbu oxidů dusíku a nalézt vztah (závislost) vyjádřený empirickým modelem mezi touto skupinou parametrů a měřenou veličinou.

## 8 VYHODNOCENÍ TESTU A

### 8.1 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT - MODEL 1

Při tvorbě matematického modelu je důležité analyzovat naměřená data. Pomocí regresní analýzy se zjišťuje, zda jsou členy hledaného modelu statisticky významné a zda mají vliv na matematický model. Je-li některý člen modelu nevýznamný, je vyloučen a regresní analýza se provede od začátku podle schématu pro výpočet matematického modelu (obr. 13).



Obr. 13 - Iterační výpočet matematického modelu.

Hledání matematického modelu bylo prováděno v programu MINITAB. Statistická významnost parametrů byla prováděna na základě vypočítané P-hodnoty pro každý parametr. P-hodnota určuje pravděpodobnost, že se dopustíme chyby I. druhu. Je-li hodnota P pod hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ , je příslušný člen statisticky významný a v modelu zůstává. Je-li hodnota P vyšší jak hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ , provede se vyřazení členu a nastává opětovné přepočítání iteračního cyklu. Tento cyklus se opakuje do doby, dokud všechny členy modelu nesplňují podmínku: P-hodnota  $< \alpha$ .

Za pomoci programu MINITAB a po vyřazení statisticky nevýznamných členů, byl vygenerován matematický model tvorby emisí  $NO_x$  v závislosti na provozních parametrech spalování a konstrukčních parametrech hořáku ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 NO_x = & -1029 + 58,88 \cdot X_1 + 1267 \cdot X_2 + 0,072 \cdot X_3 + 7,32 \cdot X_4 - 3,943 \\
 & \cdot X_1^2 - 451,4 \cdot X_2^2 - 0,006637 \cdot X_3^2 - 0,02104 \cdot X_4^2 \\
 & - 3,92 \cdot X_2 \cdot X_4
 \end{aligned} \quad (35)$$

Kde:  $X_1$  - vliv velikosti clony,  
 $X_2$  - vliv přebytku spalovacího vzduchu,  
 $X_3$  - vliv natočení trysek,  
 $X_4$  - vliv sklonu trysek.

Následně bylo zapotřebí provést dva testy k posouzení správnosti nalezeného modelu. První test, tzv. F-test spočíval v ověření adekvátnosti modelu, druhý test ověřoval, zda mají rezidua normální rozdělení.

### 8.1.1 F-TEST MODEL 1

Tímto testem zjišťujeme, zda hodnota vysvětlované proměnné závisí na lineární kombinaci vysvětlujících proměnných. Pokud bychom nulovou hypotézu nezamítli, znamenalo by to, že množina vysvětlujících proměnných je zvolena zcela špatně a museli bychom najít jinou, lepší skladbu těchto proměnných. Říkáme, že nalezený model je neadekvátní.

Posouzení adekvátnosti modelu - posouzení kvality navrženého regresního modelu na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ . Vzdálenost modelu od průměrných naměřených hodnot ("*Lack-of-fit*") je rovna veličině  $s_r^2 = 5295,02$  a kolísání naměřených hodnot kolem průměrné hodnoty ("*Pure Error*") je vyjádřeno odhadem  $s_e^2 = 145,1$ . Kvantil F Fisher-Snedecorova rozdělení se stupni volnosti  $k_1 = 29$ ,  $k_2 = 62$  je dle statistických tabulek roven  $F = 1,643$ . Pak dle testovacího kritéria vychází poměr rozptylů:

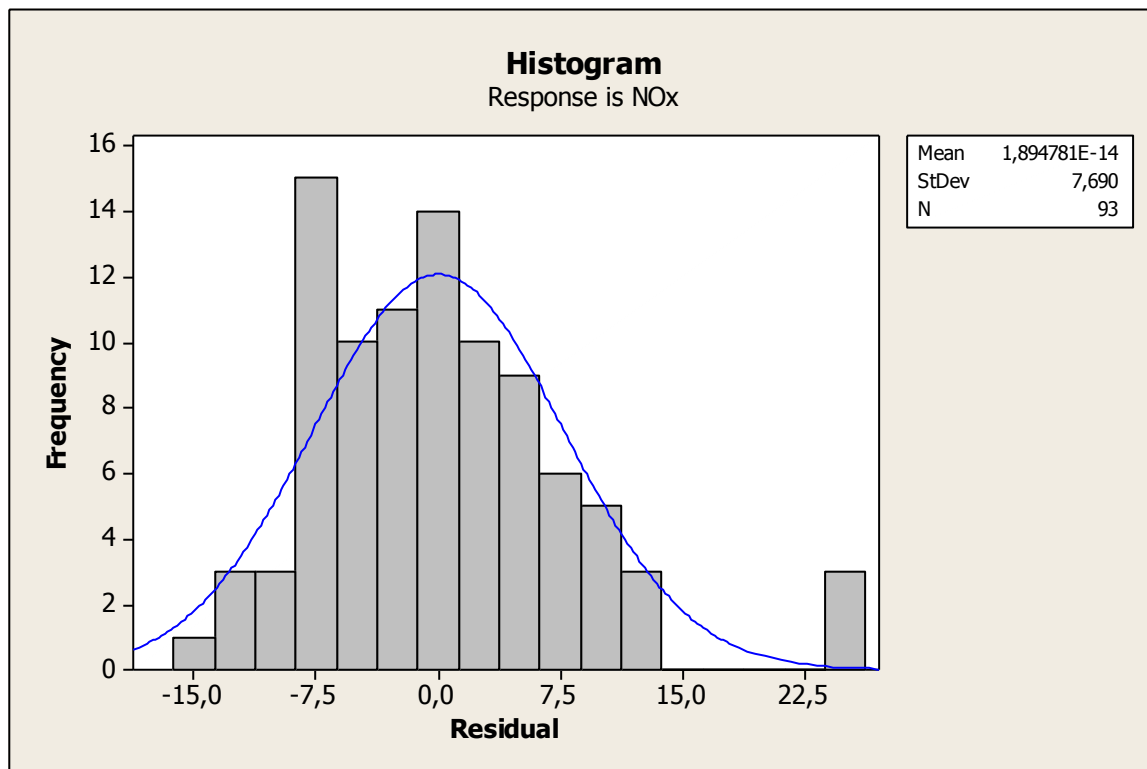
$$\frac{s_r^2}{s_e^2} = 36,493 \geq 1,643 \quad (36)$$

Po posouzení adekvátnosti modelu je zřejmé, že vytvořený model je neadekvátní. Je zde vysoký poměr rozptylů, které udávají vzdálenost modelu od průměrných naměřených hodnot. Hodnota  $R^2$ , která udává schopnost modelu popsat změny odezvy pro dané experimentální podmínky, je rovna 78,6 %. Následně byl vytvořen pravděpodobnostní graf reziduí, pomocí kterého byly identifikovány tzv. vybočující body (viz kap. 8.1.2).

### 8.1.2 TEST REZIDUÍ

Rezidua byla testována na základě histogramu (obr. 14), který zobrazil rozložení četností. Poté bylo možno identifikovat body, které se vychylují od ostatních.





Obr. 14 - Histogram četnosti reziduí pro model 1.

Hodnoty v pravé části histogramu predikují výskyt vybočujících bodů. Konkrétně sloupec histogramu s hodnotou reziduí vyšší než 23. Tyto body byly určeny z pravděpodobnostního grafu normálního rozdělení reziduí (obr. 14).

Pravděpodobnostní graf normálního rozdělení reziduí je seřazen od nejmenšího k největšímu, označeny jako  $y(1), y(2), \dots, y(n)$ . Poté jsou uspořádané hodnoty  $y(j)$  vykresleny proti jejich kumulativní četnosti  $(j - 0,5)/n$  [30].

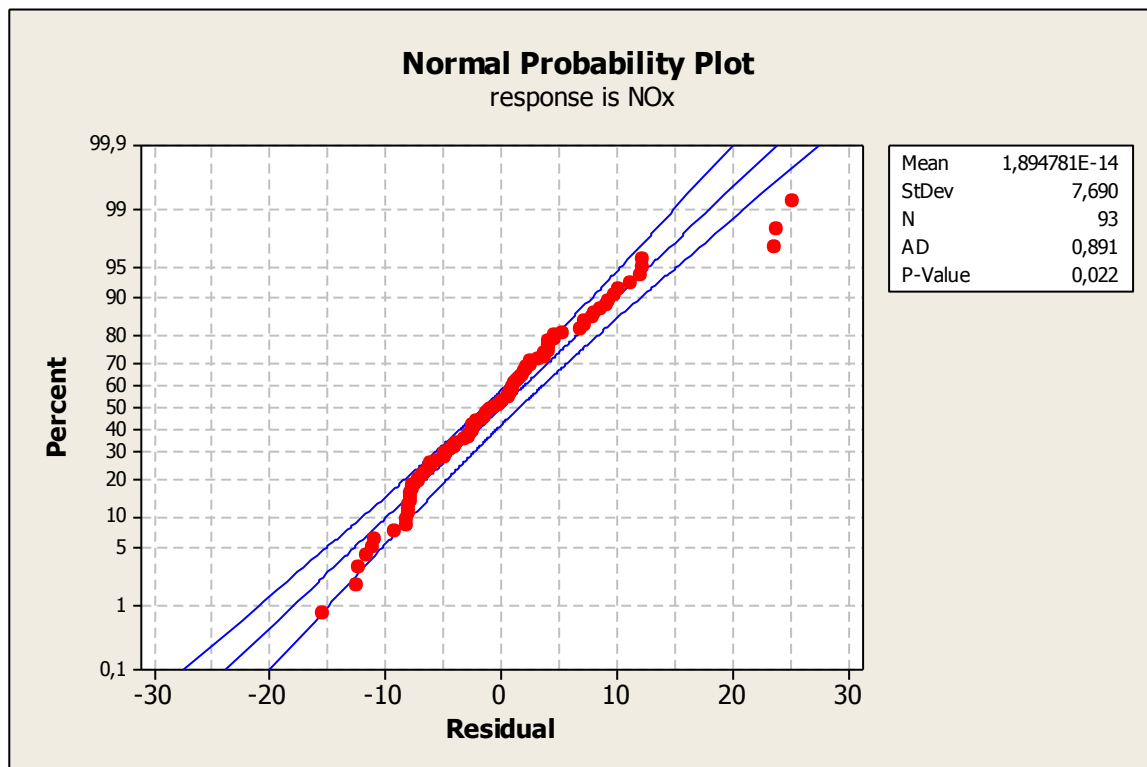
Je nutné rozhodnout, zda data vyhovují normálnímu rozdělení. První hodnota AD je testovacím kritériem Anderson-Darlingova testu dobré shody a je definována vztahem uvedeným v [35]. Test umožňuje ověřit nulovou hypotézu  $H_0: F_E(x) = F_T(x)$  proti hypotéze  $H_A: F_E(x) \neq F_T(x)$ . Zde  $F_T(x)$  je teoretické rozdělení (v našem případě normální rozdělení), které je specifikované včetně svých parametrů, a  $F_E(x)$  je rozdělení výběru. Nulová hypotéza  $H_0$  o normalitě se zamítá, pokud  $AD > D_{1-\alpha}$ . Pro hodnotu kvantilu  $D_{0,95}$  platí pro velký rozsah  $n$  přibližný vztah:

$$D_{0,95} = 1,0348 \left( 1 - \frac{1,013}{n} - \frac{0,93}{n^2} \right) \quad (37)$$

Kde:  $n$  - počet měření.

Hodnota  $D_{0,95}$  je pro  $n = 93$  přibližně 1,0234 a hodnota AD je rovna 0,891. Tedy  $AD < D_{0,95}$  a hypotézu o normálním rozdělení nezamítáme.

Dále z obr. 15 je P-hodnota 0,022. Jelikož je P-hodnota menší než zvolená hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ , rezidua nesplňují podmínku normálního rozdělení.



Obr. 15 - Pravděpodobnostní graf reziduí pro model 1.

Z pravděpodobnostního grafu normálního rozdělení byly identifikovány tzv. vybočující body, tj. body, které leží mimo pásy spolehlivosti. Graf potvrdil výskyt tří výrazně se lišících bodů. Po identifikaci těchto bodů bylo zjištěno, že tato jednotlivá měření odpovídají jednomu konkrétnímu nastavení. Jde o krajní nastavení s použitím trysek s úhlem sklonu 50°. Zde se tvorba NO<sub>x</sub> ve spalinách vymykala průměrným hodnotám (100 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>). Pro toto nastavení se koncentrace NO<sub>x</sub> ve spalinách pohybovala v rozmezí 150-160 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>. Proto bylo přistoupeno k tvorbě modelu 2, ve kterém se s tímto měřením neuvažovalo.

## 8.2 MODEL 2

Po odstranění vybočujícího měření s úhlem sklonu trysek 50°, byl vygenerován matematický model tvorby emisí NO<sub>x</sub> ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 NO_x = & -837,2 + 51,33 \cdot X_1 + 951,18 \cdot X_2 - 0,644 \cdot X_3 + 10,471 \cdot X_4 \\
 & - 3,404 \cdot X_1^2 - 330,0 \cdot X_2^2 - 0,005289 \cdot X_3^2 - 0,08171 \\
 & \cdot X_4^2 + 0,638 \cdot X_2 \cdot X_3 - 3,925 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,00378 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \quad (38)$$

Kde: X<sub>1</sub> - vliv velikosti clony,  
 X<sub>2</sub> - vliv přebytku spalovacího vzduchu,  
 X<sub>3</sub> - vliv natočení trysek,  
 X<sub>4</sub> - vliv sklonu trysek.

