



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 VNITŘNÍ RECIRKULACE SPALIN NA CHARAKTERISTICKÉ PARAMETRY SPALOVÁNÍ

THE INFLUENCE OF THE FURNACE GAS RECIRCULATION ON CHARACTERISTIC
PARAMETERS OF THE COMBUSTION PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TEREZA MACENAUEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR BĚLOHRADSKÝ, Ph.D.

BRNO 2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student(ka): Bc. Tereza Macenauerová 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 vnitřní recirkulace spalin na charakteristické parametry spalování

v anglickém jazyce:

The influence of the furnace gas recirculation on characteristic parameters of the combustion process

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Průmyslové aplikace jako jsou ohřev procesních látek nebo zpracování materiálů (kovových, nekovových, sklářských písků) získávají potřebnou tepelnou energii prostřednictvím spalovacího procesu. Při každém spalovacím procesu vznikají kromě tepelné energie i tzv. emise, které jsou škodlivé a nežádoucí. Jednou z kategorií jsou emise oxidů dusíku, zkráceně NO_x. Jejich tvorbu lze potlačit celou řadou technik, z nichž jedna je založena na recirkulaci vzniklých spalin zpět do hořáku. Vlastní recirkulace se děje na základě vhodné konstrukce hořáku. Nasávání horkých spalin zpět do těla hořáku je vyvoláno ejekčním účinkem spalovacího vzduchu. Intenzitu ejekčního účinku spalovacího vzduchu pak lze ovlivnit teplotou samotného spalovacího vzduchu.

Cílem této práce bude vyhodnotit vliv vnitřní recirkulace spalin (recirkulačního poměru) a stupňovitěho spalování paliva na celou řadu parametrů spalování. Tyto parametry zahrnují emise NO_x a CO, teplotu spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, rozložení tepelných toků z horkých spalin do stěny spalovací komory, stabilitu hoření, a tvar plamene. V prvním kroku bude provedena rešerše v oblasti metod pro snižování tvorby NO_x a v oblasti faktorů, které silně ovlivňují tvorbu NO_x. Tato rešerše bude doplněna souhrnem současných emisních limitů pro NO_x a CO pro stacionární zdroje o různém spalovacím výkonu. Druhá část práce bude zaměřena na použití vnitřní recirkulace spalin za účelem snížení tvorby NO_x, bude provedena analýza jejích kladů, záporů a problémů spojených s jejím použitím. Stěžejní částí práce pak bude provedení spalovacích zkoušek na zkušebně hořáků Ústavu procesního a ekologického inženýrství a vyhodnocení experimentálních dat.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše z oblasti metod pro snížení tvorby NO_x, klady a zápory jednotlivých metod.
2. Emisní limity pro NO_x a CO pro stacionární zdroje.
3. Použití vnitřní recirkulace spalin.
4. Spalovací zkoušky s hořákem s vnitřní recirkulací spalin a stupňovitým spalováním paliva.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá zhodnocením vzniku emisí NO_x a CO při procesu spalování za použití hořáku se stupňovitým přívodem paliva a s vnitřní recirkulací spalin. V teoretické části práce jsou popsány mechanismy vzniku NO_x a metody používané pro zamezení jejich tvorby, případně pro jejich odstranění ze spalin. Teoretická část je doplněna legislativou emisních limitů NO_x a CO pro stacionární zdroje, platných v České republice. V rámci zpracování tohoto tématu byly provedeny na zkušební hořáků UPEI VUT v Brně spalovací zkoušky. Na základě vyhodnocení těchto experimentů byly za důležité parametry vedoucí k výraznému snížení NO_x ve spalinách označeny: zavedení sekundárního paliva, rostoucí přebytek spalovacího vzduchu a použití nového zařízení pro zpětné nasávání spalin ze spalovacího prostoru umístěného ve vzruhovém kanálu hořáku. V textu jsou rovněž uvedeny závislosti teploty spalin, tepelných toků do stěn sekcí spalovací komory a teplotního rozložení v horizontální rovině symetrie spalovací komory na celé řadě parametrů. Tyto parametry zahrnovaly geometrii zařízení pro recirkulaci spalin, poměr primárního a sekundárního paliva, geometrii trysek pro přívod sekundárního paliva a jejich natočení vzhledem k ose hořáku, a přebytek spalovacího vzduchu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spalování, recirkulace spalin, stupňovitý přívod paliva, oxidy dusíku, tepelný tok, teplota v plameni.

ABSTRACT

This thesis deals with the evaluation of emissions of NO_x and CO formed during the combustion process when the burner utilizing fuel staging and internal flue gas recirculation is used. In the theoretical part the NO_x formation mechanisms and methods used to suppress their formation are described. This is followed with the currently valid legislation in the Czech Republic in terms of the emission limits for NO_x and CO in stationary sources. In the work, combustion tests were performed at the burners testing facility at UPEI BUT. The tests revealed that the most important parameters, which influence the NO_x formation, are fuel staging, increasing combustion air excess and the utilization of new equipment that induces the flue gas to be drawn back into the burner. The equipment is installed in the burner's air channel. The dependence of flue gas temperature, heat flux to the combustion chamber's section walls and in-flame temperatures distribution in the horizontal symmetry plane of the combustion chamber on various parameters were investigated. The parameters included the geometry of the equipment for flue gas recirculation, primary/secondary ratio, geometry of nozzles for secondary fuel supply, tangential orientation of these nozzles towards the burner axis, and the excess of combustion air.

KEYWORDS

Combustion, flue gas recirculation, fuel staging, nitrogen oxides, heat flux, in-flame temperatures.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACENAUEROVÁ, T. *Vliv vnitřní recirkulace spalin na charakteristické parametry spalování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Dle nejlepšího vědomí a svědomí prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Petra Bělohradského, Ph.D. a že jsem všechny použité literární zdroje citovala úplně a správně.

V Brně dne 29. května 2015

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Petru Bělohradskému, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, pomoc na zkušebně hořáků a trpělivost při vedení mé diplomové práce.

Obsah

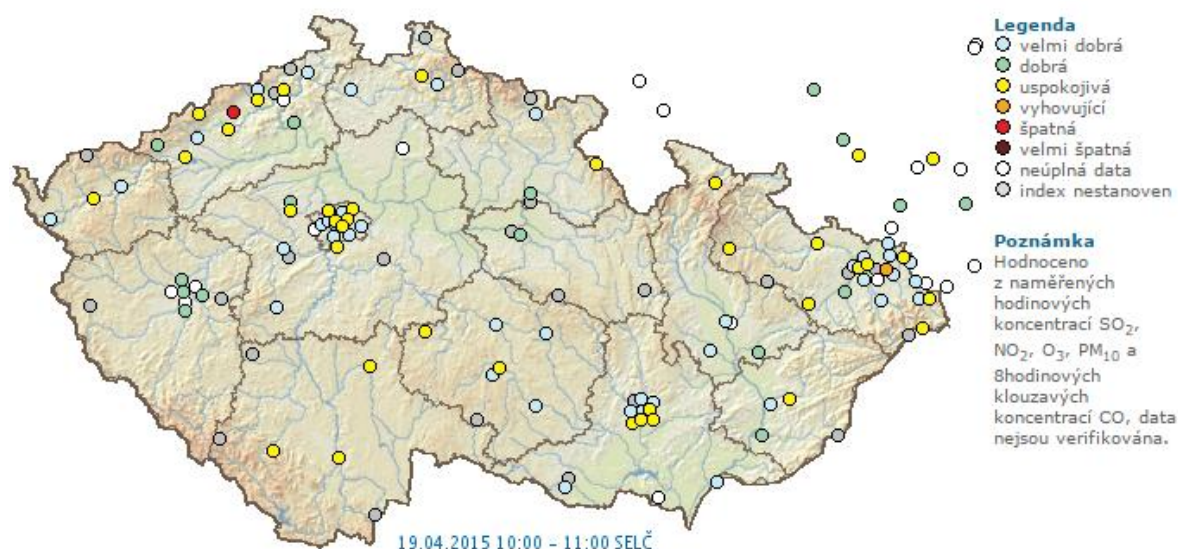
1	ÚVOD.....	11
1.1	Předmět práce.....	12
1.2	Cíle práce.....	12
2	OXIDY DUSÍKU	13
2.1	Mechanismy vzniku.....	13
2.1.1	Termický NO	13
2.1.2	Promptní NO	14
2.1.3	Palivový NO	15
2.1.4	Tvorba NO ₂	15
3	ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ OXIDŮ DUSÍKU VE SPALINÁCH	16
3.1	Primární redukční metody.....	16
3.1.1	Vícestupňové spalování.....	16
3.1.2	Recirkulace spalin.....	17
3.1.3	Bezplamenné spalování.....	18
3.2	Sekundární redukční metody	18
3.2.1	Katalytické čištění spalin	18
3.2.2	Nekatalytické čištění spalin	18
4	RECIRKULACE SPALIN	20
5	UZÁKONĚNÉ EMISNÍ LIMITY PRO ČESKOU REPUBLIKU.....	22
5.1	Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 50 MW a vyšším.....	24
5.2	Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu vyšším než 0,3 MW a nižším než 50 MW	26
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
6.1	Experimentální zařízení.....	27
6.1.1	Zkušebna hořáků	27
6.1.2	Vlastní hořák.....	29
6.2	Plán zkoušek	31
6.2.1	Stanovení emisních koncentrací NO _x ve spalinách	32
6.3	Spalovací zkoušky.....	33
6.4	Množství recirkulovaných spalin	34
7	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	38
7.1	Emise NO _x a CO	38

7.1.1	Zhodnocení tvorby emisí NO _x	38
7.1.2	Zhodnocení tvorby emisí CO	42
7.2	Teplota spalín	42
7.3	Stabilita a geometrie plamene	43
7.4	Tepelné toky.....	44
7.5	Teploty v plameni.....	45
8	ZÁVĚR	48
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	50
10	SEZNAM TABULEK	52
11	SEZNAM SYMBOLŮ.....	53
12	SEZNAM CHEMICKÝCH PRVKŮ A SLOUČENIN	54
13	SEZNAM LITERATURY	55
14	PŘÍLOHY.....	58

1 ÚVOD

Životní prostředí a s ním související pojmy, jako je jeho ochrana, kvalita a znečištění, jsou v dnešní době často skloňovaná témata. Mezi základní cíle EU patří zajištění bezpečnosti a kvality pitné vody, zlepšení kvality ovzduší a omezení dopadů používání chemických látek. To znamená ochránit obyvatele a přírodu před riziky, které může poškození životního prostředí zavinit [1]. Hlavním předmětem této práce je zkoumání množství oxidů dusíku ve spalinách. Oxidy dusíku jsou souhrnně označovány jako NO_x , jsou to škodlivé látky, které mají značný vliv na znečištění ovzduší. Podrobněji se jim bude věnovat kapitola 2. Poškození ovzduší je velmi složitý jev, kde vedle oxidů dusíku negativně působí také oxidy síry a další látky. Zdroje znečištění lze podle [2] rozdělit na přírodní, mezi které patří např. sopečná činnost nebo solné výpary z mořské vody, a antropogenní, což jsou spalování fosilních paliv, průmyslové procesy, zemědělství, zpracování odpadu. Spalování je chemický oxidační proces, při kterém se chemická vázaná energie paliva přeměňuje na energii tepelnou. Spalovací proces patří mezi nejpoužívanější a zároveň nejjednodušší metodu výroby tepelné energie, ta se dále využívá pro vytápění, výrobu elektrické energie nebo tavení materiálů a sušení pro další výrobní postupy. Vliv na množství emisí NO_x v ovzduší mají zdroje stacionární (např. teplárny, elektrárny,...) a zdroje mobilní (motorové dopravní prostředky) [3].

Úsek ochrany čistoty ovzduší Českého hydrometeorologického ústavu v předběžném zhodnocení pro rok 2014 [4] uvádí informace o znečišťujících látkách a dodržení imisních limitů na území České republiky. Oxid dusičitý byl monitorován v 91 lokalitách. K překročení ročního imisního limitu, což je $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, došlo na čtyřech stanicích (v Praze a Brně). Dalšími znečišťujícími látkami, kterými se zpráva zabývá, jsou suspendované částice PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$, u kterých je nejvíce překročení registrováno na Ostravsku. Oxid siřičitý, oxid uhelnatý a ozon jsou dalšími sledovanými látky, pro něž jsou stanoveny limitní hodnoty. Při překročení prahových hodnot pak dochází k vyhlášení smogových situací. Aktuální data o znečištění ovzduší konkrétními znečišťujícími látkami uvádí Český hydrometeorologický ústav na svých webových stránkách [5]. Obr. 1 zobrazuje stav kvality ovzduší na území České republiky ke dni 19. dubna 2015.



Obr. 1: Index kvality ovzduší (převzato z [5]).

1.1 Předmět práce

Jak už bylo uvedeno, práce se zabývá především oxidy dusíku, které jsou spolu s dalšími látkami (oxidy síry, oxidy uhlíku, uhlovodíky, těžké kovy, popílek a prach) součástí emisí [6]. Emise jsou škodlivé a znečišťující látky vypouštěné do ovzduší, vznikají jako nežádoucí produkt během spalování. Tvorbě emisí oxidů dusíku lze zabránit řadou opatření, kterých dosáhneme především vhodnou konstrukcí hořáku a nastavením spalovacího procesu (primární opatření). Koncentraci NO_x ve spalinách lze také snížit pomocí opatření sekundárních, kdy jsou ze spalin odstraňovány již vzniklé emise. Vnitřní recirkulace spalin je jedním z primárních opatření, jímž lze potlačit vznik oxidů dusíku. Je snaha najít optimální řešení spalovacího procesu, kdy bude vznikat minimální množství emisí a bude zachována účinnost spalování. Experiment, který je stěžejní částí této práce, měl za úkol ukázat vliv poměru spalovacího vzduchu na poměr nasávaných spalin zpět do hořáku, přiblížit metodu vnitřní recirkulace spalin jako vhodnou pro snížení tvorby NO_x . V rámci práce byly vykresleny závislosti tvorby emisí oxidů dusíku na poměru spalovacího vzduchu, různých úhlech natočení trysek přivádějících sekundární palivo, odlišných průměrech clony pro regulaci poměru primárního a sekundárního paliva, a také na geometrii zařízení pro zpětné nasávání spalin, které je instalováno ve vzduchovém kanálu hořáku (v práci uváděno jako zařízení pro recirkulaci spalin). Jelikož bude pro zařízení pro recirkulaci spalin po dalším testování podána patentová přihláška, nebylo možné v této práci zveřejnit ani jeho geometrii ani podrobnější popis.

1.2 Cíle práce

V následujících kapitolách jsou podrobněji přiblíženy oxidy dusíku. V teoretické části jsou uvedeny mechanismy jejich vzniku a možné metody pro snížení hodnot koncentrací NO_x ve spalinách. Důkladněji se práce zabývá metodou recirkulace spalin. Rešerše o oxidech dusíku je potom doplněna zákonnými emisními limity platnými v České republice. Souhrn emisních limitů pro oxidy dusíku (NO_x) a oxid uhelnatý (CO) pro stacionární zdroje s různým spalovacím výkonem je čerpán ze zákona č. 201/2012 o ochraně životního prostředí Sb. Cílem praktické části této diplomové práce bylo získat informace právě o závislostech tvorby oxidů dusíku na měněných parametrech při spalování. Zjištění vlivu vnitřní recirkulace spalin a poměru přiváděného spalovacího vzduchu na parametry spalování, kterými jsou emise NO_x a emise CO, teplota spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, stabilita hoření a tvar plamene, je stěžejní bod této práce. Zkoušky byly provedeny na zkušební hořáku na ÚPEI VUT v Brně, byl použit hořák se stupňovitým přívodem paliva a vnitřní recirkulací spalin. Podrobný plán měření, stejně tak jako zařízení, jsou popsány v kapitole 6. Experimentální část.

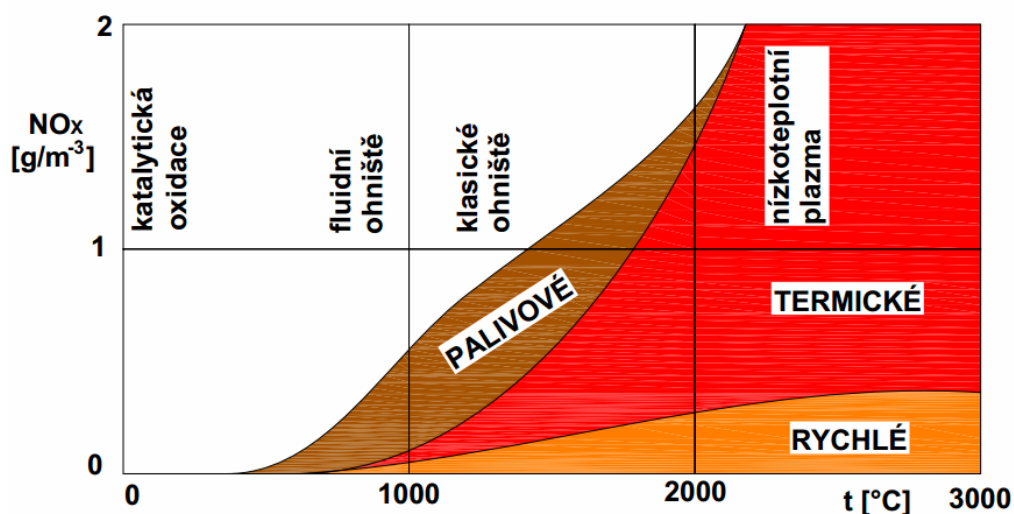
2 OXIDY DUSÍKU

Při spalovacích procesech vzniká vedle oxidu uhličitého a vodní páry řada dalších látek. Vedlejšími produkty spalování jsou emise, které obsahují řadu sloučenin, jako jsou oxidy dusíku, oxidy síry, popílek a další. Oxidy dusíku se zabýváme především z důvodu jejich negativního vlivu na lidské zdraví a životní prostředí. Hlavní toxický účinek dusíku je dráždění sliznice, kdy dlouhodobější expozice může vyvolat respirační onemocnění. Oxidy dusíku jsou také hlavními iniciátory fotochemického smogu [7], [8], [9].

Oxidy dusíku vznikají z dusíku obsaženého v palivu a v atmosférickém vzduchu, který je používán jako nejčastější oxidační činidlo při spalování. Do ovzduší je takto emitován oxid dusnatý (NO), který je další oxidací transformován na oxid dusičitý (NO₂). Množství dalších forem oxidů dusíku ve spalínách, jako oxid dusný (N₂O) nebo oxid dusičný (N₂O₅), lze zanedbat. Oxidy dusíku souhrnně značíme NO_x, jejich tvorbu ovlivňuje řada parametrů, např. s rostoucí teplotou v plameni roste množství NO_x. Dalšími faktory, které mají vliv na tvorbu NO_x, jsou: reakční doba, přebytek spalovacího vzduchu, druh paliva nebo konstrukční uspořádání topeniště příp. hořáku [10], [11].

2.1 Mechanismy vzniku

Při procesu spalování vzniká jako nejčastější zástupce oxidů dusíku oxid dusnatý (NO). Dle dosavadních znalostí rozlišujeme tři mechanismy jeho vzniku, podle kterých dále dělíme NO na termický, promptní a palivový. Obr. 2 představuje závislost tvorby NO_x na teplotě. Graf znázorňuje jednotlivé podíly NO_x podle typu vzniku a ukazuje, že čím je teplota při spalování vyšší, tím více oxidů dusíku vzniká.



Obr. 2: Závislost tvorby NO_x na teplotě (převzato z [12]).

2.1.1 Termický NO

Termický, neboli vysokoteplotní, oxid dusnatý vzniká při vysokých teplotách oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu. Vznik termických NO ovlivňuje hlavně koncentrace atomárního kyslíku vzniklého disociací O₂. Důležitými faktory jsou také doba reakce při dané teplotě, další nezbytnou podmínkou je teplota vyšší než 1200°C [10], [13].

Mechanismus vzniku termického NO závisí na daném prostředí a lze popsat rovnicemi (1) až (3):

- Při přebytku O_2 :

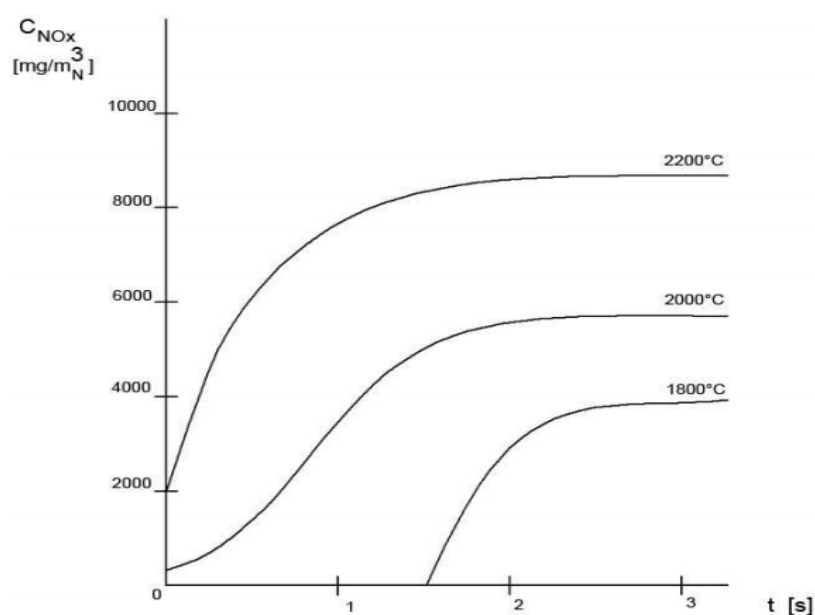
$$O + N_2 \rightarrow NO + N \quad (1)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (2)$$
- Při přebytku paliva:

$$N + OH \rightarrow NO + H \quad (3)$$

Tyto tři rovnice jsou označovány jako rozšířený modifikovaný Zeldovičův mechanismus. Rozšíření je realizováno třetí reakcí, která zohledňuje vliv hydroxylových radikálů.

Na obr. 3 je grafické znázornění závislosti tvorby termických NO na teplotě (T) a době reakce (t). Omezení vzniku termických NO lze dosáhnout snížením koncentrace O_2 v oblastech nejvyšších teplot, snížením teplotních špiček nebo zmenšením doby zdržení v oblastech nejvyšších teplot.



Obr. 3: Závislost tvorby termických NO (převzato z [13]).

2.1.2 Promptní NO

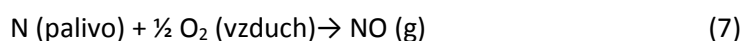
Promptní, neboli okamžitý, oxid dusnatý vzniká oxidací atmosférického molekulárního dusíku na okraji plamene bohatém na palivo. Dusík zde reaguje s uhlovodíkovými radikály a vzniklý produkt následně oxiduje na NO. Tento děj je závislý na přebytku spalovacího vzduchu a na teplotě spalování. Mechanismus vzniku promptních NO popsal Fenimore následujícími rovnicemi:



90 % promptních oxidů dusnatých je vytvořeno reakcí molekulárního dusíku s uhlovodíkovými radikály, nejčastěji se jedná o CH a CH₂. V celkovém množství NO_x vzniklých při spalování je možné podíl promptních NO zanedbat. Jedná se totiž o množství maximálně 10 % [14], [15]. Promptní NO vzniká ve větší míře až při teplotách vyšších než 2000°C, jak je uvedeno v [16], a těch je v průmyslových spalovnách dosaženo zřídka.

