



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH MLÝNICE S KROUŽKOVÝMI MLÝNY S RECIRKULACÍ SPALIN A BEZ RECIRKULACE SPALIN

THERMAL CALCULATION OF MILL SYSTEM WITH RECIRCULATION OF FLUE GAS AND
WITHOUT RECIRCULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DAVID PAWLITKO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. ZDENĚK SKÁLA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Pawlitko

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

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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:

Návrh mlýnice s kroužkovými mlýny s recirkulací spalin a bez recirkulace spalin

v anglickém jazyce:

Thermal calculation of mill system with recirculation of flue gas and without recirculation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výpočet mlecího okruhu s kroužkovými mlýny pro kotel o parametrech:

výkon = 100 t/h, $t = 485\text{ °C}$, $p = 6\text{ MPa}$, $t_{nv} = 105\text{ °C}$;

Palivo: výhřevnost 24 - 27 MJ/kg, $W = 7 - 11\%$, $A^d = 10 - 22\%$,

$S^d = 0,6\%$, $V^{daf} = 30 - 34\%$

Cíle diplomové práce:

Tepelný výpočet mlýnského okruhu s recirkulací spalin a bez recirkulace spalin, návrh trasy kouřovodu pro mlýn M31 a M32; Cílem práce je navrhnout recirkulační ventilátor a trasu kouřovodu od elektrostatického odlučovače do jednotlivých mlýnů.

Seznam odborné literatury:

Budaj, F.: Parní kotle, tepelný výpočet, skriptum VUT v Brně,
Černý, Teysler, Janeba: Parní kotle, technický průvodce, SNTL Praha 1998,
Basu, Kefa, Jestin: Boilers and Burners.Springer, New York,Berlin, Heidelberg,
2000

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18. 11. 2014

L.S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou recirkulace spalin práškového granulačního kotle spalujícího černé uhlí. Součástí diplomové práce jsou tepelné výpočty mlýnice pro provozní stav s a bez recirkulace spalin a návrh tras recirkulovaných spalin do mlýnů na úrovni studie proveditelnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Denitrifikace, kroužkový mlýn, potrubní trasa, primární opatření, recirkulační ventilátor, recirkulace spalin, třídič, uhelný prášek.

ABSTRACT

This master's thesis deals with the issue of recirculating of flue-gas of pulverized coal-fired boiler. Part of the thesis are thermal calculations of mills for operational status with and without flue-gas recirculation and design of routes of recirculated flue-gas into the mills at the level of feasibility study.

KEY WORDS

Denitrification, vertical ball mill, route for pipelines, primary measures, recirculation fan, recirculation of flue-gas, classifier, pulverized coal.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAWLITKO, D. Návrh mlýnice s kroužkovými mlýny s recirkulací spalin a bez recirkulace spalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 88 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh mlýnice s kroužkovými mlýny s recirkulací spalin a bez recirkulace spalin** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. David Pawlitko

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu Doc. Ing. Zdeňkovi Skálovi, CSc. za odborné konzultace a cenné užitečné rady při zpracování diplomové práce. Rovněž bych rád poděkoval zaměstnancům Veolia Energie ČR, a.s. za umožnění realizace této diplomové práce a za zajištění relevantních provozních a dalších údajů vztahujících se k řešenému údaji. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňkovi Jirušemu, konstruktérovi kotle ze společnosti PROTIS Ostrava Inženýring, s.r.o za definování okrajových podmínek řešení. V neposlední řadě bych rád poděkoval rovněž Ing. Pavlu Otřísalovi ze společnosti Kovoprojekta Brno a.s., kde působím jako brigádník, za rady k návrhu potrubní trasy recirkulace spalin.

OBSAH

ÚVOD	10
1 SMYSL A CÍLE PRÁCE	12
1.1 Smysl práce	12
1.2 Cíle práce	12
2 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ PRO SNÍŽENÍ EMISÍ NO_x	13
2.1 Mechanismy vzniku emisí NO _x	13
2.1.1 Termické NO _x	13
2.1.2 Palivové NO _x	13
2.1.3 Rychlé (promptní) NO _x	13
2.2 Souhrn řešení pro snížení emisí NO _x	14
2.2.1 Postupný přívod spalovacího vzduchu	15
2.2.2 Postupný přívod sekundárního paliva a spalovacího vzduchu	15
2.2.3 Snížení přebytku vzduchu	16
2.2.4 Přerozdělení prášku a jemnost mletí	16
2.2.5 Recirkulace spalin do mlýna	17
2.2.6 Snížení předehřátí spalovacího vzduchu	17
3 KROUŽKOVÝ MLÝN	18
3.1 Teorie kroužkových mlýnů	18
3.1.1 Popis kroužkového mlýna	18
3.1.2 Princip kroužkového mlýna	18
3.1.3 Přítlačná síla na mlecí elementy	19
3.1.4 Výhody a nevýhody kroužkového mlýna	20
3.1.5 Nahrazení statického třídiče za dynamický	20
3.2 Bezpečnost mlýnských okruhů	21
3.2.1 Fakta	21
3.2.2 Protivýbuchová problematika	21
3.2.2.1 Inertizace	22
3.2.2.2 Zařízení na potlačení výbuchu	22
3.2.3 Nehody způsobené výbuchem uhelného prášku	23
4 VÝPOČET TEPELNÉ BILANCE MLÝNA BEZ RECIRKULACE SPALIN	24
4.1 Technický popis práškového granulačního kotle K3	24
4.2 Technické parametry mlýnů MK 6-50	26
4.2.1 Popis kroužkového mlýna	29
4.2.2 Pohon mlýna a natáčecí zařízení	29
4.2.3 Přítlačné zařízení	29

4.2.4 Mlecí části	29
4.2.5 Třídič paliva	29
4.2.6 Práškové potrubí paliva.....	30
4.2.7 Funkce mlýna	31
4.2.8 Olejové hospodářství mlýnů	32
4.2.9 Hydraulické zařízení	32
4.2.10 Hasící zařízení mlýna.....	32
4.2.11 Zařízení proti explozi	32
4.3 Tepelný výpočet mlýna.....	32
4.3.1 Vstupy použité v tepelném výpočet mlýna	34
4.3.2 Měrné teplo sušícího vzduchu na vstupu do mlýna	35
4.3.3 Měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna.....	37
4.3.4 Měrné teplo vstupního surového paliva	38
4.3.5 Měrné teplo vzniklé třením ve mlýně	39
4.3.6 Měrné teplo spotřebované na odpaření vody z paliva.....	39
4.3.7 Měrné teplo ve vzduchu za mlýnem	40
4.3.8 Měrné teplo vázané v uhelném prášku za mlýnem	41
4.3.9 Tepelné ztráty mlecího okruhu	42
4.3.10 Rovnice tepelné bilance mlecího okruhu	43
4.3.11 Kontrola správnosti výpočtu	43
5 VÝPOČET TEPELNÉ BILANCE MLÝNA S RECIRKULACÍ SPALIN	43
5.1 Vstupní hodnoty	45
5.2 Rozvaha o potřebném množství vzduchu a spalin	46
5.3 Výpočet složení spalin	47
5.4 Měrné teplo nasávaných spalin	50
5.5 Měrné teplo sušícího vzduchu na vstupu do mlýna	53
5.6 Měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna.....	54
5.7 Měrné teplo vstupního surového paliva	55
5.8 Měrné teplo vzniklé třením ve mlýně	56
5.9 Měrné teplo spotřebované na odpaření vody paliva	56
5.10 Měrné teplo vázané ve spalinách za mlýnem.....	57
5.11 Měrné teplo ve vzduchu za mlýnem	58
5.12 Měrné teplo vázané v uhelném prášku za mlýnem.....	60
5.13 Tepelné ztráty mlecího okruhu	61
5.14 Rovnice tepelné bilance mlecího okruhu	61
6 NÁVRH SYSTÉMU RECIRKULACE SPALIN	62
6.1 Recirkulační ventilátor.....	62

6.2 Návrh potrubní trasy spalinovodů	64
6.2.1 Volba profilu spalinovodu	64
6.2.2 Dimenzování potrubí	64
6.2.3 Návrh trasy	65
6.2.3.1 Trasa k mlýnu M31	65
6.2.3.2 Trasa k mlýnu M32	66
6.2.4 Tlaková ztráta potrubní trasy	69
6.2.4.1 Tlaková ztráta potrubní trasy k mlýnu M31	69
6.2.4.2 Tlaková ztráta potrubní trasy k mlýnu M32	71
6.2.5 Návrh izolace spalinového kanálu	73
6.2.6 Návrh kompenzace potrubí.....	73
6.3 Uzavírací armatury	73
6.4 Polní instrumentace	74
6.5 Algoritmy řízení	74
6.6 Odhad nákladů.....	75
ZÁVĚR	77
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	78
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	80
Seznam použitého značení	80
Seznam dolních indexů.....	82
Seznam horních indexů	84
Seznam zkratk.....	85
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	86
SEZNAM TABULEK	87
SEZNAM PŘÍLOH	88

ÚVOD

Teplárna Olomouc (dále TOL) je součástí společnosti Veolia Energie ČR, a.s.. Pohled na TOL je na obr. 1. TOL vyrábí teplo pro potřeby parní a horkovodní soustavy města Olomouce a to kombinovaným způsobem. Součástí teplárny jsou dva bloky. První blok tvoří fluidní kotel K5 o výkonu 188,5 t/h, tlaku 13,5 MPa a teplotě páry 535 °C společně s protitlakou turbínou TG3 o výkonu 41 MWe. Druhý blok je tvořen práškovým granulačním kotlem K3 o výkonu 100 t/h, tlaku 6,0 MPa a teplotě páry 485 °C a společně s protitlakou turbínou TG3 o výkonu 8 MWe. Obě turbíny jsou vysokoobrátkové s převodovkou. Fluidní blok byl postaven v letech 1997 – 1998 v rámci komplexní rekonstrukce teplárny v objemu cca 1,7 mld. Kč. Na tuto rekonstrukci v roce 1999 navázala rekonstrukce kotle K3 z roku 1964. Předmětem rekonstrukce, související s novými emisními limity, byla změna palivové základy z hnědého na černé uhlí. Rekonstrukce práškového granulačního kotle K3, kterého se týká tato diplomová práce, zahrnovala zejména:

- náhradu 4 ks ventilátorových mlýnů dvěma kroužkovými mlýny, původně bylo uvažováno s výstavbou 4 ks kroužkových mlýnů,
- výměnu spalovacího systému,
- výměnu vzduchových ventilátorů,
- rekonstrukci výparníku kotle a výměnu ekonomizéru a ohříváku vzduchu,
- výměnu polní instrumentace a řídicího systému,
- úpravy na straně elektro,
- dodávku a montáž nových vzduchových ventilátorů a nových automatických olejových hořáků,
- náhradu hydraulického splavování pneumatickou dopravou popelovin,
- rozšíření odlučovacího zařízení.

Převážná část přehříváku páry, spalinových ventilátorů a ocelové konstrukce zůstala původní.

TOL v současné době řeší po cca 9-ti letech svého provozu od poslední změny emisních limitů svoji budoucí koncepci s ohledem na nově platnou směrnici EU o průmyslových emisích. Oba kotle K3 a K5 jsou v současné době zahrnuty do přechodového národního plánu a tak horizont rekonstrukce kotlů, odprášení a technologií na snížení emisí SO₂ je odsunut do roku 2018.

S ohledem na výše uvedené je problematika snižování emisí, zejména emisí NO_x pro provozovatele těchto kotlů více než aktuální a to i s ohledem na dosavadní výsledky denitrifikačních projektů realizovaných v posledním období.

Téma diplomové práce zabývající se mlýnskými okruhy a recirkulací spalin jsem si vybral z níže uvedených důvodů:

- jedná se o velmi aktuální téma,
- všeobecně dostupnost literárních zdrojů je velmi nízká,
- recirkulace spalin je součástí převážné většiny současně navrhovaných primárních opatření.



Obr. 1 Letecký snímek TOL.

Autor: Ing. Martin Balvín

1 SMYSL A CÍLE PRÁCE

1.1 Smysl práce

Smyslem této diplomové práce je posouzení návrhu realizace dílčí části primárních opatření a to recirkulace spalin do dvou kroužkových mlýnů společnosti ABB. Na základě zkušeností z jiných projektů se předpokládá, že v důsledku recirkulace spalin poklesne výchozí hodnota emisí NO_x po realizaci primárních opatření o dalších 30 až 50 mg/Nm^3 .

1.2 Cíle práce

Diplomová práce sleduje níže uvedené cíle:

- sestavení metodiky tepelného výpočtu mlýnice s kroužkovými mlýny s a bez recirkulací spalin,
- odladění modelů s využitím provozních údajů o provozu mlýnů a o spalovaném palivu,
- odladění modelu s využitím softwaru Kotel 2.0,
- návrh možných tras recirkulovaných spalin,
- odhad ceny aplikace.