### 8.2.1 F-TEST MODEL 2

Pro tento model platí, že vzdálenost modelu od průměrných naměřených hodnot ("Lack-of-fit") je rovna  $s_r^2 = 816,8$  a kolísání naměřených hodnot kolem průměrné hodnoty ("Pure Error") je vyjádřeno odhadem  $s_e^2 = 143,8$ . Kvantil F Fisher-Snedecorova rozdělení se

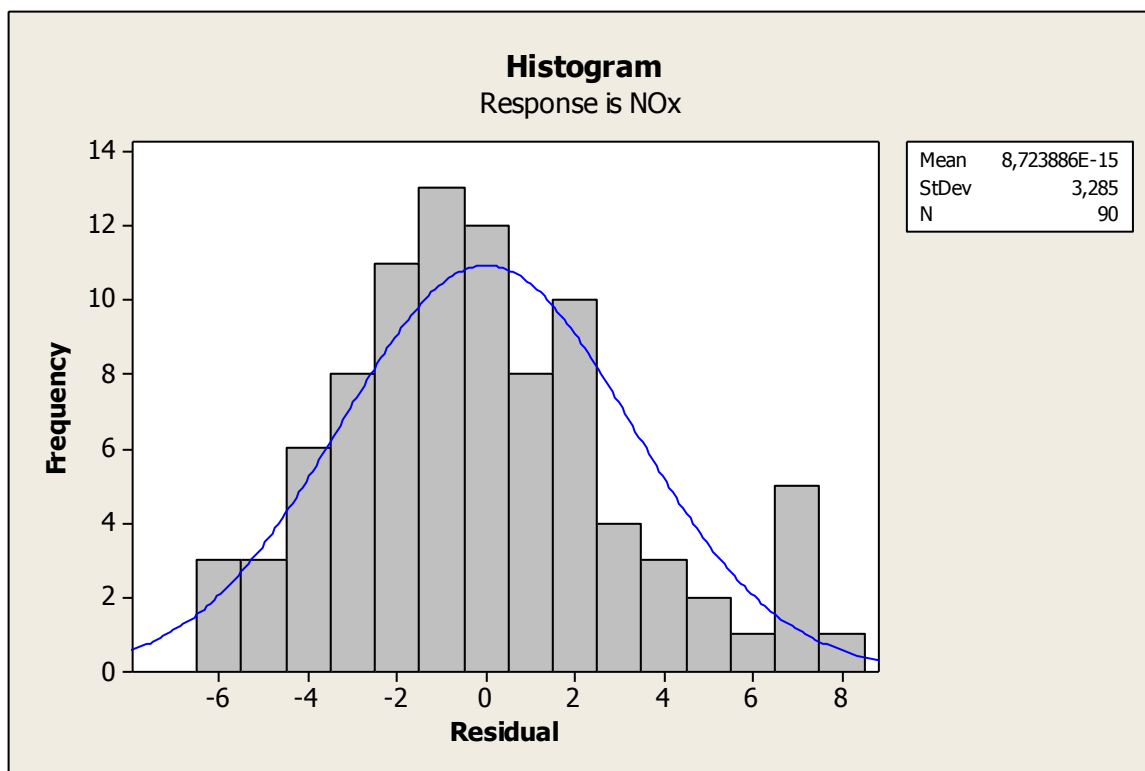
stupni volnosti  $k_1 = 28$ ,  $k_2 = 60$  je dle statistických tabulek roven  $F = 1,644$ . Pak dle testovacího kritéria vychází poměr rozptylů:

$$\frac{s_r^2}{s_e^2} = 5,68 \geq 1,644 \quad (39)$$

Po posouzení adekvátnosti modelu lze konstatovat, že i model 2 je neadekvátní. I přes tento fakt se odstraněním vybočujícího měření z modelu snížila odlišnost modelu oproti modelu 1. Zvýšila se také hodnota  $R^2 = 94,4\%$ , která udává schopnost modelu popsat změny odezvy pro dané experimentální podmínky. Pro tento model 2 byl také vytvořen pravděpodobnostní graf reziduí (viz kap. 8.2.2).

### 8.2.2 TEST REZIDUÍ

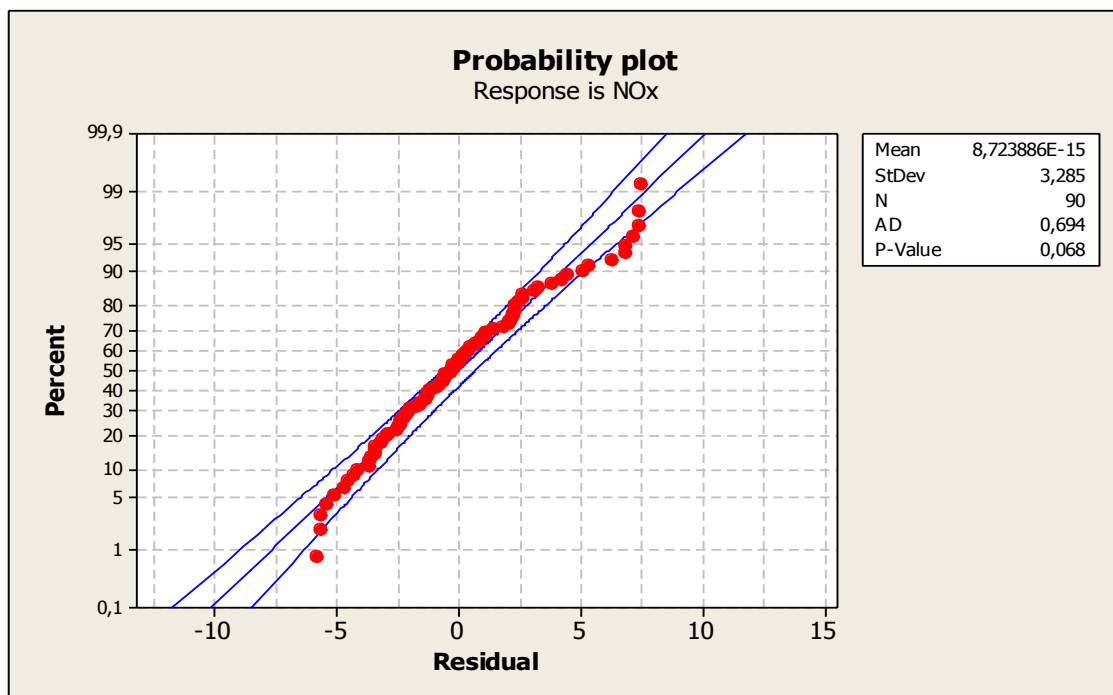
Histogram reziduí pro model 2 je zobrazen na obr. 16 a pravděpodobnostní graf normálního rozdělení je zobrazen na obr. 17.



Obr. 16 - Histogram četnosti reziduí pro model 2.

Hodnota  $D_{0,95}$  je pro  $n = 90$  přibližně 1,023 a hodnota  $AD$  je rovna 0,694. Tedy  $AD < D_{0,95}$  a hypotézu o normálním rozdělení nezamítáme.

Dále z obr. 17 je P-hodnota 0,068 a je tedy větší než zvolená hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ . Bylo tedy dokázáno, že rezidua splňují podmínku normálního rozdělení.



Obr. 17 - Pravděpodobnostní graf reziduí pro model 2.

Z pravděpodobnostního grafu normálního rozdělení byly opět identifikovány vybočující body. Tyto body jsou shrnuty v tab. 8. Následně bylo přistoupeno k tvorbě modelu 3.

Tab. 8 - Identifikované vybočující body

Číslo bodu	Clona [mm]	Přebytek vzduchu [-]	Natočení trysek [°]	Sklon trysek [°]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
21	7	1,3	-60	30	105
23	7	1,3	0	10	87
51	7	1,5	0	30	107
53	7	1,3	60	30	107
78	8,5	1,4	30	40	103
81	7	1,1	0	30	118
83	7	1,3	-60	30	106

### 8.3 MODEL 3

Po odstranění vybočujících nastavení v tab. 8, byl vygenerován matematický model tvorby emisí NO<sub>x</sub> ve tvaru:

$$\begin{aligned}
 NO_x = & -700,5 + 46,94 \cdot X_1 + 720,7 \cdot X_2 - 0,615 \cdot X_3 + 12,31 \cdot X_4 - 3,1 \\
 & \cdot X_1^2 - 241,4 \cdot X_2^2 - 0,00578 \cdot X_3^2 - 0,1108 \cdot X_4^2 + 0,638 \\
 & \cdot X_2 \cdot X_3 - 3,925 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,00378 \cdot X_3 \cdot X_4
 \end{aligned} \quad (40)$$

Kde:  $X_1$  - vliv velikosti clony,  
 $X_2$  - vliv přebytku spalovacího vzduchu,  
 $X_3$  - vliv natočení trysek,  
 $X_4$  - vliv sklonu trysek.

### 8.3.1 F-TEST MODEL 3

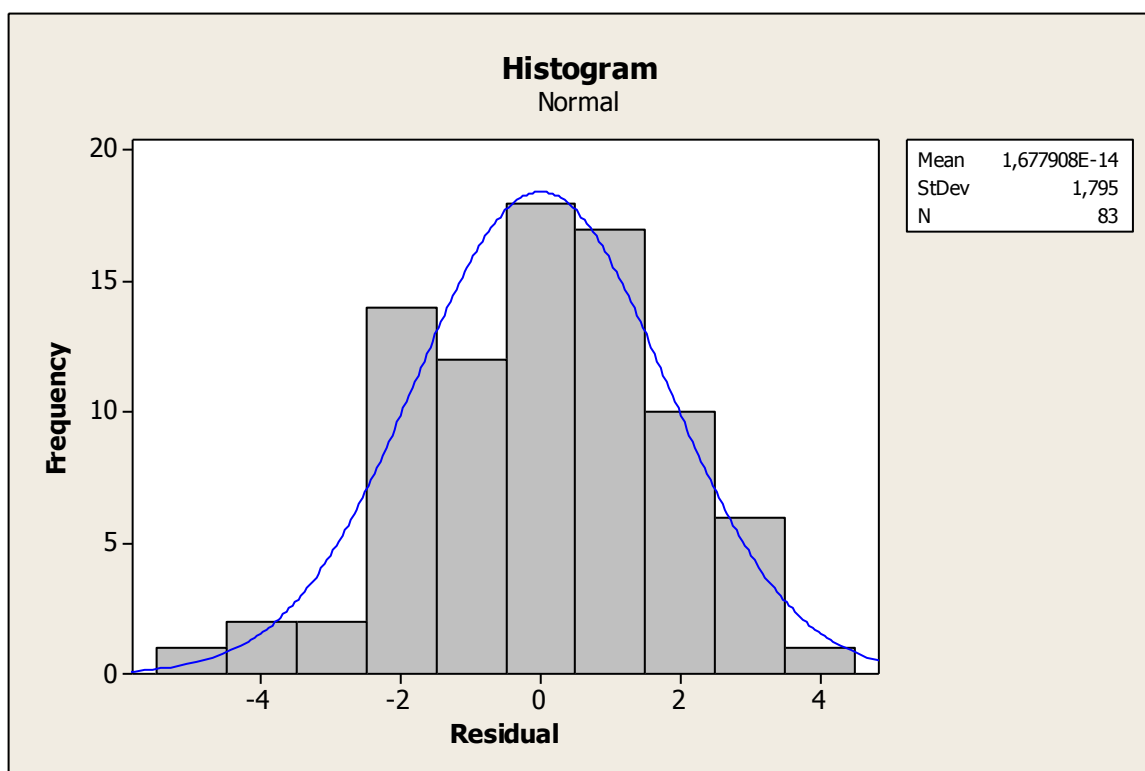
Pro tento model platí, že vzdálenost modelu od průměrných naměřených hodnot ("Lack-of-fit") je rovna  $s_r^2 = 124$  a kolísání naměřených hodnot kolem průměrné hodnoty ("Pure Error") je vyjádřeno odhadem  $s_e^2 = 140,1$ . Kvantil F Fisher-Snedecorova rozdělení se stupni volnosti  $k_1 = 25$ ,  $k_2 = 56$  je dle statistických tabulek roven  $F = 1,713$ . Pak dle testovacího kritéria vychází poměr rozptylů:

$$\frac{s_r^2}{s_e^2} = 0,885 \leq 1,713 \quad (41)$$

Po posouzení adekvátnosti modelu lze konstatovat, že model 3 je adekvátní. Zvýšila se také hodnota koeficientu určení  $R^2 = 98,4 \%$ , která udává schopnost modelu popsat změny odezvy pro dané experimentální podmínky. Pro tento model 3 byl také vytvořen pravděpodobnostní graf reziduí (viz kap. 8.3.2).

### 8.3.2 TEST REZIDUÍ

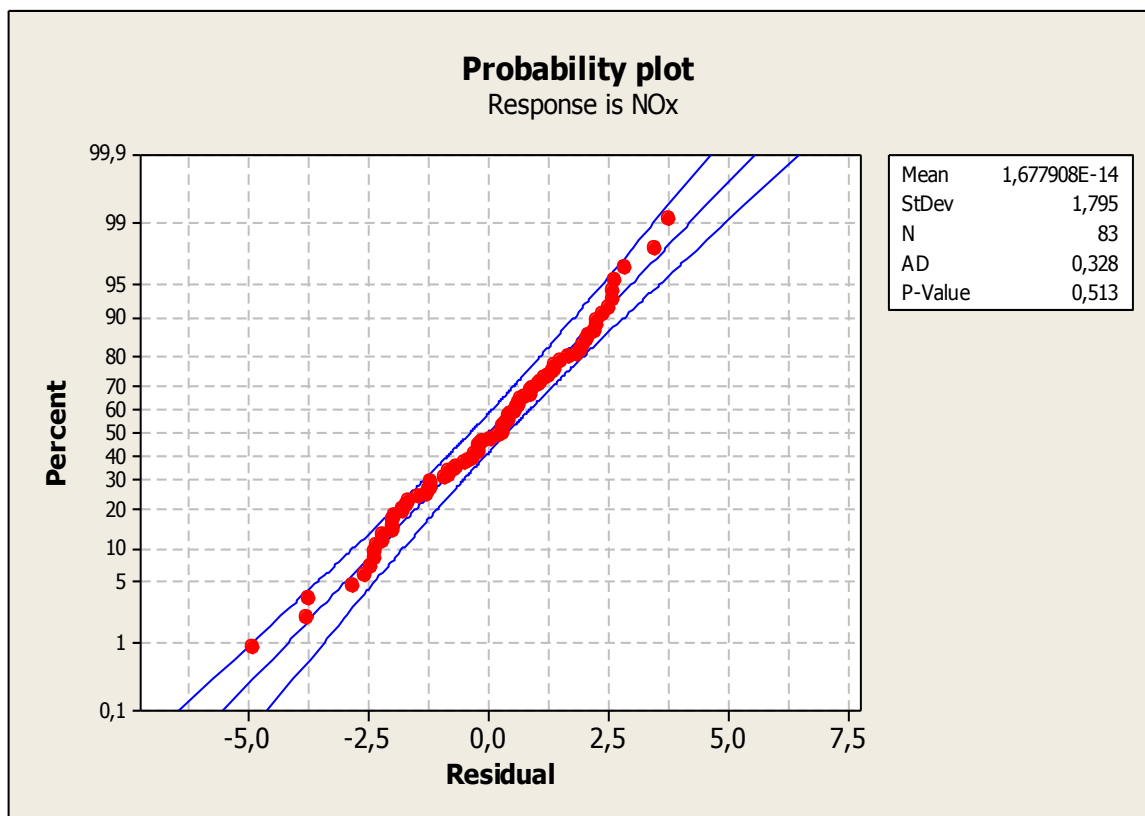
Histogram reziduí pro model 3 je zobrazen na obr. 18 a pravděpodobnostní graf normálního rozdělení je zobrazen na obr. 19.