2.1.3 Palivový NO

Tento typ oxidu dusnatého vzniká v oblasti plamene, a to oxidací dusíku vázaného v palivu. Jeho vznik není přímý, důležité jsou meziprodukty HCN a NH₃, které jsou následnou oxidací přeměněny na NO [14], [17]. Proces vzniku lze popsat zjednodušeně následující reakcí:



Příkladem obvyklého obsahu dusíku v palivech může podle [16] být:

- Dusík obsažený v černém uhlí 0,2 – 3,5 % na hořlavinu
- Obsah dusíku v ropě 0,2 – 0,5 %
- N v zemním plynu bez zastoupení organického dusíku

Při spalování zemního plynu je tvorba palivového NO zcela nevýznamná. V případě kapalných a tuhých paliv, které obsahují značné množství vázaného dusíku, však podíl palivových NO_x dosahuje i více než 80 % [14], [16], [18]. Palivové NO vznikají snadněji než termické, to proto, že vazby N-H a N-C jsou významně slabší než trojnásobná vazba atomů v molekule dusíku, která musí být přerušena pro vznik termického NO [14].

2.1.4 Tvorba NO₂

Ve spalínách se kromě oxidu dusnatého vyskytuje také oxid dusičitý. Ten vzniká při nižších teplotách oxidací NO s volnými radikály kyslíku nebo s radikály peroxidovými. Výsledné množství takto vzniklého NO₂ se pohybuje v řádech procent. K další oxidaci může docházet ve volném ovzduší (ozonem) nebo v odtazích spalín (kyslíkem).

3 ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ OXIDŮ DUSÍKU VE SPALINÁCH

Metody, kterými lze odstranit oxidy dusíku ze spalin, existuje několik. Základní rozdělení vychází ze dvou zásadních opatření. Při zásahu do vlastního spalovacího procesu, jako jsou úprava technologie nebo konstrukční změny, hovoříme o primárních opatřeních. Pomocí nich dochází k potlačení samotné tvorby NO_x , oxidy dusíku vznikají při spalování v menší míře a jejich koncentrace ve spalinách je nižší. V případě, že vzniklé oxidy dusíku jsou odstraňovány ze spalin mimo spalovací komoru, se tato opatření nazývají sekundární.

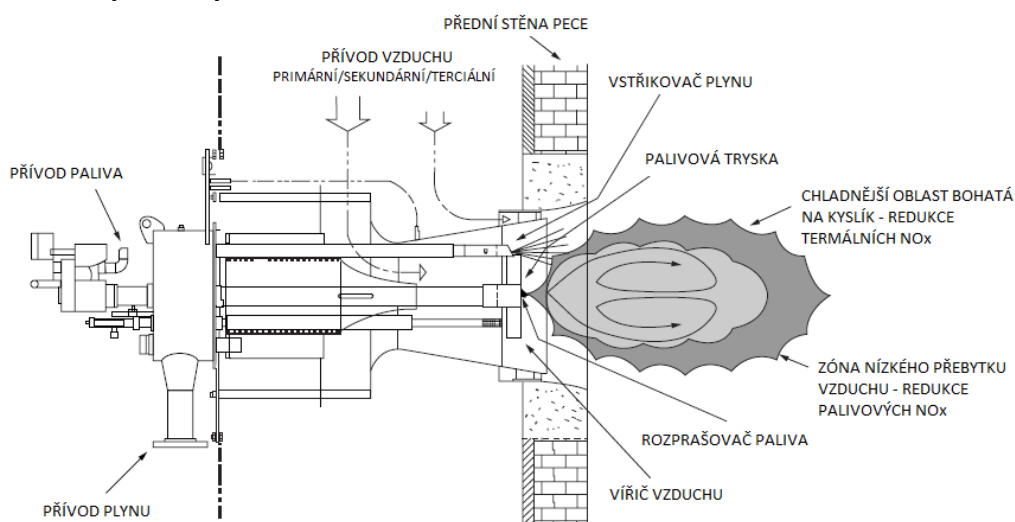
3.1 Primární redukční metody

Primární opatření ke snížení vzniku NO_x spočívají v úpravě spalovacího procesu. Jejich použití je ve srovnání se sekundárními opatřeními levné, měly by tak být zaváděny jako první [13]. Faktory, které ovlivňují tvorbu NO_x při spalování, jsou především teplota plamene a teplota uvnitř spalovací komory, koncentrace kyslíku v prostoru spalovací komory a doba zdržení hořící směsi v pásmu vysokých teplot. Cílem primárních metod je ovlivnění těchto faktorů a snížení tvorby oxidů dusíku při samotném spalování. Většina primárních metod je založena na snaze snížit teplotní špičky plamene a zmenšit v těchto teplotách pravděpodobnost reakce kyslíku s dusíkem. V následujícím textu budou přiblíženy základní způsoby vedoucí k potlačení tvorby NO_x , a to:

- vícestupňové spalování
- recirkulace spalin
- bezplamenné spalování

Jako další primární metody vedoucí ke snížení tvorby oxidů dusíku lze uvést nucený odtah spalin, tzv. „chlazení plamene“ (nástřikem vody, případně vodní páry), nebo provoz spalovacího procesu při optimálním přebytku spalovacího vzduchu [19]. Mezi metody „chlazení plamene“ je zahrnuta i recirkulace spalin.

3.1.1 Vícestupňové spalování

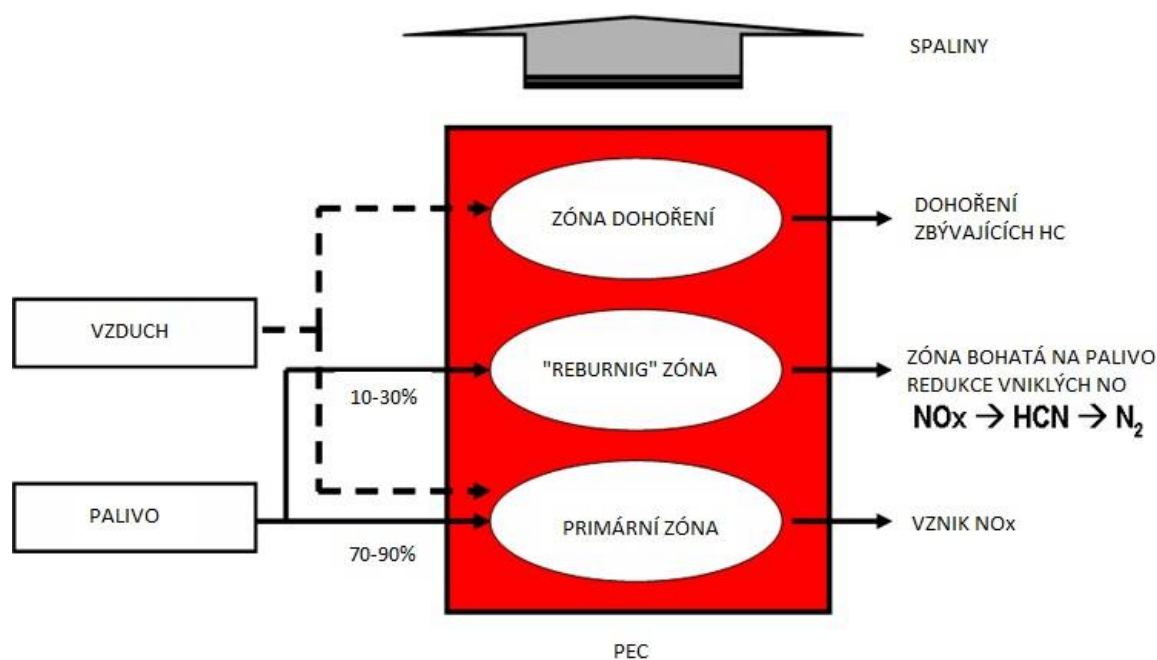


Obr. 4: Schéma vícestupňového spalování (upraveno podle [19]).

Princip vícestupňového spalování spočívá ve snížení teploty plamene. Snížení lze dosáhnout přivedením části paliva do primárního stupně, kde se vytvoří podstechiometrická oblast spalování. Zbytek paliva je přiveden do oblasti mimo jádro plamene, tj. mimo oblast teplotních špiček, kde dojde k dokončení spalování za snížených teplot. Stejně tak lze snížení teploty spalování realizovat postupným přívodem spalovacího vzduchu (znázorněno na obr. 4) nebo kombinací stupňovitého

přívodu paliva a vzduchu. Proti jednostupňovému spalování jsou výsledné hodnoty koncentrací NO_x o 20 až 50 % nižší [20], [21].

Dalším způsobem snížení koncentrace NO ve spalinách je metoda nazývaná „*reburning*“ (obr. 5). Uhlovodíkové palivo je nastřikováno do proudu spalin mimo hlavní oblast plamene. Tím je dosaženo vytvoření oblasti bohaté na uhlovodíkové radikály CH_n , které reagují s NO za vzniku HCN . Následuje redukce HCN na N_2 . Tento děj se odehrává ve třech zónách. V primární zóně je spalováno primární palivo s přebytkem vzduchu a vzniká oxid dusnatý. V „*reburning*“ zóně probíhá redukce vzniklých NO . Palivo nastřikované do této zóny může být stejné nebo jiné než palivo primární. Ve třetí zóně (tzv. zóna dohoření) pak dochází ke kompletnímu dohoření „*reburning*“ paliva. Pro tento účel je do této zóny přiváděn sekundární spalovací vzduch. V závislosti na parametrech spalování (např. palivo nebo velikost spalovací komory) lze dosáhnout snížení koncentrace NO ve spalinách o 30 až 70 % [20], [22].



Obr. 5: Schéma metody „reburning“ (upraveno podle [23]).

3.1.2 Recirkulace spalin

Recirkulace spalin patří mezi metody nazývané „chlazení plamene“, při kterých dochází ke snížení teploty reakční zóny plamene. Tato metoda pro snížení hodnot koncentrací emisí NO_x je podrobněji popsána v kapitole 4. Recirkulace spalin. Recirkulace navíc také snižuje parciální tlak kyslíku, který má za důsledek potlačení vzniku NO_x . Podle typu zpětného nasávání spalin lze rozlišit recirkulaci vnější a vnitřní. Při vnější recirkulaci jsou spaliny nasávány z odtahového systému a dále pak dopravovány spalínovým ventilátorem do sání hořáku nebo přímo do prostoru spalovací komory. Princip vnitřní recirkulace spočívá v přivádění spalin zpět do hořáku bez použití spalínového ventilátoru. Zpětný přívod spalin je zajištěn vhodnou konstrukcí hořáku. Podle [24] lze při recirkulačním poměru 32% dosáhnout snížení koncentrace NO_x až o 50%. Při vyšších recirkulačních poměrech dochází k nestabilitě a utržívání plamene. Těchto výsledků bylo dosaženo měřeními v laboratorních podmínkách.

Další způsoby, které mohou být využity k chlazení plamene, jsou např. vstřikování vody nebo vodní páry do plamene, použití většího přebytku spalovacího vzduchu. Nově jsou k ochlazení plamene používány kovové nebo keramické tyče, které jsou zasouvány do pásma maximálních teplot. Snížení teploty v plameni lze docílit také použitím nepředehřátého spalovacího vzduchu.

3.1.3 Bezplamenné spalování

Bezplamenné spalování je technologie, při které přehřátý spalovací vzduch dosahuje teploty až nad 1000°C, čímž je ve většině případů dosaženo samovznícení použitého paliva [14]. Snížená koncentrace kyslíku v přiváděném spalovacím vzduchu, která je udržována vnitřní recirkulací spalin, zaručuje omezení tvorby oxidů dusíku. Tato technologie přináší výhody, jako jsou vysoká termická účinnost procesu, energetická úspora, snížení emisí CO₂, NO_x a CO, nízká hlučnost spalování, rovnoměrné teplotní pole uvnitř spalovacího procesu a větší objem plamene, který je málo svítivý. V anglické terminologii lze bezplamenné spalování nalézt pod názvem „*flameless oxidation*“ (FLOX) [25] nebo „*High Temperature Air Combustion*“ (HiTAC) [14].

3.2 Sekundární redukční metody

Sekundární opatření spočívají v odstraňování již vzniklých oxidů dusíku ze spalin, použití těchto metod je zaváděno především kvůli přísnějším emisním limitům a u paliv s vysokou výhřevností, kde je při spalování dosahováno vysokých teplot [16]. Toto dodatečné čištění spalin je v porovnání s primárními opatřeními ekonomicky náročnější [14], [26]. Pro odstranění NO_x ze spalin jsou používány především následující metody:

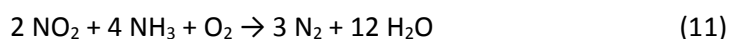
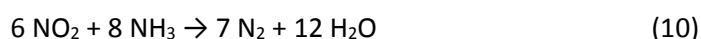
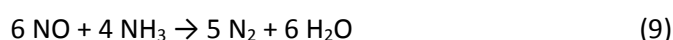
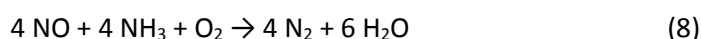
- selektivní katalytická redukce (SCR)
- selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Selektivní redukcí je nazýván soubor reakcí, které probíhají mezi amoniakem a oxidy dusíku při zvýšených teplotách. Katalytická redukce probíhá za přítomnosti katalyzátorů při teplotách 80 až 420°C [16], nekatalytická redukce je reakce probíhající za vysokých teplot (900 až 1050°C) bez účasti katalyzátorů.

3.2.1 Katalytické čištění spalin

Tato metoda zajišťuje odvod škodlivých látek ze spalin s účinností až 90% [3]. Princip katalytické redukce spočívá v nástřiku amoniaku do proudu spalin, ty jsou následně přivedeny do katalyzátorového reaktoru, kde se oxidy dusíku rozdělují na vodní páru a dusík běžně se vyskytující v atmosféře. Katalyzátorem používaným při této metodě čištění spalin jsou látky na bázi TiO₂ nebo V₂O₅.

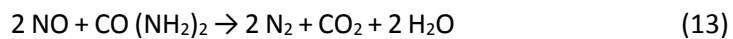
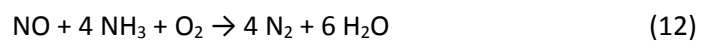
Chemismus procesu lze popsat těmito hlavními reakcemi:



3.2.2 Nekatalytické čištění spalin

Selektivní nekatalytické redukce spočívá ve vytvoření takových podmínek, aby vstříkovaná močovina nebo čpavek redukoval oxidy dusíky na elementární dusík. Tato reakce probíhá oproti katalytické redukcí za zvýšených teplot a bez přítomnosti katalyzátoru. Účinnost této metody na snížení koncentrace NO_x ve spalinách se pohybuje v rozmezí 40 až 60% [3].

Probíhající chemické reakce (12) a (13):

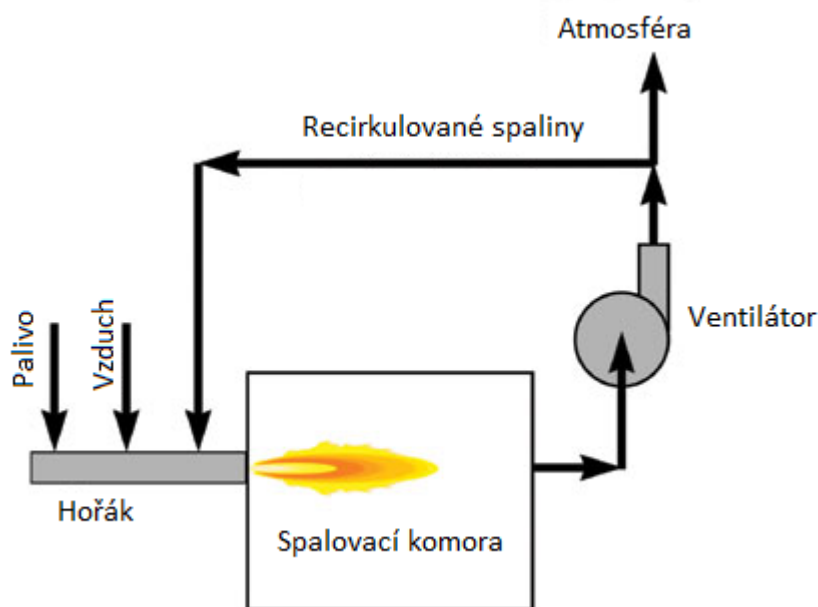


Je důležité dodržet správnou teplotu nástřiku amoniaku, při nízké teplotě je celý proces pomalý a dochází k unikání nezreagovaného amoniaku. Při vysokých teplotách dochází k samovolné oxidaci amoniaku nebo močoviny na oxidy dusíku.

4 RECIRKULACE SPALIN

Jedním z cílů této práce je zjistit jaký vliv má recirkulace spalin na vznik emisí NO_x . Použitý hořák je konstruovaný pro použití vnitřní recirkulace spalin, proto se metodu snižování hodnot NO_x ve spalinách pomocí recirkulace bude tato kapitola zabývat podrobněji. Jedním ze způsobů, jak lze snížit množství NO ve spalinách, je snížit teplotu plamene. Toho lze dosáhnout přivedením chladnějších spalin zpět do procesu hoření (do pece nebo do hořáku) [27]. Spaliny mohou být přivedeny zpět do hořáku buď přímo ze spalovací komory (tzv. recirkulace vnitřní), nebo z odtahového systému (tzv. recirkulace vnější). Mechanismus regulace vzniku emisí NO_x a účinek na proces spalování je v případě obou typů recirkulace stejný [28]. Princip vnější recirkulace je zobrazen na obr. 6.

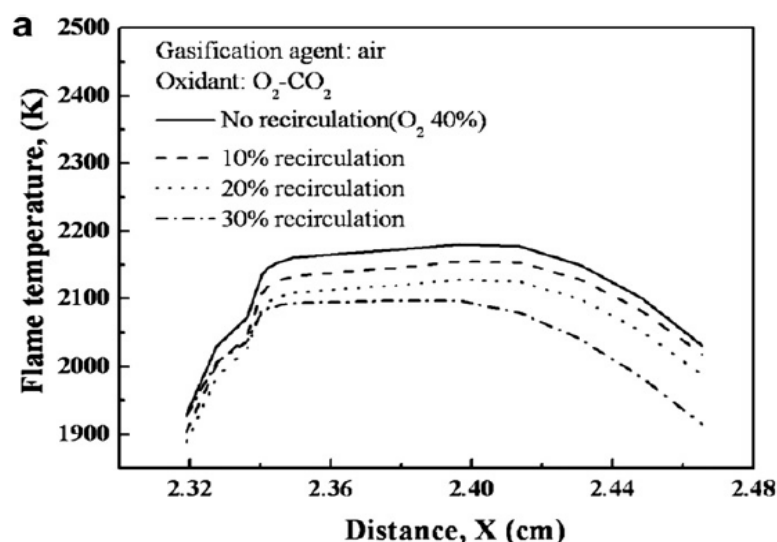
Dalším důvodem, proč se při použití recirkulace tvoří méně emisí NO_x , je nižší obsah kyslíku ve směsi, kterou vytvoří recirkulované spaliny spolu se spalovacím vzduchem. Podmínkou pro vznik oxidů dusíku je dostatečný přísun kyslíku, použití samotného spalovacího vzduchu splňuje tento předpoklad lépe, proto při recirkulaci spalin dochází k výslednému snížení obsahu NO_x .



Obr. 6: Schéma vnější recirkulace spalin (převzato z [29]).

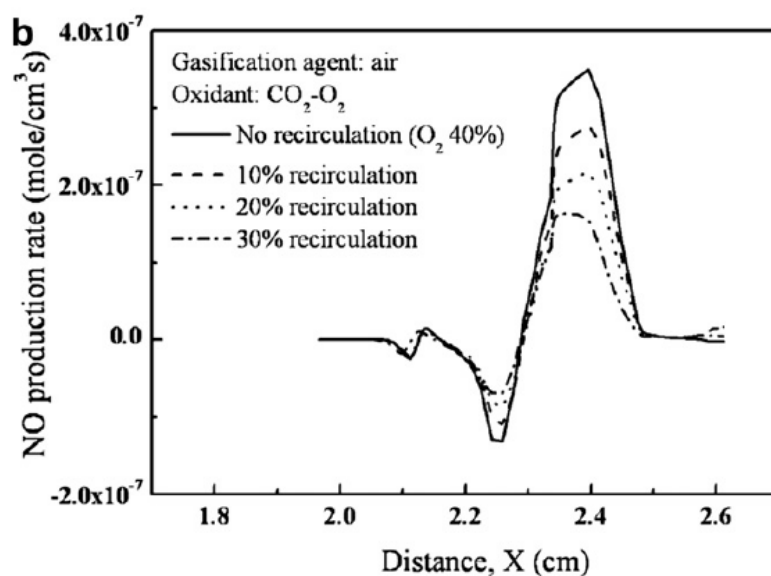
Podle [30] existují dvě možnosti, jak spaliny při vnější recirkulaci přivést do hořáku. Nejjednodušším způsobem je použít dmychadlo spalovacího vzduchu pro nasávání spalin ze zásobníku a před vstupem do hořáku je smíchat se spalovacím vzduchem. V tomto případě nejsou nutné žádné konstrukční úpravy hořáku. Druhou možností je použít pro spaliny samostatný ventilátor, který je potrubím přivede přímo na plamen. To ale obvykle vyžaduje modifikaci hořáku. Obě tyto metody se zdají být stejně účinné, i když některé typy hořáků mohou na jeden způsob reagovat lépe než na druhý. V případě vnitřní recirkulace je využíván vlastní tah jednotky [28]. Tento typ recirkulace je běžně užíván ve vertikálních pecích, které mají hořák namontovaný ke dnu směrem vzhůru. Srovnání vnější a vnitřní recirkulace při spalování zemního plynu se vzduchem jako okysličovadlem podle [31] ukazuje, že vnitřní (horká) recirkulace spalin může vést k vyššímu snížení emisí NO_x , než vnější recirkulace (za studena). Použití relativně chladných plamenů může mít za následek snížení stability plamene a vyšší emise CO .

Zpřísněním právních předpisů o omezení emisí znečišťujících látek ze spalovacích zařízení jsou výrobci nuceni k optimalizaci a vývoji takových spalovacích zařízení, aby bylo dosaženo minimální úrovně znečišťujících látek ve spalinách. V souvislosti s těmito požadavky je o metodu recirkulace spalin stále větší zájem.



Obr. 7: Vliv míry recirkulace na teplotu plamene (převzato z [32]).

Podle [32] platí, že čím větší je nárůst recirkulačního poměru, tím větší je pokles teploty v plameni. Obr. 7 znázorňuje změnu teploty v plameni v souvislosti s mírou recirkulace spalin při zplyňování. Recirkulace má vliv také na chemickou reakci, probíhající při hoření, snižuje celkovou reakční rychlost. Jedná se o velmi efektivní metodu pro snížení koncentrace NO_x ve spalinách, což je potvrzeno na obr. 8.



Obr. 8: Vliv míry recirkulace na tvorbu NO (převzato z [31]).

Pro praxi je žádoucí dosažení minimálních hodnot koncentrací NO_x při zachované stabilitě plamene. Výrazné snížení emisí oxidů dusíku bez významných vlivů na stabilitu plamene, celkovou účinnost spalování a na emise CO byly pozorovány v [31] a [33]. Stabilní spalování probíhá až do míry recirkulace cca 32%. Na základě experimentálních výsledků v [34] bylo zjištěno, že při výkonu 0,03 MW kyslíko-palivového spalování a poměrem recirkulace 40% je dosaženo úrovně emisí NO nižší než 30 ppm. Jedná se tak o snížení 93% oproti spalování bez využití recirkulace.

Použití recirkulace je vhodná technologie, jak snížit emise NO_x při spalování v kombinaci s předehřevem spalovacího vzduchu [28].