2 PRIMÁRNÍ OPATŘENÍ PRO SNÍŽENÍ EMISÍ NO_x

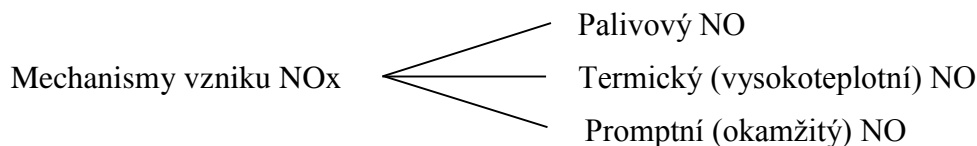
Primární opatření mají za cíl omezit vznik NO_x během spalovacího procesu, na rozdíl od sekundárních opatření, které mají za úkol snížit již vzniklé NO_x ze spalin. Množství vzniklých NO_x závisí na teplotě a koncentraci O₂ v oblasti plamene. Vhodnou úpravou kteréhokoliv z těchto dvou parametru lze docílit primárním opatřením výrazné snížení produkce NO_x.

Díky změnám ve spalovacím procesu za účelem snížení tvorby NO_x může dojít k celé řadě nepříznivých jevů týkajících se:

- stability hoření,
- úrovně mechanického a chemického nedopalu,
- struskování stěn ohniště,
- koroze,
- výstupní teploty spalin. [24]

2.1 Mechanismy vzniku emisí NO_x

Dle dosavadních poznatků rozlišujeme tři mechanismy vzniku:



Obr. 2 Mechanismy vzniku NO_x.

2.1.1 Termické NO_x

Termické NO_x vznikají při vysokých teplotách ve spalovací komoře oxidací dusíku obsaženého ve spalovacím vzduchu. Rychlost tvorby je závislá na teplotě a době styku při této teplotě. Ve významném množství začínají vznikat až při teplotách nad 1200 °C za oxidačních podmínek. Jejich množství roste exponenciálně s rostoucí teplotou. [22]

2.1.2 Palivové NO_x

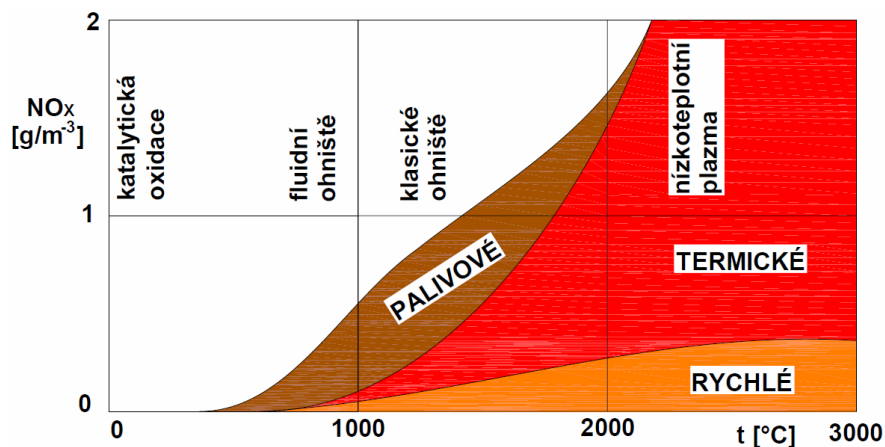
Palivové NO_x vznikají ze samotného dusíku obsaženého v palivu. Velké procento zaujímají tyto škodliviny především při spalování biomasy a hnědého uhlí, kdy se nedosahuje vysokých teplot (1200 – 1300 °C). Při překročení teploty 900 °C je tvorba palivových NO_x v podstatě nezávislá na teplotě, ale přitom výrazně závislá na koncentraci kyslíku v zóně plamene. [24]

2.1.3 Rychlé (promptní) NO_x

Rychlé NO_x vznikají ve frontě plamene při spalování uhlovodíků. Molekulární dusík je přeměňován přes meziprodukty na NO na rozhraní plamene za přítomnosti uhlovodíků. Mechanismus je popsán panem Fenimorem. Tento proces je charakterizován krátkodobostí, malou závislostí na teplotě a velkou závislostí na přebytku vzduchu s maximem tvorby

v oblasti stechiometrického poměru. Podíl rychlého dusíku na celkovém obsahu ve spalinách u velkých spalovacích zařízení je nízký. [22], [24]

Tyto popsané mechanismy se na celkovém vzniku NO_x podílejí různou měrou (viz Obr. 3).



Obr. 3 Tvorba různých druhů NO_x v závislosti na teplotě. [24]

2.2 Souhrn řešení pro snížení emisí NO_x

a) Snížení maximální spalovací teploty

- snížení výhřevnosti paliva,
- snížení teploty spalovacího vzduchu (kapalná a plynná paliva),
- intenzifikace přenosu tepla (chlazení plamene),
- recirkulace spalin (pro kvalitní paliva, snižuje se účinnost),
- vyrovnání teplot po průřezu ohniště.

b) Snížení koncentrace kyslíku

- recirkulace spalin (pro kvalitní paliva),
- snížení přebytku vzduchu,
- postupný přívod spalovacího vzduchu,
- postupný přívod paliva.

c) Zkrácení doby setrvání v oblasti vysokých teplot

- zmenšení plamene – větší počet menších hořáků,
- konstrukční změny hořáků,
- zkrácení doby hoření.

d) Ovlivnění průběhu zapálení

- změna jemnosti mletí,

- přerozdělení prášku po výšce ohniště.

e) Zpomalení mísení paliva se spalovacím vzduchem

- konstrukce hořáku,
- nasměrování proudových hořáků v ohništi,
- vertikální rozčlenění hořáků,
- změna relativní rychlosti primární směsi a sekundárního vzduchu.

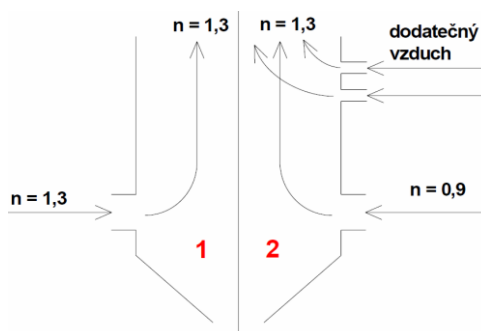
f) Kombinované spalování více druhů paliv

Tato řešení lze všelijak kombinovat, avšak nese to větší nároky na měřicí a regulační techniku a na odbornost obsluhy. Pokud se pomocí primárních opatření nedosáhne potřebné hodnoty emisního limitu, je třeba NO odstranit za kotlem, tedy použít sekundární metody. [24]

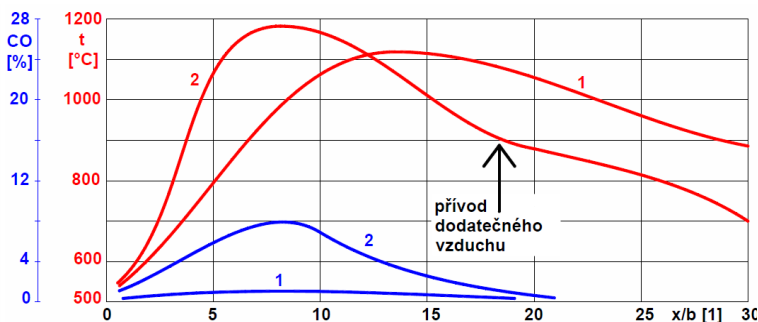
Některé z primárních opatření jsou rozebrány v následujících kapitolách.

2.2.1 Postupný přívod spalovacího vzduchu

Princip postupného přívodu spalovacího vzduchu do spalovací komory je založen na nedostatku kyslíku a vychlazování, čímž dochází ke vzniku většího množství CO. Vzniklé NO se následně redukuje pomocí CO dle rovnice 2-1. Kvůli dohoření CO se zavádí dodatečný vzduch do spalovací komory (viz Obr. 4). Nevýhodou této metody je však vyšší teplota hoření (viz Obr. 5). [24]



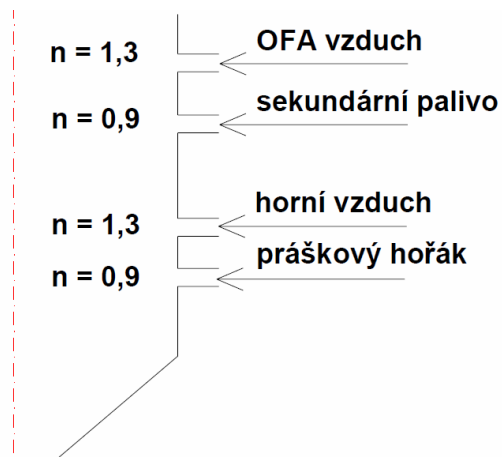
Obr. 4 Dodatečný přívod vzduchu. [24]



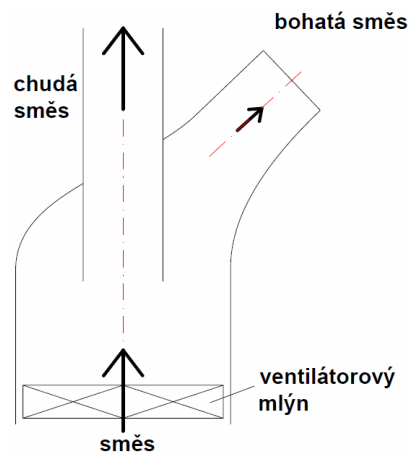
Obr. 5 Vliv dodatečného přívodu vzduchu. [24]

2.2.2 Postupný přívod sekundárního paliva a spalovacího vzduchu

Jedná se o podobný princip jako v předchozím případě. Po přivedení dodatečného paliva začne vznikat velké množství CO, které bude následně redukovat NO_x. Přebytkový CO dooxiduje pomocí kyslíku z dalšího dodatečného vzduchu zvaného OFA (viz Obr. 6). Jako sekundární palivo se může používat část základního paliva tzv. chudá směs (viz Obr. 7) nebo zemní či vysokopecní plyn. [24]



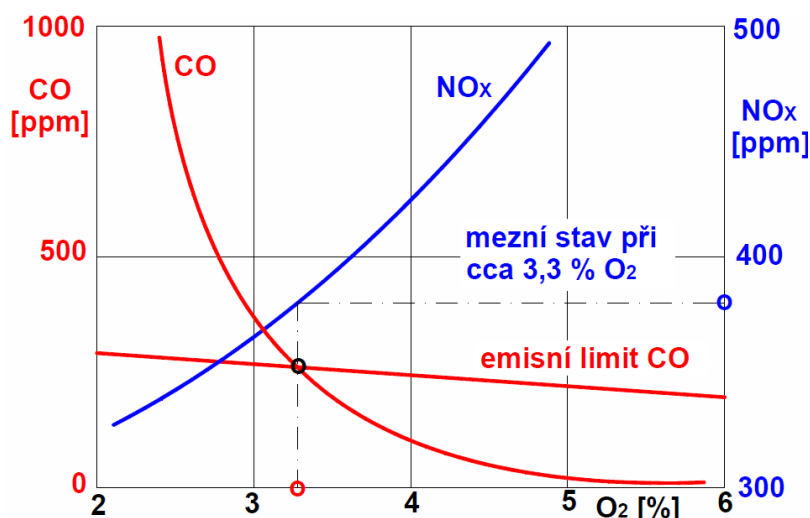
Obr. 6 Přívod vzduchů a paliva. [24]



Obr. 7 Bohatá a chudá směs. [24]

2.2.3 Snížení přebytku vzduchu

Jedná se o zásah do spalovacího procesu. Snížením přebytku vzduchu a tím pádem snížením přísunu kyslíku naroste množství CO ve spalinách. V tomto procesu opět dojde k redukci NO_x pomocí CO, avšak redukovat se může jen do té míry, aby se nepřekročily emisní limity CO. Protože jak je známo, tak s rostoucím přebytkem vzduchu roste množství NO_x , ale klesá množství CO a naopak (viz Obr. 8). Při nižším přebytku vzduchu se sice NO_x více redukuje, avšak CO již nedohoří. [24]

Obr. 8 Závislost CO a NO_x na přebytku vzduchu. [24]

Snížení přebytku vzduchu však může způsobit tvorbu nánosů a koroze teplosměnných ploch jako důsledek redukčního prostředí a neúplného spálení paliva. Dále může zvýšit ztrátu kotle nedopalem. Toto opatření se lépe osvědčilo u kotlů na hnědé uhlí než na černé. [22]

2.2.4 Přerozdělení prášku a jemnost mletí

Součástí úprav spalovacích zařízení je úprava a homogenizace distribuce uhelného prášku. U mnoha aplikací se do horních pater hořáků zavádí jemnější prášek nebo se používá tzv. reburningu. Prášek nemá problém vyhořet i při menším přebytku vzduchu, což znamená méně

NO_x. Jemnost mletí však má taky svou mez, jelikož od určité jemnosti uhlí už nedochází k ovlivnění tvorby NO_x. V praxi to lze použít pouze u černého uhlí, jelikož jeden mlýn zásobuje uhlím celé jedno patro, kdežto u hnědého uhlí zásobuje jeden mlýn jeden rohový hořák. Takže přerozdělením prášku u kotlů na hnědé uhlí by vznikala nesymetrie a nestabilita spalování. [24]

2.2.5 Recirkulace spalin do mlýna

Při provozu kotle a zároveň i mlýna na vyšší výkony, je množství spalovacího vzduchu vyšší než minimální množství dopravního vzduchu (udržení rychlosti v práškovodu na úrovni cca 20 m/s). Ovšem když je kotel provozován na minimálním výkonu (s jedním nebo dvěma mlýny), tak je množství spalovacího vzduchu nižší než minimální množství dopravního vzduchu. To má za následek, že do spalovacího procesu vstoupí více vzduchu, než je očekáváno. Větší přebytek vzduchu při spalování má za následek vyšší emise NO_x, na kterých se podílí termické NO_x.