Obr. 18 - Histogram četnosti reziduí pro model 3.

Hodnota  $D_{0,95}$  je pro  $n = 83$  přibližně 1,022 a hodnota  $AD$  je rovna 0,328. Tedy  $AD < D_{0,95}$  a hypotézu o normálním rozdělení nezamítáme.

Dále z obr. 19 je P-hodnota 0,513 a je tedy větší než zvolená hladina významnosti  $\alpha = 0,05$ . Bylo tedy dokázáno, že rezidua splňují podmínku normálního rozdělení.



Obr. 19 - Pravděpodobnostní graf reziduí pro model 3.

Pravděpodobnostní graf normálního rozdělení nenašel výrazně se lišící body. Histogram reziduí ukázal rezidua do hodnoty  $\pm 5,5 \text{ mg/m}_N^3$ , které jsou nejnižší ze všech tří modelů.

#### 8.4 ZHODNOCENÍ MODELŮ

Na základě F-testu a testu reziduí na normální rozdělení by bylo přirozené prohlásit model 3 za model, který bychom použili pro další analýzu. Avšak je důležité si uvědomit, že při tvorbě tohoto modelu nebylo uvažováno několik měřicích bodů. Z tohoto důvodu bylo ještě zapotřebí vypočítat rezidua pro tyto měřicí body a zhodnotit jejich velikost vůči ostatním reziduím. Stejný výpočet byl pro porovnání proveden i pro model 2, při jehož tvorbě byl vyloučen jeden měřicí bod. Rezidua pro model 3 jsou shrnuta v tab. 10 a reziduum pro model 2 je uvedeno v tab. 9.

Tab. 9 - Reziduum pro model 2.

Číslo bodu	Clona [mm]	Přebytek vzduchu [-]	Natočení trysek [°]	Sklon trysek [°]	NO <sub>x</sub> naměřené [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> vypočítané [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Reziduum [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
21	7	1,3	-60	30	156	98	-58

Tab. 10 - Rezidua pro model 3.

Číslo měření	Clona [mm]	Přebytek vzduchu [-]	Natočení trysek [°]	Sklon trysek [°]	NO <sub>x</sub> naměřené [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> vypočítané [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Reziduum [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
21	7	1,3	-60	30	105	95	-10
23	7	1,3	0	10	87	66	-21
24	7	1,3	0	50	156	88	-68
51	7	1,5	0	30	107	95	-11
53	7	1,3	60	30	107	66	-20
55	7	1,3	0	50	157	88	-69
78	8,5	1,4	30	40	103	105	-5
81	7	1,1	0	30	118	95	-11
83	7	1,3	-60	30	106	66	-20
86	7	1,3	0	50	156	88	-68

Z tab. 10 je zřejmé, že pro některé měřicí body nabývají rezidua velmi vysokých hodnot, a to až 70 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>. Pro ostatní body nabývají rezidua dle obr. 18 hodnoty ±6 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>. Naproti tomu v případě použití modelu 2 reziduum pro vyloučený měřicí bod nabývá maximální hodnoty 59 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> a rezidua v ostatních bodech nabývají hodnoty ±8 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>.

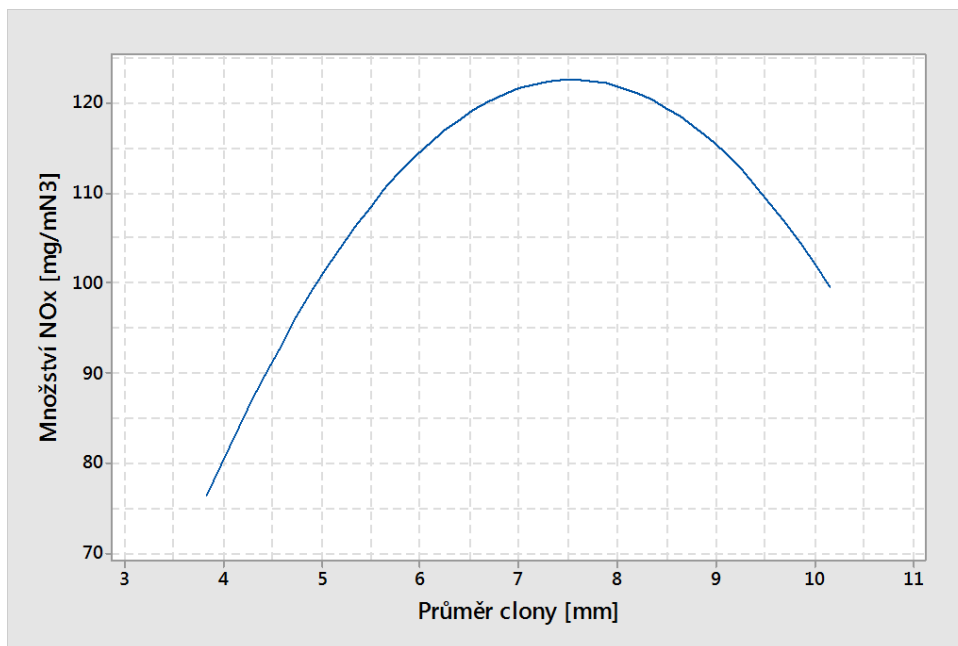
Z výše uvedeného vyplývá, že model 2 i přes svoji mírnou neadekvátnost a nižší koeficient určení dokáže přesněji predikovat hodnoty NO<sub>x</sub> v celém rozsahu experimentálních podmínek. Proto další analýza byla provedena užitím modelu 2.

## 8.5 POROVNÁNÍ VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH FAKTORŮ (ODEZVA)

### 8.5.1 VLIV PRŮMĚRU CLONY

Na distribuci paliva do spalovacího procesu má významný vliv velikost clony. Pomocí clony se rozděluje přívod paliva do primárních a sekundárních trysek. Čím větší je průměr clony, tím větší je přívod paliva do primární zóny spalování.

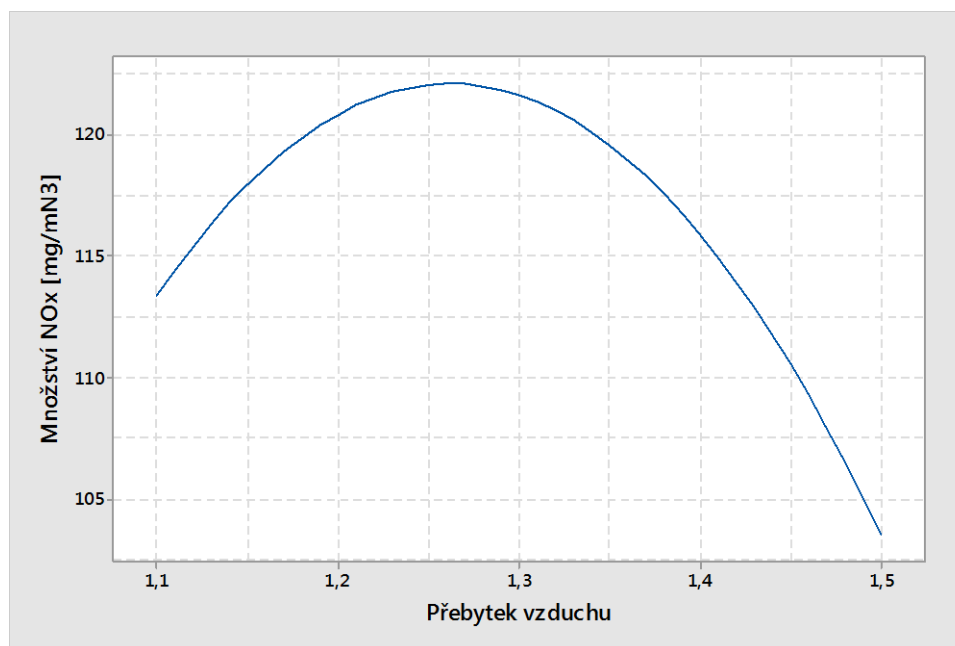
Z obr. 20 je zřejmé, že nejprve se zvyšujícím se množstvím paliva do primární zóny spalování roste o i množství produkovaného NO<sub>x</sub>. Maximum tvorby NO<sub>x</sub> nastává při použití clony o průměru přibližně 7,5 mm. S dalším rostoucím podílem paliva v primárním stupni tvorba NO<sub>x</sub> začíná klesat. Chceme-li dosáhnout co nejmenší tvorby NO<sub>x</sub>, musí se odvést co nejvíce paliva do sekundárních trysek, avšak s příliš malým průměrem trysek začíná být plamen nestabilní.



Obr. 20 - Graf závislosti velikosti clony na tvorbu NO<sub>x</sub> [mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>].

### 8.5.2 VLIV PŘEBYTKU VZDUCHU

Je známo, že přebytek vzduchu má velký vliv na spalování a tedy i na tvorbu NO<sub>x</sub>. Literatura uvádí, že optimální přebytek vzduchu pro spalování zemního plynu je  $\lambda = 1,15 - 1,2$ . Z grafu na obr. 21 je patrné, že maximum tvorby NO<sub>x</sub> nastává při přebytku vzduchu  $\lambda = 1,26$ . Poté dochází vlivem vyššího přebytku vzduchu ke snižování NO<sub>x</sub>, protože vzduch ochlazuje plamen a při nižších teplotách v plameni je snížena tvorba termického NO. U měření bylo pozorováno, že při větším přebytku vzduchu je délka plamene kratší a plamen má větší průměr oproti nižšímu přebytku vzduchu. Je to především způsobeno snadnějším a intenzivnějším promícháváním vzduchu a paliva.



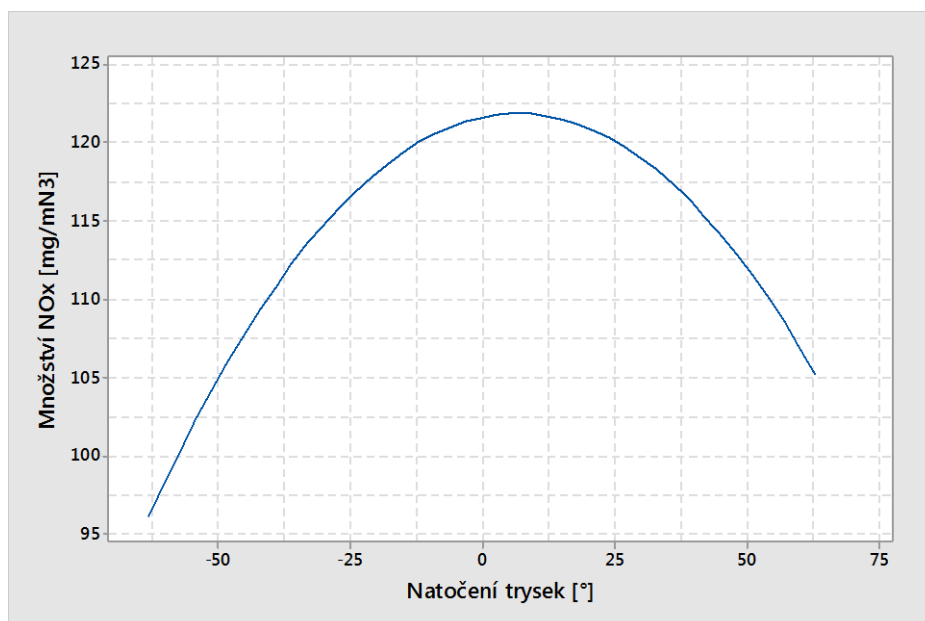
Obr. 21 - Graf závislosti přebytku vzduchu na NO<sub>x</sub> [mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>].



### 8.5.3 Vliv natočení sekundárních trysek

Během experimentu byly testovány čtyři sekundární hlavy s kuželovým zakončením. V každé hlavě byly vyvrtány dva otvory o průměrech 3,3 mm.

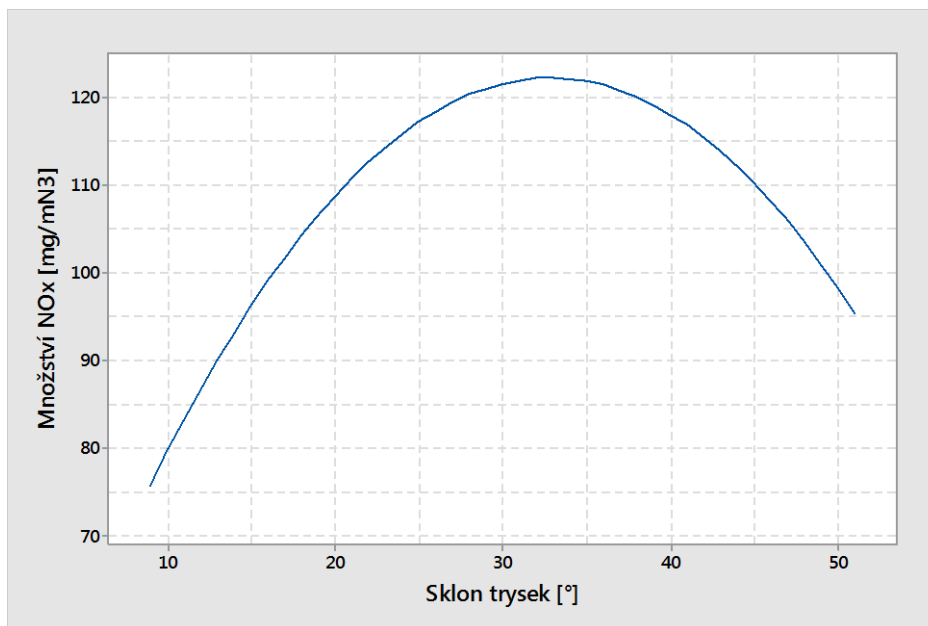
V průběhu experimentu byly otáčeny sekundární trysky ve směru i proti směru rotace spalovacího vzduchu. Při referenčním natočení sekundárních trysek, tj. do osy hořáku, dosahovala tvorba  $\text{NO}_x$  maximálních hodnot. Je to dáno tím, že palivo ze sekundárních trysek směřuje přímo do jádra plamene a to má za následek růst teploty v plameni, která predikuje vyšší tvorbu  $\text{NO}_x$ . V grafu závislosti  $\text{NO}_x$  na natočení trysek (obr. 22) se s rostoucím úhlem natočení trysek, jak kladným tak záporným, tvorba  $\text{NO}_x$  snižuje. Je to dáno natočením sekundárních trysek, kdy se palivo dostává mimo oblast jádra plamene, kde vyhoří za nižších teplot. Při větším natočení trysek se plamen dostává do rotace, zvyšuje svůj objem a zkracuje svoji délku.