5 UZÁKONĚNÉ EMISNÍ LIMITY PRO ČESKOU REPUBLIKU

Ochranu životního prostředí lze chápat jako nauku, zabývající se přírodou a jejími složkami ve stavu změny navozené člověkem [35]. Přístup k řešení otázky ochrany životního prostředí je dán rozdělením do několika částí, které jsou vzájemně úzce propojeny - ovzduší, voda, organizmy, horniny, člověk. Politika Evropské unie se snaží o motivaci podniků k ekologizaci hospodářství, o zdravé a dobré životní podmínky obyvatel EU, svou politikou životního prostředí chrání přírodní bohatství Evropy [1]. K nejzávažnějším otázkám v diskutované oblasti patří rozhodně znečištění vody, ovzduší a působení chemických látek na lidské zdraví. Základ environmentální politiky Unie tvoří akční program EU pro životní prostředí (EAP). Česká republika jako členský stát EU musí zajistit provádění tohoto programu a dosažení prioritních cílů do roku 2020.

V souvislosti s ochranou životního prostředí a snížení rizik pro lidské zdraví, které souvisí se znečištěním ovzduší, je třeba ustanovit pravidla pro přípustnou úroveň znečištění a znečišťování ovzduší. Práva a povinnosti osob, zároveň také přípustné limity, definice zdrojů a látek znečišťování, posuzování a vyhodnocování úrovně znečištění v České republice stanovuje zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší [36]. Zdroje znečištění mohou být stacionární a mobilní, tato práce se zabývá spalováním v hořáku s vnitřní recirkulací spalin a stupňovitým přívodem paliva, proto v následujícím textu budou uvedeny informace týkající se pouze stacionárních zdrojů znečišťování.

Za stacionární zdroj je podle zákona považovaná ucelená technicky dále nedělitelná stacionární technická jednotka nebo činnost, která znečišťuje nebo by mohla znečišťovat. Nejedná se však o stacionární jednotky, které jsou používány pouze pro výzkum nebo vývoj nových výrobků či procesů. Stacionární zdroje jsou rozděleny podle oblasti použití daného zařízení v energetice či různých odvětvích zpracovatelského průmyslu, jako příklad stacionárního zdroje lze uvést spalování paliv v kotlích o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nad 5 MW nebo tavení v elektrické obloukové peci. Všechny stacionární zdroje podle Zákona č. 201/2012 Sb. jsou uvedeny v příloze A této práce.

Zákon uvádí přípustnou úroveň znečišťování, která je vymezena emisními limity, emisními stropy, technickými podmínkami provozu a přípustnou tmavostí kouře. Nejvýše přípustná množství znečišťujících látek vnášená do ovzduší právě ze stacionárního zdroje se nazývají emisní limity. Ty musí být splněny na každém komínovém průduchu nebo výduchu do ovzduší, lze je rozdělit do dvou skupin: první tvoří obecné emisní limity stanovené prováděcím právním předpisem pro znečišťující látky a jejich skupiny, druhou část tvoří specifické emisní limity stanovené prováděcím právním předpisem nebo v povolení podle § 11 daného zákona pro stacionární zdroj. Hodnoty nazývané emisní stropy doplňují emisní limity, stanovují se pro stacionární zdroj, skupinu stacionárních nebo mobilních zdrojů, provozovnu nebo vymezené území. Měření emisí provádí provozovatel stacionárního zdroje, přičemž zjišťování množství škodlivin vypouštěných do ovzduší může být v některých případech prováděno výpočtem. Zjišťují se emise znečišťujících látek a provozní parametry zařízení. Ověření správnosti výsledků je zajištěno jednorázovým měřením autorizovanou osobou; na plnění emisních limitů je dohlíženo Českou inspekcí životního prostředí.

V příloze č. 10 k zákonu č. 201/2012 Sb. jsou uvedeny minimální požadavky na spalovací stacionární zdroje o jmenovitém tepelném příkonu 300 kW a nižším, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění, pro účely uvádění výrobků na trh. Jednotlivé tabulky jsou rozděleny podle typu paliva na požadavky pro stacionární zdroj na pevná, kapalná a plynná paliva. Celá tato práce se zabývá spalováním plynu, proto zde budou uvedeny pouze požadavky pro zdroje na paliva plynná. Limitní emisní hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách, převzatých ze zákona O ochraně životního prostředí. V tab. 1 jsou mezní hodnoty emisí platné od roku 2014, vztahující se k suchým spalinám, teplotě 273,1 K, tlaku 101,325 kPa a k referenčnímu obsahu kyslíku 3 % v případě kotlů, 5 % v případě pístových spalovacích motorů a 15% v případě plynových turbín.

Druh spalovacího zdroje	Mezní hodnoty emisí	
	NO _x	CO
	[mg.m ⁻³]	
kotle	120	100
pístové spalovací motory	500	650
plynové turbíny	350	100

Tab. 1: Požadavky na spalovací stacionární zdroj na plynná paliva platné od 1. ledna 2014.

Od roku 2018 jsou uvedeny v platnost nové emisní limity, požadavky mezních hodnot pro stacionární zdroj jsou vztahovány k suchým spalinám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 kPa a k referenčnímu obsahu kyslíku 3%. Nové podmínky jsou zobrazeny v tab. 2.

Palivo	Jmenovitý tepelný příkon (kW)	Mezní hodnoty emisí	
		NO _x	CO
		[mg.m ⁻³]	
Plynné	≤ 300	65	80

Tab. 2: Požadavky na spalovací stacionární zdroj na plynná paliva platné od 1. ledna 2018.

Spolu s popsáním zákonem byla roku 2012 vydána Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Z předmětů úpravy vyhlášky 415 zde budou zdůrazněny především obecné emisní limity a specifické emisní limity, vyhláška navíc upravuje také způsob a podmínky zjišťování úrovně znečišťování měřením a výpočtem, vyhodnocování výsledků, požadavky na kvalitu paliv nebo náležitosti provozní evidence a další. Zde uvedené tabulky je možné najít v kapitole nazvané „Podmínky provozu pro spalovací stacionární zdroje“ ve zdroji [14]. Všechny následující údaje jsou vztaženy k celkovému jmenovitému tepelnému příkonu a na normální stavové podmínky. Ve vyhlášce jsou uvedeny emisní limity SO₂, NO_x, TZL, CO, tato práce se zabývá především znečištěním ve formě emisí NO_x, proto byly tabulky upraveny. V případě uvedení dvou hodnot pro jeden druh paliva je pro přesné vysvětlení nutno nahlédnout přímo do vyhlášky, která obsahuje dané vysvětlivky.

5.1 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 50 MW a vyšším.

Druh Paliva	Limity emisí NO _x [mg/m ³]		
	50-100 MW	>100-300 MW	>300 MW
Pevné palivo obecně	300	200	200
Biomasa	300	250	200
Rašelina	300	250	200
Kapalné palivo obecně	450	200	150
Zkapalněný plyn	200	200	200
Plynné palivo obecně	200	200	200
Zemní plyn	100	100	100
Koksárenský plyn	200	200	200
Vysokopecní plyn	200	200	200
Plyn ze zplyňování rafinérských zbytků	200	200	200

Tab. 3: Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje, pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, před 7. lednem 2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději 7. ledna 2014.

Druh Paliva	Limity emisí NO _x [mg/m ³]		
	50-100 MW	>100-300 MW	>300 MW
Pevné palivo obecně	300	200	150
	400		200
Biomasa	250	200	150
Rašelina	250	200	150
Kapalné palivo obecně	300	150	100
	50	50	50
Zkapalněný plyn	300	150	150
Plynné palivo obecně	100	100	100
	50	50	50
	75	75	75
Zemní plyn	100	100	100
	50	50	50
	75	75	75
Koksárenský plyn	100	100	100
Vysokopecní plyn	100	100	100
Plyn ze zplyňování rafinérských zbytků	100	100	100

Tab. 4: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje, pro něž byla podána kompletní žádost o povolení do provozu 7. ledna nebo později nebo byly uvedeny do provozu po 7. lednu 2014.

Druh Paliva	Limity emisí NO _x [mg/m ³]		
	50-100 MW	>100-300 MW	>300 MW
Pevné palivo obecně	600	600	600 500
Kapalné palivo obecně	450 300	450 300	400 300
Zkapalněný plyn	300	300	300 200
Plynné palivo obecně	200 300	200 300	200 300
Zemní plyn	200	200	200
Koksárenský plyn	300	300	200
Vysokopecní plyn	300	300	300 200
Plyn ze zplyňování rafinérských zbytků	300	300	200

Tabulka 5: Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2015 pro spalovací stacionární zdroje, kterým bylo vydáno první povolení provozu, nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, před 27. listopadem 2002 nebo pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu před tímto datem a byly uvedeny do provozu nejpozději 27. listopadu 2003.

Druh Paliva	Limity emisí NO _x [mg/m ³]		
	50-100 MW	>100-300 MW	>300 MW
Pevné palivo obecně	400	200	200
Biomasa	400	300	200
Rašelina	400	200	200
Kapalné palivo obecně	400 120	200 120	200 120
Zkapalněný plyn	200 50	200 50	200 50
Plynné palivo obecně	200 120	200 120	200 120
Zemní plyn	150 50	150 50	100 50
Koksárenský plyn	200 120	200 120	200 120
Vysokopecní plyn	200 120	200 120	200 120
Plyn ze zplyňování rafinérských zbytků	200 120	200 120	200 120

Tab. 6: Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2015 pro spalovací stacionární zdroje, kterým bylo vydáno první povolení provozu, nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, mezi 27. listopadem 2002 a 7. lednem 2013 nebo byly uvedeny do provozu mezi 27. listopadem 2003 a 7. lednem 2014

5.2 Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje o celkovém jmenovitém tepelném příkonu vyšším než 0,3 MW a nižším než 50 MW

Druh paliva	Limity emisí NO _x [mg/m ³]		
	>0,3-1 MW	>1-5 MW	>5-50 MW
Pevné palivo	600	500	500
Kapalné palivo	130	130 450	130 450
Plynné palivo a zkapalněný plyn	100	100	100

Tab. 7: Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné od 1. ledna 2018.

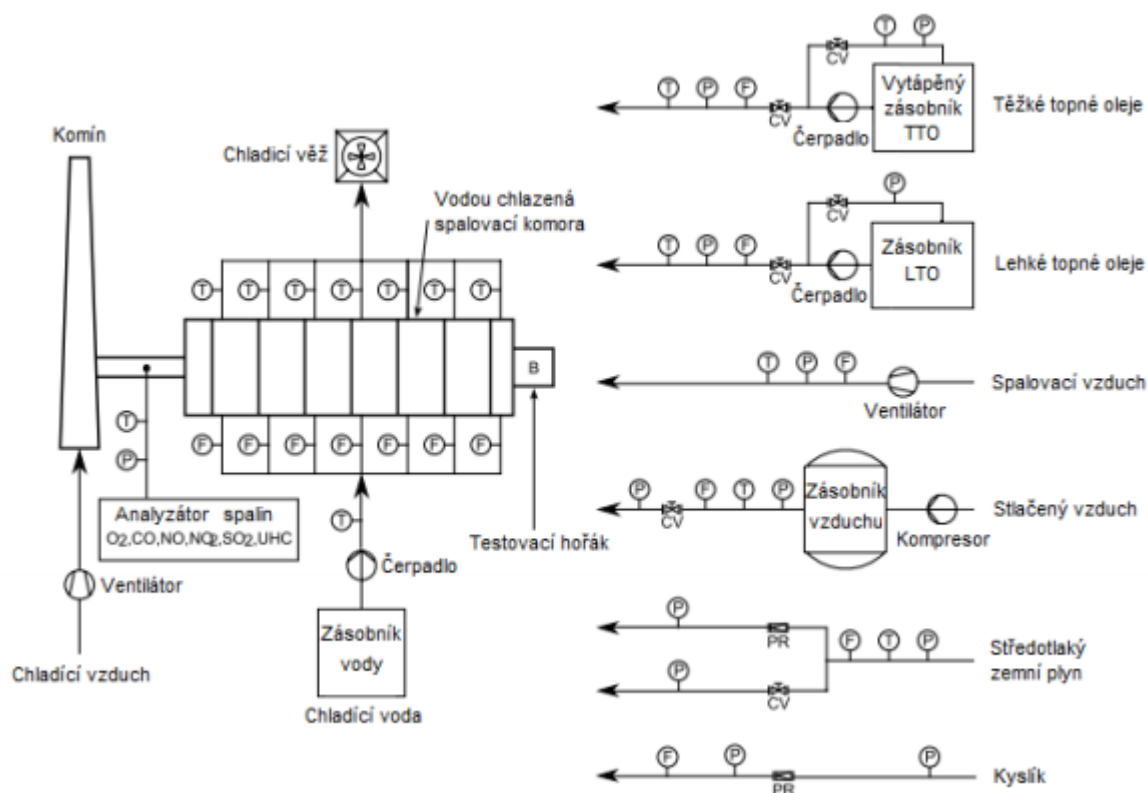
Druh paliva	Limity emisí NO _x [mg/m ³]		
	>0,3-1 MW	>1-5 MW	>5-50 MW
Pevné palivo	650 1100	650 1100	650 500 1100
Paliva dle § 15 odst. 5	650	650	650
Kapalné palivo	500	500	450
Plynné palivo a zkapalněný plyn	200 300	200 300	200 300

Tab. 8: Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné do 31. prosince 2017.

6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

6.1 Experimentální zařízení

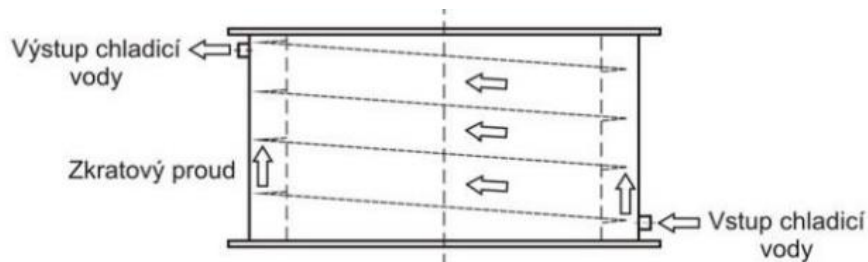
Celá experimentální část byla provedena na zkušebně hořáků Ústavu procesního a ekologického inženýrství (ÚPEI) FSI VUT v Brně. Schéma zkušebny je zobrazeno na obr. 9. Technologie zařízení umožňuje instalaci hořáků na plynná a kapalná paliva s maximálním výkonem 1,8 MW [37].



Obr. 9: Schéma zkušebny hořáků UPEI (převzato z [37]).

6.1.1 Zkušebna hořáků

Stěžejním zařízením je horizontálně umístěná dvouplášťová spalovací komora s proměnlivou délkou 2 až 4 m a vnitřním průměrem 1 m (obr. 11). Čela komory jsou izolována vysokoteplotní vyzdívkou o tloušťce 100 mm. Chlazení pláště komory je zajištěno vodou. Cirkulující chladicí voda je čerpána ze zásobníku, dále prochází chladičím systémem po obvodu spalovací komory. Zde ohřátá voda je vyvedena do chladičí věže, kde dojde k jejímu opětovnému ochlazení, následně je svedena opět do zásobníku. Aby nedocházelo k nerovnoměrnému odvodu tepla a bylo dosaženo usměrnění toku chladicí vody a rovnoměrného obtékání pláště komory, byla použita šroubovice pro vedení vody po povrchu vnitřního pláště. Šroubovice je umístěna v meziplášťovém prostoru spalovací komory, napevno přivařena k vnitřnímu plášti. U vnějšího pláště tak vznikla štěrbina, kterou proudí tzv. zkratové proudy. Celý prostor dvou plášťů je rozdělen do sedmi sekcí s délkou 0,5 m, poslední z nich má délku 1 m. Je tak docíleno lepší cirkulace vody a sníženo riziko lokálního varu. Schéma šroubovice v jednotlivých sekcích je zachyceno na obr. 10. V každé části pláště jsou umístěny senzory tepla a průtoku vody, to umožňuje vyhodnocení přenosu tepla do stěny spalovací komory po délce plamene. Plamen hořáku je možné pozorovat osmi inspekčními otvory, které se nacházejí po obvodu spalovací komory, jsou umístěny podélně ve vzdálenosti 0,5 m od sebe. Další přínos těchto otvorů je umožnění instalace přídatné měřicí techniky, jako jsou termočlánky, radiační sondy aj.



Obr. 10: Zobrazení šroubovice v jedné sekci (převzato z [37]).

Ve spodní části komína je umístěn ejektor, který udržuje ve spalovací komoře podtlak, je možné dosáhnout až -600 Pa. Do ejektoru je vysokotlakým ventilátorem přiváděn vzduch sloužící jako hnací médium. Další funkcí ejektoru je chlazení spalin odcházejících ze spalovací komory. Ve spalovací komoře je možný maximální přetlak 800 Pa.

Maximální výkon ventilátoru spalovacího vzduchu je $2500 \text{ m}_N^3/\text{h}$ při přetlaku 7 kPa. Spalovací vzduch je k hořáku přiváděn vzduchotechnickým potrubím o čtvercovém průřezu. Na potrubí jsou umístěny snímače tlaku, teploty a průtoku. Současná technologie neumožňuje přehřívání spalovacího vzduchu, napojení potrubí přímo na hořák je řešeno přírubami a přechodovým kusem.

Používaným palivem je zde zemní plyn, do zkušebny je přiváděn $250 \text{ m}_N^3/\text{h}$ středotlakého zemního plynu o přetlaku 100 kPa. Přívod plynu je řízen regulačním ventilem, spotřeba měřena plynoměrem, který rovněž slouží pro výpočet a nastavení hořáku. Ve zkušebně lze rovněž provádět zkoušky hořáků na lehké a těžké topné oleje.

Systém pro sběr dat, kterým je zkušebna hořáků vybavena, umožňuje automatický sběr dat v několika možných časových intervalech a také zápis dat na povel operátora. Systém je schopen zaznamenávat a ukládat následující veličiny: 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 řídicí jednotkou dopočítané hodnoty pak lze odečíst i z ovládacího panelu.



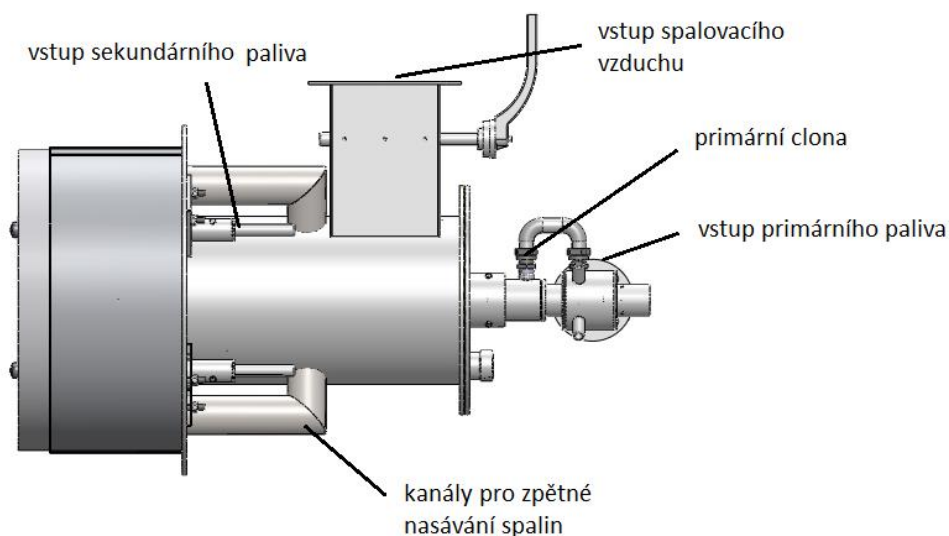
Obr. 11: Fotografie zkušebny hořáků UPEI.

Zkušebna je vybavena také bezpečnostním systémem, jehož úkolem je zajistit bezpečný a spolehlivý chod zkušebního zařízení. Součástí systému je kromě informačních čidel také zabezpečovací souprava určená k zapalování a ionizačnímu hlídání plamene plynového hořáku. Soustavu tvoří tzv. jednoelektrodový systém, který slouží k zapalování i hlídání plamene. V případě, že dojde k utržení nebo vzdálení se plamene od elektrody, dojde k zániku ionizovaného prostředí a relé hlídače plamene se rozezne.

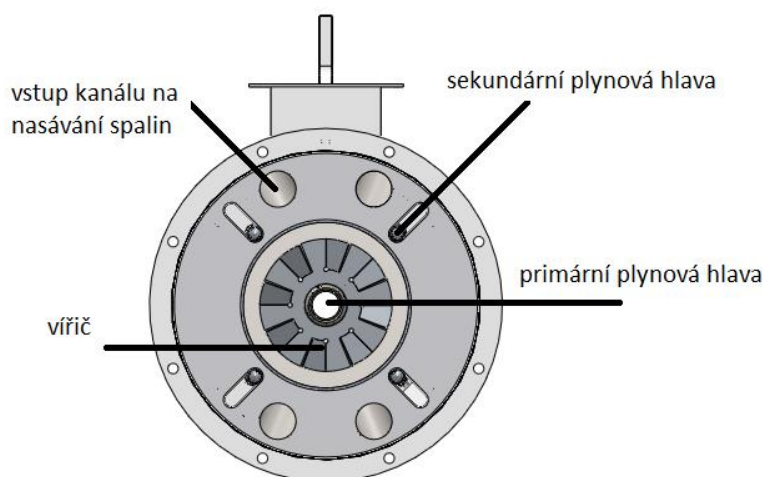
Analýza spalín je prováděna v analyzačním boxu Testo 350-XL, který je vybaven elektrochemickými čidly pro stanovení koncentrace kyslíku (O_2), oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO_2), oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO_2). Spaliny jsou před vstupem do analyzátoru zbaveny vody. Sonda pro odběr spalín je umístěna na kouřovodu spolu s čidlem pro měření teploty spalín.

6.1.2 Vlastní hořák

Pro experiment je využit plynový hořák s maximálním tepelným příkonem 1500 kW. Jedná se o nízkoemisní hořák využívající stupňovitý přívod paliva a vnitřní recirkulaci spalín. Vnitřní průměr hořákového kamene je 300 mm a vnější průměr hořákového kamene je 600 mm [10]. Do konstrukce hořáku bylo nově zakomponováno zařízení pro nasávání spalín ze spalovacího prostoru před vířič do těla hořáku. Změnou geometrie zařízení, které je umístěno ve vzduchovém kanálu hořáku, lze regulovat množství nasávaných spalín. Pro účel experimentu byly použity dvě geometrie (v testech označovány jako geometrie A, geometrie B). Celý hořák je zobrazen na obr. 12. Obr. 13 ukazuje čelní pohled hořáku s vířičem a polohovatelnými sekundárními tryskami.



Obr. 12: Model hořáku s dvoustupňovým přívodem paliva a vnitřní recirkulací spalín.



Obr. 13: Čelní pohled hořáku.

Přívod plynu se skládá z šestnácti primárních trysek a osmi sekundárních trysek. Primární trysky jsou vyvrtány v primární tryskové hlavě a jsou uspořádány ve dvou soustředných kruzích. Jedná se o čtyři trysky s průměrem 2,3 mm v první sadě a dvanáct trysek se stejným průměrem ve druhé sadě.

Maximální tepelný příkon může být regulován pomocí škrcení o různých průměrech, které lze umístit před vstup primárního paliva do hořáku. Během zkoušek byl poměr primární/celkový průtok paliva regulován clonami o různých průměrech. První použitá clona s průměrem 7,9 mm odpovídá 46,4 % primárního paliva. Při výměně clony za průměr 4 mm je tok primárního stupně roven 18,2 % a se clonou o průměru 6 mm je to 33,3 % z celkového množství spalovaného zemního plynu.

Sekundární přívod plynu je zajištěn čtyřmi tryskami. V experimentu byly použity dva typy sekundárních hlav trysek. V prvním případě byl úhel sklonu vrtání hlavy 50°, druhý typ hlavy má úhel vrtání 20°. V obou případech byly do každé hlavy vyvrtány dva otvory s průměrem 3 mm. Hořák je konstruován tak, že je možná změna pozice sekundárních hlav vůči ose hořáku v tangenciálním a radiálním směru. V referenční tangenciální poloze jsou hlavy orientovány přímo do osy hořáku. Orientace mohou být změněny jak ve směru hodinových ručiček (tj. ve směru vířivého proudění spalovacího vzduchu - pozitivní úhel) a proti směru hodinových ručiček (tj. záporný úhel). V referenční radiální vzdálenosti je vzdálenost hlav sekundárních trysek od osy hořáku 180 mm a může být prodloužena až o 50 mm. Během testů byl použit režim stupňovitého spalování a sekundární hlavy byly natáčeny v rozsahu -60° až +60°, jejich radiální vzdálenost byla nastavena na maximum, tj. 230 mm od osy hořáku.