Možným řešením tohoto problému je zavedení recirkulovaných spalin do mlýna. Tyto spaliny v malém objemu nahrazují určité množství dopravního vzduchu a tím dojde ke snížení produkce termických NO_x. Množství sekundárního vzduchu se však musí úměrně zvýšit, aby se celkové množství kyslíku potřebného ke spálení nezměnilo. Spalovací podmínky v hořáku a jeho okolí se tím změní, a proto je nutná úprava hořáku.

Recirkulace spalin do mlýna snižuje obsah O₂ ve směsi přiváděné do hořáků, s čímž souvisí i snížení teplotního maxima plamene. V případě aplikace recirkulace spalin je nutné komplexně posoudit dopady této recirkulace na celý kotel (zvýšení rychlostí v kotli, změny v přestupu tepla). [22]

2.2.6 Snížení předehtátí spalovacího vzduchu

Vznik vysokoteplotních oxidů dusíku může někdy potlačit nižší předehtátí spalovacího vzduchu, které snižuje teplotní maxima v primární spalovací zóně. Toto opatření však nelze aplikovat na stávajících kotlích, protože vede ke snížení účinnosti kotle. [22]

3 KROUŽKOVÝ MLÝN

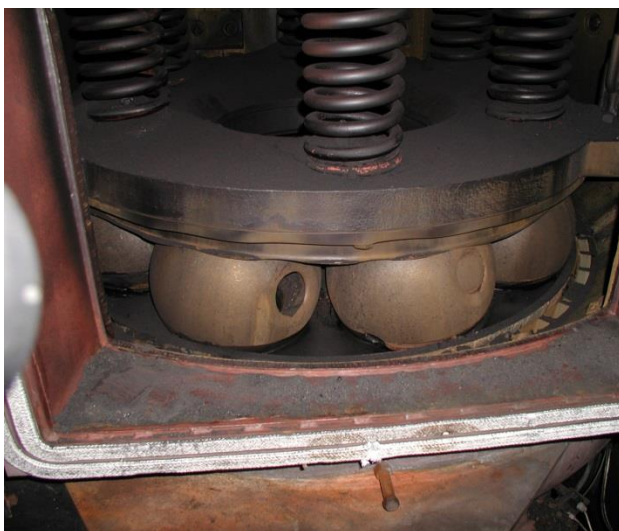
3.1 Teorie kroužkových mlýnů

3.1.1 Popis kroužkového mlýna

Kroužkový mlýn je mlýnem středněběžným. Používá se pro popelnaté černé uhlí. Odvalováním mlecích koulí (viz Obr. 9) mezi dvěma prstenci (talíř s kruhovou drážkou) dochází k mletí uhlí roztlačováním a otěrem.

Provozní otáčky se pohybují v rozmezí 50 – 115 ot/min. Obvodová rychlost otáčení mlecího stolu je poměrně nízká a pohybuje se okolo 3 – 8,5 m/s. Otáčení mlecí mísy se realizuje pomocí elektromotoru a převodovky s kuželovým soukolím. [17], [3]

Mlýnu není předřazena suška a k sušení uhelného prášku dochází přímo ve mlýně. Voda uvolněná sušením odchází ve formě vodní páry a spolu se sušícím vzduchem a uhelným práškem tvoří tzv. brýdy. [17]



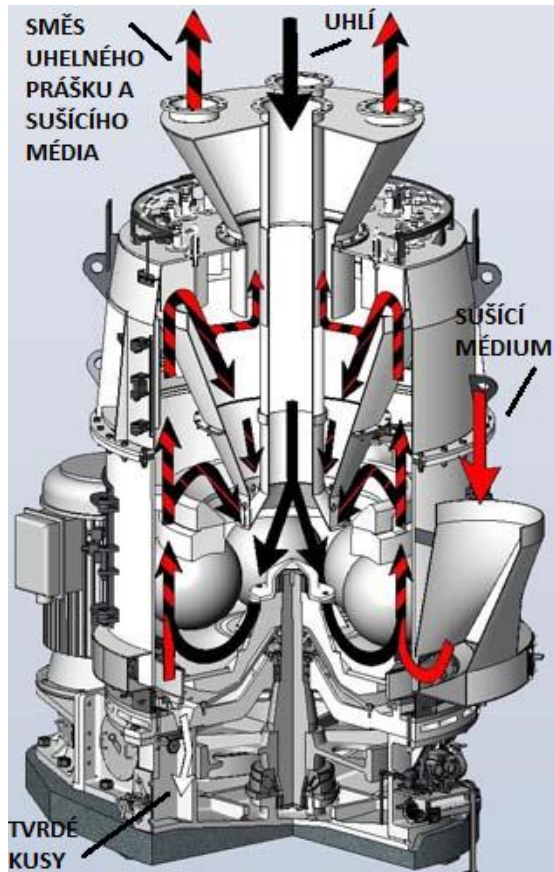
Obr. 9 Pohled na mlecí elementy.



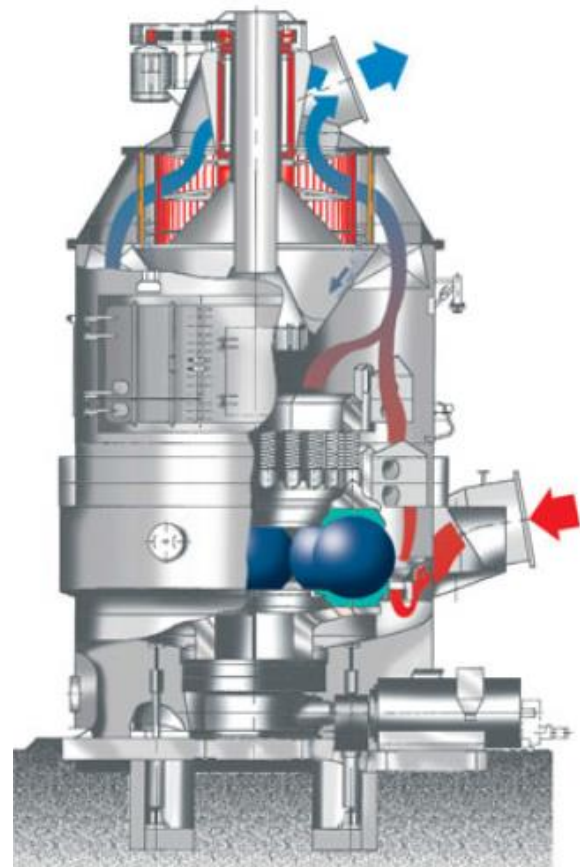
Obr. 10 Detail vzduchové dýzy.

3.1.2 Princip kroužkového mlýna

Uhlí se do mlýna dopravuje středem třídiče a dopadá na otáčející se mlecí mísu. Odstředivá síla vhání uhlí mezi mlecí koule. Sušící médium vstupuje do mlýna přes vzduchové dýzy (viz Obr. 10) a strhává uhelný prach. Tato směs poté prochází přes třídič, kde se oddělí hrubá frakce zrn (krupice) a zbytek pokračuje do hořáků kotle. Tzv. krupice se vrací zpět na mlecí mísu, kde je znovu mleta. Rychlost nosného média v mezeře mezi skříní s talířem se reguluje osovým posouváním kuželovitého regulačního prstence. Rychlost v mezeře bývá 25 – 30 m/s. Tvrdé kusy (např. křemene nebo kyzu) nebo cizí předměty propadnou vzduchovými štěrbinami do prostoru pod mlecí mísu a do výpadu. [17] Řez mlýnem, na kterém je patrný princip mletí, je na Obr. 11.



Obr. 11 Princip mlýnice s kroužkovými mlýny. [1]

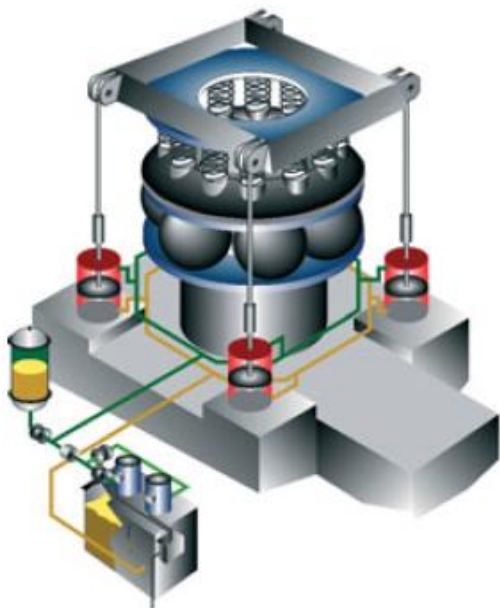


Obr. 12 Kroužkový mlýn s dynamickým tříděčem. [2]

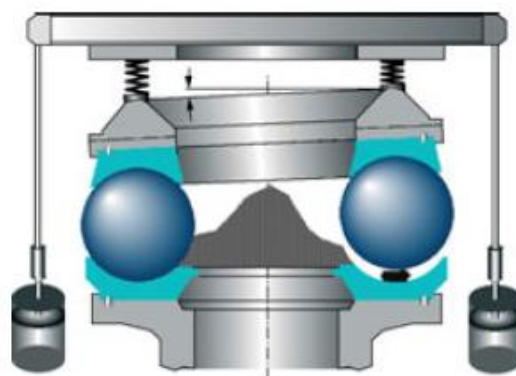
3.1.3 Příkladná síla na mlecí elementy

Příkladná síla na mlecí elementy se realizuje pružinami, vlastní tíhou nebo hydraulicky (viz Obr. 13). Příkladná síla na každou kouli se pohybuje okolo 1800 – 6000 N. Protože se koule opotřebovávají, je nutno konstrukčně zajistit, aby bylo možno přítlakovou sílu regulovat. Pokud nejsou všechny koule stejného průměru, přejímá koule s největším průměrem celou přítlakovou sílu a dochází k její deformaci nebo dokonce k destrukci (koule se může rozpálit). [3]

Když koule a prstenec přijde při mletí do kontaktu s překážkou, výsledná síla od nárazu je zcela absorbována pomocí napínavých pružin bez zatížení hydraulického systému (viz Obr. 14). [2]



Obr. 13 Hydraulický systém kroužkového mlýna. [2]



Obr. 14 Absorbování síly od nárazu. [2]

3.1.4 Výhody a nevýhody kroužkového mlýna

Mezi nevýhody všech středněběžných mlýnů patří citlivost na kovové a cizí předměty, které se mohou spolu s uhlím dostat do mlýna a způsobit poškození mlecí mísy a mlecích elementů. Proto musí být na přívodu surového uhlí magnetický separátor kovových předmětů. Další nevýhodou těchto mlýnů je, že pokud dojde k opotřebením mlecích částí, tak dochází ke zhrubnutí prášku. S rostoucím opotřebením klesá také výkon a kvalita prášku se rapidně zhoršuje. [17]

Výhodou těchto mlýnů je naopak nízká měrná mlecí práce, kompaktnost, malé rozměry zařízení a poměrně malé opotřebením mlecích částí. Tyto mlýny se využívají v mlecích okruzích s přímým foukáním a jsou vhodné pro kotle s granulačním i výtavným ohništěm. [17]

3.1.5 Nahrazení statického třídiče za dynamický

Převážná většina dnes provozovaných mlýnských okruhů je vybavena statickými třídiči uhelného prášku. Zlepšení jemnosti například nastavením klapky nebo prodloužením límců má svá technologická maxima, a proto se v dnešní době nahrazují statické třídiče dynamickými (viz Obr. 12). Zvýšenou jemností uhelného prášku menším než zbytek 30 % na sítu 0,09 mm, lze dosáhnout snížení nedopalů v úletovém popílku a ve škváře nebo při dosažení stávajících hodnot snížení hodnot emisí NO_x .

Rotor třídiče, jeho statorové lopatky a další exponovaná místa jsou většinou navrhovány ze speciálních plechů, případně jsou opatřeny antiabrazivními nátěry. Těleso třídiče je pak většinou opatřeno navařovanými pancéři. Jemnost a ostrost třídění dynamického třídiče jsou řízeny několika způsoby:

- změnou otáček rotoru třídiče pomocí frekvenčního měniče elektromotoru nebo výměnou řemenic,

- změnou množství vzduchu proudícího přes třídič. [14]

3.2 Bezpečnost mlýnských okruhů

Bezpečné provozování mlýnů je velice důležité, neboť výbuch uhelného prášku v mlýnu může způsobit značné škody na majetku, ale i životech.