Obr. 22 - Graf závislosti natočení trysek na tvorbu  $\text{NO}_x$  [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ].

### 8.5.4 Vliv sklonu hlav sekundárních trysek

Graf závislosti sklonu hlav trysek na množství produkovaného  $\text{NO}_x$  (obr. 23) do sklonu  $30^\circ$  ukazuje rostoucí tendenci koncentrace  $\text{NO}_x$  při zvyšování sklonu sekundárních hlav. Je to dáno především tím, že při velkém sklonu hlavy je palivo přiváděno do jádra plamene a je tedy podporována tvorba  $\text{NO}_x$ , především termického  $\text{NO}$ . Při menším sklonu hlavy je plamen delší, protože palivo distribuované ze sekundárních trysek vyhořívá dále od jádra plamene v místech s nižší teplotou. Použitím trysek s vyšším sklonem jak  $35^\circ$  koncentrace  $\text{NO}_x$  klesá. Palivo začíná být distribuováno před jádro plamene, což má za následek nižší tvorbu  $\text{NO}_x$  a kratší plamen.



Obr. 23 - Graf závislosti sklonu sekundárních trysek na množství NO<sub>x</sub> [mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>].

## 8.6 KONCENTRACE CO

Součástí testu A bylo i měření koncentrace CO ve spalinách. Množství CO se pohybovalo průměrně kolem 3,5 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>, největší koncentrace byla 7,5 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (viz tab. A2 v příloze A).

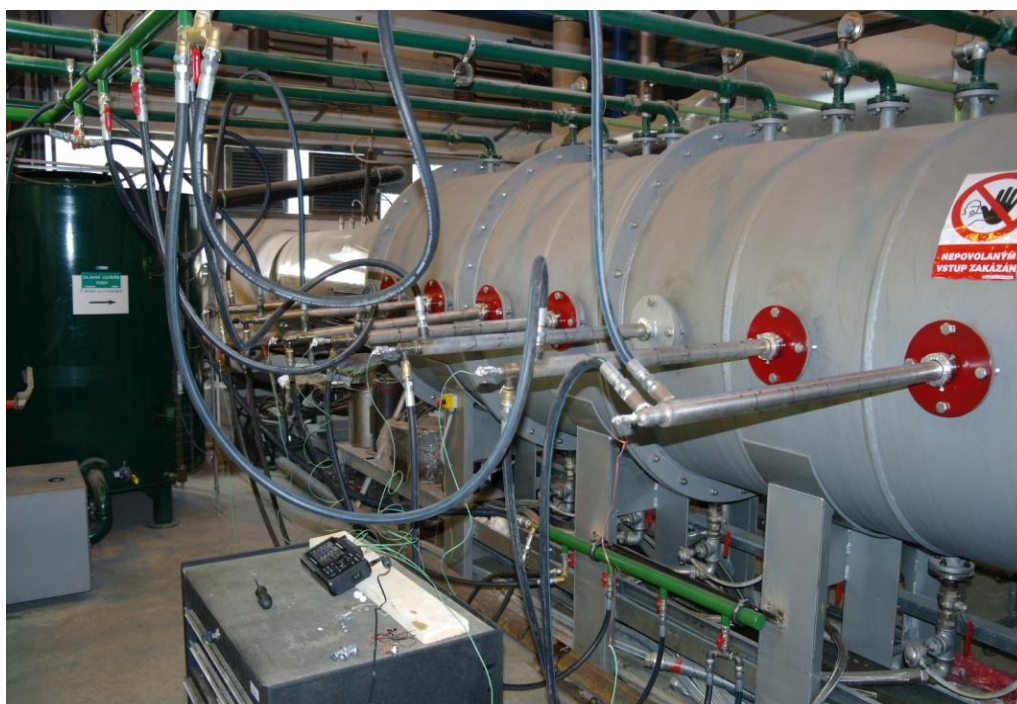
## 9 VYHODNOCENÍ TESTU B

### 9.1 MĚŘENÍ TEPLoty V PLAMENI

K měření teploty plamene byl použitý snímač - termočlánek. Termočlánek se skládá z dvou spojených různých kovů. Jak začne na tento spoj působit teplota, v termočláncu se začne indukovat napětí závislé na teplotě. Termočláncové slitiny jsou nejčastěji dodávány jako tenké dráty. Podle potřeby existuje více různých kombinací kovů nebo kalibrací (nejpoužívanější J, K, T, E a pro vysoké teploty R, S, C, GB). Každý typ má odlišné pracovní podmínky a teplotní rozsah. Teplotní rozsah je také omezený tloušťkou použitého drátu. Pro naše potřeby byl zvolený termočlánek typu R. Daný termočláncový drát se skládá z dvou svařených drátů. První drát je z čisté platiny, druhý je směsí platiny a rhodia. Obalovou vrstvu tvoří oxid hlinitý. Vzhledem na složení a průměr drátu je možné použití do teploty 1400 °C, krátkodobě až do teploty 1600 °C.

Sběr a zpracování dat z termočláncu byl prováděn pomocí dataloggeru midi LOGGER GL2220 od společnosti Graphtec. Použitý datalogger je možné používat samostatně, či připojit na počítač. Má vestavěný LCD display, na kterém se zobrazují měřené hodnoty. Zařízení má 10 analogových vstupů, kde je možné připojit sondy.

Samotné měření teploty plamene probíhalo ve více krocích. Nejprve se zkompletovalo zařízení. Po celkovém sestavení a připojení všech součástí se přešlo k zapálení hořáku. Po zahřátí komory se přešlo k měření teploty plamene pomocí termočlánců umístěných v inspekčních otvorech (obr. 24). Nastavili se požadované parametry pro dané měření a sondy se nastavili do první pozice, která byla 5 cm od okraje vnitřního pláště komory. V průběhu měření se sondy v dvouminutových intervalech zasouvali směrem k ose komory ve vzdálenosti 5, 10, 20, 30, 40, 50 cm od okraje vnitřního pláště komory.



Obr. 24 - Pohled na zasunuté termočláncy.

## 9.2 VYHODNOCENÍ TEPLOT V PLAMENI

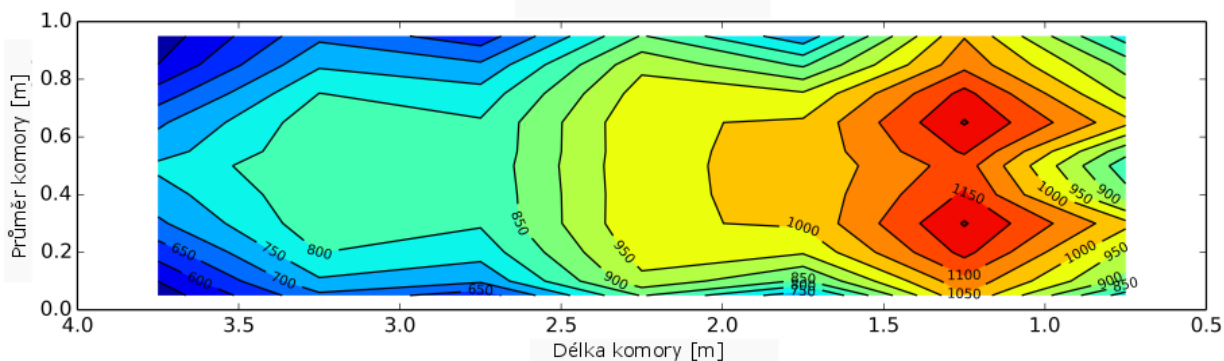
Pro měření bylo vybráno sedm nastavení hořáku (viz tab. 11), která byla vybrána zejména pro své množství produkovaného  $\text{NO}_x$ , délku a tvar plamene. Z naměřených hodnot se pomocí programovacího jazyku Python vykreslilo rozložení teplot napříč spalovacím prostorem.

Tab. 11 - Vybraná nastavení hořáku.

Číslo měření	Velikost clony [mm]	Přebytek vzduchu [-]	Natočení trysek [°]	Sklon hlavy [°]	Koncentrace $\text{NO}_x$ [ppm]	Délka plamene [m]	Průměr plamene [m]
1	5,5	1,2	-30	20	79	2,5	0,9
2	5,5	1,4	30	20	91	2,5	0,9
3	5,5	1,1	30	20	74	-	-
4	8,5	1,4	30	40	103	2	1
5	8,5	1,1	30	40	106	-	-
6	7	1,3	0	50	156	3	1
7	7	1,1	0	50	150	-	-

### 9.2.1 MĚŘENÍ Č. 1

Měření bylo vybráno ze zkušenosti v předchozím testu A, kdy byla naměřena nejnižší tvorba  $\text{NO}_x$ . Jednalo se o nastavení s velikostí clony 5,5, přebytkem vzduchu 1,2, natočením trysek  $-30^\circ$  a se sklonem trysek  $20^\circ$ . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze B (tab. II). Na obr. 25 je pak znázorněna mapa teplotního pole v horizontální rovině symetrie spalovací komory.



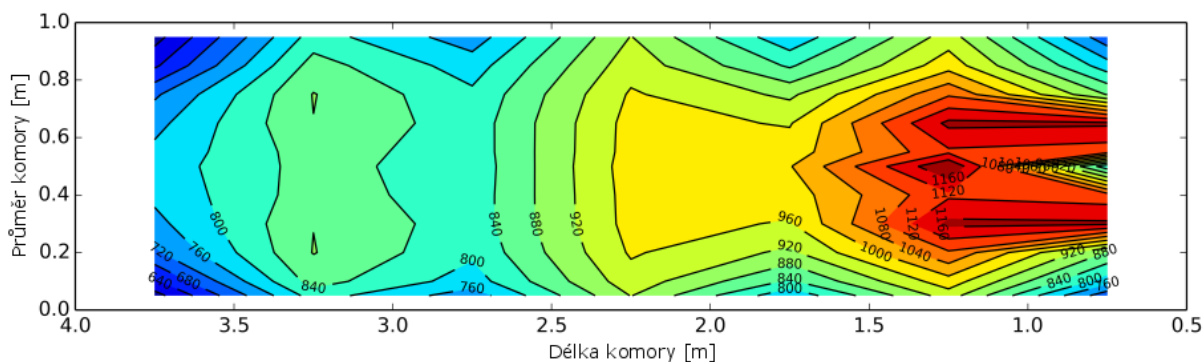
Obr. 25 - Teplotní pole pro měření č. 1.

Z obr. 25 je patrné, že teploty v jádru plamene dosahovaly maximálně teploty  $1200^\circ\text{C}$ , což má příznivý vliv na potlačení tvorby  $\text{NO}_x$ . Dále lze pozorovat, že teplotní pole je do délky cca 2,5 m velmi uniformní.

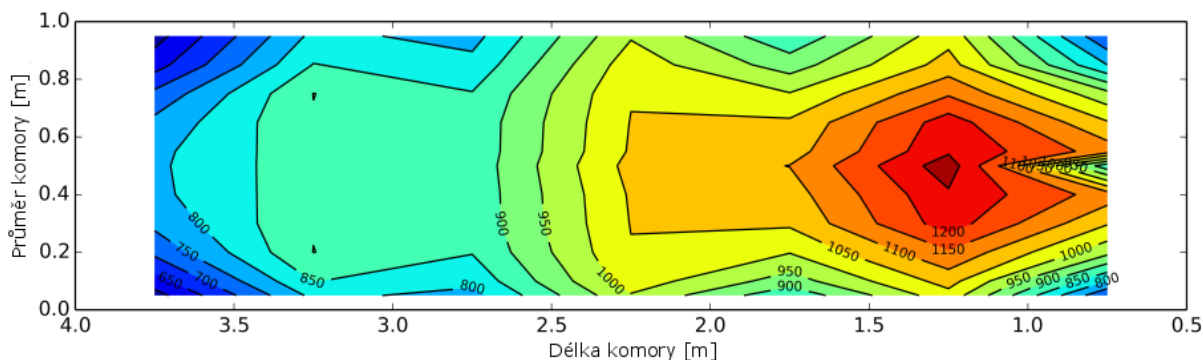
### 9.2.2 MĚŘENÍ Č. 2 A 3

Měření bylo vybráno ze zkušenosti v předchozím testu A, kdy velikost, stabilita a barva plamene vypadaly vizuálně nejlépe. Jednalo se o nastavení s velikostí clony 5,5, přebytkem vzduchu 1,4, natočením trysek  $30^\circ$  a se sklonem trysek  $20^\circ$ . Naměřené hodnoty jsou shrnuty v příloze B (tab. III). Z hodnot byl vytvořen graf teplot plamene (obr. 26).

Následně, pro porovnání teplot v plameni se zvolilo snížení přebytku vzduchu na  $1,1^\circ$  a taktéž se vyhodnotilo pomocí grafu teplotní rozložení plamene (obr. 27).



Obr. 26 - Teplotní pole pro měření č. 2.

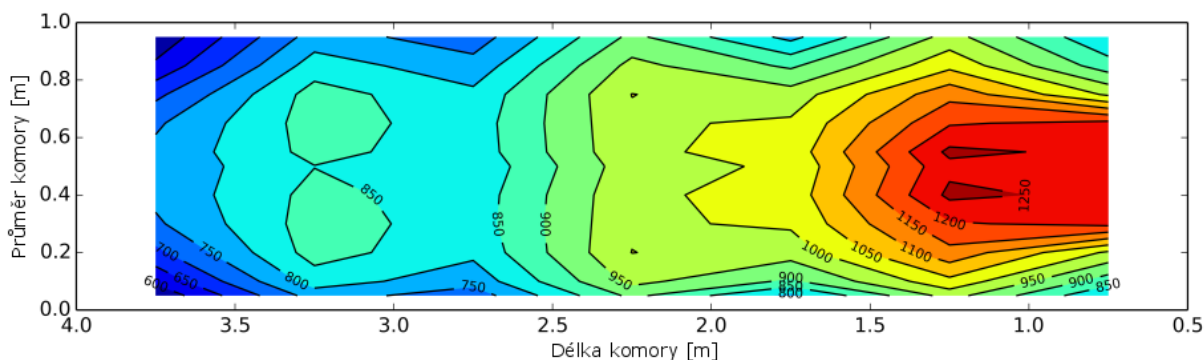


Obr. 27 - Teplotní pole pro měření č. 3.