Hořák je vybaven tzv. poutačem plamene, který má tvar vířivého generátoru, tzv. víříč. Ten sestává z osmi šikmých lopatek a je připevněn ke vzduchovému kanálu hořáku. Při spalovacích zkouškách byl použit víříč s průměrem 280 mm a roztečí úhlu lopatek 45°. Zapalování plamene se provádí hořákem s tepelným příkonem 18 kW.

6.2 Plán zkoušek

Hlavním cílem celého experimentu bylo zjistit, jaký vliv má vnitřní recirkulace spalín, podíl primárního paliva, geometrie zařízení umístěného ve vzduchovém kanálu hořáku, přebytek spalovacího vzduchu, úhel sklonu sekundárních trysek a úhel jejich natočení na hlavní parametry spalování. V rámci spalovacích zkoušek byla snaha změřit co nejvíce možných kombinací s různými proměnami charakteristických veličin. Z důvodu časové náročnosti kompletního měření všech kombinací byly některé parametry zafixovány, a to výkon hořáku, geometrie víříče, beze změny axiální polohy byly ponechány sekundární plynové trysky. Hodnoty neproměnných veličin jsou uvedeny v tab. 9.

Při měření byly použity dva různé typy geometrie zařízení umístěném v hořáku pro regulaci toku nasávaných spalín. V kombinaci s první geometrií (geometrie A) byly vystřídány tři clony, pomocí kterých lze změnit podíl primárního paliva. Průměry těchto použitých clon byly 7,9 mm, 4 mm a 6 mm. S každou výměnou clony je provedeno dvacet pět měření, kdy dochází ke změnám ostatních proměnných parametrů. V případě druhé geometrie (geometrie B) měření proběhlo pouze s třetí clonou (otvor s průměrem 6 mm). Spalovací zkoušky proběhly pro dva režimy: (1) bez přívodu sekundárního paliva, kdy byl výkon hořáku 860 kW odpovídající maximálnímu výkonu primárního stupně, (2) s použitím sekundárního stupně paliva s výkonem hořáku 1000 kW. Dalšími proměnnými je použití dvou typů sekundárních trysek a jejich natočení, první natočení -60° je následováno změnou vždy po 30° až do $+60^\circ$. Přebytek spalovacího vzduchu je poslední parametr, který bude při tomto experimentu měněn, a to ve čtyřech krocích po jedné desetíně v rozmezí 1,1 až 1,5, což odpovídá koncentraci kyslíku v suchých spalínách 2,1 % až 9,3 %.

Tab. 9 až 11 jsou přehledným seznamem všech parametrů – konstantních, proměnných i měřených.

Konstantní parametry		
Část zařízení	Veličina	Hodnota
Hořák	Výkon (s použitím sekundárního paliva)	P = 1000kW
	Výkon (bez použití sekundárního paliva)	P = 860 kW
Víříč	Průměr	D = 280mm
	Natočení lopatek	$\Theta = 45^\circ$
Sekundární plynové trysky	Geometrie	
	Radiální vzdálenost	Lr = 232mm
	Axiální vzdálenost	La = 0mm

Tab. 9: Konstantní parametry.

Měněné parametry			
Proměnné	Měněno	Rozmezí	Krok změny
Geometrie zařízení pro recirkulaci spalín	2 typy		
Podíl primárního paliva: (realizace clonou)	3 typy	7,9 mm 4 mm 6 mm	
Natočení sekundárních trysek		-60° až $+60^\circ$	po 30°
Přebytek spalovacího vzduchu		1,1 až 1,7	po 0,2

Tab. 10: Měněné parametry.

Měřené parametry		
Veličina		Jednotka
Koncentrace	NO	ppm
	NO ₂	ppm
	CO	ppm
	O ₂	%
Teplota spalin	spalin	°C
	spalovacího vzduchu	°C
	paliva	°C
Tlak	spalovacího vzduchu	kPa
	paliva	kPa
Průtok	spalovacího vzduchu	m ³ /hod
	paliva	m ³ /hod

Tabulka 11: Měřené parametry.

Cílem práce bylo zjistit vliv vnitřní recirkulace v kombinaci se stupňovitým přívodem paliva na charakteristické parametry spalování. Tyto parametry zahrnovaly koncentrace NO, NO₂, CO a O₂ ve spalinách, teplotu spalin, délku, průměr stabilitu a barvu plamene, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory a tepelné toky do stěny sekci spalovací komory.

Celý experiment byl rozdělen do tří základních částí. V testu A byly měřeny koncentrace NO a NO₂, ze kterých byla následně dopočítána hodnota koncentrace NO_x. Výpočet koncentrace NO_x je vysvětlen v kapitole 6.2.1. Dále probíhal záznam koncentrace CO, teploty spalin a stability, průměru a délky plamene. Kompletní záznam měření je zapsán v měřících listech, které jsou k nalezení v příloze B této práce. V testu B byly měřeny tepelné toky do stěny sekci spalovací komory. Tento test byl proveden jen pro vybraná nastavení, byly použity typy geometrie A i B, v kombinaci s druhým typem trysek (sklon hlavy 20°) a šestimilimetrovou clonou. Pro porovnání důležitosti vícestupňového spalování byly použity oba geometrie také pouze s přívodem primárního paliva (bez přívodu sekundárního paliva). V posledním testu, test C, byly měřeny teploty v horizontální rovině symetrie spalovací komory pomocí vodou chlazených termočlánků typu R. Nastavení proměnných parametrů ve třetím testu bylo stejné jako při testu B.

6.2.1 Stanovení emisních koncentrací NO_x ve spalinách

- Přepočítání z ppm na mg/m³

$$M_m = \frac{M}{V_m}, \quad (14)$$

M_m ... měrná molární hmotnost [kg/m³]

M ... molární hmotnost [kg/kmol]

V_m ... molární objem [m³/kmol]

Pro NO a NO₂ platí:

$$1 \text{ ppm NO} = \frac{14,01 + 16}{22,41} = 1,34 \text{ mg/m}^3 \quad (15)$$

$$1 \text{ ppm NO}_2 = \frac{14,01 + 2 * 16}{22,41} = 2,05 \text{ mg/m}^3 \quad (16)$$

- Pro výpočet NO_x je nutné provést nejprve přepočítání NO na ekvivalentní složku NO_2 podle rovnice (17):

$$[\text{NO}_2] \text{ mg/m}^3 = \frac{[\text{NO}] \text{ mg}}{\text{m}^3} * \frac{M_{\text{NO}_2}}{M_{\text{NO}}} = 1,533 * [\text{NO}] \text{ mg/m}^3 \quad (17)$$

Výsledná hodnota NO_x potom vznikne jako součet složky NO_2 a ekvivalentní složky NO_2 .

- Pro porovnání emisních koncentrací při různém přebytku vzduchu je nutný přepočítání koncentrace na referenční přebytek vzduchu. Při spalování plyných paliv se jako referenční stav uvádí 3 % kyslíku v suchých spalínách [39].

$$[C]_{ref} = [C]_{měř} * \frac{20,9 - [O_2]_{ref}}{20,9 - [O_2]_{měř}} \quad (18)$$

$[C]_{ref}$...hodnota referenční koncentrace [%]

$[C]_{měř}$...hodnota měřené koncentrace [%]

6.3 Spalovací zkoušky

Měření na zkušební hořáku na ÚPEI bylo rozděleno do čtyř pracovních dní. Postup byl zvolen takový, aby nedocházelo ke zbytečně velkému množství zhasínání hořáku. To bylo nutné např. u výměny trysek nebo při změně typu zařízení uvnitř hořáku. Časové úspory bylo dosaženo také proto, že bylo zvoleno takové pořadí jednotlivých nastavení, aby se následující odlišovalo v co nejmenším množství parametrů od předchozího. Před začátkem zápisu dat bylo nutné počkat na ustálení výstupní teploty spalín.

Matice měření, které jsou zobrazeny v tab. 12 až 17, ukazují, jakým způsobem probíhaly zkoušky v testu A. V kombinaci s první geometrií (A) byly použity trysky pro přívod sekundárního paliva se sklonem hlavy 50° . V nastavení s těmito tryskami byly vyměněny dvě clony. V případě, kdy byla použita clona s průměrem otvoru 4 mm a natočení sekundárních trysek 0° , nebylo možné přebytek spalovacího vzduchu navýšit na 1,7, protože se plamen začínal chovat nestabilně. Aby nedošlo k jeho utržení, bylo toto navýšení vynecháno.

přebytek spalovacího vzduchu		1,1	1,3	1,5	1,7
nastavení sekundárních trysek	-60°	•	•	•	•
	-30°	•	•	•	•
	0°	•	•	•	•
	$+30^\circ$	•	•	•	•
	$+60^\circ$	•	•	•	•

Tab. 12: Matice měření pro nastavení – geometrie A, trysky se sklonem hlavy 50° a clona s otvorem o průměru 7,9 mm.

přebytek spalovacího vzduchu		1,1	1,3	1,5	1,7
nastavení sekundárních trysek	-60°	•	•	•	•
	-30°	•	•	•	•
	0°	•	•	•	–
	$+30^\circ$	•	•	•	•
	$+60^\circ$	•	•	•	•

Tab. 13: Matice měření pro nastavení – geometrie A, trysky se sklonem hlavy 50° a clona s otvorem o průměru 4 mm.

V dalším kroku experimentu byly data odečítána při nastavení s geometrií A, avšak bez přívodu sekundárního paliva. Po výměně geometrie bylo toto nastavení opakováno i se změnou geometrií (B).

přebytek spalovacího vzduchu		1,1	1,3	1,5	1,7
bez sekundárních trysek	-60°	–	–	–	–
	-30°	–	–	–	–
	0°	•	•	•	•
	+30°	–	–	–	–
	+60°	–	–	–	–

Tab. 14: Matice měření pro nastavení geometrie A i B, bez použití sekundárního paliva a bez clony.

přebytek spalovacího vzduchu		1,1	1,3	1,5	1,7
nastavení sekundárních trysek	-60°	–	–	–	–
	-30°	–	–	–	–
	0°	–	–	–	–
	+30°	•	•	•	–
	+60°	–	–	–	–

Tab. 15: Matice měření pro nastavení – modifikace geometrie A, sekundární trysky se sklonem 20° a clona 6 mm.

Typ sekundárních trysek také ovlivňuje tvorbu složení spalín i charakter chování plamene. Další zkoušky probíhaly s tryskami, jejichž sklon hlavy je 20°. V kombinaci s těmito tryskami byla nejprve použita clona s průměrem 4 mm. Toto nastavení se však ukázalo jako nevhodné. Protože při poměru přebytku spalovacího vzduchu vyšším než 1,1 se plamen choval nestabilně. Z tohoto důvodu byla clona vyměněna za třetí typ clony, a to s průměrem otvoru 6 mm.

Porovnání vlivu a účinnosti typu geometrie na hodnoty koncentrací NO_x ve spalínách, tvar a charakter plamene byly zjišťovány při následujícím nastavení v případě každé z geometrie: trysky pro přívod sekundárního paliva se sklonem hlavy 20°, clona s průměrem 6 mm. Při použití geometrie A, natočení trysek o 0° a poměru přebytku spalovacího vzduchu vyšším než 1,5 docházelo k nestabilnímu chování plamene. Z tohoto důvodu nebylo zvyšováno na přebytek 1,7 pro kompletnost měření. V případě geometrie B docházelo k pulzaci plamene při poměru přebytku spalovacího vzduchu větším než 1,5 u všech použitých natočení.

přebytek spalovacího vzduchu		1,1	1,3	1,5	1,7
nastavení sekundárních trysek	-60°	–	–	–	–
	-30°	•	•	•	•
	0°	•	•	•	–
	+30°	•	•	•	•
	+60°	–	–	–	–

Tab. 16: Matice měření pro nastavení – geometrie A, sekundární trysky se sklonem 20° a clona 6 mm.

přebytek spalovacího vzduchu		1,1	1,3	1,5	1,7
nastavení sekundárních trysek	-60°	–	–	–	–
	-30°	•	•	•	–
	0°	•	•	•	–
	+30°	•	•	•	–
	+60°	–	–	–	–

Tab. 17: Matice měření pro nastavení – geometrie B, sekundární trysky se sklonem 20° a clona 6 mm.

6.4 Množství recirkulovaných spalín

V rámci práce bylo potřeba zjistit jaký je poměr mezi nasávanými a vytvořenými spalínami a jaké množství spalín je schopný hořák nasát s použitím zařízení pro recirkulaci spalín (geometrie A a geometrie B). Zjišťován byl také účinek poměru spalovacího vzduchu právě na množství zpětně nasávaných spalín. Měření průtoku spalín a jejich teploty probíhalo v jednom z kanálů, sloužícím k nasávání recirkulovaných spalín a jejich přívodu zpět do hořáku. Vhodnou metodou zjištění průtoku spalín je měření rychlostní sondou a následný výpočet [40], v případě těchto spalovacích zkoušek byla použita Prandtlůva trubice typu „L“ a pro odečet tlaku byl použit diferenční manometr se šikmým ramenem. Byly stanoveny tři měřící body v průřezu kanálu a v každém z bodů byl odečten statický tlak, dynamický tlak, který je označován jako tlak diferenční Δp , a teplota proudícího plynu. Pro následující výpočet jsou používány průměrné hodnoty naměřených veličin.

- Vztah pro průměrnou rychlost spalin v průřezu kanálu je:

$$w = K * C * \sqrt{\frac{T * \Delta p}{p * M}} \quad (19)$$

- w ... Průměrná rychlost spalin [m/s]
 K ... Koeficient Prandtlovy trubice (kalibrační faktor) [-]
 C ... Konstanta, $C=129$ [m.kg^{1/2}.kmol^{-1/2}.K^{-1/2}.s⁻¹]
 T ... Průměrná teplota plynu [K]
 Δp ... Průměrná hodnota diferenčního tlaku [kPa]
 p ... Absolutní statický tlak plynu [kPa], kde $p = p_{atm} + p_s$
 p_{atm} ... Atmosférický tlak [kPa]
 p_s ... Statický tlak [kPa]

- Průtok plynu pak lze vypočítat ze vztahu:

$$V = w * A * 3600 \quad (20)$$

- V ... Průtok plynu za podmínek měření [m³/hod]
 A ... Plocha průřezu potrubí [m²]

- Pro snadnější porovnání průtoků při jednotlivých nastaveních byl použit vztah pro přepočet průtoku na normální podmínky:

$$V' = V * \frac{273,15}{T} * \frac{p}{101,325} * 3600 \quad (21)$$

- V' ... Průtok vlhkých spalin za n. p. ($T=273,15$ K; $p=101,325$ kPa) [m_N³/hod]

Bylo předpokládáno, že rychlost proudění je ve všech čtyřech kanálech stejná a je tedy možno celkový průtok vypočítat jako čtyřnásobek průtoku zjištěného v jednom kanálu. Rozdílnost množství proudících spalin je pro názornost zobrazena na obr. 14.

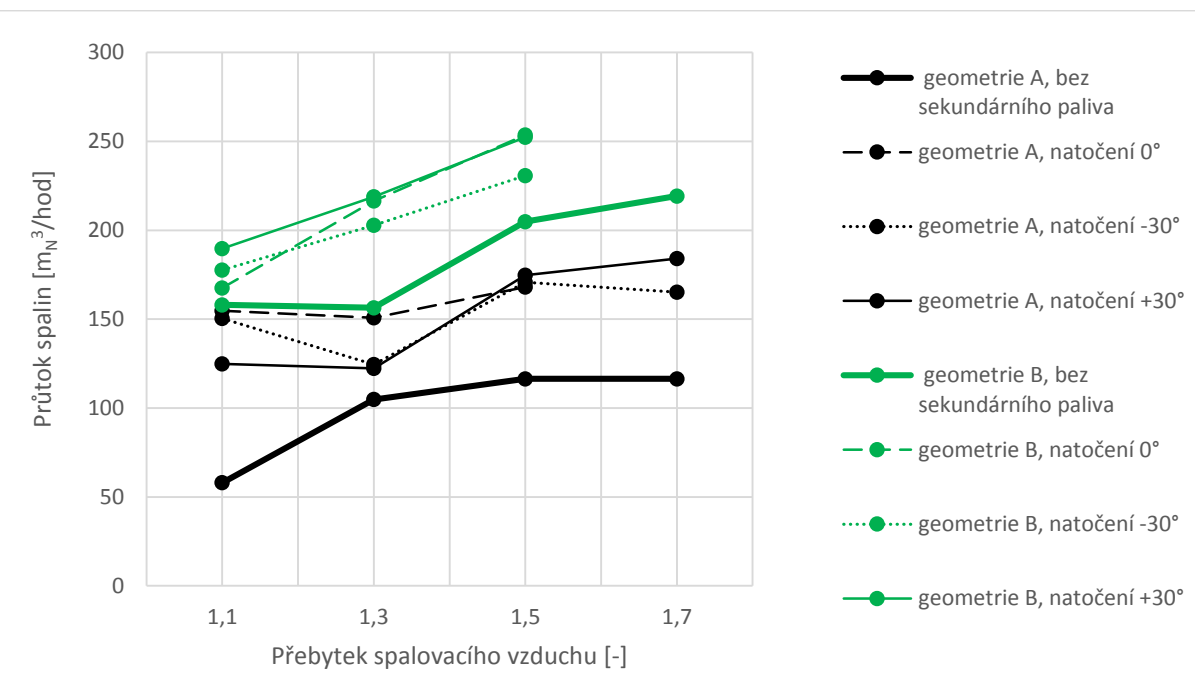
Z bilančních spalovacích rovnic byla vypočtena teoretická tvorba spalin pro jednotlivé používané přebytky vzduchu (viz tab. 18).

Přebytek spal. Vzduchu [-]	Teoretická tvorba spalin pro výkon 1000 kW[m _N ³ /hod]	Teoretická tvorba spalin pro výkon 860 kW[m _N ³ /hod]
1,1	1356	1179
1,3	1548	1346
1,5	1740	1514
1,7	1932	1681

Tab. 18: Teoretická tvorba spalin při výkonu hořáku 1000 kW a 860 kW.

Porovnáním množství teoreticky vytvořených a recirkulovaných spalin bylo zjištěno, že přebytek spalovacího vzduchu nemá zásadní vliv na zvyšování/snižování recirkulačního poměru. Podle naměřených dat nemá velký vliv na recirkulační poměr spalin ani použití sekundárního přívodu paliva. Jediným prvkem, který dokáže zvýšit poměr zpětně nasávaných spalin je zařízení, umístěné ve vzduchovém kanálu. Rozdíl geometrie B oproti geometrii A ukazuje rovnoměrné zvýšení množství recirkulovaných spalin přibližně o 6%. Jako konkrétní příklady, které ukazují rozdíl množství zpětně nasávaných spalin při použití obou geometrií, byly vybrány pro nastavení: clona redukcující podíl

primárního paliva (otvor 6 mm), trysky sekundárního paliva 2 (sklon hlavy 20°), jejich natočení +30° a druhý případ – bez použití sekundárního paliva (tab. 19 a 20).



Obr. 14: Celkový průtok recirkulovaných spalin nasávacími kanály (za normálních podmínek).

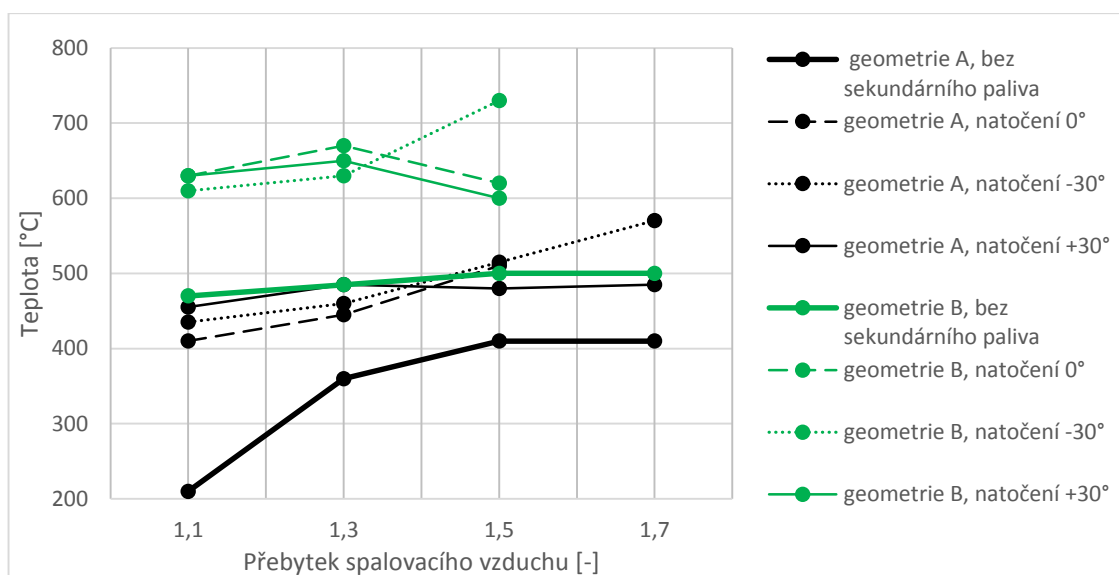
přebytek spal. vzduchu	Geometrie A		Geometrie B	
	V_c [m_N^3/hod]	r [%]	V_c [m_N^3/hod]	r [%]
1,1	112,4	8,3	449,6	13,9
1,3	121,2	7,8	484,8	14,1
1,5	150,4	8,6	601,6	14,5

Tab. 19: Porovnání množství recirkulovaných spalin při nastavení natočení trysek sekundárního paliva +30° pro jednotlivé průtoky při použití obou geometrií (r – recirkulační poměr).

přebytek spal. vzduchu	Geometrie A		Geometrie B	
	V_c [m_N^3/hod]	r [%]	V_c [m_N^3/hod]	r [%]
1,1	58,0	4,9	158,0	13,9
1,3	104,8	7,7	156,4	14,1
1,5	116,4	7,6	204,8	14,5
1,7	116,4	6,9	219,2	13,0

Tab. 20: Porovnání množství recirkulovaných spalin bez přívodu sekundárního paliva (r – recirkulační poměr).

Naměřené hodnoty tlaků (statický, dynamický) pro výpočet průtoku spalin jsou pouze orientační, měření bylo zatíženo chybou lidského faktoru, stejně tak i chybou měřicího přístroje. Na vlastní měření měla vliv celá řada veličin, např. turbulentní chování spalin proudících v kanálech pro nasávání spalin, nedostatečná délka přímého úseku kanálu před měřicím místem, nebo turbulentní charakter plamene. Proto i odečítané hodnoty byly zatíženy nepřesností a byl odhadován jejich průměr.



Obr. 15: Teplota recirkulovaných spalin v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu typu nastavení.

Teplotu recirkulovaných spalin (obr. 15), která byla měřena termočlánkem zavedeným měřicím otvorem do jednoho z kanálů pro nasávání spalin, ovlivňují významně dva faktory, a to geometrie zařízení pro recirkulaci spalin a přívodu paliva do spalovacího prostoru (tj. pouze primárním stupněm, nebo současně primárním a sekundárním stupněm). Zavedením sekundárního stupně a s použitím geometrie B dochází podle grafu ke zvýšení teploty recirkulujících spalin.