3.2.1 Fakta

- uhelný prášek tvoří se vzduchem výbušnou směs,
- nelze vyloučit iniciační zdroje,
- výbušný trojúhelník (tři základní faktory se musí sejít, aby došlo k výbuchu),



Obr. 15 Výbušný trojúhelník. [21]

- iniciačními zdroji jsou:
 - statická elektřina,
 - horké povrchy,
 - plameny a horké plyny,
 - mechanické jiskry (např. když se v uhlí nachází kovové předměty),
 - a další. [21]

3.2.2 Protivýbušová problematika

Protivýbušová problematika se řeší:

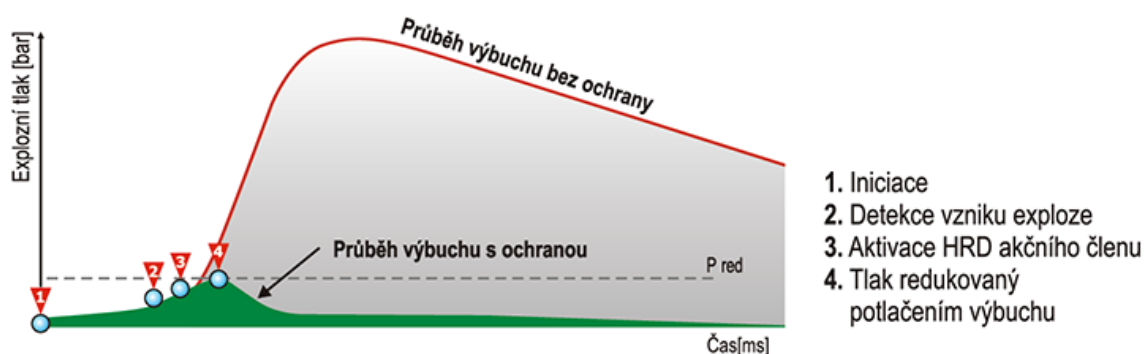
- vyloučením iniciačních zdrojů (statická elektřina, kovové předměty/magnety, natažení žhavého uhlí, atd.),
- omezením výbušné atmosféry (inertizace mlýna),
- měřením teploty směsi,
- instalací zařízení na potlačení a oddělení výbuchu,
- hašením mlýna.

3.2.2.1 Inertizace

Povolená koncentrace kyslíku ve směsi za třídičem vztažena na suchou směs je 16 % pro černé uhlí. V případě černého uhlí z dolu Darkov je dle PTCH (požárně technická charakteristika) koncentrační mez stanovena na 11 %. Pokud má směs za třídičem vyšší obsah kyslíku než je přípustná mez, musíme mlýn inertizovat např. pískem, inertním plynem nebo parou (případ TOL).

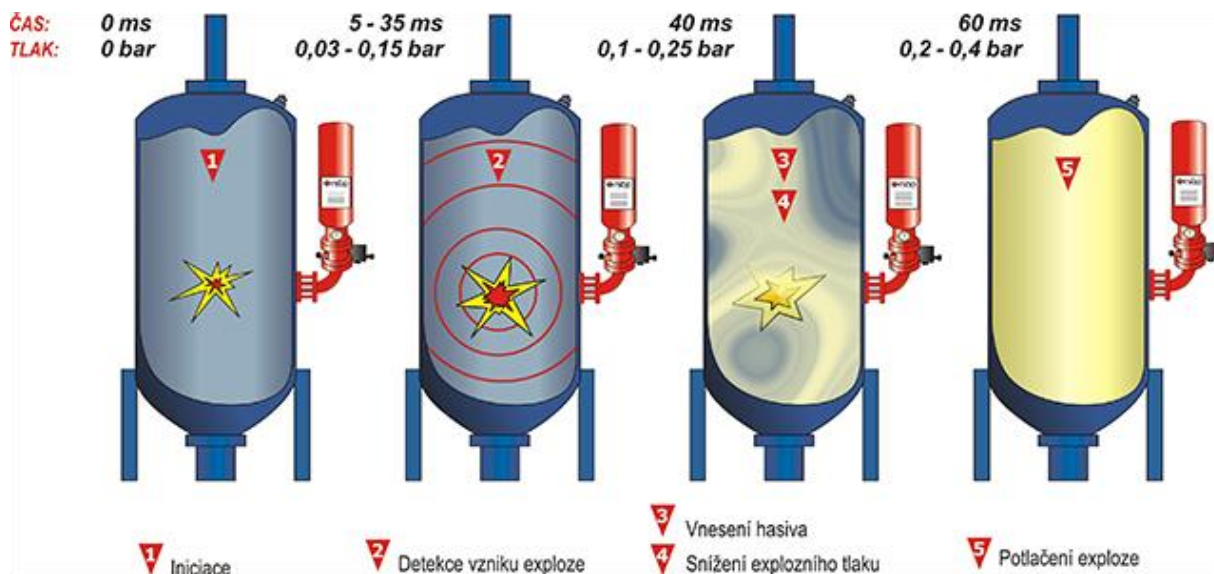
3.2.2.2 Zařízení na potlačení výbuchu

V TOL se pro potlačení výbuchu používá bezpečnostní systém HRD (high rate discharge), který je namontovaný na obou mlýnech. Tento systém dokáže v řádu milisekund detekovat počátek výbuchu uvnitř mlýna a následně provést rychlé uhašení. Tímto se omezuje výbuchový tlak uvnitř mlýna (viz Obr. 16) pod hranici jeho tlakové odolnosti, čímž nedojde k jeho destrukci.



Obr. 16 Minimalizace výbuchového tlaku. [16]

Nastane-li výbuch, začnou optické nebo tlakové detektory v řádu milisekund signalizovat alarm. Poté systém otevře HRD ventily a aktivuje HRD nádoby (akční členy) s hasicím materiálem (viz Obr. 17). Tlakem hasiva se vysunou speciální teleskopické trysky, které zajistí účinnou distribuci hasiva do celého chráněného objemu. [16]



Obr. 17 Proces potlačení výbuchu. [16]

3.2.3 Nehody způsobené výbuchem uhlénoho prášku

Za zmínku rozhodně stojí výbuch a následně obrovský požár v Teplárně Brno na Špitálce 6 v roce 1975 (Obr. 18). Příčinou požáru byl výbuch uhlénoho prášku v prostoru staré mlýnice, ze které se oheň rychle rozšířil do dalších prostor. Na místě byly usmrceny 4 osoby, 14 osob později podlehl na různě těžká poranění. [10]

Z poslední doby lze zmínit např. nehodu, která se odehrála 25. 1. 2010 v Polsku a to konkrétně na elektrárně Dolna Odra. Došlo zde k výbuchu uhlénoho prášku (viz Obr. 19). Havárie si vyžádala jeden lidský život a tři raněné. [11]



Obr. 18 Výbuch v teplárně na Špitálce. [10]



Obr. 19 Výbuch v elektrárně Dolna Odra. [11]

4 VÝPOČET TEPELNÉ BILANCE MLÝNA BEZ RECIRKULACE SPALIN

Tato kapitola se ve své praktické části zabývá návrhem systému recirkulace spalin pro práškový granulační kotel K3. Technické parametry kotle jsou uvedeny dále.

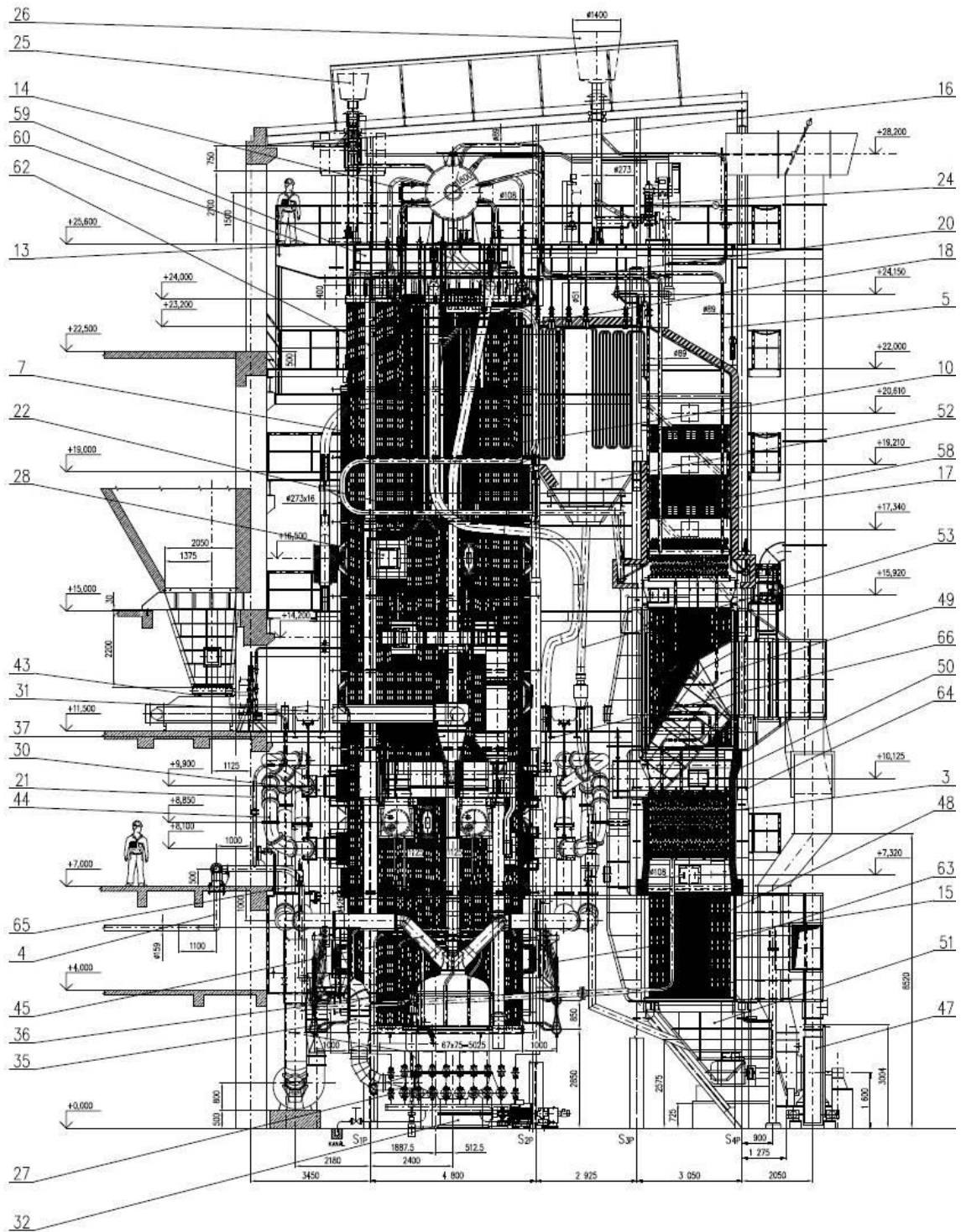
4.1 Technický popis práškového granulačního kotle K3

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny základní parametry práškového granulačního kotle K3 v TOL.

Tab. 1 Základní parametry kotle K3.

Výrobce kotle	První brněnská strojírna
Zhotovitel rekonstrukce kotle	Energomontáže Liberec a.s.
Rok provedení rekonstrukce na černé uhlí	1999
Jmenovitý výkon kotle	100 t.h ⁻¹
Minimální výkon kotle bez stabilizace	45 t.h ⁻¹
Minimální výkon kotle se stabilizací	36 t.h ⁻¹
Tlak páry za kotlem	6 MPa
Teplota výstupní páry	485 ± 8 °C
Účinnost garantovaná:	
při výkonu 90 t.h ⁻¹	88,5 %
při výkonu 80 t.h ⁻¹	88,9 %
při výkonu 50 t.h ⁻¹	86,5 %

Jedná se o práškový, granulační kotel, spalující černouhelný prášek. Kotel je strmotrubný, s přirozeným oběhem vody a přímým foukáním uhelného prášku. Konstruován je jako dvoutahový se svislým ohništěm se vzestupným prouděním spalin a jedním sestupným konvekčním tahem. V ohništi se udržuje podtlak, který je vytvořen kouřovými ventilátory. Spalovací zařízení je tvořeno osmi proudovými hořáky. Řez kotlem je na Obr. 20.



Obr. 20 Řez kotlem K3.

Spalovací komora kotle má základní rozměr 5 025 x 5 625 mm a je tvořena membránovými stěnami. Výška je 21 550 mm (rozteč horních a spodních komor).

Vzduch do kotle je nasáván společným kanálem, umístěným za zadní stěnou kotelny. Podle klimatických podmínek je možno ručními klapkami zvolit sání vzduchu buď ze stropu

kotelny, tzn. prostoru kotelny nebo z venkovního prostředí. Sací kanál se rozděluje do dvou větví sání vzduchových ventilátorů RVM 1 600-4N, před kterými jsou instalovány tlumiče hluku. Vzduch je ohříván v trubkových ohřívacích vzduchu LUVO I a LUVO II, které sestávají z vertikálních trubek, zaválcovaných do trubkovic. Spaliny proudí trubkami a ohřívají tak vzduch, proudící kolmo na trubky. Vzduch je poté distribuován do kotle několika kanály.