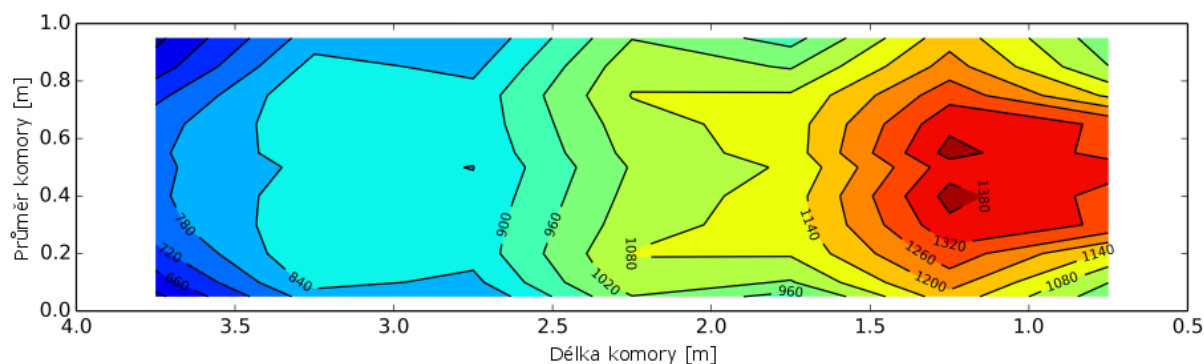
Porovnáním obr. 26 a obr. 27 lze pozorovat, že vyšší přebytek vzduchu snižuje teplotu plamene, což kladně ovlivňuje tvorbu  $\text{NO}_x$ . Na obr. 27 lze vidět oblast jádra plamene, kde teplota přesahuje  $1200^\circ\text{C}$ . Naproti tomu na obr. 26 je vidět účinek vyššího přebytku vzduchu, který pomáhá snížit teplotní špičky v jádru plamene.

### 9.2.3 MĚŘENÍ Č. 4 A 5

Měření bylo vybráno ze zkušenosti v předchozím testu A, kdy byla velikost plamene nejkratší a plamen měl největší průměr (1 m) s dotykem na stěny komory. Jednalo se o nastavení s velikostí clony 8,5, přebytkem vzduchu 1,4, natočením trysek  $30^\circ$  a se sklonem trysek  $40^\circ$ . Naměřené hodnoty byly zaznamenány v příloze B (tab. iiiIII). Z hodnot byl vytvořen graf teplot plamene (obr. 28). Následně, pro porovnání teplot v plameni se zvolilo snížení přebytku vzduchu na  $1,1^\circ$  a taktéž se vyhodnotilo pomocí grafu teplotní rozložení plamene (obr. 29).



Obr. 28 - Teplotní pole pro měření č. 4.

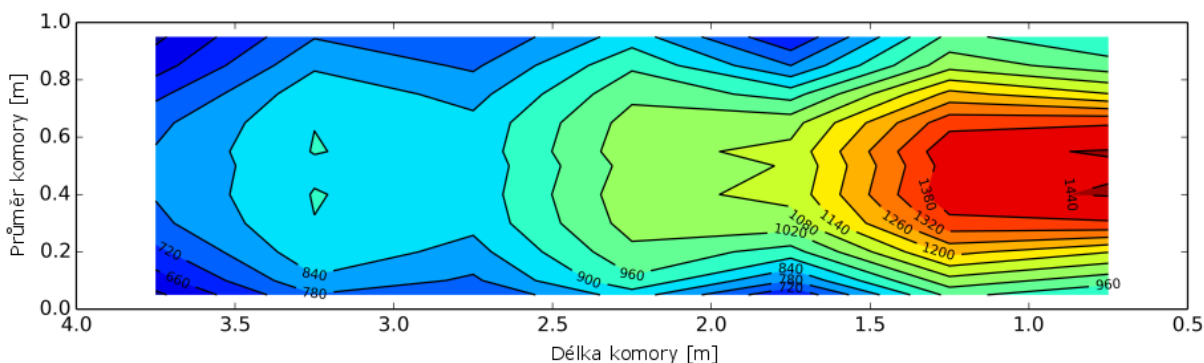


Obr. 29 - Teplotní pole pro měření č. 5.

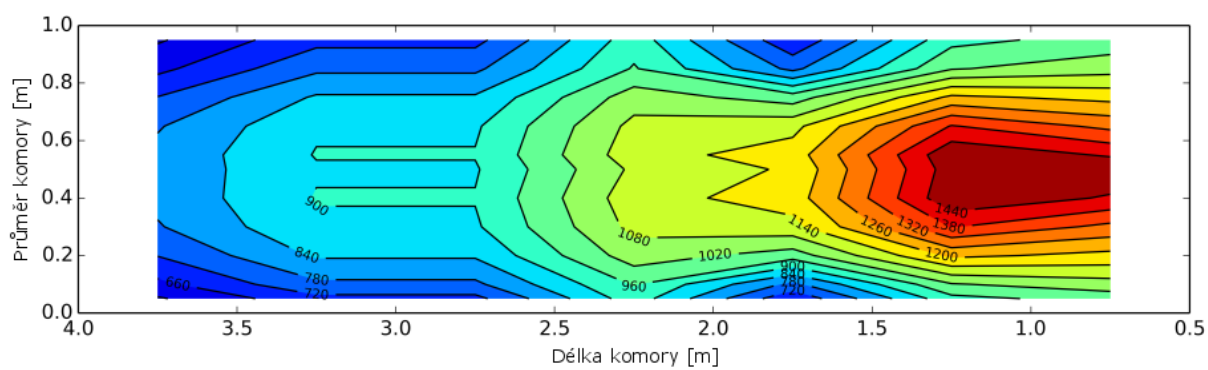
Porovnáním obr. 28 a obr. 29 lze opět pozorovat, že vyšší přebytek vzduchu snižuje teplotu plamene, což se následně projevuje i na nižší tvorbě  $\text{NO}_x$ .

#### 9.2.4 MĚŘENÍ Č. 6 A 7

Měření bylo vybráno ze zkušenosti v předchozím testu A, kdy měl plamen největší průměr (1 m) s dotykem na stěny komory a zároveň byla zjištěna největší tvorba  $\text{NO}_x$ . Jednalo se o nastavení s velikostí clony 7, přebytkem vzduchu 1,3, natočením trysek  $0^\circ$  a se sklonem trysek  $50^\circ$ . Naměřené hodnoty jsou shrnuty v příloze (tab. ivIV). Z hodnot byl vytvořen graf teplot plamene (obr. 30). Následně, pro porovnání teplot v plameni se zvolilo snížení přebytku vzduchu na 1,1 a taktéž se vyhodnotilo pomocí grafu teplotní rozložení plamene (obr. 31).



Obr. 30 - Teplotní pole pro měření č. 6.



Obr. 31 - Teplotní pole pro měření č. 7.

Porovnáním obr. 30 a obr. 31 lze pozorovat známou skutečnost, že vyšší přebytek vzduchu snižuje teplotu plamene, což se následně projevuje i nižší tvorbou  $\text{NO}_x$ .

## 10 VYHODNOCENÍ TESTU C

### 10.1 MĚŘENÍ TEPELNÝCH TOKŮ

Z naměřených dat byly vypočítány hustoty tepelných toků. Pro výpočet tepelných toků se vycházelo z kalorimetrické rovnice (42):

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{v,i} \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i = \rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i \quad (42)$$

$$\dot{q}_i = \frac{\rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot \Delta t_i}{A_i} = \frac{\rho_i \cdot \dot{V}_i \cdot c_{p,i} \cdot (t_{out,i} - t_{in,i})}{L_i \cdot \pi} \quad (43)$$

kde:  $\dot{Q}_i$  - tepelný tok pro i-tou sekci [W],  
 $\dot{m}_{v,i}$  - hmotnostní průtok pro i-tou sekci [kg/s],  
 $c_{p,i}$  - měrná tepelná kapacita [J/kg·K],  
 $\Delta t_i$  - rozdíl teplot chladicí vody na výstupu a vstupu [°C],  
 $\dot{q}_i$  - hustota tepelného toku i-té sekce [W/m<sup>2</sup>],  
 $\dot{V}_{v,i}$  - objemový průtok pro i-tou sekci [m<sup>3</sup>/s],  
 $\rho_i$  - hustota vody závislosti na teplotě [kg/m<sup>3</sup>],  
 $A_i$  - plocha i-té sekce [m<sup>2</sup>],  
 $L_i$  - délka i-té sekce [m],  
 $t_{out,i}$  - výstupní teplota chladicí vody sekce [°C],  
 $t_{in,i}$  - vstupní teplota chladicí vody sekce [°C].

Při výpočtu se uvažovalo s konstantní hodnotou hustoty chladicí vody a s konstantní hodnotou tepelné kapacity v celé sekci komory. Z tohoto důvodu byly obě veličiny aproximovány užitím vztahů (44) a (45) [36]:

$$\rho_i = 1006 - 0,26 \cdot \frac{\hat{t}_i}{2} - 0,0022 \cdot \left(\frac{\hat{t}_i}{2}\right)^2 \quad (44)$$

$$c_{p,i} = 4210 - 1,363 \cdot \frac{\hat{t}_i}{2} + 0,014 \cdot \left(\frac{\hat{t}_i}{2}\right)^2 \quad (45)$$

$$\hat{t}_i = t_{in,i} + t_{out,i} \quad (46)$$

### 10.2 CHYBOVÁ ANALÝZA EXPERIMENTÁLNÍCH DAT

Každá experimentální zkouška obsahuje určité chyby (systematické, či náhodné). Cílem analýzy bylo zjistit, jak velké chyby jsme se dopustili během měření. Chyby jsou převážně způsobené nedokonalostí měřících zařízení. Určování těchto chyb vychází z předpokladu, že všechny jsou v mezích intervalu, který je pro každé zařízení definováno výrobcem.

Ze statistiky je známý pojem „zákon šíření chyby“, který je také známý jako „zákon šíření nejistoty“. Tento pojem byl na základě známých chyb teplot a průtoků aplikovaný



na experiment za účelem zjištění absolutní chyby tepelných toků. Šíření chyby vyplývá z chyb měřených veličin na celkovou nejistotu funkce těchto veličin.

Rovnice pro rozptyl  $\sigma_p^2$  produktu  $P$  pro nezávislé proměnné  $A$  a  $B$  s rozptyly  $\sigma_a^2$  a  $\sigma_b^2$  [43]:

$$\left(\frac{\sigma_p}{P}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_a}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{B}\right)^2 \quad (47)$$

Za předpokladu konstantní hustoty a tepelné kapacity chladící vody pro jednotlivé sekce komory, proměnná  $A$  zastupuje objemový průtok chladící vody  $V_i$  a proměnná  $B$  zastupuje rozdíl teplot chladící vody na výstupu a vstupu  $\Delta t_i$ . Pak vztah pro směrodatnou odchylku tepelného toku do stěny  $i$ -té sekce je vyjádřen vztahem [30]:

$$\left(\frac{\sigma_{\dot{q}_i}}{\dot{q}_i}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{out,i}}^2 + \sigma_{t_{in,i}}^2}{\Delta t_i^2} \quad (48)$$

Rovnice (48) může být dále upravena na tvar:

$$\sigma_{\dot{q}_i} = \dot{q}_i \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_i}}{V_i}\right)^2 + \frac{\sigma_{t_{out,i}}^2 + \sigma_{t_{in,i}}^2}{\Delta t_i^2}} \quad (49)$$

### 10.3 VYHODNOCENÍ TEPELNÝCH TOKŮ

Tepelné toky byly vyhodnoceny pro stejná nastavení jako v testu B (viz tab. 11). Pro jednotlivá nastavení bylo zjištěno množství odvedeného tepla do stěn sekcí spalovací komory a vypočtena účinnost.

#### 10.3.1 MĚŘENÍ Č. 1

Vypočítané tepelné toky a relativní chyby pro měření č. 1 jsou shrnuty v tab. 12. Jednalo se o nastavení s velikostí clony 5,5, přebytkem vzduchu 1,2, natočením trysek  $-30^\circ$  a se sklonem trysek  $20^\circ$ .

Tab. 12 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 1.

Sekce	Tepelný tok [kW/m <sup>2</sup> ]	Relativní chyba [%]	Účinnost [%]
1	44,15	2,52	58,6
2	62,16	1,40	
3	73,34	1,24	
4	61,59	1,50	
5	50,27	1,87	
6	39,01	2,19	
7	28,73	1,88	

Maximální tepelný tok byl do stěny sekce 3, čemuž odpovídají i nejvyšší teploty v plameni. Výsledná celková účinnost měření č. 1 byla 58,6 %. Chyba měření se pohybovala do 2,5 %.

### 10.3.2 MĚŘENÍ Č. 2, 3

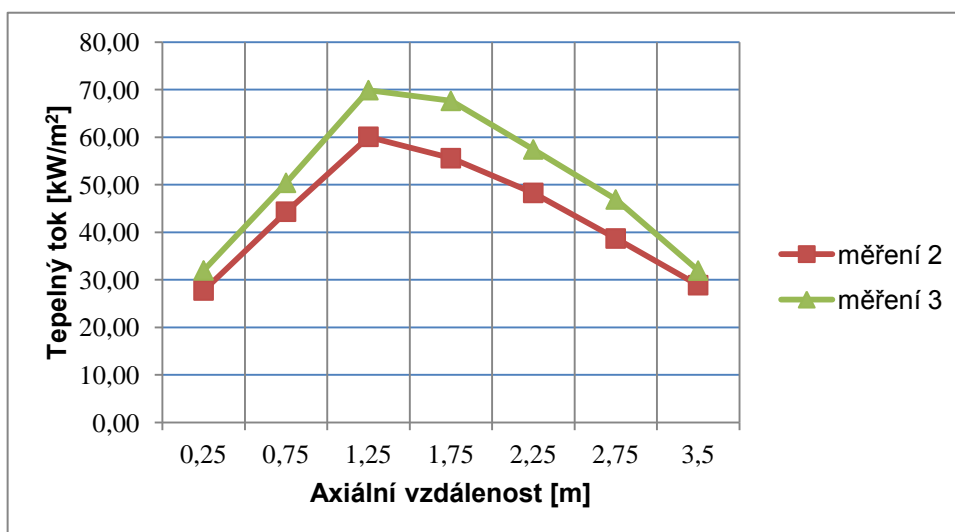
Pro měření č. 2 a č. 3 jsou hodnoty tepelných toků a relativní chyby shrnuty v tab. 13 a tab. 14. Měření č. 2 odpovídalo nastavení s velikostí clony 5,5, přebytkem vzduchu 1,4, s natočením trysek 30° a se sklonem trysek 20°. Měření č. 3 se odlišovalo pouze přebytkem vzduchu, který byl snížen na 1,1.

Tab. 13 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 2.

Sekce	Tepelný tok [kW/m <sup>2</sup> ]	Relativní chyba [%]	Účinnost [%]
1	27,74	3,99	50,4
2	44,31	1,91	
3	60,07	1,46	
4	55,57	1,65	
5	48,27	1,94	
6	38,68	2,27	
7	28,86	1,90	

Tab. 14 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 3.