7 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V rámci spalovacích zkoušek byl vyhodnocen vliv měněných parametrů (tab. 10) na tvorbu emisí NO_x a CO (kapitola 7.1), teplotu spalin (kapitola 7.2), stabilitu a tvar plamene (kapitola 7.3). V rámci experimentu B byly posuzovány tepelné toky a účinnosti při vybraných nastaveních (kapitola 7.4) a test C zahrnoval vyhodnocení rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory (kapitola 7.5).

V dalším textu a grafech bylo zavedeno následující značení (tab. 21).

Geometrie zařízení pro recirkulaci spalin – první typ	Geometrie A, resp. GA
Geometrie zařízení pro recirkulaci spalin – druhý typ	Geometrie B, resp. GB
Clona s otvorem o průměru 7,9 mm (odpovídá 46,4 % primárního paliva)	Clona 1
Clona s otvorem o průměru 4 mm (odpovídá 18,2 % primárního paliva)	Clona 2
Clona s otvorem o průměru 6 mm (odpovídá 33,3 % primárního paliva)	Clona 3
Trysky sekundárního paliva s úhlem sklonu hlavy 50°	Trysky 1
Trysky sekundárního paliva s úhlem sklonu hlavy 20°	Trysky 2

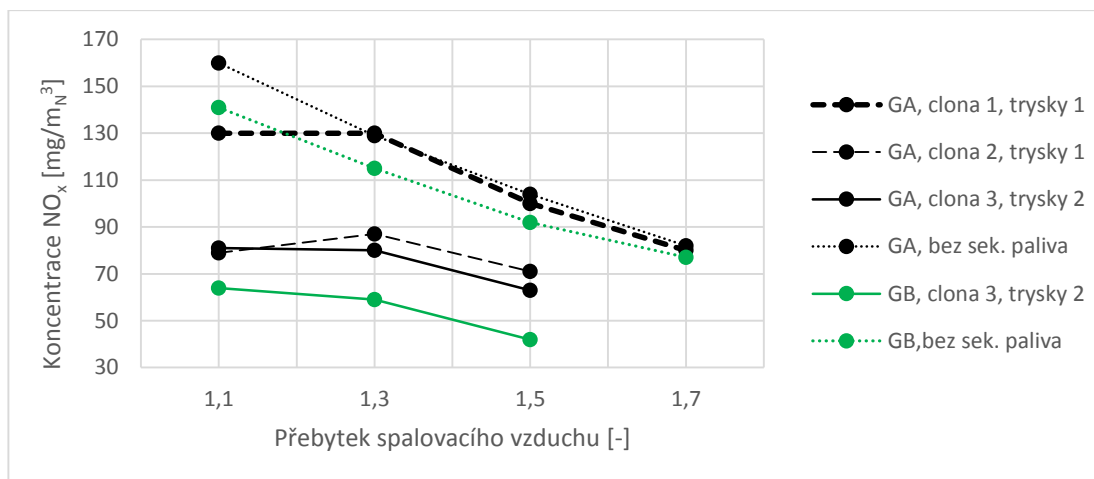
Tab. 21: Přehled značení v grafech.

7.1 Emise NO_x a CO

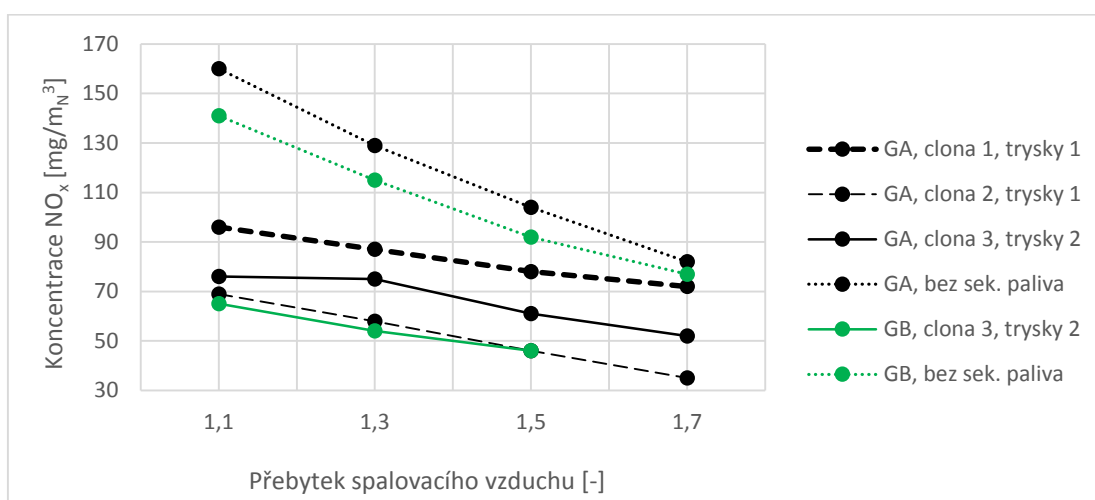
7.1.1 Zhodnocení tvorby emisí NO_x

Hlavním cílem práce bylo najít závislost tvorby oxidů dusíku na nastavení proměnných parametrů při spalování s postupným přívodem paliva. Pro jednotlivá nastavení byl vždy zvyšován přebytek spalovacího vzduchu od 1,1 do 1,7, případně do 1,5, kdy vyšší přebytek nebyl v důsledku stability plamene možný. Byly porovnány dvě geometrie zařízení, které mělo ovlivnit množství recirkulovaných spalin a tím i tvorbu NO_x . Obr. 16 až 18 ukazují porovnání geometrií A a B pro stejné nastavení. V obou případech byly použity trysky s úhlem sklonu hlavy 20°. Každý graf pak znázorňuje závislost množství vyprodukovaných emisí NO_x na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočeních (-30°, 0°, +30°). Pro regulaci poměru primárního a sekundárního paliva byla použita clona s průměrem otvoru 6 mm (33,3 % primárního paliva). Grafy zahrnují také měření bez přívodu sekundárního paliva.

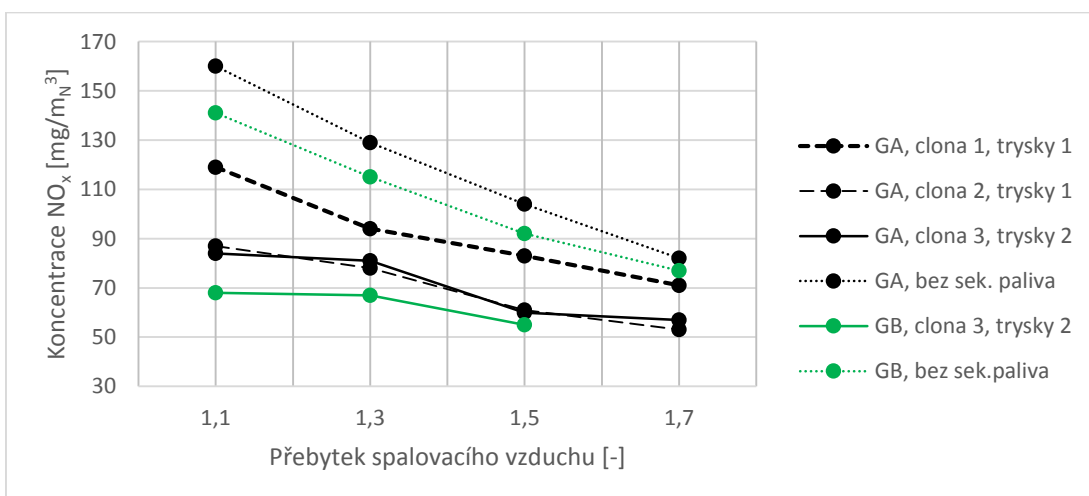
Při použití zařízení pro recirkulaci spalin s geometrií B (tj. vyšší poměr recirkulovaných spalin) bylo dosaženo snížení hodnot koncentrací emisí NO_x o 10 až 20 mg/m_N^3 . Jako nejúčinnější nastavení, kdy bylo dosaženo celkově nejnižších hodnot koncentrací NO_x , je možné považovat geometrii B se clonou 3 a sekundárními tryskami 2. Minimum je v tomto případě rovno hodnotě 42 mg/m_N^3 při přebytku spalovacího vzduchu 1,5. Avšak plamen jevil znaky mírné pulzace, modrá jádra jednotlivých plamenů byla výrazně oddělena a dosažení vyššího přebytku spalovacího vzduchu už nebylo možné. Celkově nejnižší hodnoty koncentrace oxidů dusíku ve spalinách bylo dosaženo při použití geometrie A, clony 2, trysek 2 s natočením -30° a přebytku 1,7 (hodnota koncentrace emisí NO_x ve spalinách je 32 mg/m_N^3).



Obr. 16: Závislost tvorby oxidů dusíku na přebytku spalovacího vzduchu při natočení sekundárních trysek 0°.



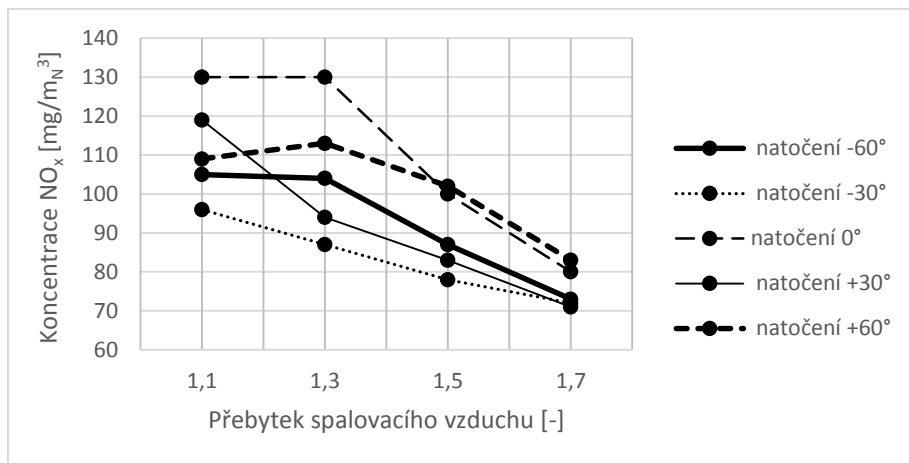
Obr. 17: Závislost tvorby oxidů dusíku na přebytku spalovacího vzduchu při natočení sekundárních trysek -30°.



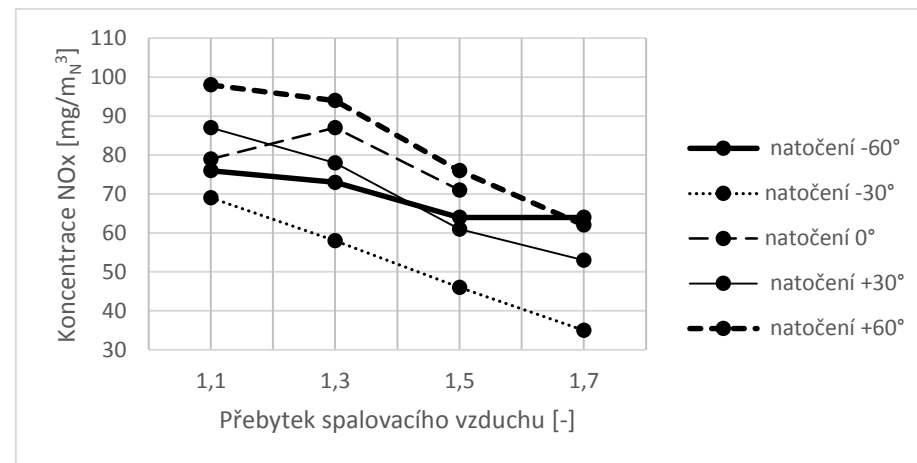
Obr. 18: Závislost tvorby oxidů dusíku na přebytku spalovacího vzduchu při natočení sekundárních trysek +30°.

Cílem použitých nastavení, které byly zahrnuty do těchto spalovacích zkoušek, nebylo najít optimální sestavu pro co nejnižší hodnotu koncentrace NO_x ve spalinách. Tyto závislosti na proměnných parametrech spalování mohou sloužit jako návod, kterým směrem se dále ubírat pro nalezení nastavení, které může vést k dalšímu snížení hodnot koncentrací emisí NO_x ve spalinách. Z celkového porovnání při všech natočeních lze vidět, že přívod sekundárního paliva má na dodržení emisních požadavků pro NO_x pozitivní vliv. Při zavedení sekundárního paliva klesla produkce NO_x v některých případech o více než 50%.

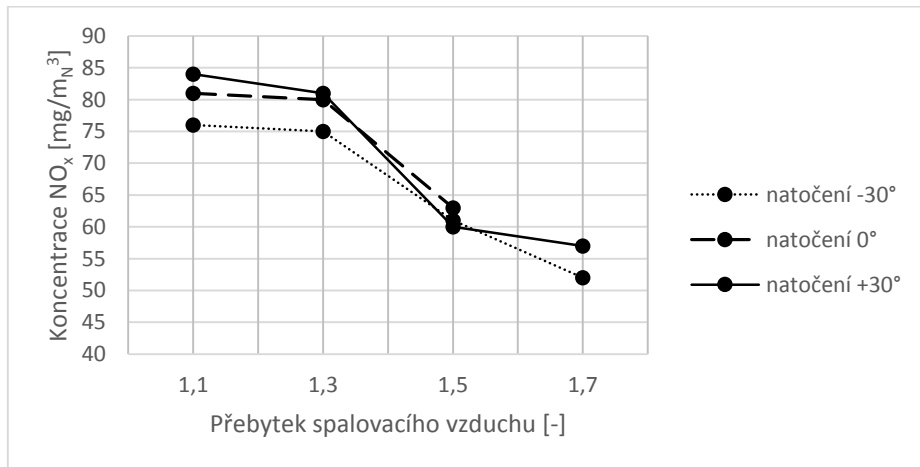
Následující grafy, zobrazeny na obr. 19 až 22, jsou postupným vyobrazením jednotlivých nastavení. Lze tak snadněji porovnat vliv přebytku spalovacího vzduchu a natočení sekundárních trysek na tvorbu oxidů dusíku. Obecný trend pro koncentrace emisí NO_x je snižující se s rostoucím přebytkem spalovacího vzduchu. Porovnáním grafů lze odhadnout, že použití clony s otvorem 4 mm (18,2 % primárního paliva) místo clony 7,9 mm (46,4 % primárního paliva) vede ke snížení tvorby NO_x . Jako nejvýhodnější se jeví podle všech grafů porovnávacích vliv natočení trysek pro přívod sekundárního paliva natočení trysek sekundárního paliva -30° .



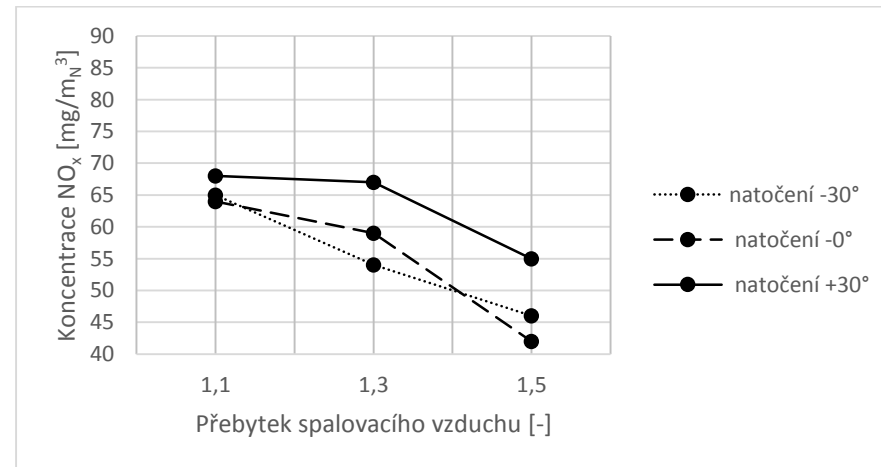
Obr. 19: Závislost koncentrace NOx ve spalínách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie A, trysky 1 a clona 1.



Obr. 20: Závislost koncentrace NOx ve spalínách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie A, trysky 1 a clona 2.



Obr. 21: Závislost koncentrace NOx ve spalínách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie A, trysky 2 a clona 3.



Obr. 22: Závislost koncentrace NOx ve spalínách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie B, trysky 2 a clona 3.

7.1.2 Zhodnocení tvorby emisí CO

Spolu s oxidy dusíku byly měřeny i emise znečišťující látky oxidu uhelnatého (CO). Oxid uhelnatý je jedovatý, pro člověka nebezpečný plyn, který má schopnost vázat se na hemoglobin a zabránit tak přenosu kyslíku krví [41]. Po provedení experimentu bylo zjištěno, že vznik emisí CO při těchto nastaveních probíhá jen velmi ojediněle. Obecné podmínky pro vznik oxidu uhelnatého při spalování jsou:

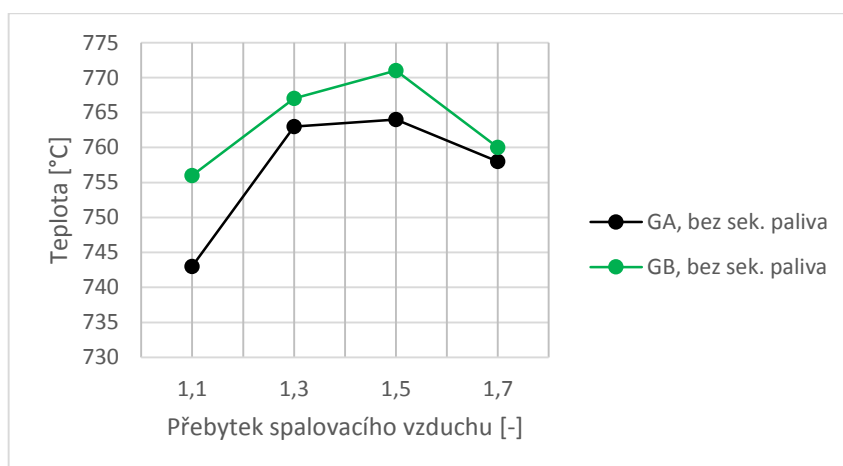
- Příliš nízká teplota spalování, nedochází při ní k úplné oxidaci paliva na oxid uhličitý (CO₂).
- Krátký čas hoření ve spalovací komoře.
- Nedostatečný přísun kyslíku (nízký přebytek spalovacího vzduchu).
- Nedokonalé promíchávání paliva se spalovacím vzduchem, resp. kyslíkem.

Po většinu nastavení byly hodnoty CO nulové nebo dosahovaly maximálně 25 mg/m_N³. Největší koncentrace CO byly naměřeny v případě, že sekundární trysky byly natočeny do polohy -60°, byla použita geometrie A zařízení pro recirkulaci spalin a čtyřmilimetrová clona. Při tomto nastavení emise CO rostly od 0 do 245 mg/m_N³ spolu se stoupajícím přebytkem spalovacího vzduchu.

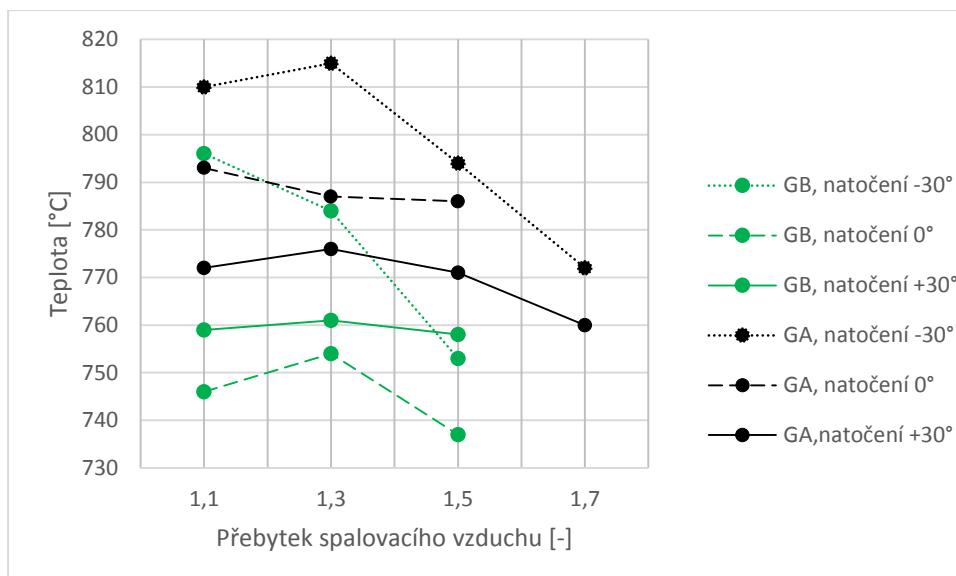
7.2 Teplota spalin

Dalším z vyhodnocovaných parametrů při spalovacích zkouškách byla teplota spalin. Grafy na obr. 23 až 25 porovnávají teplotu spalin v závislosti na změně nastavení a přebytku spalovacího vzduchu přiváděném do spalovacího procesu.

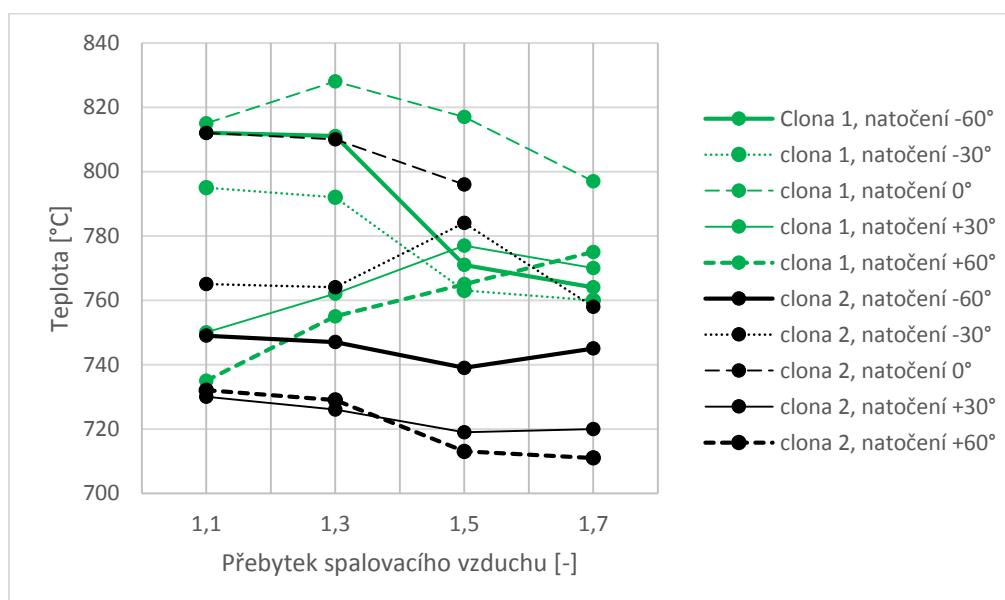
Obr. 23 znázorňuje průběh teploty spalin v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu pro oba typy zařízení pro recirkulaci spalin bez použití sekundárního paliva. Z grafu je patrné, že teplota spalin s použitím zařízení s geometrií A i B rostla do přebytku spalovacího vzduchu 1,5. S dalším zvýšením přebytku spalovacího vzduchu teplota spalin začala klesat. V případě zavedení sekundárního stupně paliva již tento trend neplatil (obr. 24). Při porovnání shodných natočení za použití jiné geometrie zařízení pro recirkulaci spalin bylo zjištěno, že s geometrií B je teplota spalin nižší. Obr. 25 porovnává různé typy clony a jejich vliv na teplotu spalin pro geometrii A, trysky s úhlem sklonu hlavy 50° při všech natočeních. (-60° až +60°). Obecně lze říci, že při použití clony s menším otvorem 4 mm dojde ke snížení teploty spalin v porovnání se clonou o průměru 6 mm.



Obr. 23: Teplota spalin pro jednotlivé geometrie zařízení pro recirkulaci spalin bez použití sekundárního paliva.