Kanály sekundárního vzduchu pro práškové hořáky, vždy pro 2 hořáky umístěné nad sebou je vzduch odebírán jedním kanálem. Kanály pro ofukovací dýzy membránových stěn spalovací komory. Kanály dohořivacích vzduchů (OFA). Po obou stranách kotle je vzduch odebírán jedním kanálem, který je rozdělen pro zaústění dvou dýz dohořivacích vzduchů v každé boční stěně spalovací komory. Kanály pro hořáky LTO. Po obou stranách kotle je vzduch odebírán jedním kanálem, který se rozděluje do 2 kanálů, připojených ke vzduchovým pneumatickým klapkám hořáků LTO, ovládaných automatikou hořáků. Kanály primárního vzduchu do mlýnů. Primární vzduch do mlýnů je sveden potrubím kanálů horkého vzduchu po obou stranách kotle do sání mlýnských ventilátorů. Pro regulaci teploty za třídiči mlýnů je ze vzduchových kanálů ohříváků vzduchu LUVO I odebírán studený vzduch a zaveden po obou stranách kotle do potrubí primárního vzduchu mlýnů.

Spaliny vzniklé při spalování paliva a dostatečném vychlazení v kotli procházejí ve dvou paralelních větvích nad výsypkami II. tahu a mezitahu. Dále zplodiny pokračují přes mechanické odlučovače popílku a z nich vstupují do elektrostatického odlučovače (EO) tvořeného třemi sekcemi. Odsávání spalin z kotle do komína zajišťují 2 axiální rovnotlaké ventilátory.

4.2 Technické parametry mlýnů MK 6-50

V níže uvedených tabulkách jsou uvedeny základní parametry kroužkového mlýnu a ventilátoru těsnícího vzduchu v TOL.

Tab. 2 Technické parametry mlýnů

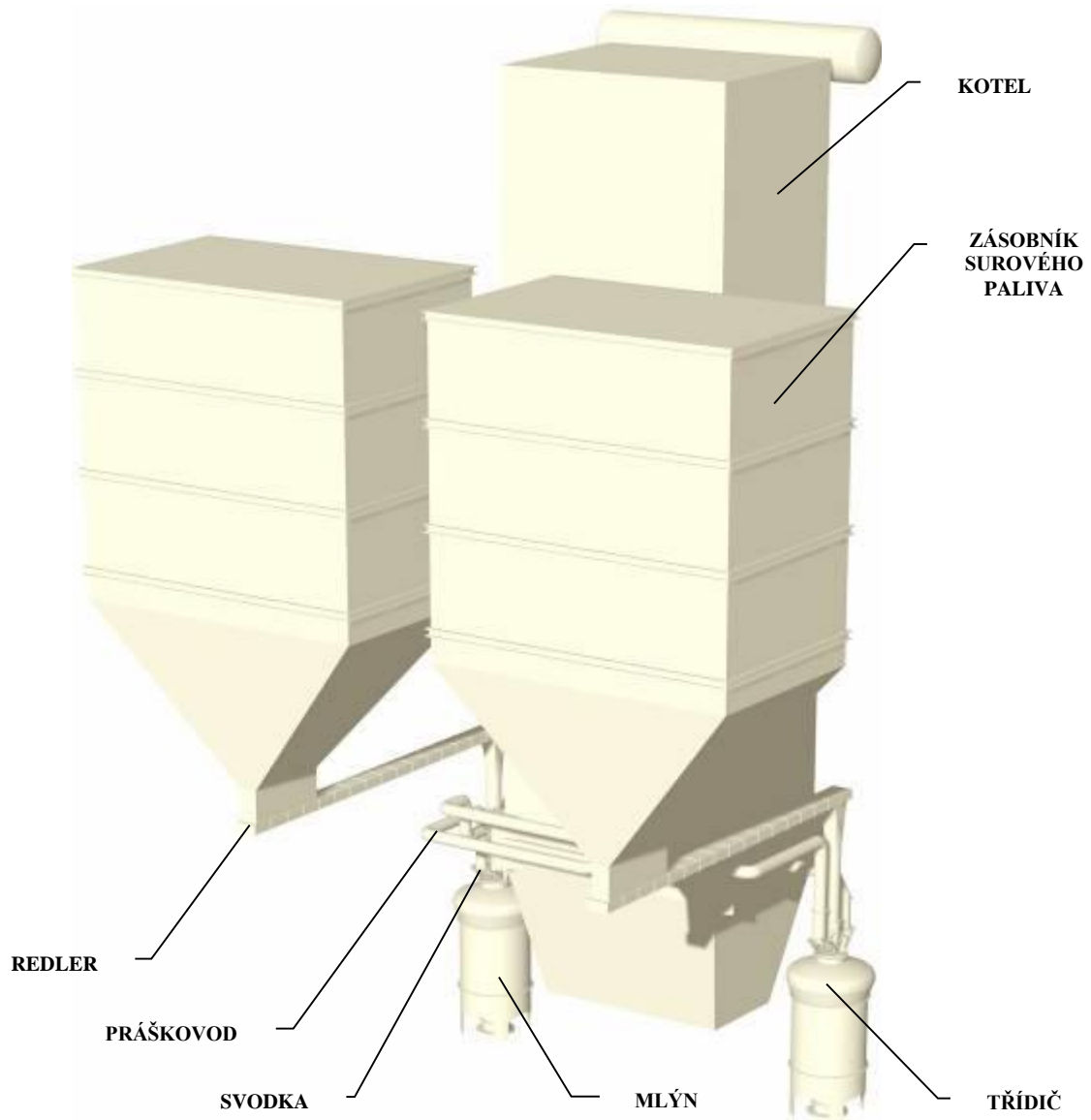
KKS	HFC10(20)AJ101
Počet	2 ks
Typ	MK 6-50
Jmenovitý mlecí výkon	6,2 t/h
Maximální mlecí výkon	7,5 t/h
Průměr mlecí dráhy	1 060 mm
Průměr koulí	500 mm
Počet koulí	6
Otáčky mlecí mísy	58 ot/min
Typ elektromotoru	F 280 M06, třífázový, asynchronní, 75 kW, 400V, 138 A

Otáčky	985 ot/min
Převodovka	ŠKODA 315/400 – 140 kW
Pracovní délka pružiny	400 – 430 mm
Elektromotor pro natáčení mlecí mísy	4 AP 909L-6, 1,1 kW
Převodovka	Unibox 34 x 100 s
Spojka	obručová 360 x 105 x 130
Spojka pro natáčení mlecí mísy	EZA 100, typ 4459, 165 W, 110 V, 1,5 A
Olejové hospodářství	mazací čerpadlo, elektromotor 3 kW, chladič oleje, příslušenství
Hydraulické zařízení	hydraulický agregát s příslušenstvím, 3 hydraulické válce
Teplota za třídičem	110 °C
Množství směsi za mlýnem	12 600 Nm ³ /h
Množství horkého vzduchu před mlýnem	10 800 Nm ³ /h
Přetlak horkého vzduchu před mlýnem	7,5 kPa

Tab. 3 Parametry ventilátoru těsnícího vzduchu

KKS	HLB50(60)AN101
Počet	2 ks
Typ	RVJ 800- 3
Výrobce	Kovodružstvo Strážov
Dopravované množství	950 Nm ³ /h
Celkový tlak	12,5 kPa
Teplota vzduchu	5 – 30 °C

Na podlaží ± 0 m jsou dva kroužkové mlýny MK 6-50 určené pro mletí, sušení a přímé foukání černouhelného prášku do kotle K3. Každý mlecí okruh sestává ze zásobníku surového uhlí, podavače paliva, palivové svodky a kroužkového mlýna s příslušenstvím (viz Obr. 21). Uhlý prášek z mlýnů je práškovým potrubím rozveden do práškových hořáků.



Obr. 21 3D schéma mlýnice a mlecích okruhů

4.2.1 Popis kroužkového mlýna

Mlýn sestává ze základových rámu, pohonu, stojanu a pláště, přítlačného zařízení, mlecích částí, třídiče a obslužných plošin. Základové rámy jsou ukotveny pomocí základových šroubů a zality betonem. Na rámech jsou upevněny desky přítlačného zařízení, nohy stojanu a pohon mlýna.

4.2.2 Pohon mlýna a natáčecí zařízení

Sestává z motoru, převodovky a elektromagnetické spojky. Slouží k natáčení mlecí mísy při údržbových činnostech na mlýně.

Plášť mlýna je tvořen skruženým plechem s eliptickým dnem. Horní část pláště je zakončena přírubou pro připojení spodní části třídiče. Plášť je opatřen vraty, která umožňují kontrolu mlecích částí.

4.2.3 Přítlačné zařízení

Přítlačné zařízení můžeme rozdělit na přítlačný soubor a napínací zařízení. Přítlačný soubor se skládá z částí, které upevňují a navzájem přitlačují mlecí části. Na převodové skříni je usazen nosič mlecí mísy. Mezi nosičem mlecí mísy a přítlačným rámem jsou uloženy mlecí části. Přítlačný rám nese šest válcových tlačných pružin. Jeho tři ramena jsou zakončena kulovými čepy s vedením zabraňujícím otáčení horního mlecího kruhu. Přítlačnou sílu pružin je možno nastavit přes napínací rám hydraulickými válci upevněnými k třídiči. Tři napínací tyče jsou o napínací rám opřeny přes axiální ložisko s kulovou plochou. Druhým koncem jsou zašroubovány do nosné desky. V každé horní nosné desce jsou též dva otvory pro průchod a zajištění stavěcích tyčí. Ve spodní desce jsou zašroubovány stavěcí tyče a oko, které je čepem spojeno se základovým rámem. Rám je zakotven v podlaží.

4.2.4 Mlecí části

Mlecí část slouží k rozemletí paliva. Tvoří je mlecí mísa, šest koulí a horní mlecí kruh. Mlecí koule o vnějším průměru 520 mm jsou duté. Po opotřebení koulí na průměr 430 mm se jedna koule vloží. Mlecí mísa je posazena na nosiči mlecí mísy. Proti otočení je zajištěna čepem a vzájemným třením s nosičem. Horní mlecí kruh je přišroubován k přítlačnému rámu. V úrovni mlecí mísy je v plášti mlýna umístěn dýzový kruh, přes který proudí horký vzduch do mlecího prostoru mlýna. Vzduch do mlýna je přiváděn dvěma otvory, které jsou v kolmém směru na osu mlýna.

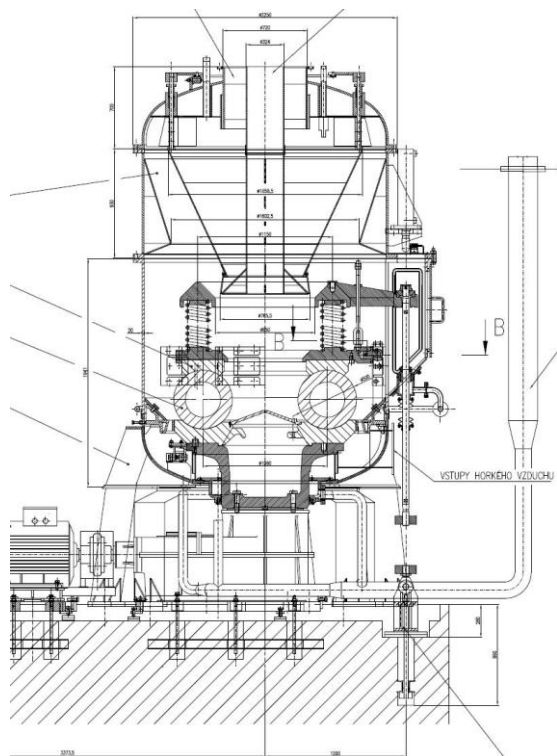
4.2.5 Třídič paliva

Třídič paliva slouží k oddělení hrubé a jemné frakce uhelného prášku. Vzhledem k omezenému prostoru kotelny je rozdělen na horní a spodní část. Spodní část třídiče je tvořena skruženým válcovým pláštěm, přírubami pro spojení s pláštěm mlýna a horní částí třídiče. Do pláště jsou soustředně vyvařeny dvě kuželové části a svodka pro vstup paliva do mlýna. Vnější kuželovou částí proudí směs z prostoru pláště mlýna do horní části třídiče.

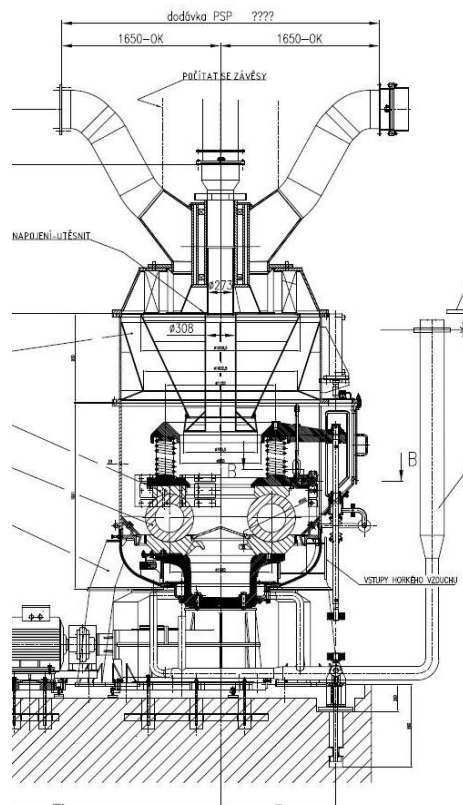
Vnitřní části třídiče se vrací hrubá frakce uhelného prášku zpět do prostoru mletí. Hrubá frakce se shromažďuje ve spodní části kuželu, který je opatřen jednoduchými klapkami. Po shromáždění určitého množství prášku se vlastní tíhou prášku klapky otevřou a pustí prášek do prostoru mletí. Plášť horní části třídiče tvoří eliptické dno, příruby pro připojení spodní

části třídiče a rozdělovacího kusu. V plášti jsou uloženy regulační klapky ovládané přes věnec šroubem a maticí.