Sekce	Tepelný tok [kW/m <sup>2</sup> ]	Relativní chyba [%]	Účinnost [%]
1	31,97	3,47	58,7
2	50,39	1,69	
3	69,89	1,27	
4	67,63	1,38	
5	57,42	1,65	
6	46,89	1,93	
7	31,93	1,71	



Obr. 32 - Profil tepelného toku pro měření č. 2, 3.

Při porovnání tepelných toků v tab. 13 a tab. 14 je viditelný známý fakt, že odvedené teplo ovlivňuje množství přebytku vzduchu. V sekcích 3, 4 a 5, ve kterých jsou dosaženy nejvyšší tepelné toky, je patrný rozdíl mezi tepelnými toky řádově o 10 kW/m<sup>2</sup>. Dále je patrné, že se nejvyšší tepelné toky posunuly dále od ústí hořáku oproti měření č. 1. Výsledná účinnost byla vyšší u měření č. 3 (58,7 %) oproti měření č. 2 (50,4 %).

### 10.3.3 MĚŘENÍ Č. 4, 5

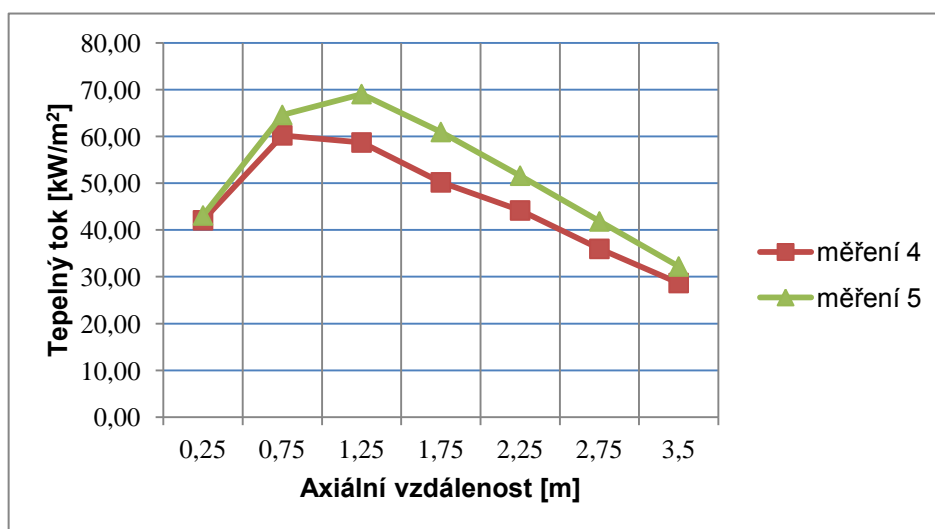
Hodnoty tepelných toků a relativní chyby jsou vyneseny do tab. 15 a tab. 16. Jednalo se o nastavení s velikostí clony 8,5, přebytkem vzduchu 1,4, s natočením trysek 30° a se sklonem trysek 40°, poté byl, jako v předchozím případě snížen přebytek vzduchu na 1,1.

Tab. 15 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 4.

Sekce	Tepelný tok [kW/m <sup>2</sup> ]	Relativní chyba [%]	Účinnost [%]
1	42,07	2,56	52,4
2	60,23	1,44	
3	58,71	1,48	
4	50,19	1,81	
5	44,18	2,11	
6	35,97	2,31	
7	28,67	1,88	

Tab. 16 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 5.

Sekce	Tepelný tok [kW/m <sup>2</sup> ]	Relativní chyba [%]	Účinnost [%]
1	43,11	2,49	59,8
2	64,60	1,35	
3	69,06	1,29	
4	60,95	1,53	
5	51,61	1,82	
6	41,84	2,01	
7	32,21	1,69	



Obr. 33 - Profil tepelného toku pro měření č. 4, 5.

Porovnání tepelných toků v tab. 15 a tab. 16 potvrdilo známý fakt, že množství odvedeného tepla je ovlivněno přebytkem vzduchu. V sekcích 3 a 4 je patrný rozdíl mezi hodnotami tepelných toků řádově až  $10 \text{ kW/m}^2$ . Nejvyšší tepelné toky jsou v sekcích 2 a 3 při přebytku vzduchu 1,1. Výsledná účinnost byla vyšší u měření č. 5 (59,8 %) oproti měření č. 4 (52,4 %).

### 10.3.4 MĚŘENÍ Č. 6, 7

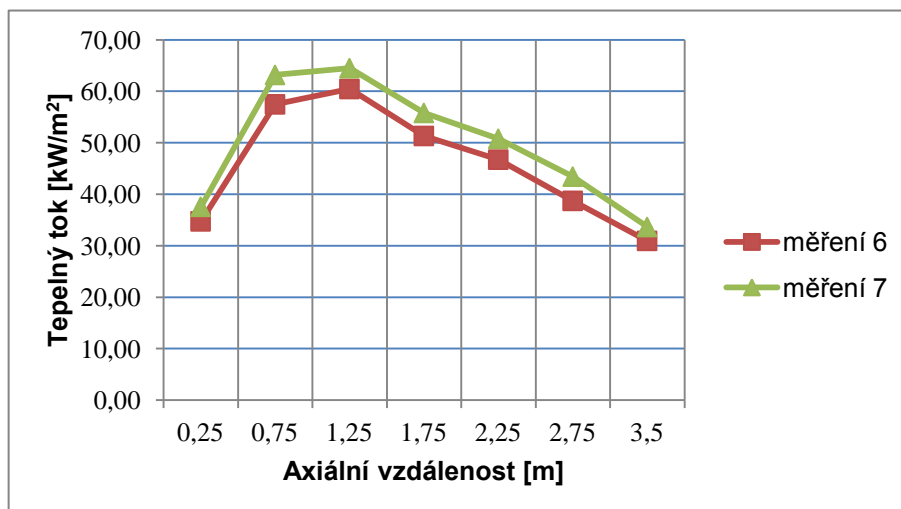
Hodnoty tepelných toků a relativní chyby jsou shrnuty v tab. 17 a tab. 18. Jednalo se o nastavení s velikostí clony 7, přebytkem vzduchu 1,3, s natočením trysek  $0^\circ$  a se sklonem trysek  $50^\circ$ , poté byl stejně jako u předchozích měření snížen přebytek vzduchu na 1,1.

Tab. 17 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 6.

Sekce	Tepelný tok [ $\text{kW/m}^2$ ]	Relativní chyba	Účinnost [%]
1	34,74	3,19	57,6
2	57,47	1,50	
3	60,45	1,44	
4	51,33	1,77	
5	46,73	2,00	
6	38,72	2,16	
7	30,95	1,75	

Tab. 18 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 7.

Sekce	Tepelný tok [ $\text{kW/m}^2$ ]	Relativní chyba	Účinnost [%]
1	37,56	2,88	53,1
2	63,19	1,38	
3	64,50	1,37	
4	55,80	1,64	
5	50,78	1,85	
6	43,42	1,95	
7	33,64	1,61	

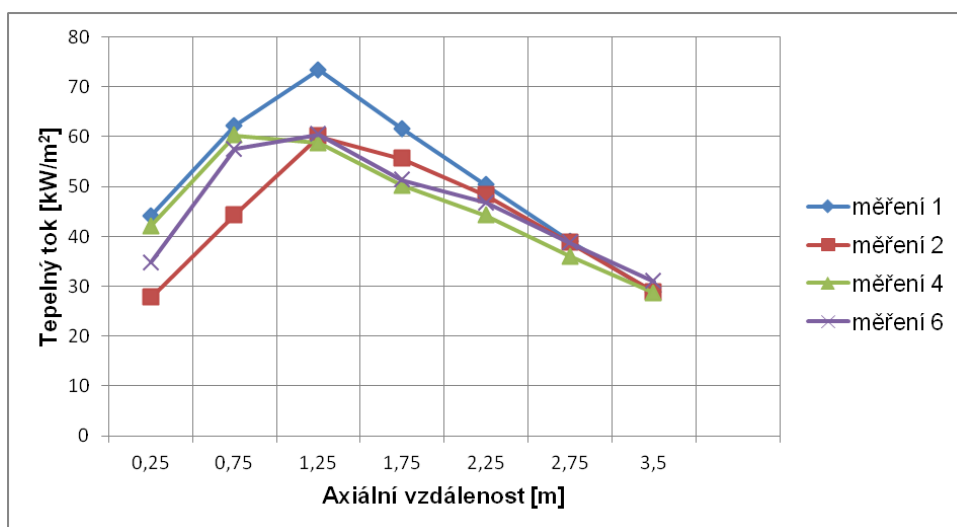


Obr. 34 - Profil tepelného toku pro měření č. 6, 7.

Při porovnání tepelných toků v tab. 17 a tab. 18 je v sekcích 2, 3 a 4 patrný rozdíl mezi hodnotami tepelných toků řádově o  $4 \text{ kW/m}^2$ . Nejvyšší tepelné toky jsou v sekcích 2 a 3 při přebytku vzduchu 1,1. Výsledná účinnost byla vyšší u měření č. 7 (57,6 %) oproti měření č. 6 (53,1 %).

### 10.3.5 CELKOVÉ POROVNÁNÍ

Pro porovnání množství přeneseného tepelného toku jednotlivými stěnami byl vytvořený graf závislosti axiální vzdálenosti a tepelného toku. Na obr. 35 lze pozorovat rozdíly v tepelných tocích jednotlivými sekcemi při různém nastavení hořáku a nastavení provozních parametrů.



Obr. 35 - Profil tepelného toku po délce spalovací komory.

Z obr. 35 se jeví jako optimální nastavení parametrů měření č. 1, kdy je dosaženo největší účinnosti přestupu tepla do stěny komory (58,6 %) a zároveň nejnižší tvorby  $\text{NO}_x$  ( $79,18 \text{ mg/m}_N^3$ ). Rozdílný přestup tepla je zejména v sekci 3, kde měření č. 1 dosahuje hodnot o  $15 \text{ kW/m}^2$  vyšších oproti ostatním. Naproti tomu při měření 2 byla účinnost pouze 54,3 % a emise  $\text{NO}_x$  se pohybovaly kolem  $91 \text{ mg/m}_N^3$ . Plameny pro obě nastavení byly stabilní s průměr cca 0,9 m a délkou 2,5 m.

## 11 ZÁVĚR

Na množství produkovaných emisí je v dnešní době kladen velký důraz. V České republice je v současné době v právní moci zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, platný od 1. 9. 2012. Hlavním cílem zákona o ochraně ovzduší je zásadní zlepšení kvality ovzduší. S popsáním zákonem byla roku 2012 vydána Vyhláška 415 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Jednou z hlavních, podstatných složek emisí jsou oxid dusnatý a oxid dusičitý, souhrnně označovány jako oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Obecně lze snižovat množství oxidů dusíku dvěma způsoby. Při prvním způsobu se jedná o snížení tvorby  $\text{NO}_x$  při samotném procesu spalování např. použitou technologií spalování (stupňovitý přívod paliva nebo spalovacího vzduchu, recirkulace spalin, atd.) nebo konstrukcí spalovacího zařízení. Souhrnně se tyto zásahy do procesu spalování nazývají primární opatření. Druhý způsob se nazývá sekundární opatření, kdy se provádí čištění spalin, které vychází ze spalovací komory. K sekundárnímu opatření se přistupuje, když provedená primární opatření nedosáhnou na požadovanou hodnotu obsahu oxidů dusíku ve spalinách. Nejrozšířenější metodou sekundárního opatření je selektivní redukce, která se dále rozděluje na katalytickou (SCR) a nekatalytickou (SNCR).

V rámci této práce bylo navázat na vědecko-výzkumnou činnost v oblasti spalování plyných paliv, která probíhá na Ústavu procesního a ekologického inženýrství již řadu let. K provedení spalovacích zkoušek byla k dispozici polo-průmyslová zkušebna hořáků. Cílem této práce bylo zhodnotit provoz hořáku se stupňovitým přívodem paliva z hlediska tvorby emisí  $\text{NO}_x$  a CO, teploty spalin, rozložení teplot uvnitř spalovací komory a tepelných toků do stěny pláště spalovací komory, stability, délky, velikosti a tvaru plamene. Naměřená experimentální data udávala koncentrací  $\text{NO}_x$  a CO ve spalinách, dále se měřily teploty v horizontální rovině plamene a v neposlední řadě i množství tepla odvedeného do pláště spalovací komory při konstantním výkonu hořáku 1000 kW. Vyhodnocení provozních parametrů (přebytek spalovacího vzduchu, množství paliva v primárním stupni) a konstrukčních parametrů (úhel sklonu sekundárních trysek, úhel natočení sekundárních trysek vzhledem k ose hořáku) parametrů bylo rozděleno do tří testů.

V testu A bylo cílem vyšetřit vliv skupiny konstrukčních prvků a provozních parametrů hořáku na tvorbu oxidů dusíku a nalézt vztah (závislost) vyjádřený empirickým modelem mezi touto skupinou parametrů a měřenou veličinou. Hledání matematického modelu se provádělo v programu MINITAB, ve kterém se provedla statistická analýza naměřených dat. Test A také zahrnoval podrobné plánování zkoušky hořáku před jejím vlastním provedením. Byl vytvořen model 2. řádu zahrnující 4 lineární členy, 4 kvadratické členy a 3 členy vyjadřujících vzájemnou interakci lineárních členů. Model se vyznačuje koeficientem určení  $R^2 = 98,4$ . Podle modelu s rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu a rostoucím úhlem natočení sekundárních trysek klesala tvorba  $\text{NO}_x$ , s rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu také nejprve stoupala tvorba  $\text{NO}_x$  do hodnoty cca 1,25, poté začala výrazně klesat.

Test B se zabýval měřením teploty v plameni v horizontální rovině symetrie spalovací komory. V průběhu měření se vodou chlazené termočlánky zasouvaly směrem k ose komory ve vzdálenosti 5, 10, 20, 30, 40, 50 cm a z naměřených dat se vytvořili teplotní pole pro vybraná nastavení. Obecně lze říct, že byla pozorována známá skutečnost, že vyšší přebytek vzduchu snižuje teplotu plamene, což se následně projevuje i nižší tvorbou  $\text{NO}_x$ .

Jako optimální nastavení se jeví měření, při kterém byla velikost clony 5,5, přebytek spalovacího vzduchu 1,2, natočení trysek  $-30^\circ$  a sklon trysek  $20^\circ$ . Při tomto nastavení teploty v jádru plamene dosahovaly maximálně teploty  $1200^\circ\text{C}$ , což mělo příznivý vliv na potlačení tvorby  $\text{NO}_x$ . Z pozorování také vyplynulo, že teplotní pole je nejrovnoměrnější ze všech testovaných nastavení a je rozloženo v horizontální rovině komory s délkou plamene cca 2,5 m.