Obr. 24: Teplota spalín pro geometrii A a B při použití clony 3 a trysek 2, zobrazení vlivu jednotlivých natočení sekundárních trysek a v závislosti na zvyšování přebytku spalovacího vzduchu.



Obr. 25: Porovnání teploty spalín při použití geometrie A, clon 1 a 2, sekundárních trysek 1 při všech natočeních.

7.3 Stabilita a geometrie plamene

Geometrie a stabilita plamene je pro využití spalování v procesním průmyslu (např. ohřev procesní látky, tavení železných a neželezných kovů) a energetickém průmyslu velmi důležitá. To samé platí o rozložení teplot v plameni, které je popsáno podkapitole 7.4. Při provedených spalovacích zkouškách bylo zjištěno, že jednotlivá nastavení ovlivňují chování a změny v plameni. Zvyšování přebytku spalovacího vzduchu má obecně za následek zkrácení plamene, což bylo také ve většině případů pozorováno. Ve výjimečných případech se plamen ale prodloužil. Bylo to dáno vlastním nastavením geometrie hořáku a natočením sekundárních trysek do mínusových hodnot. Plamen tak byl uveden do rotace opačné, než uděluje geometrie vířiče, došlo tak k ovlivnění intenzity promíchávání paliva se spalovacím vzduchem a délka vyhoření paliva byla prodloužena. Vliv na délku i průměr plamene má také natočení sekundárních trysek, kdy při natočení se plamen zkracuje a jeho průměr zvětšuje. Stejnou závislost na přebytku spalovacího vzduchu i natočení sekundárních trysek má tvar plamene.

Při zvyšování přebytku spalovacího vzduchu a natočení sekundárních trysek se od sebe oddělují jednotlivé plameny (primární plamen a čtyři sekundární plameny) a vzniká soubor pěti jednotlivých plamenů. Při natočení trysek směrem proti hodinovým ručičkám (tj. do minusových hodnot) není toto oddělení tak výrazné, protože sekundární trysky nutí plamen do opačné rotace než víříč spalovacího vzduchu. Při nulovém natočení trysek pro přívod sekundárního paliva v kombinaci s geometrií A a při všech natočeních s geometrií B nebylo možné dosáhnout přebytku spalovacího vzduchu více než 1,5. Plamen se při vyšším přebytku vzduchu začal chovat nestabilně, docházelo k jeho pulzaci a hrozilo jeho utrnutí.

7.4 Tepelné toky

Před spuštěním měření testu B bylo nutné, aby spalovací komora dosáhla termodynamického stavu, tj. konstantní teplota spalin a stabilní lokální tepelné toky do stěn jednotlivých sekcí. Zápis průtoku a teplot chladicí vody v jednotlivých sekcích a následný výpočet tepelných toků a tepelné účinnosti proběhl jen pro vybraná nastavení.

Výpočet tepelného toku vychází z kalorimetrické rovnice (22), kdy vypočtené teplo odpovídá tepelné energii, kterou spalovací komora předá vodě cirkulující v meziplášťovém prostoru spalovací komory.

$$Q = m_i * c_{p,i} * \Delta t \quad (22)$$

Q	...tepelný tok [W]
m_i	...hmotnostní tok [kg/s], kdy $m = V_v * \rho_i$
V_v	...objemový průtok vody [m ³ /s]
ρ_i	...hustota vody v i-té sekci [kg/m ³]
$c_{p,i}$...měrná tepelná kapacita v i-té sekci [J/kg.K]
Δt	...změna teplot, kdy $\Delta t = t_i - t_{vstup}$ [C°]
t_i	...výstupní teplota vody v i-té sekci [C°]
t_{vstup}	...teplota vody na vstupu [C°]

Pro výpočet hustoty tepelného toku vody do jednotlivých sekcí spalovací komory se vypočítá podle vztahu:

$$q = \frac{Q}{A_i} \quad (23)$$

q	...hustota tepelného toku [W/m ²]
A_i	...plocha i-té sekce [m ²], kde $A_i = L_i * \pi$
L_i	...délka i-té sekce [m]

Při výpočtu byly zohledněny změny měrné tepelné kapacity vody a hustoty vody na teplotě, výpočet těchto veličin je naznačen rovnicemi (24) a (25) [42]. Při dosazení teploty do těchto rovnic je předpoklad, že teplota chladicí vody je vždy v objemu jedné sekce konstantní.

$$\rho_i = 1006 - 0,26 * \frac{t'}{2} - 0,0022 * \frac{t'^2}{4} \quad (24)$$

$$c_{p,i} = \left(4210 - 1,363 * \frac{t'}{2} + 0,014 * \frac{t'^2}{4} \right) * 10^{-3} \quad (25)$$

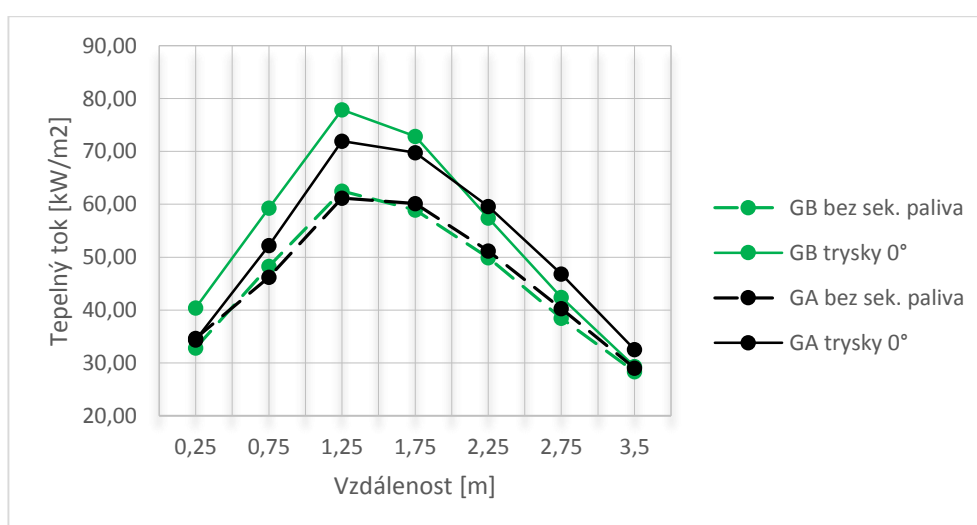
t' ...předpokládaná teplota v objemu jedné sekce [C°], kde $t' = t_i + t_{vstup}$

Pro měření bylo zvoleno stejné nastavení v případě obou geometrií: byly použity sekundární trysky se sklonem hlavy 20°, trysky byly ponechány v základní poloze (natočení 0°), byla použita clona s průměrem otvoru 6 mm a přebytek spalovacího vzduchu byl 1,1 (odpovídá 2 % kyslíku v suchých

spalinách). Pro druhé měření s každou geometrií byl pozastaven přívod sekundárního paliva. Výsledné porovnání tepelných toků lze vidět na obr. 26. Tab. 22 představuje porovnání průměrných tepelných toků v jednotlivých sekcích, hodnoty výsledných tepelných výkonů a tepelných účinností pro daná nastavení.

Nastavení	Tepelný tok [kW/m ²]							Výkon [kW]	Účinnost [%]
	sekce 1	sekce 2	sekce 3	sekce 4	sekce 5	sekce 6	sekce 7		
GA, bez sek. paliva	32,81	48,31	62,50	58,97	49,90	38,48	28,35	45,62	61,3
GA, trysky 0°	40,39	59,33	77,92	72,84	57,40	42,38	29,33	54,23	61,7
GB, bez sek. paliva	34,62	46,21	61,19	60,15	51,21	40,26	29,03	46,10	62,4
GB, trysky 0°	34,37	52,22	71,99	69,79	59,60	46,83	32,56	52,48	60,6

Tab. 22: Porovnání tepelných toků, tepelných výkonů a tepelných účinností pro jednotlivá nastavení.



Obr. 26: Tepelné toky pro jednotlivá nastavení v závislosti na vzdálenosti od hořáku.

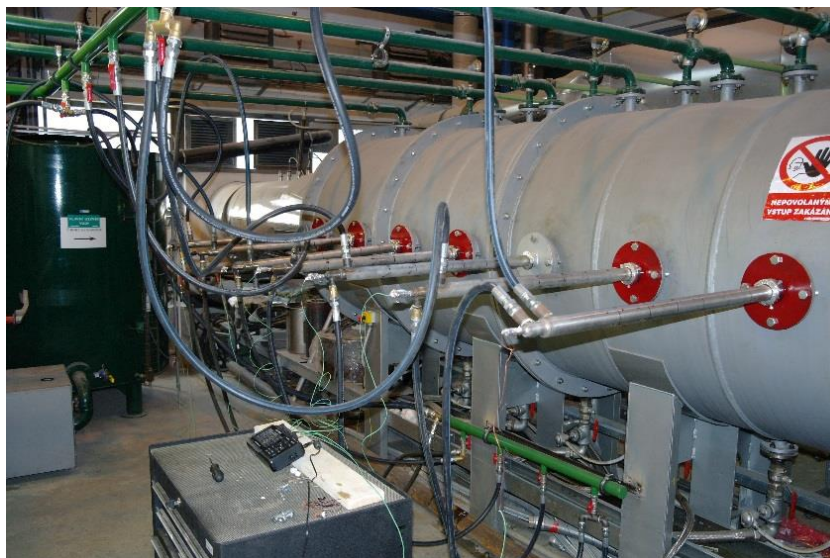
Při porovnání tepelných toků za daných nastavení bylo zjištěno, že při zavedení sekundárního stupně paliva vzroste maximum funkce tepelného toku v závislosti na vzdálenosti od hořáku. Největší tepelný tok byl zaznamenán do stěny třetí sekce spalovací komory. Celkový průměrný tepelný tok do stěny spalovací komory ani tepelná účinnost se ale výrazně nezměnily. Při použití zařízení pro recirkulaci spalin s geometrií B, kdy se zvýšilo množství nasávaných spalin, vzrostla také hodnota tepelného toku do střední části pláště komory.

7.5 Teploty v plameni

Pro vyhodnocení teplot v plameni bylo provedeno měření v horizontální rovině symetrie spalovací komory. Měření teplot bylo provedeno také pouze pro vybraná nastavení, aby bylo možné porovnat vliv zařízení vloženého do hořáku pro zlepšení recirkulace spalin a vliv přívodu sekundárního paliva. Použité nastavení zahrnuje geometrii A, sekundární trysky druhého typu (úhel sklonu hlavy 20°) bez natočení (základní poloha 0°), clonu 3 (průměr otvoru 6 mm, což odpovídá 33,3 % primárního paliva) a přebytek spalovacího vzduchu 1,1 (odpovídá 2 % kyslíku v suchých spalinách). Druhé měření proběhlo pro geometrii A se stejným přebytkem spalovacího vzduchu, ale bez zavedení sekundárního stupně paliva. Obě měření byla zopakována při stejném nastavení také pro geometrii B.

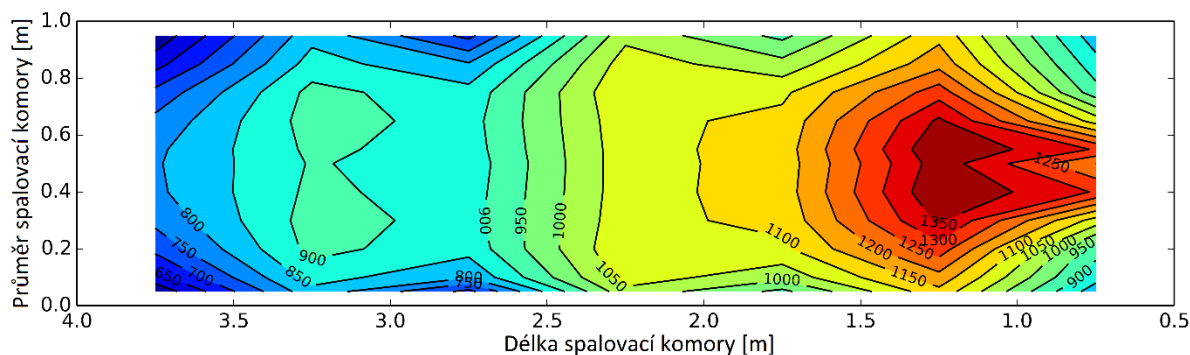
Měření probíhalo pomocí vysokoteplotních termočlánků typu R, které byly inspekčními otvory zavedeny vždy do každé sekce spalovací komory (obr 27). Termočlánky byly do komory zasouvány

postupně do vzdálenosti 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm a 50 cm od vnitřní stěny spalovací komory, kdy poslední měřicí body leží na ose symetrie horizontální roviny komory. V každém bodě byl proveden dvouminutový záznam hodnot. Zápis probíhal vždy každou sekundu. K záznamu dat byl využit datalogger Graphtec midi Logger GL220. Při zobrazení teplotního profilu plamene v horizontální rovině spalovací komory je předpokládáno zrcadlení hodnot podle osy horizontální roviny.

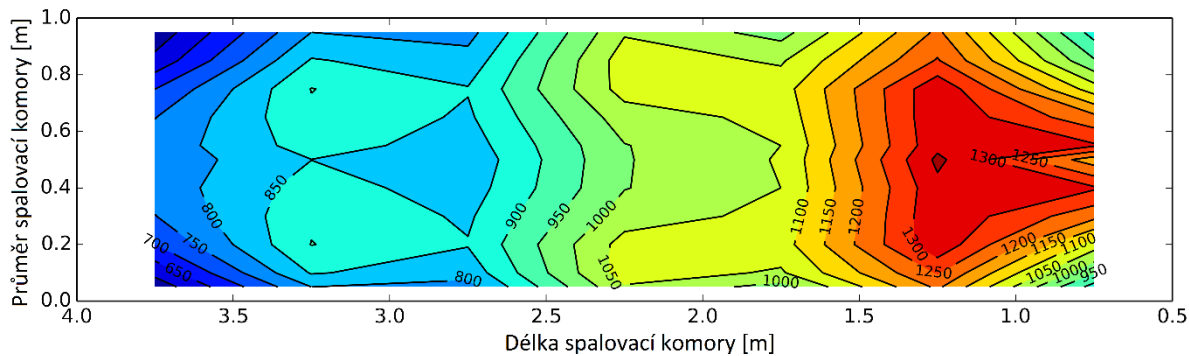


Obr. 27: Termočlánky sloužící k měření teplot ve spalovací komoře.

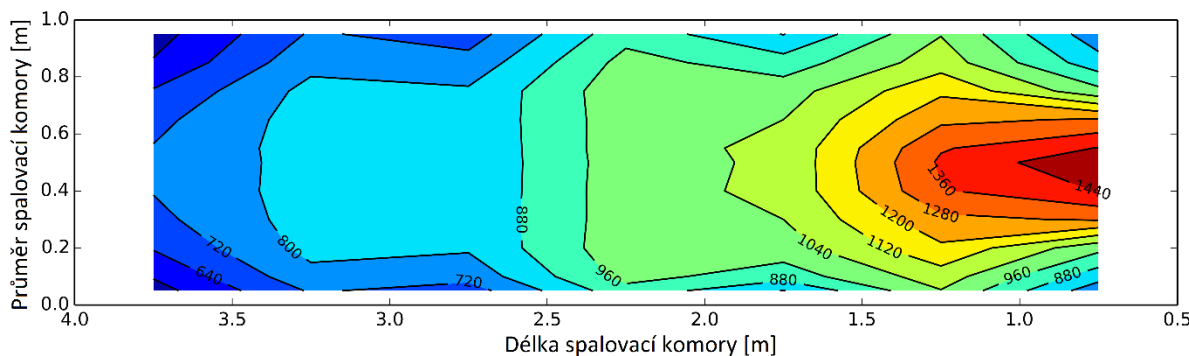
Vliv geometrie zařízení pro recirkulaci spalin na rozložení teplot v plameni nebyl příliš výrazný. Rozložení teplot je porovnáno na obr. 28 a obr. 29. Při použití geometrie B, která měla za následek několikaprocentní zvýšení poměru recirkulovaných spalin, došlo ke snížení špičkové teploty plamene (přibližně o 50 °C) a pozvolnějšímu ochlazení až k teplotě spalin (700 až 750 °C). Vizualní rozdíly v teplotním zobrazení jsou pozorovatelné spíše při porovnání měření s a bez přívodu sekundárního paliva, kdy přivedení sekundárního paliva způsobilo posunutí teplotních špiček dále od ústí hořáku (cca 1,25 m) a současně snížení tvorby NO_x (viz obr. 16 až 18) a zvýšení tepelného toku do stěny spalovací komory (viz obr. 26). V případě provozu hořáku pouze s primárním stupněm paliva byly naměřené teplotní špičky o 100 °C vyšší (obr. 30 a obr. 31). Teplotní gradient po délce komory byl strmější, teplota naměřená na konci komory byla o 20 °C nižší.



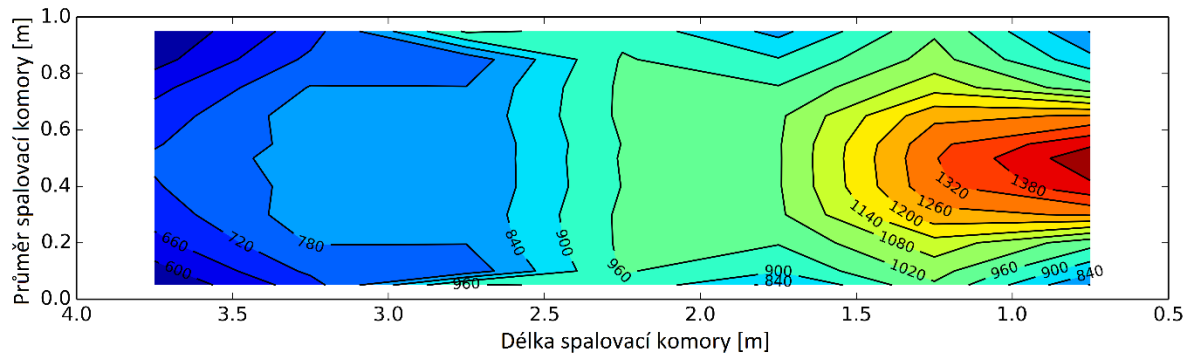
Obr. 28: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie A, clona 3, trysky 2 (natočení 0°).



Obr. 29: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie B, clona 3, trysky 2 (natočení 0°).



Obr. 30: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie A, bez přívodu sekundárního paliva.



Obr. 31: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie B, bez přívodu sekundárního paliva.

8 ZÁVĚR

Jednou ze znečišťujících látek emitovaných do ovzduší při procesu spalování jsou oxidy dusíku, souhrnně označované jako NO_x . Jedná se především o oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2), což jsou jedovaté plyny, které se podílejí na vzniku kyselých dešťů. Oxidy dusíku vznikají během spalovacího procesu z dusíku obsaženého v palivu a v atmosférickém vzduchu (nejčastější oxidační činidlo). Pro vznik NO_x existuje několik mechanismů. Oxidy dusnaté dělíme podle typu vzniku na termické, promptní a palivové. Oxid dusičitý vzniká při nižších teplotách oxidací NO s kyslíkem. Z důvodu ochrany ovzduší, životního prostředí a nařízení legislativy je snaha, aby NO_x vznikaly v co nejmenší míře, a pro ekonomiku procesu je důležité, aby byla zachována stabilita a účinnost spalování. Způsoby, kterými lze zabránit jejich tvorbě, jsou známé jako primární metody („chlazení plamene“, vícestupňové spalování, bezplamenné spalování). Práce se podrobněji zabývala recirkulací spalin, která se řadí mezi metody „chlazení plamene“. Ve zkušebně hořáků na UPEI VUT v Brně byly provedeny spalovací zkoušky s hořákem s vícestupňovým přívodem paliva a s vnitřní recirkulací spalin.

Pro účel experimentu bylo do hořáku nainstalováno zařízení pro recirkulaci spalin. Byly použity dva typy jeho geometrie, byl posuzován jejich vliv na množství recirkulovaných spalin a důsledek změny tohoto množství na koncentrace emisí NO_x a CO ve spalinách. Další závislosti byly pozorovány při změně ostatních proměnných parametrů (poměr přiváděného spalovacího vzduchu, poměr primární/sekundární palivo, natočení trysek pro přívod sekundárního paliva). Ostatními vyhodnocovanými parametry jsou teplota spalin, rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, stabilita hoření a tvar plamene.

Zvyšování přebytku spalovacího vzduchu vede při všech použitých nastaveních ke snižování množství oxidů dusíku ve spalinách. Z vyhodnocení výsledků vyplývá, že při použití zařízení s geometrií B v porovnání s geometrií A docházelo při shodném nastavení ke snížení tvorby emisí NO_x . Při porovnání množství zpětně nasávaných spalin bylo při obou zkoušených nastaveních dosaženo s použitím geometrie B navýšení přibližně o 5 %. Z důvodu zachování stability plamene však nebylo možné v případě použití geometrie B zvýšit přebytek spalovacího vzduchu výše než na poměr 1,5. Geometrie A toto dovolovala. Na rozložení teplot v horizontální rovině symetrie spalovací komory, tepelné toky ani tepelnou účinnost neměla změna geometrie zařízení pro recirkulaci spalin velký vliv.

Použití sekundárního paliva výrazně ovlivní tvorbu NO_x . Bez použití sekundárního stupně došlo při spalovacích zkouškách k nárůstu hodnot koncentrací NO_x ve spalinách až o 50 %. Při porovnání zkoušek s využitím sekundárního paliva s měřením, při kterém byl použit pouze primární stupeň paliva, lze pozorovat rozdíly v rozložení teplot v plameni. V případě spalování se sekundárním palivem se teplotní špičky nacházejí cca 1,25 m od ústí hořáku a teplota směrem ke konci komory klesá pomaleji, než v případě, kdy bylo palivo přivedeno pouze do primárního stupně. Na průměrnou hodnotu tepelného toku a tepelnou účinnost nemělo zavedení sekundárního stupně paliva výrazný vliv. Došlo však ke zvýšení maxima tepelného toku, a to o 10 a 15 kW/m^2 ve třetí sekci.

Obecně lze označit zmenšení otvoru clony jako faktor, který snižuje výslednou koncentraci emisí oxidů dusíku ve spalinách. Rovněž teplota spalin je s menší clonou při ostatním shodujícím se nastavení nižší. Za nejvýhodnější natočení trysek přivádějících sekundární palivo v posuzování NO_x se jeví -30° . Při všech nastaveních byly zaznamenány do přebytku spalovacího vzduchu 1,5 nejnižší hodnoty oxidů dusíku při tomto natočení. Stabilita plamene byla narušena při vyšším přebytku spalovacího vzduchu, případně při větších natočení sekundárních trysek. Zvyšování přebytku spalovacího vzduchu vede při všech použitých nastaveních ke snižování množství oxidů dusíku ve spalinách.

Diplomová práce a výsledky, které zde jsou uvedeny, ukazují, že recirkulace spalin je vhodná metoda vedoucí ke snížení hodnot koncentrací emisí NO_x ve spalinách. Emise CO vznikají při tomto typu spalování jen ve výjimečných případech nastavení.