V TOL se zvažuje výměna stávajícího statického třídiče (viz Obr. 22) za nový dynamický třídič (viz Obr. 23) a to z důvodu uvedených v kap. 3.1.5. Nový třídič by byl implantován na tělo kroužkového mlýna. Na níže uvedených obrázcích je znázorněno technické řešení náhrady statického třídiče dynamickým.



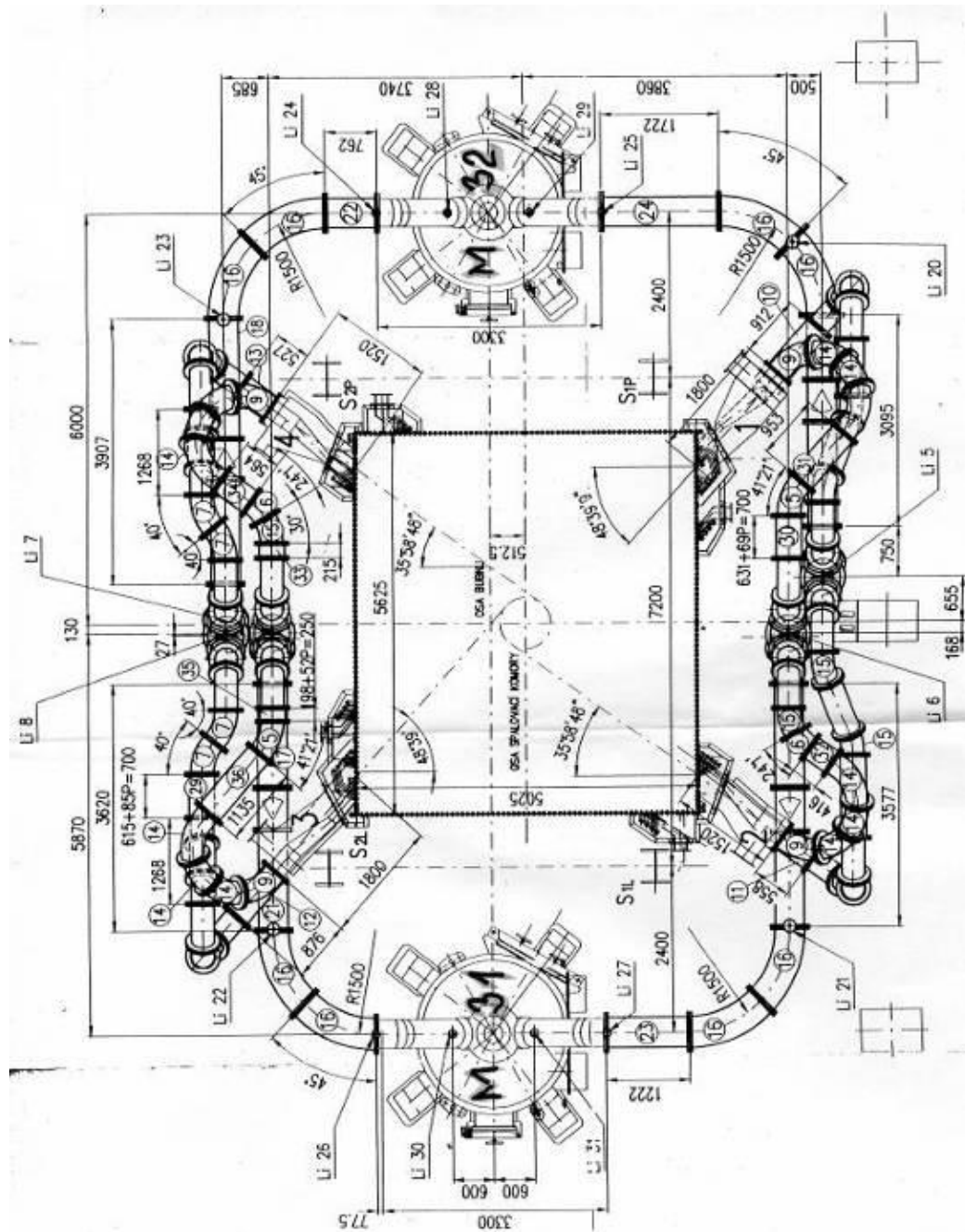
Obr. 22 Stávající desing mlýna.



Obr. 23 Desing mlýna s dynamickým třídičem.

4.2.6 Práškové potrubí paliva

Práškové potrubí paliva slouží k dopravě pomletého černého paliva do spalovací komory kotle. Za třídičem mlýna je instalován rozdělovací kus, který rozděljuje uhelný prášek z mlýna do dvou práškových potrubí. Práškové potrubí z každého mlýna jsou rozvedeny do 4 práškových hořáků (viz Obr. 24). Z mlýna M 31 na levé straně kotle do hořáků na úrovni + 9,9 m, z mlýna M 32 na pravé straně kotle do spodních hořáků na úrovni + 8,1 m. Z každého mlýna vystupují dvě prášková potrubí o vnitřním průměru 356 mm. Po průchodu plošinou (podlaží + 7 m) u přední a zadní stěny spalovací komory se každé práškové potrubí rozděljuje v kalhotovém kusu do dvou práškových potrubí o vnitřním průměru 254 mm, která jsou již zaústěna do práškových hořáků. Všechna prášková potrubí jsou vyložena čedičem. Svislé části práškového potrubí nad plošinou + 7,0 m jsou upraveny pro možnost jejich zaslepení v případě nutnosti opravy mlecího okruhu za provozu kotle.



Obr. 24 Detail stávajících práškovodu.

4.2.7 Funkce mlýna

Surové uhlí padá centrální svodkou na kuželovou desku, odkud se odstředivou silou posune pod mlecí koule, kde se mele a je dále unášeno na kraj mlecí mísy. Zde je horkým vzduchem, proudícím přes dýzový kruh strháváno a vynášeno do třídiče. V třídiči se působením odstředivých a gravitačních sil oddělují z proudící směsi hrubé částice, které padají zpět na kuželovou desku. Směs horkého vzduchu a uhelného prášku odchází z třídiče rozdělovacím kusem do práškového potrubí a hořáků. Případné cizí předměty propadávají přes dýzový kruh do odpadní komory. Jemnost mletí paliva se reguluje natáčením lopatek třídiče. U výstupního hrdla je uložen tubus, pomocí kterého lze též regulovat jemnost mletí.

Uhlí ve mlýně je sušeno horkým vzduchem o teplotě cca 290 °C odebíraným za LUVO II. Pro regulaci teploty za třídičem mlýna na požadovanou teplotu 110 °C je použit studený vzduch z prostoru LUVO I. Pro dopravu vzduchu do mlýna slouží radiální jednostranně sací mlýnský ventilátor RVK 800 s pohonem přes pružnou spojku a regulačním ústrojím na sací straně. Mlýnský ventilátor vytváří v mlecím okruhu potřebný tlak k překonání odporů k dopravě prášku a primárního vzduchu do hořáků. Pro utěsnění hřídele pohonu mlýna a průchodu tyčí napínacího ústrojí je pro mlýn instalován těsnící ventilátor RVJ 800, radiální jednostranně sací, spojený přímo s elektromotorem. Měří se a sleduje množství, teplota a tlak vzduchu před a za mlýnem.

4.2.8 Olejové hospodářství mlýnů

Olejový systém zajišťuje mazání převodovky mlýna. Olejové čerpadlo zajišťuje cirkulaci otepleného oleje z převodovky přes filtr a chladič (chlazení vodou). Teplotu oleje udržuje termostat v mezích 45 – 65 °C tím, že otevírá a uzavírá přívod chladicí vody do chladiče oleje. Dojde-li k ucpaní filtru, je možné přejetí na záložní filtr ručně z místa. Měří se a sleduje teplota a tlak oleje.

4.2.9 Hydraulické zařízení

Hydraulické zařízení se skládá ze dvou samostatných okruhů. Jedná se o okruh napínání a o okruh šoupátkového uzávěru s odpadní komorou. Tlakový olej do obou okruhů dodává hydraulický agregát. Okruh napínání slouží k předpnutí přitlačných pružin horního mlecího kruhu. Pracovní poloha přitlačného zařízení je v rozsahu stlačení pružin 400 – 430 mm. S opotřebením mlecích částí dochází k zmenšení mlecího tlaku a je třeba přestavit přitlačné zařízení.

4.2.10 Hasící zařízení mlýna

Hasící zařízení slouží k ochraně před požárem. Do pláště mlýnu jsou zaústěny přívody pro hasící vodu a inertizaci okruhu parou. V každém přívodu jsou instalovány uzavírací a regulační ventily, které lze ovládat z místa nebo dálkově z řídicího systému. Měří se a sleduje tlak páry na inertizaci.

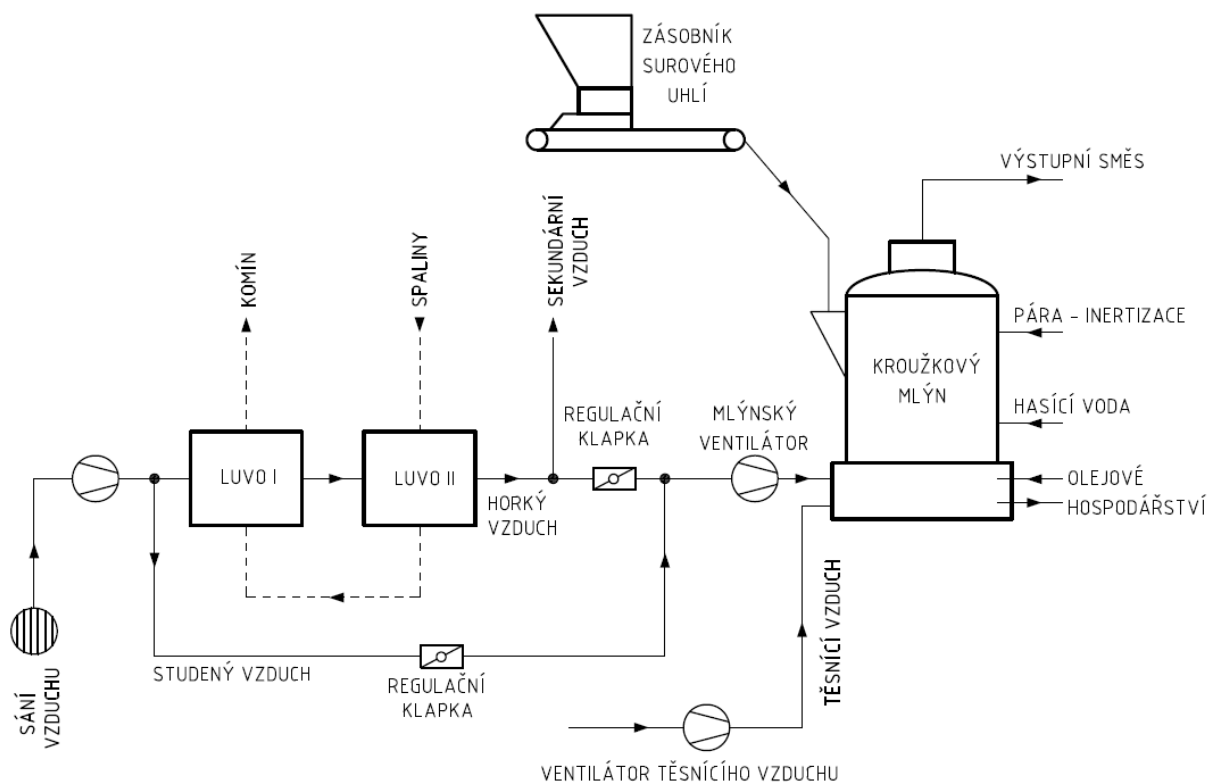
4.2.11 Zařízení proti explozi

Zařízení proti explozi slouží jako bezpečnostní prvek viz kap. 3.2.2.2. Na každém mlýně se nachází čtyři tlakové láhve s hasícím práškem, z nichž dvě jsou umístěny na stropě třídiče a dvě na plášti mlýna. Na každém mlýně jsou umístěny dva detektory exploze, jeden na stropě mlýna a druhý v boční části pláště. Detektory jsou chlazeny vodou napojenou na chladicí okruh olejových čerpadel mlýnů. Detektor exploze PD93 snímá indikaci plamene, jisker a překročení tlaku v plášti mlýna.