V testu C byly měřeny pro vybraná nastavení tepelné toky do stěn sekcí spalovací komory a byla vyhodnocena účinnost. Klíčovým parametrem pro spalovací zařízení je tepelný tok a jeho rovnoměrné rozložení. Jako nejideálnější nastavení parametrů se jeví měření číslo 1, přesněji nastavení přebytku vzduchu 1,2 %, s velikostí clony 5,5, natočením trysek  $-30^\circ$  a sklonem trysek  $20^\circ$ . Při tomto nastavení bylo dosaženo největší účinnosti přestupu tepla do stěny komory (58,6 %) a zároveň nejnižší tvorby  $\text{NO}_x$  ( $79\text{ mg/m}_N^3$ ). Obecně lze říci, že největší zatížení pláště u všech měření se pohybovalo ve třetí sekci, tj. ve vzdálenosti 1,5 m od ústí hořáku.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Vývoj koncentrace oxidů dusíku ( $C_{NO_x}$ ) za čas (t) pro různé teploty spalování [8]. ....	24
Obr. 2 - Tvorba termického NO v závislosti na přebytku vzduchu [30]. .....	24
Obr. 3 - Závislost vzniku $NO_x$ na teplotě [7]. .....	25
Obr. 4 - Reakční doba závisící na přebytku vzduchu [7]. .....	27
Obr. 5 - Emise $NO_x$ [ $mg/m^3$ ] při spalování různých paliv [7]. .....	27
Obr. 6 - Tvorba $NO_x$ v závislosti na teplotě spalovacího vzduchu [8]. .....	30
Obr. 7 - Znázornění metody jednostupňového a stupňového přívodu vzduchu [20]. .....	31
Obr. 8 - Princip metody „reburning“ [30]. .....	32
Obr. 9 - Znázornění vnitřní recirkulace spalin [23]. .....	32
Obr. 10 - Znázornění vnější recirkulace spalin [23]. .....	33
Obr. 11 - Foto zkušebny. ....	37
Obr. 12 - Model hořáku s dvojstupňovým přívodem plynu. ....	39
Obr. 13 - Iterační výpočet matematického modelu. ....	47
Obr. 14 - Histogram četnosti reziduí pro model 1. ....	49
Obr. 15 - Pravděpodobnostní graf reziduí pro model 1. ....	50
Obr. 16 - Histogram četnosti reziduí pro model 2. ....	51
Obr. 17 - Pravděpodobnostní graf reziduí pro model 2. ....	52
Obr. 18 - Histogram četnosti reziduí pro model 3. ....	53
Obr. 19 - Pravděpodobnostní graf reziduí pro model 3. ....	54
Obr. 20 - Graf závislosti velikosti clony na tvorbu $NO_x$ [ $mg/m_N^3$ ]. .....	56
Obr. 21 - Graf závislosti přebytku vzduchu na $NO_x$ [ $mg/m_N^3$ ]. .....	56
Obr. 22 - Graf závislosti natočení trysek na tvorbu $NO_x$ [ $mg/m_N^3$ ]. .....	57
Obr. 23 - Graf závislosti sklonu sekundárních trysek na množství $NO_x$ [ $mg/m_N^3$ ]. .....	58
Obr. 24 - Pohled na zasunuté termočlánky. ....	59
Obr. 25 - Teplotní pole pro měření č. 1. ....	60
Obr. 26 - Teplotní pole pro měření č. 2. ....	61
Obr. 27 - Teplotní pole pro měření č. 3. ....	61
Obr. 28 - Teplotní pole pro měření č. 4. ....	62
Obr. 29 - Teplotní pole pro měření č. 5. ....	62
Obr. 30 - Teplotní pole pro měření č. 6. ....	62
Obr. 31 - Teplotní pole pro měření č. 7. ....	63
Obr. 32 - Profil tepelného toku pro měření č. 2, 3. ....	66
Obr. 33 - Profil tepelného toku pro měření č. 4, 5. ....	67
Obr. 34 - Profil tepelného toku pro měření č. 6, 7. ....	68
Obr. 35 - Profil tepelného toku po délce spalovací komory. ....	69



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Složení plynu (RWE). .....	17
Tab. 2 - Charakteristické vlastnosti zemního plynu. ....	17
Tab. 3 - Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2017 (vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky). ....	20
Tab. 4 - Specifické emisní limity platné od 1. ledna 2018. ....	20
Tab. 5 - Mezní hodnoty emisí ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ ) pro $\text{NO}_x$ pro spalovací zařízení spalující plyn. ....	21
Tab. 6 - Proměnné faktory. ....	45
Tab. 7 - Konstantní faktory. ....	45
Tab. 8 - Identifikované vybočující body .....	52
Tab. 9 - Reziduum pro model 2. ....	54
Tab. 10 - Rezidua pro model 3. ....	55
Tab. 11 - Vybraná nastavení hořáku. ....	60
Tab. 12 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 1. ....	65
Tab. 13 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 2. ....	66
Tab. 14 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 3. ....	66
Tab. 15 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 4. ....	67
Tab. 16 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 5. ....	67
Tab. 17 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 6. ....	68
Tab. 18 - Tepelné toky a relativní chyby v jednotlivých sekcích pro měření č. 7. ....	68

## SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Význam
$\lambda$	[-]	Přebytek vzduchu
$\phi$	[-]	Ekvivalenční poměr
$Q_v$	[kWh/m <sup>3</sup> ]	Výhřevnost paliva
$Q_s$	[kWh/m <sup>3</sup> ]	Spalné teplo
DMV	[%]	Dolní mez výbušnosti
HMV	[%]	Horní mez výbušnosti
$x_i$	[kg/kg]	Hmotnostní zlomek složky i
$\dot{V}$	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]	Objemový průtok
M	[g/mol]	Molární hmotnost
$V_m$	l/mol	Molární objem
k	[m <sup>3</sup> /mol·s·K]	Rychlostní konstanta
t	[s]	Doba reakce
Q	[W·s]	Teplo
$\varepsilon$	[-]	emisivita (poměrná zářivost)
$\sigma$	[W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )]	Stefan-Boltzmannova konstanta
S	[m <sup>2</sup> ]	Plocha povrchu
T	[K]	Teplota
$\alpha$	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	Součinitel přestupu tepla
$T_w$	[K]	Teplota povrchu tělesa
$q_x$	[W/m <sup>2</sup> ]	Měrný tepelný tok
k	[W/(m·K)]	Tepelná vodivost
dT	[K]	Rozdíl teplot mezi dvěma místy
dx	[K]	Vzdálenost mezi dvěma místy
AVG	[-]	Průměrná hodnota úrovní faktoru,
MID	[-]	Poloviční rozsah úrovní faktoru
$\beta_i$	[-]	Lineární účinek faktoru $x_i$
$\beta_{ij}$	[-]	Bilineární interakce mezi faktory $x_i$ a $x_j$
$\beta_{ii}$	[-]	Kvadratický účinek faktoru $x_i$
$\varepsilon$	[-]	Náhodná chyba
$N_0$	[-]	Počet měření
2k	[-]	Počet hvězdicovitých bodů
$n_c$	[-]	Počet centrálních bodů
$s_r^2$	[-]	Vzdálenost modelu
$s_e^2$	[-]	Rozptyl měřených hodnot
n	[-]	Počet měření
$\alpha$	[%]	Hladina významnosti
R <sup>2</sup>	[W]	Koeficient určení
$\dot{Q}_i$	[-]	Tepelný tok pro i-tou sekci

$m_v$	[kg/s]	Hmotnostní průtok
$c_{p,i}$	[J/kg·K]	Měrná tepelná kapacita
$\Delta t_i$	[°C]	Rozdíl teplot chladicí vody na výstupu a vstupu
$\dot{q}_i$	[W/m <sup>2</sup> ]	Hustota tepelného toku i-té sekce
$\rho_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota vody závislosti na teplotě
$A_i$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha i-té sekce
$L_i$	[m]	Délka i-té sekce
$t_{out,i}$	[°C]	Výstupní teplota chladicí vody sekce
$t_{in,i}$	[°C]	Vstupní teplota chladicí vody sekce

## SEZNAM ZKRATEK

Zkratka	Definice
CFD	Computational fluid dynamics
LTO	Lehké topné oleje
HiTAC	High temperature air combustion
FLOX	Flameless oxidation
SNCR	Selective Non-catalytic Reduction
SCR	Selective Catalytic Reduction
DOE	Design of Experiments
CCD	Central Composite Design
XSO	Procentuální přebytek oxidačního činidla

## SEZNAM CHEMICKÝCH PRVKŮ A SLOUČENIN

Vzorec	Název
Ar	Argon
CH <sub>4</sub>	Metan
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Etan
CH <sub>γ</sub>	Uhlovodíkový radikál
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
H <sub>2</sub> O	Voda, vodní pára
HCN	Kyanovodík
NH <sub>3</sub>	Amoniak
N <sub>2</sub>	Dusík
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
NO	Oxid dusnatý
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý
N <sub>2</sub> O	Oxid dusný
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Oxid dusičný
O <sub>2</sub>	Kyslík
OH <sub>1</sub>	Hydroxilový radikál
SO <sub>x</sub>	Oxidy síry

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Anderson J.D., Computational Fluid Dynamics: The basics with Applications, USA, McGraw-Hill, 1995, ISBN 0-07113210-4.
- [2] Něco málo o spalování. In: [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: <http://www.schiedel.cz/cz/neco-malo-o-spalovani>
- [3] Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>/NO<sub>2</sub>). In: [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: [http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy\\_dusiku.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/oxidy_dusiku.pdf)
- [4] Výzva NO<sub>x</sub>. In: [online]. [cit. 2015-02-01]. Dostupné z: [http://sk.swewe.net/word\\_show.htm/?321274\\_1&Vyzva\\_NOx](http://sk.swewe.net/word_show.htm/?321274_1&Vyzva_NOx)
- [5] BOROVEC, Karel, Pavel DANIHELKA, Petr KULA a Tadeáš OCHODEK. Znečištění ovzduší oxidem dusným a vliv průmyslových procesů na jeho emise. s. 6. Dostupné z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/1998/n3/12borovec.pdf>
- [6] Plynárenská příručka – 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě, Praha, GAS s.r.o., 1997, ISBN 80-902339-6-1.
- [7] Ibler Z. a kol., Technický průvodce energetika, 1.díl, Vydalo nakladatelství BEN – technická literatura 2002, 1.vydání.
- [8] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1978. ISBN 04-230-78.
- [9] Ballester J.M., Dopazo C., Fueyo N., Hernández M., Vidal P.J., Investigation of low-NO<sub>x</sub> strategies for natural gas combustion, Fuel 1997; 76:435-446.
- [10] Beér J.M., Minimizing NO<sub>x</sub> emissions from stationary combustion; Reaction engineering methodology, Chemical Engineering Science 1993; 49:4067-4083.
- [11] Ballester J.M., Sanz A., González M.A., Investigation of the characteristic and stability of air-staged flames, Experimental Thermal and Fluid Science 2008; 32:776-790.
- [12] Smoot L.D., Hill S.C., Xu H., NO<sub>x</sub> control through reburning, Progress in Energy and Combustion Science 1998; 24:385-408.
- [13] Kicherer A., Spliethoff H., Maier H., Hein K.R.G., The effect of different reburning fuels on NO<sub>x</sub>-reduction, Fuel 1994; 73:1443-1446.
- [14] Baltasar J., Carvalho M.G., Coelho P., Costa M., Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling, Fuel 1997; 76:919-929.

- [15] Emise oxidů dusíku u spalovacích procesů a možnosti jejich snižování: Sborník. 1. vyd. Brno: Dům techniky ČSVTS, 1990, 50 STR. 80-020-0117-6.
- [16] Carvalho M.G., Semiao V.S., Coelho J.P., Modelling and optimization of the NO formation in an industrial glass furnace, ASME J. Engineering for Industry 1992;114:514-523.
- [17] Carvalho M.G., Semiao V.S., Lockwood F.C., Papadopoulos C., Prediction of nitric oxides emissions from an industrial glass-melting furnace, Journal of Inst. of Energy 1990; 39-47.
- [18] Niessen W.R., Combustion and Incineration Processes, USA, Marcel Dekker, 2002, ISBN 0-8247-0629-3.
- [19] 98 str. ISBN 80-7080-571-4. Smoot L.D., Hill S.C., Xu H., NO<sub>x</sub> control through reburning, Progress in Energy and Combustion Science 1998; 24:385-408.
- [20] Tvorba škodlivin při spalování [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Výzkumné energetické centrum, [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <<http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/tvorba.pdf>>.
- [21] Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC) : Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách pro celá spalovací zařízení [online]. Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu. 2010 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <<http://www.ippc.cz/index.php?m=docs&a=getActiveFile&ffid=357>>.
- [22] VEJVODA, J., MACHAČ, P., BURYAN, P. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany prostředí, 2003. 226 str. ISBN 80-7080-517-X.
- [23] Baukal C.E., Industrial Combustion, Pollution and Control, USA, Marcel Dekker, 2004, ISBN 0-8247-4694-5.
- [24] Baukal C.E., Industrial Burners Handbook, USA, CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-1386-4.
- [25] GRÝCMANOVÁ, M. Výzkum možnosti aplikace technologie SNCR pro denitrifikaci kotle K4 v Elektrárně Opatovice: Research of possibility for the application of SNCR technology for denitrification in the power boiler K4 Opatovice. 1. vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, 37 str. ISBN 978-80-248-2437-6.
- [26] Kermes V., Skryja P., Stehlík P., Up to date experimental facility for testing low-NO<sub>x</sub> burners, 10th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2007, Ischia Porto, Itálie, 2007, Proceeding on CD-ROM.