Jako nezbytnou součástí metody vnitřní recirkulace spalin vedoucí k co největšímu snížení škodlivých oxidů ve spalinách se ukázalo přivedení sekundárního stupně paliva. Zařízení instalované do hořáku je prostředek pro rychlejší nasávání spalin a při další změně jeho geometrie může dojít ještě k dalšímu zvýšení množství recirkulovaných spalin. TO by dále vedlo ke snížení koncentrace oxidů dusíku ve spalinách. Pro nalezení optimálního nastavení pro minimální tvorbu NO_x a stabilní plamen je potřeba provést další spalovací zkoušky, dále upravit geometrii zařízení pro recirkulaci spalin a nastavit další proměnné parametry.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Index kvality ovzduší (převzato z [5]).	11
Obr. 2: Závislost tvorby NO _x na teplotě (převzato z [12]).	13
Obr. 3: Závislost tvorby termických NO (převzato z [13]).	14
Obr. 4: Schéma vícestupňového spalování (upraveno podle [19]).	16
Obr. 5: Schéma metody „reburning“ (upraveno podle [23]).	17
Obr. 6: Schéma vnější recirkulace spalin (převzato z [29]).	20
Obr. 7: Vliv míry recirkulace na teplotu plamene (převzato z [32]).	21
Obr. 8: Vliv míry recirkulace na tvorbu NO (převzato z [31]).	21
Obr. 9: Schéma zkušebny hořáků UPEI (převzato z [37]).	27
Obr. 10: Zobrazení šroubovice v jedné sekci (převzato z [37]).	28
Obr. 11: Fotografie zkušebny hořáků UPEI.	28
Obr. 12: Model hořáku s dvoustupňovým příívodem paliva a vnitřní recirkulací spalin.	29
Obr. 13: Čelní pohled hořáku.	30
Obr. 14: Celkový průtok recirkulovaných spalin nasávacími kanály (za normálních podmínek).	36
Obr. 15: Teplota recirkulovaných spalin v závislosti na přebytku spalovacího vzduchu typu nastavení.	37
Obr. 16: Závislost tvorby oxidů dusíku na přebytku spalovacího vzduchu při natočení sekundárních trysek 0°.	39
Obr. 17: Závislost tvorby oxidů dusíku na přebytku spalovacího vzduchu při natočení sekundárních trysek -30°.	39
Obr. 18: Závislost tvorby oxidů dusíku na přebytku spalovacího vzduchu při natočení sekundárních trysek +30°.	39
Obr. 19: Závislost koncentrace NO _x ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie A, trysky 1 a clona 1.	41
Obr. 20: Závislost koncentrace NO _x ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie A, trysky 1 a clona 2.	41
Obr. 21: Závislost koncentrace NO _x ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie A, trysky 2 a clona 3.	41
Obr. 22: Závislost koncentrace NO _x ve spalinách na přebytku spalovacího vzduchu při jednotlivých natočení pro nastavení: geometrie B, trysky 2 a clona 3.	41
Obr. 23: Teplota spalin pro jednotlivé geometrie zařízení pro recirkulaci spalin bez použití sekundárního paliva.	42
Obr. 24: Teplota spalin pro geometrii A a B při použití clony 3 a trysek 2, zobrazení vlivu jednotlivých natočení sekundárních trysek a v závislosti na zvyšování přebytku spalovacího vzduchu.	43
Obr. 25: Porovnání teploty spalin při použití geometrie A, clon 1 a 2, sekundárních trysek 1 při všech natočeních.	43
Obr. 26: Tepelné toky pro jednotlivá nastavení v závislosti na vzdálenosti od hořáku.	45
Obr. 27: Termočláanky sloužící k měření teplot ve spalovací komoře.	46
Obr. 28: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie A, clona 3, trysky 2 (natočení 0°).	46
Obr. 29: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie B, clona 3, trysky 2 (natočení 0°).	47
Obr. 30: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie A, bez příívodu sekundárního paliva.	47

Obr. 31: Rozložení teplot ve vodorovné rovině symetrie spalovací komory pro nastavení: geometrie B, bez přívodu sekundárního paliva. 47

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Požadavky na spalovací stacionární zdroj na plynná paliva platné od 1. ledna 2014.	23
Tab. 2: Požadavky na spalovací stacionární zdroj na plynná paliva platné od 1. ledna 2018.	23
Tab. 3: Specifické emisní limity pro spalovací stacionární zdroje, pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, před 7. lednem 2013 a byly uvedeny do provozu nejpozději 7. ledna 2014.	24
Tab. 4: Specifické emisní limity pro stacionární zdroje, pro něž byla podána kompletní žádost o povolení do provozu 7. ledna nebo později nebo byly uvedeny do provozu po 7. lednu 2014.	24
Tabulka 5: Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2015 pro spalovací stacionární zdroje, kterým bylo vydáno první povolení provozu, nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, před 27. listopadem 2002 nebo pro něž byla podána kompletní žádost o první povolení provozu před tímto datem a byly uvedeny do provozu nejpozději 27. listopadu 2003.	25
Tab. 6: Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2015 pro spalovací stacionární zdroje, kterým bylo vydáno první povolení provozu, nebo obdobné povolení podle dřívějších právních předpisů, mezi 27. listopadem 2002 a 7. lednem 2013 nebo byly uvedeny do provozu mezi 27. listopadem 2003 a 7. lednem 2014.	25
Tab. 7: Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné od 1. ledna 2018.	26
Tab. 8: Specifické emisní limity pro kotle a teplovzdušné přímotopné stacionární zdroje platné do 31. prosince 2017.	26
Tab. 9: Konstantní parametry.	31
Tab. 10: Měněné parametry.	31
Tabulka 11: Měřené parametry.	32
Tab. 12: Matice měření pro nastavení – geometrie A, trysky se sklonem hlavy 50° a clona s otvorem o průměru 7,9 mm.	33
Tab. 13: Matice měření pro nastavení – geometrie A, trysky se sklonem hlavy 50° a clona s otvorem o průměru 4 mm.	33
Tab. 14: Matice měření pro nastavení geometrie A i B, bez použití sekundárního paliva a bez clony.	34
Tab. 15: Matice měření pro nastavení – modifikace geometrie A, sekundární trysky se sklonem 20° a clona 6 mm.	34
Tab. 16: Matice měření pro nastavení – geometrie A, sekundární trysky se sklonem 20° a clona 6 mm.	34
Tab. 17: Matice měření pro nastavení – geometrie B, sekundární trysky se sklonem 20° a clona 6 mm.	34
Tab. 18: Teoretická tvorba spalin při výkonu hořáku 1000 kW a 860 kW.	35
Tab. 19: Porovnání množství recirkulovaných spalin při nastavení natočení trysek sekundárního paliva +30° pro jednotlivé průtoky při použití obou geometrií (r – recirkulační poměr).	36
Tab. 20: Porovnání množství recirkulovaných spalin bez přívodu sekundárního paliva (r – recirkulační poměr).	36
Tab. 21: Přehled značení v grafech.	38
Tab. 22: Porovnání tepelných toků, tepelných výkonů a tepelných účinností pro jednotlivá nastavení.	45

11 SEZNAM SYMBOLŮ

<u>Symbol</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Význam</u>
A	$[m^2]$	Plocha průřezu potrubí
A_i	$[m^2]$	Plocha i-té sekce
C	$[m \cdot kg^{1/2} \cdot kmol^{-1/2} \cdot K^{-1/2} \cdot s^{-1}]$	Konstanta
$c_{p,i}$	$[J/kg \cdot K]$	Měrná tepelná kapacita vody v i-té sekci
$[C]_{měř}$	$[\%]$	Hodnota měřené koncentrace
$[C]_{ref}$	$[\%]$	Hodnota referenční koncentrace
K	$[-]$	Koeficient Prandtlovy trubice (kalibrační faktor)
L_i	$[m]$	Délka i-té sekce
m_i	$[kg/s]$	Hmotnostní tok
M	$[kg/kmol]$	Molární hmotnost
M_m	$[kg/m^3]$	Měrná molární hmotnost
p	$[kPa]$	Absolutní statický tlak plynu
p_{atm}	$[kPa]$	Atmosférický tlak
p_s	$[kPa]$	Statický tlak
Δp	$[kPa]$	Průměrná hodnota diferenčního tlaku
q	$[W/m^2]$	Hustota tepelného toku
Q	$[W]$	Tepelný tok
r	$[-]$	Poměr recirkulovaných a teoreticky vytvořených spalin
T	$[K]$	Průměrná teplota plynu
t'	$[C^\circ]$	Předpokládaná teplota v objemu jedné sekce
t_i	$[C^\circ]$	Výstupní teplota vody v i-té sekci
t_{vstup}	$[C^\circ]$	Teplota vody na vstupu
Δt	$[C^\circ]$	Změna teplot
V	$[m^3/hod]$	Průtok plynu
V'	$[m_N^3/hod]$	Průtok vlhkých spalin za n.p. jedním kanálem pro zpětné nasávání
V_c	$[m_N^3/hod]$	Celkový průtok spalin za n.p.
V_m	$[m^3/kmol]$	Molární objem
V_v	$[m^3/s]$	Objemový průtok vody
w	$[m/s]$	Průměrná rychlost spalin
ρ_i	$[kg/m^3]$	Hustota vody v i-té sekci

12 SEZNAM CHEMICKÝCH PRVKŮ A SLOUČENIN

<u>Značka</u>	<u>Prvek/sloučenina</u>
C	Uhlík
CH	Uhlovodíkový radikál
CH ₂	Uhlovodíkový radikál
CH _n	Uhlovodíkový radikál
CN	Radikál kyseliny kyanovodíkové
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
H ₂	Vodík
HCN	Kyselina kyanovodíková
H ₂ O	Voda
N ₂	Dusík
NO	Oxid dusnatý
NO ₂	Oxid dusičitý
NO _x	Oxidy dusíku
N ₂ O	Oxid dusný
N ₂ O ₅	Oxid dusičný
NH ₃	Amoniak
O ₂	Kyslík
O ₃	Ozon
OH	Hydroxylový radikál
SO ₂	Oxid siřičitý
TiO ₂	Oxid titaničitý
V ₂ O ₅	Oxid vanadičný

13 SEZNAM LITERATURY

- [1] Europa.eu. *Životní prostředí* [online]. Aktualizováno 22/01/2015 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: http://europa.eu/pol/env/index_cs.htm
- [2] Evropská agentura pro životní prostředí: *Znečištění ovzduší* [online]. Aktualizováno 15.12.2015 [cit. 2015-04-19]. dostupné z: <http://www.eea.europa.eu/cs/themes/air/intro>
- [3] SNIŽOVÁNÍ EMISÍ NO_x [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee%20chapter=2.5.7
- [4] Český hydrometeorologický ústav Úsek ochrany čistoty ovzduší: *Předběžné zhodnocení kvality ovzduší a rozptylových podmínek v roce 2014* [online]. Zpráva z 29.1.2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: http://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/mes_zpravy/Rocni_zprava_2014.pdf
- [5] Český hydrometeorologický ústav: *Index kvality ovzduší* [online]. Aktualizováno 19.4.2015 [cit. 2015-04-19]. dostupné z: http://portal.chmi.cz/portal/dt?action=content&provider=JSPTabContainer&menu=JSPTabContainer/P1_0_Home&nc=1&portal_lang=cs#PP_TabbedWeather
- [6] <http://www.nazeleno.cz/emise.dic>
- [7] ISSAR, Informační systém statistiky a reportingu. *Indikátory Státní politiky životního prostředí ČR 2004 - 2010* [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=102>.
- [8] HAVEL, Milan, HEBNAR, Vít. *Oxidy dusíku* [online]. 2014 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://arnika.org/oxidy-dusiku>
- [9] BALNAR, Antonín. *Příčiny a důsledky vlivu člověka na životní prostředí z fyzikálního hlediska*. [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://www.wigym.cz/nv/wp-content/uploads/docs/opory/evvo_balnar.pdf
- [10] ČECH, J. *Vznik a snižování obsahu NO_x ve spalinách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michaela Zárybnická.
- [11] Ochrana ovzduší: *10. Snižování emisí oxidů dusíku* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~lih90/_soubory/oo/10-01.pdf
- [12] VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM. *Tvorba škodlivin při spalování*. In: [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/tvorba.pdf>.
- [13] VEJVODA, Josef, MACHAČ, Pavel a BURYAN, Petr. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha, 2002. Dostupné také z: <http://www.vscht.cz/uchop/udalosti/skrinavo.html>
- [14] BĚLOHRADSKÝ, P. *Metody pro určování charakteristických parametrů procesů spalování na bázi experimentů a modelování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 143 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc..
- [15] HAYHURST A.N., VINCE I.M., *Nitric oxide formation from N₂ in flames: The importance of „prompt“ NO*, Progress in Energy and Combustion Science 1980; 6:35-51
- [16] BOŠKA, M. *Vznik a způsoby snižování emisí No_x*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 39 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Chlápek. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5097
- [17] HILL, S.C., SMOOT, L. D., *Modelling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems*, Progress in Energy and Combustion Science 1989; 15:287-338
- [18] IBLER, Z. a kol., *Technický průvodce energetika, 1. díl*. Vydalo nakladatelství BEN – technická literatura 2002, 1. vydání
- [19] BAUKAL, Charles E. Jr., *Industrial Burners Handbook*, USA, CRC Press, 2004, ISBN 0-8493-1386-4.
- [20] BEÉR, J. M., *Combustion technology developments in power generation in response to enviromental challenges*, Progress in Energy and Combustion Science 2000; 26:301-327

- [21] BALLESTER, J.M., *Minimizing NO_x emissions from stationary combustion; Reaction engineering methodology*, Chemical Engineering Science 1993; 49:4067-4083
- [22] KICHERER, A., SPLIETHOF, H., MAIER, H., HEIN, K.R.G., *The effect of different reburning fuels on NO_x-reduction*, Fuel 1994; 73:1443-1446
- [23] Propulsion and Combustion Lab. Schematic of Reburning Technology. [online]. [cit. 2015-03-11]. Dostupné z: <http://procom.kaist.ac.kr/reburn.htm>
- [24] BALTASAR, J., CARVALHO, M. G., COELHO, P., COSTA, M., *Flue gas recirculation in gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling*, Fuel 1997; 76:919-929
- [25] http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2006/Projekt-Info_07-2006/Flameless_Combustion.pdf
- [26] NIESSEN, W. R., *Combustion and Incineration Processes*, USA, Marcel Dekker, 2002, ISBN 0-8247-0629-3
- [27] IEA Clean Coal Centre, *Flue gas recirculation for NO_x control*. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.iea-coal.org.uk/site/ieacoal/databases/ccts/flue-gas-recirculation-for-nox-control/>
- [28] Entropy Technology and Environmental Consultants, Inc., *Process or Fired Heater Flue Gas Recirculation (Nox Control for Precess Heaters)*. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.etcinc.net/downloads/Process%20or%20Fired%20Heater%20Flue%20Gas%20Recirculation.pdf>
- [29] BAUKAL, Charles. Everything You Need to Know About Nitric Oxides. *Environmental & Regulatory Compliance*. 2006. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.metalfinishing.com/view/3717/everything-you-need-to-know-about-nitric-oxides/>
- [30] Genesys Combustion, Inc., *Flue Gas Recirculation for NO_x Reduction*. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.genesyscombustion.com/whitepages-417.pdf/>
- [31] VISSER, B. Martien, LEVINSKY, Howard B., *External and Internal Flue Gas recirculation: A Comparison with Respect to Flame Stability and NO_x Emission*. AFRC 1996 Int Symposium Baltimore. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://content.lib.utah.edu:81/cgi-bin/showfile.exe?CISOROOT=/AFRC&CISOPTR=13048&CISOMODE=print>
- [32] AHN, S. Y. a kol. *The characteristic of NO production mechanism on flue gas recirculation in oxy-firing condition*. *Applied Thermal Engeneering* 2010. 1-9
- [33] BALTASAR, J., CARVALHO, M. G., COELHO, P., COSTA M. *Flue gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modeling*. *Fuel*. 1997. 76: 919-929
- [34] KIM, H. K., KIM, Y., Lee, S. M., AHN, K. Y. *NO reduction in 0,03-0,2 MW oxy-fuel combustor using flue gas recirculation technology*. *Elsevier Inc*. 2006. 31: 3377-33884
- [35] Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze. *Ochrana životního prostředí – úvod*. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/fakulta/zivotni-prostredi/download/ochrana-zp-uvod>
- [36] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 201 ze dne 2. května 2012 o ochraně životního ovzduší. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2012. Dostupný také z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/9f4906381b38f7f6c1257a94002ec4a0?OpenDocument>.
- [37] DŘÍMAL, J. *Parametry procesu spalování při využití vzduchu s obsahem kyslíku vyšším než 21 %*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D..
- [38] BĚLOHRADSKÝ, Petr, SKRYJA, Pavel a, HUDÁK, Igor. Experimental study on the influence of oxygen content in the combustion air on the combustion characteristics. *Energy* 75. 2014, s. 116-126. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03605442>.
- [39] LAXA, Václav. *Technická ekologie: Stanovení emisních koncentrací ve spalinách plynového hořáku*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Praha, 2012.
- [40] HORÁK, J., F. HOPAN, K. KRPEC, P. KUBESA, L. MARTINÍK a M. DEJ. *Měření základních fyzikálních veličin potřebných při měření emisí znečišťujících látek – 1. část* [online]. 2014 [cit.

- 2015-04-28]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/11357-mereni-zakladnich-fyzikalnich-velicin-potrebnych-pri-mereni-emisi-znecistujicich-latek-1-cast>
- [41] Tlakinfo.cz. *Už víte vše o otravě oxidem uhelnatým?* [online]. Aktualizováno 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1233>
- [42] Vybrané výpočetní vztahy pro vlastnosti vody. Zdroj: Výpočtové tabulky pro vytápění 9 – Karel Laboutka, Tomáš Suchánek, 2001. [online], [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/41-vybrane-vypocetni-vztahy-pro-vlastnosti-vody>

14 PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A

PŘÍLOHA Č. 2 K ZÁKONU Č. 201/2012 SB. – VYJMENOVANÉ STACIONÁRNÍ ZDROJE

PŘÍLOHA B

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – TEST A, MĚŘÍCÍ LISTY

- Geometrie A, clona 1, trysky 1
- Geometrie A, clona 2, trysky 1
- Geometrie A, clona 3, trysky 2
- Geometrie A, bez použití sekundárního paliva
- Geometrie B, bez použití sekundárního paliva
- Geometrie B, clona 3, trysky 2

PŘÍLOHA A

PŘÍLOHA Č. 2 K ZÁKONU Č. 201/2012 SB.

VYJMENOVANÉ STACIONÁRNÍ ZDROJE

Vyjmenované stacionární zdroje

Vysvětlivky k tabulce:

1. Sloupec A - je vyžadována rozptylová studie podle § 11 odst. 9
2. Sloupec B - jsou vyžadována kompenzační opatření podle § 11 odst. 5
3. Sloupec C - je vyžadován provozní řád jako součást povolení provozu podle § 11 odst. 2 písm. d)

kód		A	B	C
ENERGETIKA - SPALOVÁNÍ PALIV				
1.1.	Spalování paliv v kotlích o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od 0,3 MW do 5 MW včetně	x	x*)	
1.1.	Spalování paliv v kotlích o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nad 5 MW	x	x	x
1.2.	Spalování paliv v pístových spalovacích motorech o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od 0,3 MW do 5 MW včetně	x		
1.2.	Spalování paliv v pístových spalovacích motorech o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nad 5 MW	x	x	x
1.3.	Spalování paliv v plynových turbínách o celkovém jmenovitém tepelném příkonu od 0,3 MW do 5 MW včetně	x		
1.3.	Spalování paliv v plynových turbínách o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nad 5 MW	x		x
1.4.	Spalování paliv v teplovzdušných přímotopných spalovacích zdrojích o celkovém jmenovitém příkonu od 0,3 do 5 MW	x		
1.4.	Spalování paliv v teplovzdušných přímotopných spalovacích zdrojích o celkovém jmenovitém příkonu nad 5 MW	x		x
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADU, NAKLÁDÁNÍ S ODPADY A ODPADNÍMI VODAMI				
2.1.	Tepelné zpracování odpadu ve spalovnách	x	x	x
2.2.	Skládky, které přijímají více než 10 t odpadu denně nebo mají celkovou kapacitu větší než 25 000 t	x		x
2.3.	Kompostárny a zařízení na biologickou úpravu odpadů o projektované kapacitě rovné nebo větší než 10 tun na jednu základku nebo větší než 150 tun zpracovaného odpadu ročně	x		x
2.4.	Biodegradační a solidifikační zařízení			x
2.5.	Sanační zařízení (odstraňování ropných a chlorovaných uhlovodíků z kontaminovaných zemí) s projektovaným ročním výkonem vyšším než 1 t VOC včetně	x		x
2.6.	Čistírny odpadních vod; zařízení určená pro provoz technologií produkujících odpadní vody nepřevoditelné na ekvivalentní obyvatele v množství větším než 50 m ³ /den			x
2.7.	Čistírny odpadních vod s projektovanou kapacitou pro 10 000 a více ekvivalentních obyvatel			
ENERGETIKA - OSTATNÍ				
Přímé procesní ohřevy jinde neuvedené a rozmrazovny				
3.1.	Spalovací jednotky přímých procesních ohřev (s kontaktem) jinde neuvedené o jmenovitém tepelném příkonu od 0,3 MW do 5 MW	x		
3.1.	Spalovací jednotky přímých procesních ohřev (s kontaktem) jinde neuvedené o jmenovitém tepelném příkonu od 5 MW	x	x*)	x
3.2.	Rozmrazovny s přímým ohřevem	x		x
Třídění a úprava uhlí, briketárny				
3.3.	Třídění a jiná studená úprava uhlí	x		x

3.4.	Tepelná úprava uhlí (briketárny, nízkoteplotní karbonizace, sušení)	x	x	x
Výroba koksu – koksovací baterie				
3.5.1.	Otop koksárenských baterií	x	x	x
3.5.2.	Příprava uhelné vsázky	x	x	x
3.5.3.	Koksování	x	x	x
3.5.4.	Vytlačování koksu	x	x	x
3.5.5.	Třídění koksu	x	x	x
3.5.6.	Chlazení koksu	x	x	x
Úprava uhlí a výroba plyn a olej				
3.6.	Zplyňování a zkapaování uhlí, výroba a rafinace plyn a minerálních olej, výroba energetických plyn (generátorový plyn, svítiplyn) a syntézních plyn	x	x	x
3.7.	Výroba bioplynu			x
VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ KOVŮ A PLASTŮ				
Pražení nebo slinování kovové rudy, včetně siřníkové rudy				
4.1.1.	Příprava vsázky	x	x	x
4.1.2.	Spékací pásy aglomerace	x	x	x
4.1.3.	Manipulace se spečencem jako chlazení, drcení, mletí, třídění	x	x	x
4.1.4.	Peletizační provozy (drcení, sušení, peletizace)	x	x	x
Výroba železa				
4.2.1.	Doprava a manipulace s vysokopecní vsázkou	x	x	x
4.2.2.	Odlévání (vysoká pec)	x	x	x
4.2.3.	Ořivače větru	x		x
Výroba oceli				
4.3.1.	Doprava a manipulace se vsázkou nebo produktem	x	x	x
4.3.2.	Nístějové pece s intenzifikací kyslíkem	x	x	x
4.3.3.	Kyslíkové konvertory	x	x	x
4.3.4.	Elektrické obloukové pece	x	x	x
4.3.5.	Pánvové pece	x	x	x
4.3.6.	Elektrické indukční pece s projektovaným výkonem nad 2,5 t/hod	x		x
Zpracování železných kov ve válcovnách a kovárnách				
4.4.	Válcovny za tepla a za studena, včetně ohřívacích pecí a pecí na tepelné zpracování o projektovaném výkonu do 10 t včetně zpracované oceli za hodinu	x		
4.4.	Válcovny za tepla a za studena, včetně ohřívacích pecí a pecí na tepelné zpracování o projektovaném výkonu nad 10 t zpracované oceli za hodinu	x		x
4.5.	Kovárný – ohřívací pece a pece na tepelné zpracování s projektovaným tepelným výkonem 1 MW- 5 MW včetně	x		
4.5.	Kovárný – ohřívací pece a pece na tepelné zpracování s projektovaným tepelným výkonem nad 5 MW	x		x
Slévárny železných kov (slitin železa)				
4.6.1.	Doprava a manipulace se vsázkou nebo produktem	x	x	x
4.6.2.	Žihací a sušící pece	x		x
4.6.3.	Tavení v elektrické obloukové peci	x	x	x
4.6.4.	Tavení v elektrické indukční peci	x		x
4.6.5.	Kuplovný	x	x	x
4.6.6.	Tavení v ostatních pecích – kapalná paliva	x		x
4.6.7.	Tavení v ostatních pecích – plynná paliva	x		x