- [27] Pavelek, M.; Janotková, E.; Sekanina, B.; Kavička, F.; Jícha, M. Termomechanika. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN: 80-214-2409-5.
- [28] MINITAB 14.1, *User's Guide*, Minitab Inc., USA, 2003.
- [29] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L., *Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science*, USA, Wiley, 2003, ISBN 0-471-37216-
- [30] BĚLOHRADSKÝ, Petr. Metody pro určování charakteristických parametrů procesů spalování na bázi experimentů a modelování. Brno, 2010. Dizertační práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Petr Stehlík.
- [31] Montgomery D.C., *Design and Analysis of Experiments*, USA, Wiley, 1991, ISBN 0-471-52000-4.
- [32] Chen X., Du W., Liu D., Response surface optimization of biocatalytic biodiesel production with acid oil, *Biomechanical Engineering Journal* 2008; 40:423-429.
- [33] Wüning J.A., Wüning J.G., *Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation*, *Progress in Energy and Combustion Science* 1997; 23:81-94.
- [34] Tsuji H., Gupta A.K., Hasewaga T., Katsuki M., Kishimoto K., Morita M., *High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction*, USA, CRC Press, 2003, ISBN 0-8493-1036-9.
- [35] Meloun M., Militký J., *Statistická analýza experimentálních dat*, Česká republika, Academia, 2004, ISBN 80-200-1254-0.
- [36] Bašta J., *Otopné plochy*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001, ISBN 80-01-02365-6.
- [37] PŘÍRUČKA PRO OCHRANU OVZDUŠÍ. In: ZÁKON Č. 201/2012 SB. O OVZDUŠÍ A ZÁKON Č. 73/2012 SB. O REGULOVANÝCH LÁTKÁCH A FLUOROVANÝCH SKLENÍK. 2012. Dostupné z:[http://www.eurochem.cz/eko/EKO\\_CD35\\_828284/dokumenty/e\\_book/prirucka/d\\_obsah\\_texty.pdf?PHPSESSID=de944d142c62b05eb73db5508c374b1d](http://www.eurochem.cz/eko/EKO_CD35_828284/dokumenty/e_book/prirucka/d_obsah_texty.pdf?PHPSESSID=de944d142c62b05eb73db5508c374b1d)
- [38] SLAVÍK, Jan. Směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích (IED). In: MŽP [online]. 2011, 2012 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf/cc554be906d1d9b6c1256d52004d27cd/df503f0543cb860ec125785300285162?OpenDocument>
- [39] BEJČOVÁ, Pavla. Nový zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. [online]. 2012 [cit. 2013-02-23]. ISSN 1803-6686. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/paragraf/93553/novy-zakon-o-ochrane-ovzdusi-c-201-2012-sb>

- [40] VACH, Marek. Ochrana ovzduší [online]. Praha, 2010 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: [knc.czu.cz/~vachm/ovzdusi/ovzd\\_text.doc](http://knc.czu.cz/~vachm/ovzdusi/ovzd_text.doc). Česká zemědělská univerzita v Praze.
- [41] Ochrana ovzduší. In: zákon č. 201/2012 Sb. o ovzduší a zákon č. 73/2012 Sb. o regulovaných látkách a fluorovaných skleník. 2012. Dostupné z: [http://www.ekonoviny.cz/envireport/12\\_09\\_878985/D\\_Kniha.pdf?PHPSESSID=41a801e4d307cb8c4ba8e3977199f32b](http://www.ekonoviny.cz/envireport/12_09_878985/D_Kniha.pdf?PHPSESSID=41a801e4d307cb8c4ba8e3977199f32b)
- [42] KRAYZEL, Zbyněk. Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší – základní povinnosti provozovatelů zdrojů znečišťování ovzduší [online]. Praha, 2013 [cit. 2013-02-24]. Dostupné z: [http://www.krayzel.cz/wp-content/uploads/PRED\\_Zakon-201\\_2012-plnaverze-10.1.2013.pdf](http://www.krayzel.cz/wp-content/uploads/PRED_Zakon-201_2012-plnaverze-10.1.2013.pdf)
- [43] Vondál, J. Computational Modeling of Turbulent Swirling Diffusion Flames. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2012. 221 p. Supervisor doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.



**PŘÍLOHA A -**  
plán experimentu + naměřené hodnoty

Tab. A1- Plán experimentu.

Číslo měření	Clona [mm]	Přebytek vzduchu [-]	Natočení sekundárních trysek [°]	Sklon sekundárních trysek [°]
1	7	1,3	0	10
2	5,5	1,2	-30	20
3	8,5	1,2	-30	20
4	5,5	1,4	-30	20
5	8,5	1,4	-30	20
6	5,5	1,2	30	20
7	8,5	1,2	30	20
8	5,5	1,4	30	20
9	8,5	1,4	30	20
10	4	1,3	0	30
11	10	1,3	0	30
12	7	1,1	0	30
13	7	1,5	0	30
14	7	1,3	-60	30
15	7	1,3	60	30
16	7	1,3	0	30
17	7	1,3	0	30
18	7	1,3	0	30
19	7	1,3	0	30
20	7	1,3	0	30
21	7	1,3	0	30
22	7	1,3	0	30
23	5,5	1,2	-30	40
24	8,5	1,2	-30	40
25	5,5	1,4	-30	40
26	8,5	1,4	-30	40
27	5,5	1,2	30	40
28	8,5	1,2	30	40
29	5,5	1,4	30	40
30	8,5	1,4	30	40
31	7	1,3	0	50

Tab. A2 – Naměřená data a přepočty.

Číslo měření	O <sub>2</sub> [ppm]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO <sub>2</sub> [ppm]	CO při 3 % O <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Přepočet NO na NO <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> při 3 % O <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
1	5,18	2,15	37,10	0,19	3,06	76	77	87
1	5,20	1,80	36,85	0,11	2,56	76	76	86
1	5,15	1,08	36,83	0,27	1,53	76	76	87
2	3,87	0,93	37,03	0,28	1,23	76	77	80
2	3,77	3,37	37,20	0,12	4,40	76	77	80
2	3,75	3,25	36,75	0,09	4,23	75	76	79
3	3,80	2,15	42,83	0,25	2,81	88	88	93
3	3,80	1,93	43,37	0,38	2,53	89	90	94
3	3,75	1,45	43,28	0,36	1,89	89	90	93
4	6,47	1,40	32,53	0,41	2,17	67	68	84
4	6,47	0,47	31,43	0,50	0,72	65	66	81
4	6,60	2,15	30,18	0,26	3,35	62	62	78
5	6,48	1,10	35,35	0,47	1,70	73	74	91
5	6,47	1,93	34,90	0,25	2,99	72	72	89
5	6,43	1,45	35,58	0,46	2,24	73	74	91
6	3,88	2,50	40,40	0,15	3,29	83	83	88
6	3,80	2,53	41,30	0,41	3,30	85	86	90
6	3,85	0,38	40,70	0,34	0,49	84	84	88
7	3,83	1,45	42,80	0,36	1,90	88	89	93
7	3,85	1,80	43,85	0,43	2,37	90	91	95
7	3,87	1,43	43,43	0,16	1,88	89	89	94
8	6,38	0,70	35,63	0,28	1,08	73	74	91
8	6,40	0,35	36,45	0,22	0,54	75	75	93
8	6,43	0,70	36,38	0,26	1,08	75	75	93
9	6,43	1,05	40,58	0,36	1,62	83	84	104
9	6,43	1,93	40,10	0,46	2,99	82	83	103
9	6,43	0,35	40,53	0,32	0,54	83	84	104
10	5,30	1,10	34,58	0,36	1,59	71	72	82
10	5,28	1,45	34,55	0,37	2,07	71	72	82
10	5,26	0,56	33,46	0,25	0,80	69	69	79
11	5,23	3,37	45,33	0,34	4,81	93	94	107
11	5,23	2,40	45,50	0,29	3,43	93	94	107
11	5,17	1,43	46,37	0,40	2,04	95	96	109
12	2,13	1,93	59,07	0,43	2,31	121	122	116
12	2,17	1,43	59,13	0,33	1,71	121	122	117
12	2,08	1,10	60,13	0,25	1,31	123	124	118
13	7,50	1,08	39,13	0,16	1,79	80	81	108

Tab. A2 (pokr.) - Naměřená data a přepočty.

Číslo měření	O <sub>2</sub> [ppm]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO <sub>2</sub> [ppm]	CO při 3 % O <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Přepočet NO na NO <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> při 3 % O <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
13	7,55	0,35	38,63	0,38	0,58	79	80	107
13	7,50	1,45	38,20	0,41	2,42	78	79	106
14	5,30	1,45	44,08	0,34	2,07	90	91	105
14	5,27	2,40	44,70	0,28	3,43	92	92	106
14	5,30	0,70	44,53	0,37	1,00	91	92	106
15	5,28	1,45	45,05	0,33	2,08	92	93	107
15	5,20	1,80	45,58	0,30	2,56	94	94	107
15	5,17	3,37	45,50	0,20	4,78	93	94	107
16	5,20	2,15	51,85	0,22	3,06	106	107	122
16	5,30	0,70	51,90	0,38	1,00	107	107	123
16	5,25	2,15	50,45	0,15	3,07	104	104	119
17	5,20	1,45	50,70	0,42	2,07	104	105	120
17	5,25	0,00	50,60	0,21	0,00	104	104	119
17	5,30	1,45	50,60	0,19	2,08	104	104	120
18	5,35	-0,70	50,25	0,20	-1,00	103	104	119
18	5,35	0,00	50,70	0,43	0,00	104	105	121
18	5,20	0,75	52,05	0,20	1,07	107	107	122
19	5,25	1,45	50,80	0,50	2,08	104	105	120
19	5,30	2,15	51,80	0,34	3,09	106	107	123
19	5,35	0,70	51,85	0,40	1,00	106	107	123
20	5,35	0,70	51,15	0,24	1,00	105	105	121
20	5,30	1,45	51,95	0,07	2,08	107	107	123
20	5,35	1,45	52,25	0,33	2,08	107	108	124
21	5,25	1,45	52,45	0,33	2,07	108	108	124
21	5,25	1,45	52,05	0,23	2,08	107	107	123
21	5,30	0,00	51,60	0,36	0,00	106	107	122
22	5,20	2,90	52,20	0,22	4,13	107	108	123
22	5,30	1,40	52,40	0,19	2,01	108	108	124
22	5,30	1,40	50,60	0,04	2,01	104	104	119
23	3,87	2,90	47,47	0,24	3,81	97	98	103
23	4,00	5,80	45,90	0,33	7,68	94	95	101
23	3,90	3,87	46,27	0,35	5,08	95	96	101
24	3,77	0,97	53,13	0,33	1,26	109	110	115
24	3,75	1,08	53,28	0,24	1,40	109	110	115
24	3,78	1,08	53,13	0,27	1,41	109	110	115
25	6,37	4,80	33,97	0,26	7,39	70	70	87
25	6,37	0,97	34,37	0,39	1,49	71	71	88
25	6,40	1,08	33,20	0,21	1,66	68	69	85
26	6,50	1,90	36,77	0,26	2,95	75	76	94

Tab. A2 (pokr.) – Naměřená data a přepočty.

Číslo měření	O <sub>2</sub> [ppm]	CO [ppm]	NO [ppm]	NO <sub>2</sub> [ppm]	CO při 3 % O <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	Přepočet NO na NO <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> při 3 % O <sub>2</sub> [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
26	6,53	3,33	36,97	0,19	5,18	76	76	95
26	6,47	1,43	38,53	0,25	2,22	79	80	99
27	3,73	1,93	48,57	0,31	2,52	100	100	105
27	3,70	4,35	48,75	0,35	5,66	100	101	105
27	3,80	3,37	48,47	0,27	4,40	99	100	105
28	3,80	1,47	50,27	0,17	1,92	103	104	108
28	3,80	3,60	51,43	0,39	4,72	106	106	111
28	3,83	4,35	52,13	0,28	5,69	107	108	113
29	6,50	1,90	35,97	0,45	2,95	74	75	93
29	6,60	3,83	35,87	0,51	6,00	74	75	93
29	6,60	1,93	37,03	0,36	3,02	76	77	96
30	6,40	2,90	41,35	0,07	4,47	85	85	105
30	6,30	5,05	41,25	0,14	7,74	85	85	104
30	6,40	2,90	40,43	0,17	4,47	83	83	103
31	5,20	1,45	66,48	0,18	2,07	136	137	156
31	5,28	1,08	66,58	0,39	1,54	137	137	157
31	5,30	2,15	66,00	0,26	3,08	135	136	156

**PŘÍLOHA B**  
Teploty v plameni

Tab. I - Naměřené teploty v plameni pro nastavení č. 1.

	Ter. č. 1	Ter. č. 2	Ter. č. 3	Ter. č. 4	Ter. č. 5	Ter. č. 6	Ter. č. 7
Pozice	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
5 cm	774,9	1046,7	715,9	853,9	620,0	688,5	521,1
10 cm	880,7	1085,2	842,2	937,5	708,6	742,9	550,6
20 cm	937,2	1165,5	956,3	972,8	770,0	800,9	622,1
30 cm	1014,7	1204,3	1007,3	992,5	805,5	831,7	691,4
40 cm	868,9	1157,1	1012,0	990,9	808,6	838,3	728,9
50 cm	818,9	1124,0	1011,4	992,1	813,1	845,8	760,6

Tab. II - Naměřené teploty v plameni pro nastavení č. 2.

	Ter. č. 1	Ter. č. 2	Ter. č. 3	Ter. č. 4	Ter. č. 5	Ter. č. 6	Ter. č. 7
Pozice	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
5 cm	693,1	939,1	769,2	921,4	738,1	818,5	584,1
10 cm	778,2	983,3	834,5	943,4	780,8	856,8	633,1
20 cm	877,5	1074,5	911,3	965,0	808,1	881,7	713,3
30 cm	1167,2	1169,7	956,6	974,7	818,0	879,2	747,5
40 cm	1097,1	1112,8	979,6	976,0	817,7	860,4	769,3
50 cm	813,2	1198,8	997,3	979,8	815,1	856,4	777,9

Tab. III - Naměřené teploty v plameni pro nastavení č. 4.

	Ter. č. 1	Ter. č. 2	Ter. č. 3	Ter. č. 4	Ter. č. 5	Ter. č. 6	Ter. č. 7
Pozice	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
5 cm	804,0	969,6	785,2	912,4	722,6	772,7	561,6
10 cm	872,3	1036,3	891,2	965,0	768,6	824,4	610,0
20 cm	991,8	1134,1	973,4	1000,9	812,0	871,3	687,3
30 cm	1215,2	1194,7	1007,4	992,8	824,8	873,6	742,0
40 cm	1237,3	1261,7	1019,1	990,4	822,2	865,4	762,2
50 cm	1245,6	1236,4	1008,7	978,9	810,6	848,9	763,2

Tab. IV - Naměřené teploty v plameni pro nastavení č. 6.

	Ter. č. 1	Ter. č. 2	Ter. č. 3	Ter. č. 4	Ter. č. 5	Ter. č. 6	Ter. č. 7
Pozice	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
5 cm	905,8	976,9	665,6	869,6	722,2	776,4	586,9
10 cm	985,3	1057,2	779,6	949,2	769,5	830,2	632,9
20 cm	1142,7	1219,5	934,2	1005,7	818,6	880,9	705,0
30 cm	1374,0	1359,9	1055,7	1044,8	855,8	898,7	764,3
40 cm	1444,0	1427,4	1097,7	1058,2	863,6	903,3	784,6
50 cm	1433,3	1410,2	1084,2	1042,8	858,3	887,9	791,2