Metalurgie neželezných kov				
4.7.	Úprava rud neželezných kov	x		x
Výroba nebo tavení neželezných kov, slévání slitin, přetavování produkt, rafinace a výroby odlitků				
4.8.1.	Doprava a manipulace se surovinou nebo produktem	x		
4.8.2.	Pecní agregáty pro výrobu neželezných kov	x		x
4.9.	Elektrolytická výroba hliníku	x		x
4.10.	Tavení a odlévání neželezných kov a jejich slitin	x		x
4.11.	Zpracování hliníku válcováním	x		x
Povrchová úpravu kov a plast a jiných nekovových předmětů a jejich zpracování				
4.12.	Povrchová úpravu kov a plast a jiných nekovových předmětů a jejich zpracování s objemem lázně do 30 m3 včetně, procesy bez použití lázně			
4.12.	Povrchová úpravu kov a plast a jiných nekovových předmětů a jejich zpracování s objemem lázně nad 30 m3			x
4.13.	Obrábění kov (brusírny a obrobny) a plast, jejichž celkový elektrický příkon je vyšší než 100 kW	x		
4.14.	Svařování kovových materiálů, jejichž celkový elektrický příkon je roven nebo vyšší než 1000 kVA	x		
4.15.	Nanášení ochranných povlak z roztavených kov s projektovaným výkonem menším než 1 t pokovené oceli za hodinu včetně	x		
4.16.	Nanášení ochranných povlak z roztavených kov – procesní vany s projektovaným výkonem větším než 1 t pokovené oceli za hodinu	x		x
4.17.	Žárové pokovování zinkem	x		x
ZPRACOVÁNÍ NEROSTNÝCH SUROVIN				
Výroba cementářského slínku, vápna, úprava žáruvzdorných jílovců a zpracování produkt odsíření				
5.1.1.	Manipulace se surovinou a výrobkem, včetně skladování a expedice	x	x	x
5.1.2.	Výroba cementářského slínku v rotačních pecích	x	x	x
5.1.3.	Ostatní technologická zařízení pro výrobu cementu	x	x	x
5.1.4.	Výroba vápna v rotačních pecích	x	x	x
5.1.5.	Výroba vápna v šachtových a jiných pecích	x	x	x
5.1.6.	Pece pro zpracování produkt odsíření	x	x	x
5.1.7.	Úprava a zušlechťování žáruvzdorných jílovců a kaolínů v rotačních pecích	x	x	x
Výroba materiálů obsahujících azbest				
5.2.	Výroba materiál a produkt obsahujících azbest	x		x
Výroba skla, včetně skleněných vláken				
5.3.	Výroby skla, vláken, sklářských výrobků, smaltovacích a glazurovacích frit a skla pro bižuterní zpracování	x		x
5.4.	Výroba kompozitních skleněných vláken s použitím organických pojiv	x		x
5.5.	Zpracování a zušlechťování skla (leštění, malování, mačkání, tavení z polotovar nebo střepů, výroba bižuterie a jiné) o projektované kapacitě vyšší než 5 t zpracované skleněné suroviny ročně	x		x
5.6.	Chemické leštění skla	x		x
Tavení nerostných materiálů, včetně výroby nerostných vláken				
5.7.	Zpracování magnezitu a výroba bazických žáruvzdorných materiálů, křemence apod.	x		x
5.8.	Tavení nerostných materiálů v kupolových pecích	x		x
5.9.	Výroba kompozitních nerostných vláken s použitím organických pojiv	x		x
Výroba keramických výrobků				
5.10.	Výroba keramických výrobků vypalováním, zejména krytinových tašek, cihel, žáruvzdorných tvárnic, obkládaček, kameniny nebo porcelánu o projektovaném výkonu od 5 do 75 t/den včetně	x		

5.10.	Výroba keramických výrobků vypalováním, zejména krytinových tašek, cihel, žáruvzdorných tvárníc, obkládaček, kameniny nebo porcelánu o projektovaném výkonu větší než 75 t/den	x		x
Výroba stavebních hmot, těžba a zpracování kamene, nerost a paliv z povrchových dolů				
5.11	Kamenolomy a zpracování kamene, ušlechtilá kamenická výroba, těžba, úprava a zpracování kameniva - přírodního i umělého o projektovaném výkonu vyšším než 25 m ³ /den	x	x	x
5.12.	Příprava stavebních hmot a betonu, recyklační linky stavebních hmot o projektovaném výkonu vyšším než 25 m ³ /den	x		x
5.13.	Povrchové doly paliv, rud, nerudných surovin a jejich zpracování, především těžba, vrtání, odstředění, bagrování, třídění drcení a doprava, o projektované kapacitě vyšší než 25 m ³ /den	x		x
5.14.	Obalovny živičných směsí a mísírny živíc, recyklace živičných povrchů	x		x
CHEMICKÝ PRŮMYSL				
Výroba a zpracování organických látek a výrobků s jejich obsahem				
6.1.	Výroba 1,2-dichlorethanu a vinylchloridu	x		x
6.2.	Výroba epichlorhydrinu (1-chlor-2,3-epoxypropanu) a allylchloridu (1-chlor-2-propenu)	x		x
6.3.	Výroba polymer na bázi polyakrylonitrilu	x		x
6.4.	Výroba polyvinylchloridu	x		x
6.5.	Výroba a zpracování ostatních syntetických polymer a výroba kompozit, s výjimkou kompozit vyjmenovaných jinde	x		x
6.6.	Výroba a zpracování viskózy	x		x
6.7.	Výroba gumárenských pomocných přípravků	x		x
6. 8.	Zpracování dehtu	x		x
6.9.	Výroba expandovaného polystyrenu			
6.10.	Výroba acetylenu mokrou metodou	x		
Výroba anorganických látek				
6.11.	Výroba chloru	x		x
6.12.	Výroba kyseliny chlorovodíkové	x		x
6.13.	Výroba síry (Clausův proces)	x		x
6.14.	Výroba kapalného oxidu siřičitého	x		x
6.15.	Výroba kyseliny sírové	x		x
6.16.	Výroba amoniaku	x		x
6.17.	Výroba kyseliny dusičné a jejích solí	x		x
6.18.	Výroba hnojiv	x		x
6.19.	Výroba základních prostředků na ochranu rostlin a biocidů	x		x
6.20.	Výroba výbušnin s projektovanou roční produkcí menší 10 t včetně	x		
6.20.	Výroba výbušnin s projektovanou roční produkcí větší než 10 t	x		x
6.21.	Sulfátový proces p i výrob oxidu titaničitého	x		x
6.22.	Chloridový proces p i výrob oxidu titaničitého	x		x
6.23.	Výroba ostatních pigmentů	x		x
Ropná rafinerie, výroba, zpracování a skladování petrochemických výrobků a jiných kapalných organických látek				
6.24.	Ropná rafinerie, výroba a zpracování petrochemických výrobků	x		x
6.25.	Skladování petrochemických výrobků a jiných kapalných organických látek o objemu nad 1000 m ³ nebo skladovací nádrže s ročním objemem výtoče nad 10 000 m ³ a manipulace (není určeno pro automobilové benziny)			x
POTRAVINÁŘSKÝ, DŘEVOZPRACUJÍCÍ A OSTATNÍ PRŮMYSL				
7.1.	Jatka o kapacitě porážky větší než 50 t denně			

7.2.	Zařízení na úpravu a zpracování za účelem výroby potravin z rostlinných surovin o projektované kapacitě 75 t hotových výrobků denně a vyšší			
7.3	Zařízení na úpravu a zpracování za účelem výroby potravin z živočišných surovin o projektované kapacitě 50 t hotových výrobků denně a vyšší			
7.4.	Zařízení na úpravu a zpracování mléka, kde množství odebíraného mléka je větší než 200 t denně (v průměru za rok)			
7.5.	Pražírny kávy o projektovaném výkonu větším než 1 t/den			
7.6.	Udírný s projektovaným výkonem na zpracování více než 1000 kg výrobků denně	x		
7.7.	Průmyslové zpracování dřeva, vyjma výroby uvedené v bodu 7.8., o roční spotřebě materiálu větší než 150 m ³ včetně	x		
7.8.	Výroba dřevotřískových, dřevovláknitých a OSB desek	x	x	x
7.9.	Výroba buničiny ze dřeva a papíru z panenské buničiny	x		x
7.10.	Výroby papíru a lepenky, které nespádají pod bod 7.9.	x		x
7.11.	Předúpravy (operace jako praní, b lení, mercerace) nebo barvení vláken nebo textilií; technologická linka, jejíž zpracovatelská kapacita je od 1 t/den do 10 t/den včetně			
7.11.	Předúpravy (operace jako praní, b lení, mercerace) nebo barvení vláken nebo textilií; technologická linka, jejíž zpracovatelská kapacita větší než 10 t/den včetně	x		x
7.12.	Vydělávání kůží a kožešin; technologická linka, jejíž zpracovatelská kapacita je menší než 12 t hotových výrobků denně včetně	x		
7.12.	Vydělávání kůží a kožešin; technologická linka, jejíž zpracovatelská kapacita je větší než 12 t hotových výrobků denně	x		x
7.13.	Výroba dřevěného uhlí	x		x
7.14.	Zařízení na výrobu uhlíku (vysokoteplotní karbonizací uhlí) nebo elektrografitu vypalováním nebo grafitací a zpracování uhlíkatých materiálů	x		x
7.15.	Krematoria	x		x
7.16.	Veterinární asanační zařízení			x
7.17.	Regenerace a aktivace katalysátorů pro katalytické štěpení ve fluidní vrstvě	x		x
CHOVY HOSPODÁŘSKÝCH ZVÍŘAT				
8.	Chovy hospodářských zvířat s celkovou roční emisí amoniaku nad 5 t včetně			x
POUŽITÍ ORGANICKÝCH ROZPOUŠTĚDEL				
9.1.	Ofset s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.2.	Publikační hlubotisk s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.3.	Jiné tiskařské činnosti s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.4.	Knihtisk s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.5.	Odmašťování a čištění povrchů prostředky s obsahem těkavých organických látek, které jsou klasifikovány jako karcinogenní, mutagenní a toxické pro reprodukci, s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,01 t/rok; odmašťování a čištění povrchů prostředky s obsahem těkavých organických látek, které jsou klasifikovány jako halogenované, s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,1 t/rok			x
9.6.	Odmašťování a čištění povrchů prostředky s obsahem těkavých organických látek, které nejsou uvedeny pod kódem 9.5., s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.7.	Chemické čištění			x
9.8.	Aplikace nátěrových hmot, včetně kateforetického nanášení, nespádají-li pod činnosti uvedené v bodech 9.9. až 9.14., s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.9.	Nátěry dřevěných povrchů s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.10.	Přestříkávání vozidel – opravárenství s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,5 t/rok a nátěry při výrobě nových silničních a kolejových vozidel s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel menší než 15 tun/rok			x
9.11.	Nanášení práškových plastů			x
9.12.	Nátěry kůže s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			x
9.13.	Nátěry pásů a svítek			x
9.14.	Nátěry při výrobě nových silničních a kolejových vozidel s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 15 tun/rok			x

9.15.	Navalování navíjených drát s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			X
9.16.	Nanášení adhezivních materiál s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			X
9.17.	Impregnace dřeva s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			X
9.18.	Laminování dřeva a plast s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			X
9.19.	Výroba kompozit za použití kapalných nenasycených polyesterových pryskyřic s obsahem styrenu s projektovanou spotřebou těkavých organických látek od 0,6 t/rok			X
9.20.	Výroba nátěrových hmot, adhezivních materiál a tiskařských barev s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 10 t/rok			X
9.21.	Výroba obuvi s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 0,6 t/rok			X
9.22.	Výroba farmaceutických směsí			X
9.23.	Zpracování kaučuku, výroba pryže s projektovanou spotřebou organických rozpouštědel od 5 t/rok			X
9.24.	Extrakce rostlinných olej a živočišných tuk a rafinace rostlinných olej			X
NAKLÁDÁNÍ S BENZINEM				
10.1.	Terminály na skladování benzínu			X
10.2.	Čerpací stanice a zařízení na dopravu a skladování benzínu			X
OSTATNÍ ZDROJE				
11.1.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) tuhých znečišťujících látek překračuje 5 t	X		X
11.2.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) oxidu siřičitého překračuje 8 t	X		X
11.3.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) oxid dusíku vyjádřených jako NO ₂ překračuje 5 t	X		X
11.4.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) těkavých organických látek překračuje 1 t	X		X
11.5.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) amoniaku překračuje 5 tun	X		X
11.6.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) sulfanu překračuje 0,1 tuny	X		X
11.7.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) sirouhlíku překračuje 1 tunu	X		X
11.8.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) chloru a jeho anorganických sloučenin překračuje 0,4 tuny (vyjádřeno jako HCl)	X		X
11.9.	stacionární zdroje, jejichž roční emise**) fluoru a jeho anorganických sloučenin překračuje 0,1 tuny (vyjádřeno jako HF)	X		X

*) nevztahuje se na spalování zemního plynu

**) roční emise odpovídající projektovanému výkonu nebo kapacit, předpokládanému využití provozní doby a emisím na úrovni emisního limitu

PŘÍLOHA B

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – TEST A, MĚŘÍCÍ LISTY

Geometrie A, clona 1, trysky 1

Geometrie A, clona 2, trysky 1

Geometrie A, clona 3, trysky 2

Geometrie A, bez použití sekundárního paliva

Geometrie B, bez použití sekundárního paliva

Geometrie B, clona 3, trysky 2

kombinace proměnných parametrů			měřené veličiny															
20.4.2015			Koncentrace					Teplota [°C]			Obj. průtok [m3/h]		Tlak		Plamen		teplota rec. spalin v kanálu [°C]	
natočení -60°	přebytek spalovacích o vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	Spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	Palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]			
																geometrie A clona 1 trysky 1	natočení -60°	1,1
1,3	44	0	104	0	5,25	811	18,6	16,5	1429	100,9	694	52,4	1	3	-			
1,5	32	0	87	0	7,56	771	19,6	16,5	1702	100,9	984	52,1	1	2,5	-			
1,7	23	0	73	0	9,25	764	20,7	16,5	1974	100,7	1377	51,7	1	1,25	-			
natočení -30°	přebytek spalovacích o vzduchu	NO	NO2	NOx	CO	O2	Spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	průměr [m]	délka [m]			
		1,1	50	0	96	6	1,9	795	17,7	16,6	1178	100,8	444	52,1	1		3,25	-
		1,3	36	0	87	7	5,24	792	18,5	16,7	1458	100,7	694	52,1	1		2,25	-
		1,5	28	0	78	0	7,61	763	19,8	16,7	1698	100,8	1023	52,1	1		2	-
natočení 0°	přebytek spalovacích o vzduchu	NO	NO2	NOx	CO	O2	Spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	průměr [m]	délka [m]			
		1,1	66	0	130	0	2,1	815	15,8	16,2	1212	100,6	447	51,3	1		3	-
		1,3	55	0	130	0	5,25	828	16,9	16,3	1477	101,1	707	51,5	0,8		2,75	-
		1,5	40	0	100	0	7,58	817	18,6	16,3	1725	100,9	999	51,4	0,8		2,5	-
natočení +30°	přebytek spalovacích o vzduchu	NO	NO2	NOx	CO	O2	Spaliny	spal. vzduch	palivo	Spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	průměr [m]	délka [m]			
		1,1	61	0	119	0	2,14	750	19,5	17	1209	101	434	52,6	1		2,5	480
		1,3	41	0	94	0	5,25	762	20,6	17	1444	100,9	668	52,3	1		2	430
		1,5	31	0	83	0	7,52	777	21,6	16,9	1714	101,2	987	52,6	1		2	430
natočení +60°	přebytek spalovacích o vzduchu	NO	NO2	NOx	CO	O2	Spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	průměr [m]	délka [m]			
		1,1	53	0	109	25	2,16	735	18,8	17	1254	100,8	425	52,6	1	3,5	500	
		1,3	44	0	113	0	5,25	755	19,7	17,1	1528	100,5	670	52,5	1	2	520	
		1,5	32	0	102	0	7,45	765	20,7	17,1	1717	100,9	934	53	1	1,5	555	
	1,7	23	0	83	2	9,21	775	22,4	17,2	1986	100,8	1278	53	1	1,5	590		

kombinace proměnných parametrů			měřené veličiny															
20.4.2015			Koncentrace					Teplota [°C]			Obj. průtok [m3/h]		Tlak		Plamen		teplota	
geometrie A clona 2 trysky 1	natočení -60°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	rec. spalin [°C]	
		1,1	39	0	76	0	2,07	749	18,6	18,5	1228	101	359	100	1	2,75	390	
		1,3	31	0	73	13	5,29	747	19,3	18,6	1485	100	626	100	1	3	480	
		1,5	22	0	64	76	7,71	739	21,2	18,7	1777	100	973	100	1	3	540	
		1,7	20	0	64	196	9,3	745	23,1	18,8	2036	100	1300	99,8	1	3	550	
		natočení -30°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
		1,1	36	0	69	0	2,11	765	16,9	17,8	1191	100	384	97,5	1	2,75	400	
		1,3	23	0	58	0	5,28	764	18,4	18	1510	101	662	97,7	1	2,5	575	
		1,5	18	0	46	0	7,64	784	19,8	18,1	1785	101	1008	99	1	2	600	
		1,7	12	0	35	18	9,25	758	22,4	18,4	2071	101	1395	99,1	1	2	600	
		natočení 0°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
		1,1	39	0	79	0	2,15	812	15,2	15,5	1185	101	401	94,7	0	3,25	370	
		1,3	36	0	87	0	5,35	810	17	16,8	1440	100	703	96	0,8	2,75	470	
		1,45	27	0	71	0	7,02	796	18,6	17,5	1639	101	909	96,9	0,8	2,5	480	
		-								-						-		
		natočení +30°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
		1,1	45	0	87	0	2,11	730	20,8	17,7	1209	101	348	100	1	2,5	575	
		1,3	32	0	78	0	5,34	726	20,8	17,6	1461	101	558	100	1	1,75	560	
		1,5	22	0	61	0	7,55	719	22,6	17,5	1682	101	871	99,7	1	1,5	540	
		1,7	17	0	53	9	9,34	720	23,1	17,5	1967	100	1248	99,5	1	1,5	540	
		natočení +60°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
		1,1	49	0	98	0	1,97	732	18,1	17,2	1207	101	352	99,5	1	2,5	530	
		1,3	40	0	94	1	5,32	729	19,1	17,3	1444	101	605	99,4	1	2,75	570	
		1,5	27	0	76	2	7,62	713	20,2	17,4	1675	101	907	99,7	1	2,5	640	
	1,7	18	1	62	53	9,2	711	21,2	17,4	2028	100	1286	99,3	1	2,25	640		

kombinace proměnných parametrů			měřené veličiny														
27.4.2015			Koncentrace				Teplota [°C]			Obj. průtok [m3/h]		Tlak		Plamen		teplota rec. spalin v kanálu [°C]	
geometrie A clona 3 trysky 2	natočení -30°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]		
		1,1	39	0	76	1,95	810	22,6	19,6	1239	101,1	278	71,4	0,6-1	3	435	
		1,3	31	0	75	5,18	815	22,6	19,6	1483	100,7	363	70,9	0,6-1	2,5	460	
		1,5	22	0	61	7,48	794	24,7	19,7	1725	100,7	843	71,4	0,6-2	2	515	
		1,7	16	0	52	9,31	772	25,5	19,8	1966	100,3	1226	71,5	0,6-3	2,5	570	
		natočení 0°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
		1,1	42	0	81	1,94	793	21	19,1	1228	101,4	286	71,4	0,6-1	3,5	405	
		1,3	35	0	80	5,28	787	21,8	19,3	1436	100,9	549	70,6	0,6-0,8	3,5	445	
		1,5	23	0	63	7,51	786	24	19,4	1744	100,8	874	71	0,6-1	2,25	510	
		1,7															
		natočení +30°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
		1,1	42	0	84	2,12	772	22,5	20	1251	100,8	218	71,4	1	2,75	455	
		1,3	34	0	81	5,34	776	24,1	19,9	1445	100,7	490	70,3	1	2	485	
		1,5	25	0	60	7,55	771	25,3	19,9	1743	101	850	70,4	1	2	480	
		1,7	18	0	57	9,3	760	26,9	19,8	2059	100,8	1238	70,9	1	2	485	

kombinace proměnných parametrů		měřené veličiny														
27.4.2015		Koncentrace					Teplota [°C]			Obj. průtok [m3/h]		Tlak		Plamen		teplota rec. spalin v kanálu [°C]
geometrie A, bez sekundárního paliva	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
	1,1	82	0	160	0	2,10	743	18,7	18,8	1030	86,6	194	102,0	0,8	3,25	185
	1,3	57	0	129	0	5,23	763	19,2	18,9	1247	86,7	416	102,2	0,6	2,25	345
	1,5	38	0	104	0	7,58	764	20,0	19,0	1517	86,9	633	102,0	0,6	2,25	420
	1,7	26	0	82	0	9,27	758	21,0	19,0	1760	87,1	887	102,2	0,5	1,75	410

kombinace proměnných parametrů		měřené veličiny														
29.4.2015		Koncentrace					Teplota [°C]			Obj. průtok [m3/h]		Tlak		Plamen		teplota rec. spalin v kanálu [°C]
geometrie B, bez sekundárního paliva	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	
	1,1	73	0	141	0	1,94	756	9,8	15,8	1010	86,8	555	99,0	0,8	3	470
	1,3	79	0	115	0	5,33	767	10,7	15,9	1233	86,9	918	99,3	0,6	2,5	485
	1,5	33	0	92	0	7,59	771	11,9	15,9	1451	87,4	1262	99,5	0,6	2,5	500
	1,7	24	0	77	0	9,29	760	13,8	15,9	1764	87,9	1763	99,5	0,6	2,25	500

Kombinace proměnných parametrů			měřené veličiny														
29.4.2015			Koncentrace					Teplota [°C]			Obj. průtok [m3/h]		Tlak		Plamen		teplota rec. spalin [°C]
geometrie B clona 3 trysky 2	natočení -30°	přebytek spalovacího vzduchu	NO [ppm]	NO2 [ppm]	NOx [mg/mN3]	CO [ppm]	O2 [%]	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch [Pa]	palivo [kPa]	průměr [m]	délka [m]	teplota
		1,1	32	0	65	0	2,07	796	9,9	15,8	1233	100,3	716	68	0,6-1	3	610
		1,3	23	0	54	0	5,18	784	10,4	15,8	1429	100,6	1159	68,6	0,6-0,8	2,5	630
		1,5	17	0	46	52	7,57	753	12,8	15,9	1801	100,6	1814	69,2	0,6-1	2,5	730
	natočení -0°	přebytek spalovacího vzduchu	NO	NO2	NOx	CO	O2	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	průměr	délka	teplota
		1,1	32	0	64	0	2,25	746	8,4	13,5	1207	100,6	792	67,7	0,6-1	3	630
		1,3	25	0	59	0	5,3	754	9,9	14,3	1548	100,9	1292	68,4	0,6-1	2,5	670
		1,5	16	0	42	2	7,56	737	11,7	14,8	1780	100,6	1765	68,1	0,6-1	2	620
	natočení +30°	přebytek spalovacího vzduchu	NO	NO2	NOx	CO	O2	spaliny	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	spal. vzduch	palivo	průměr	délka	teplota
		1,1	35	0	68	0	2,12	759	10	15	1186	100,9	773	68,2	0,6-1	3	630
	1,3	28	0	67	0	5,28	761	10,1	15,2	1484	100,5	1211	69,2	0,6-0,8	2,5	650	
	1,5	20	0	55	0	7,54	758	11,9	15,5	1804	101	1703	69,1	1	2,5	600	