4.3 Tepelný výpočet mlýna

Výpočet tepelné bilance mlecího okruhu je prvním krokem před tepelným výpočtem kotle a vlastním projekčním návrhem kotle. Na tento výpočet navazuje tepelný výpočet kotle a další výpočty. Z tepelného výpočtu mlýna získá projektant první informace pro návrh spalovacího systému. Diplomová práce řeší návrh recirkulace spalin pro již existující práškový granulační

kotel a konkrétní kroužkový mlýn (viz kap. 4.1 a kap. 4.2). Výpočet je proveden pro výkon kotle 45,4 t/h. Zjednodušené schéma řešeného mlýnského okruhu je na Obr. 25.



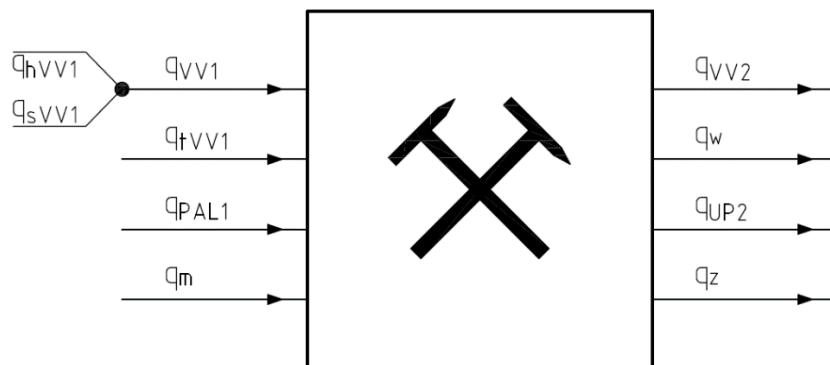
Obr. 25 Schéma mlecího okruhu bez recirkulace spalin na TOL.

Rovnice tepelné bilance mlýna bez recirkulace spalin

$$q_{VV1} + q_{tVV1} + q_{PAL1} + q_m - q_w - q_{VV2} - q_{UP2} - q_z = 0$$

Kde:

- člen q_{VV1} představuje měrné teplo směsi horkého (q_{hVV1}) a studeného vzduchu (q_{sVV1}) na vstupu do mlýna,
- člen q_{tVV1} představuje měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna,
- člen q_{PAL1} představuje měrné teplo surového paliva na vstupu do mlýna,
- člen q_m představuje měrné teplo vzniklé třením ve mlýně částečnou přeměnou měrné mlecí práce,
- člen q_w představuje měrné teplo na vypaření vody z paliva,
- člen q_{UP2} představuje měrné teplo vázané v uhelném prášku na výstupu z mlýna,
- člen q_z představuje měrné tepelné ztráty mlecího okruhu.



Obr. 26 Schéma tepelné bilance mlýna bez recirkulace spalin.

4.3.1 Vstupy použité v tepelném výpočtu mlýna

Pro tepelný výpočet mlýna a odladění modelu byly použity níže uvedené podklady:

- fyzikální vlastnosti paliva získané z laboratorních rozborů,
- požárně technické charakteristiky,
- průtoky, tlaky a teploty primárního vzduchu do mlýna,
- technické parametry mlýna Mk6-50,
- výpočet množství uhlí do mlýna korigovaný od otáček podavače a výšky vrstvy paliva,
- tepelný výpočet kotle pro provoz s a bez recirkulace spalin realizovaný společností PROTIS Ostrava Inženýring, s.r.o. Ing. Z. Jirušem autorem návrhu kotle,
- parametry vlhkého vzduchu.

Metodika pro tepelný výpočet mlýnice je použita ze zdroje [7].

V Tab. 4 jsou uvedeny všechny vstupní parametry použité ve výpočtu mlýna.

Tab. 4 Vstupní parametry pro výpočet bez recirkulace spalin.

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Výhřevnost surového paliva	Q_1^r	25,5	MJ/kg
Obsah popela v surovém palivu	A_1^r	17	%
Obsah vody v surovém palivu	W_1^r	9	%
Podíl prchavé hořlaviny	V_1^{daf}	32	%
Vstupní množství surového paliva do mlýna	m_{PAL1}	5725	kg/h
Teplota surového paliva na vstupu do mlýna	t_{PAL1}	20	°C
Tlak nasávaného vzduchu (abs.)	p_{VV0}	101325	Pa
Teplota nasávaného vzduchu	t_{VV0}	20	°C

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Relativní vlhkost nasávaného vzduchu	f_{ivv0}	0,65	-
Tlak sušícího vzduchu na vstupu do mlýna (abs.)	p_{vv1}	108284	Pa
Teplota směsi horkého a studeného vzduchu na vstupu do mlýna	t_{hvv1}	223,4	°C
Tlak těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna (abs.)	p_{tVV1}	113825	Pa
Teplota těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna	t_{tVV1}	30	°C
Zbytkový obsah vody v uhelném prášku na výstupu z mlýna	W_2	0,6	%
Objemové množství těsnícího vzduchu do mlýna	O_{tVV1}	950	Nm ³ /h
Teplota směsi na výstupu z mlýna	t_{sm2}	104,7	°C
Měrná mlecí práce	ϵ_m	15,2	kWh/t
Ztráta sdílením tepla do okolí	ξ_s	0,05	-
Tlak primární uhlé směsi za třídičem (abs.)	p_2	104020	Pa
Teplota za normálních podmínek	t_N	0	°C
Tlak za normálních podmínek	p_N	101325	Pa
Střední měrná tepelná kapacita	c_{pW1}	4,2	kJ/kg.K
Střední měrná tepelná kapacita zbytkové vody v uhelném prášku	c_{pW2}	4,2	kJ/kg.K
Průtok horkého vzduchu do mlýna	O_{VV1}	12113	Nm ³ /h
Jemnost mletí	z_{90}	33,15	μm

4.3.2 Měrné teplo sušícího vzduchu na vstupu do mlýna

Jedná se o součet měrných tepel horkého a studeného vzduchu. Dopravu potřebného množství vzduchu do mlýna zabezpečuje primární mlýnský ventilátor. Množství vzduchu je regulováno pomocí tabulkové funkce, která je nastavena při seřizování mlýnského okruhu. Celkové množství do mlýna vychází z potřebného množství vzduchu na sušení, potřebného množství dopravního vzduchu a potřebného množství primárního vzduchu. Teplota vzduchu na vstupu do mlýna je regulována polohami klapek studeného a horkého vzduchu.

Měrná vlhkost nasávaného vzduchu (z tabulek f (t_{vv0} ; f_{ivv0} ; p_{vv0}))

$$d_{VV0} = 0,009477 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{VS}$$

Hustota sušícího vzduchu (z tabulek f (t_{VV0} ; d_{VV0} ; p_{VV0}))

$$\rho_{VV1} = 1,197 \text{ kg/Nm}^3$$

Celkový hmotnostní průtok sušícího vzduchu

$$m_{VV1} = O_{VV1} \cdot \rho_{VV1} = 12113 \cdot 1,197 = 14499,26 \text{ kg/h} \quad (4-1)$$

Měrný hmotnostní průtok sušícího vzduchu

$$y_{VV1} = \frac{m_{VV1}}{m_{PAL1}} = \frac{14499,26}{5725} = 2,533 \text{ kg}_{VV}/\text{kg}_{PAL} \quad (4-2)$$

Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažené v sušícím vzduchu

$$y_{H_2OVV1} = \frac{d_{VV0} \cdot y_{VV1}}{1 + d_{VV0}} = \frac{0,009477 \cdot 2,533}{1 + 0,009477} = 0,02376 \text{ kg}_{H_2OVV}/\text{kg}_{PAL} \quad (4-3)$$

Hmotnostní podíl vodní páry obsažené v sušícím vzduchu

$$x_{H_2OVV1} = \frac{y_{H_2OVV1}}{y_{VV1}} \cdot 100 = \frac{0,02376}{2,533} = 0,938 \% \quad (4-4)$$

Střední měrná tepelná kapacita suchého sušícího vzduchu

$$\bar{c}_{pVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{VV1}^2 + 0,00011146 \cdot t_{VV1} + 0,991$$

$$\bar{c}_{pVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 223,4^2 + 0,00011146 \cdot 223,4 + 0,991 = 1,0154 \text{ J/kg} \cdot \text{K} \quad (4-5)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry obsažené v sušícím vzduchu

$$\bar{c}_{pH_2OVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{VV1}^2 + 0,00032937 \cdot t_{VV1} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2OVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 223,4^2 + 0,00032937 \cdot 223,4 + 1,829 = 1,902 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (4-6)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhkého sušícího vzduchu

$$\bar{c}_{pVV1} = \left(1 - \frac{x_{H_2OVV1}}{100}\right) \cdot \bar{c}_{pVS1} + \frac{x_{H_2OVV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2OVV1}$$

$$\bar{c}_{pVV1} = \left(1 - \frac{0,9388}{100}\right) \cdot 1,0154 + \frac{0,9388}{100} \cdot 1,902 = 1,0237 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (4-7)$$

Měrné teplo sušícího vzduchu na vstupu do mlýna

$$q_{VV1} = y_{VV1} \cdot \bar{c}_{pVV1} \cdot t_{VV1} = 2,533 \cdot 1,0237 \cdot 223,4 = 579,208 \text{ kJ/kg} \quad (4-8)$$

4.3.3 Měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna

Studený těsnící vzduch se do mlýna zavádí z toho důvodu, aby se zamezilo úniku namletého uhlénoho prášku do prostoru mlýnice. Těsnící vzduch se odebírá z prostoru kotelny, což znamená, že teplota vzduchu je víceméně stejná jako teplota venkovního vzduchu. Parametry těsnící ventilátoru jsou uvedeny v

Tab. 3. Ve výpočtu je zanedbáno množství těsnícího vzduchu, které unikne přes ucpávky.

Hustota těsnícího vzduchu (z tabulek f (t_{VV0} ; d_{VV0} ; p_{VV0}))

$$\rho_{tVV1} = 1,1522 \text{ kg/Nm}^3$$

Celkový hmotnostní průtok těsnícího vzduchu

$$m_{tVV1} = O_{tVV1} \cdot \rho_{VV1} = 950 \cdot 1,1522 = 1094,59 \text{ kg/h} \quad (4-9)$$

Měrný hmotnostní průtok těsnícího vzduchu

$$y_{tVV1} = \frac{m_{tVV1}}{m_{PAL1}} = \frac{1094,59}{5725} = 0,191 \text{ kg}_{VV}/\text{kg}_{PAL} \quad (4-10)$$

Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažené v těsnícím vzduchu

$$y_{H_2O_{tVV1}} = \frac{d_{VV0} \cdot y_{tVV1}}{1 + d_{VV0}} = \frac{0,009477 \cdot 0,191}{1 + 0,009477} = 0,001794 \text{ kg}_{H_2O_{hVV}}/\text{kg}_{PAL} \quad (4-11)$$

Hmotnostní podíl vodní páry obsažené v těsnícím vzduchu

$$x_{H_2O_{tVV1}} = \frac{y_{H_2O_{tVV1}}}{y_{tVV1}} \cdot 100 = \frac{0,001794}{0,1912} \cdot 100 = 0,938 \% \quad (4-12)$$

Střední měrná tepelná kapacita suchého těsnícího vzduchu

$$\bar{c}_{ptVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{tVV1}^2 + 0,00011146 \cdot t_{tVV1} + 0,991$$

$$\bar{c}_{ptVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 30^2 + 0,00011146 \cdot 30 + 0,991 = 0,994 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-13)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry obsažené v těsnícím vzduchu

$$\bar{c}_{pH_2OtVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{tVV1}^2 + 0,00032937 \cdot t_{tVV1} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2OtVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 30^2 + 0,00032937 \cdot 30 + 1,829 = 1,839 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-14)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhkého těsnícího vzduchu

$$\bar{c}_{ptVV1} = \left(1 - \frac{x_{H_2OtVV1}}{100}\right) \cdot \bar{c}_{ptVS1} + \frac{x_{H_2OtVV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2OtVV1}$$

$$\bar{c}_{ptVV1} = \left(1 - \frac{0,9388}{100}\right) \cdot 0,994 + \frac{0,9388}{100} \cdot 1,839 = 1,0023 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-15)$$

Měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna

$$q_{tVV1} = y_{tVV1} \cdot \bar{c}_{ptVV1} \cdot t_{tVV1} = 0,191 \cdot 1,0023 \cdot 30 = 5,749 \text{ kJ/kg} \quad (4-16)$$

4.3.4 Měrné teplo vstupního surového paliva**Střední měrná tepelná kapacita hořlaviny při teplotě paliva na vstupu do mlýna**

$$\bar{c}_{ph1} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{V_1^{daf}}{100}\right) \cdot (130 + t_{PAL1})$$

$$\bar{c}_{ph1} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{32}{100}\right) \cdot (130 + 20) = 1,0965 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-17)$$

Střední měrná tepelná kapacita popele při teplotě paliva na vstupu do mlýna

$$\bar{c}_{pA1} = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{t_{PAL1}}{1000}\right) = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{20}{1000}\right) = 0,72 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-18)$$

Obsah hořlaviny v surovém palivu

$$h_1 = 100 - A_1^r - W_1^r = 100 - 17 - 9 = 74 \% \quad (4-19)$$

Střední měrná tepelná kapacita paliva při teplotě paliva na vstupu do mlýna

$$\bar{c}_{pPAL1} = \bar{c}_{ph1} \cdot \frac{h_1}{100} + \bar{c}_{pA1} \cdot \frac{A_1^r}{100} + \bar{c}_{pW1} \cdot \frac{W_1^r}{100}$$

$$\bar{c}_{pPAL1} = 1,0965 \cdot \frac{74}{100} + 0,72 \cdot \frac{17}{100} + 4,2 \cdot \frac{9}{100} = 1,312 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad (4-20)$$

Měrné teplo paliva na vstupu do mlýna

$$q_{PAL1} = \bar{c}_{pPAL1} \cdot t_{PAL1} = 1,312 \cdot 20 = 26,236 \text{ kJ/kg} \quad (4-21)$$

4.3.5 Měrné teplo vzniklé třením ve mlýně

Při procesu mletí uhlí v kroužkovém mlýně dochází díky vzájemnému tření mezi částicemi a třením částic s mlecími elementy k částečné přeměně měrné mlecí práce na teplo.

Koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo (dle [17])

$$k_m = 0,6 \quad (4-22)$$

Měrné teplo vzniklé třením ve mlýně

$$q_m = 3,6 \cdot k_m \cdot \varepsilon_m = 3,6 \cdot 0,6 \cdot 15,2 = 32,832 \text{ kJ/kg} \quad (4-23)$$

4.3.6 Měrné teplo spotřebované na odpaření vody z paliva

Toto teplo zahrnuje teplo potřebné na ohřev vody v palivu na teplotu sytosti, její vypaření a dále teplo potřebné na přehřátí uvolněné páry z paliva na teplotu směsi.

Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažené v celkovém množství vzduchu na vstupu

$$y_{H_2OVV1} = \frac{d_{VV0} \cdot (y_{VV1} + y_{tVV1})}{1 + d_{VV0}}$$

$$y_{H_2OVV1} = \frac{0,09477 \cdot (2,533 + 0,191)}{1 + 0,09477} = 0,0256 \text{ kg}_{H_2OVV} / \text{kg}_{PAL} \quad (4-24)$$

Množství uvolněné vody z paliva při sušení

$$\Delta W = \frac{W_1^r - W_2}{100 - W_2} = \frac{9 - 0,6}{100 - 0,6} = 0,0845 \text{ kg/kg} \quad (4-25)$$

Entalpie vody obsažené v palivu na vstupu do mlýna (z tabulek f (t_{PAL1}; p₁))

$$i_{w1} = 84 \text{ kJ/kg} \quad (4-26)$$

Parciální tlak vodní páry ve směsi za mlýnem

$$p_{H_2O_2} = \frac{p_2 \cdot d_2}{0,622 - d_2} = \frac{104020 \cdot 0,0408}{0,622 - 0,0408} = 6401,5 \text{ Pa} \quad (4-27)$$

Entalpie vodní páry ve směsi za mlýnem (z tabulek f (t_{sm2}; p_{H2O2}))

$$i_{w2} = 2696,8 \text{ kJ/kg} \quad (4-28)$$

Měrné teplo potřebné pro odpaření vody z paliva

$$q_w = \left[\frac{W_1^r - W_2}{100 - W_2} \right] \cdot (i_{w2} - i_{w1}) = \left[\frac{9 - 0,6}{100 - 0,6} \right] \cdot (2696,8 - 84) = 220,8 \text{ kJ/kg} \quad (4-29)$$

4.3.7 Měrné teplo ve vzduchu za mlýnem**Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažený ve vzduchu za mlýnem**

Do výpočtu měrného tepla vzduchu není zahrnuta vodní pára uvolněná z paliva při sušení, protože je zahrnuta ve výpočtu q_w .

$$y_{H_2OVV2} = y_{H_2OVV1} \quad (4-30)$$

Skutečná měrná vlhkost vzduchu za mlýnem

$$d_2 = \frac{y_{H_2OVV1} + \Delta W}{y_{VV1} + y_{tVV1} - y_{H_2OVV1}}$$

$$d_2 = \frac{0,0256 + 0,0845}{2,533 + 0,191 - 0,0256} = 0,0408 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{VS} \quad (4-31)$$

Hmotnostní podíl vodní páry obsažené ve vzduchu za mlýnem

$$x_{H_2O_{VV2}} = \left(\frac{y_{H_2O_{VV2}}}{y_{VV1} + y_{t_{VV1}}} \right) \cdot 100$$

$$x_{H_2O_{VV2}} = \left(\frac{0,0256}{2,533 + 0,191} \right) \cdot 100 = 0,938 \% \quad (4-32)$$

Střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu ve vzduchu za mlýnem

$$\bar{c}_{p_{VS2}} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00011146 \cdot t_{sm2} + 0,991$$

$$\bar{c}_{p_{VS2}} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 104,7^2 + 0,00011146 \cdot 104,7 + 0,991 = 1,00299 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-33)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry obsažené ve vzduchu za mlýnem

$$\bar{c}_{p_{H_2O_{VV2}}} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00032937 \cdot t_{sm2} + 1,829$$

$$\bar{c}_{p_{H_2O_{VV2}}} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 104,7^2 + 0,00032937 \cdot 104,7 + 1,829 = 1,863 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-34)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu za mlýnem

$$\bar{c}_{p_{VV2}} = \left(1 - \frac{x_{H_2O_{VV2}}}{100} \right) \cdot \bar{c}_{p_{VS2}} + \frac{x_{H_2O_{VV2}}}{100} \cdot \bar{c}_{p_{H_2O_{VV2}}}$$

$$\bar{c}_{p_{VV2}} = \left(1 - \frac{0,939}{100} \right) \cdot 1,00299 + \frac{0,939}{100} \cdot 1,863 = 1,011 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-35)$$

Měrné teplo vzduchu za mlýnem

$$q_{VV2} = (y_{VV1} + y_{t_{VV1}}) \cdot \bar{c}_{p_{VV2}} \cdot t_{sm2}$$

$$q_{VV2} = (2,533 + 0,191) \cdot 1,011 \cdot 104,7 = 288,339 \text{ kJ/kg} \quad (4-36)$$

4.3.8 Měrné teplo vázané v uhelném prášku za mlýnem

Sušením paliva ve mlýně dojde k úbytku vody v palivu, což se projeví na složení uhelného prášku. Tuto změnu složení je potřeba zohlednit při výpočtu měrného tepla vázaného v uhelném prášku za mlýnem.

Obsah popela v uhelném prášku

$$A_2 = A_1^r \cdot \left(\frac{100 - W_2}{100 - W_1^r} \right) = 17 \cdot \left(\frac{100 - 0,6}{100 - 9} \right) = 18,57 \% \quad (4-37)$$

Obsah hořlaviny v uhelném prášku

$$h_2 = 100 - A_2 - W_2 = 100 - 18,57 - 0,6 = 80,83 \% \quad (4-38)$$

Střední měrná tepelná kapacita hořlaviny při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{ph2} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{V_1^{daf}}{100} \right) \cdot (130 + t_{sm2})$$

$$\bar{c}_{ph2} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{32}{100} \right) \cdot (130 + 104,7) = 1,157 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-39)$$

Střední měrná tepelná kapacita popele při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pA2} = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{t_{sm2}}{1000} \right) = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{104,7}{1000} \right) = 0,762 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-40)$$

Střední měrná tepelná kapacita uhelného prášku při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pUP2} = \bar{c}_{ph2} \cdot \frac{h_2}{100} + \bar{c}_{pA2} \cdot \frac{A_2}{100} + \bar{c}_{pW2} \cdot \frac{W_2}{100}$$

$$\bar{c}_{pUP2} = 1,157 \cdot \frac{80,83}{100} + 0,762 \cdot \frac{18,57}{100} + 4,2 \cdot \frac{0,6}{100} = 1,102 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-41)$$

Měrné teplo vázané ve spalinách za mlýnem

$$q_{UP2} = \left(\frac{100 - W_2}{100 - W_1^r} \right) \cdot \bar{c}_{pUP2} \cdot t_{sm2}$$

$$q_{UP2} = \left(\frac{100 - 0,6}{100 - 9} \right) \cdot 1,102 \cdot 104,7 = 105,615 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-42)$$

4.3.9 Tepelné ztráty mlecího okruhu

Tepelné ztráty mlecího okruhu (5 až 15 % z přivedeného tepla sušícího média přejde sdílením tepla do okolí)

$$q_z = \xi_s \cdot (q_{VV1} + q_{tVV1})$$

$$q_z = 0,05 \cdot (579,208 + 5,749) = 29,248 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-43)$$

4.3.10 Rovnice tepelné bilance mlecího okruhu

$$q_{VV1} + q_{tVV1} + q_{PAL1} + q_m = q_w + q_{VV2} + q_{UP2} + q_z$$

$$579,208 + 5,749 + 26,236 + 32,832 = 220,8 + 288,339 + 105,615 + 29,248$$

$$644,0248 \text{ kJ/kg} \cdot K \approx 644,00129 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (4-44)$$

4.3.11 Kontrola správnosti výpočtu

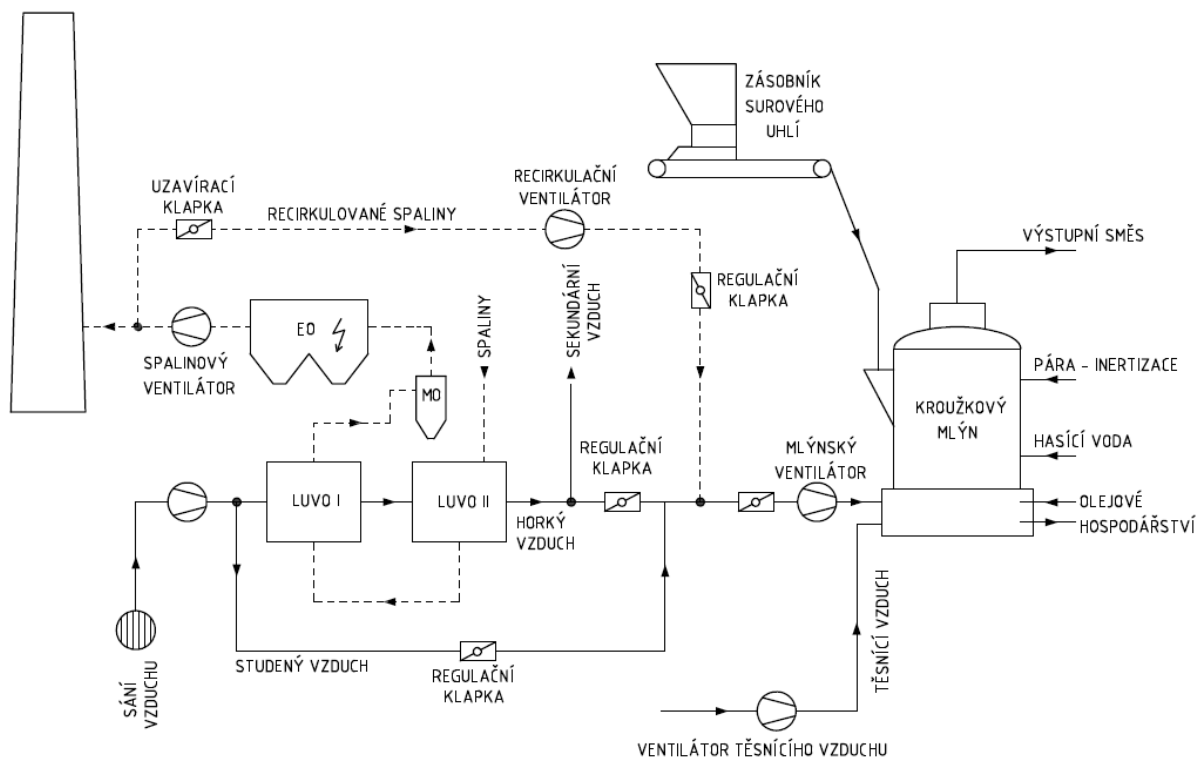
Správnost výpočtu se potvrdí, pokud teplo přivedené do mlýna je stejné jako teplo odvedené z mlýna. Tato skutečnost vychází z prvního zákona termodynamiky, který říká, že teplo se nemůže ztrácet, pouze měnit s jedné formy energie na druhou.

V rámci výpočtu mlecího okruhu bez recirkulace spalin docházelo pouze k drobným odchylkám mezi vstupními a výstupními tepley. Rovněž tepelný výpočet koreloval i s provozními daty. Optimalizovaný model výpočtu mlýna bez recirkulace spalin byl dále po drobné úpravě použit pro výpočet mlýna s recirkulací spalin.

5 VÝPOČET TEPELNÉ BILANCE MLÝNA S RECIRKULACÍ SPALIN

Tento výpočet tepelné bilance je doplněn o měrné teplo vstupujících a vystupujících spalin. V tomto případě se jedná o recirkulaci studených spalin, které se odebírají za EO a spalinovým ventilátorem o přibližné teplotě 123 °C. Výpočet je opět proveden pro výkon kotle 45,4 t/h.

Zjednodušené schéma mlýnského okruhu s recirkulací spalin je na Obr. 27. PI diagram zachycující skutečné zapojení recirkulace je uveden na výkresu č. DP-006-2015 v příloze této práce.



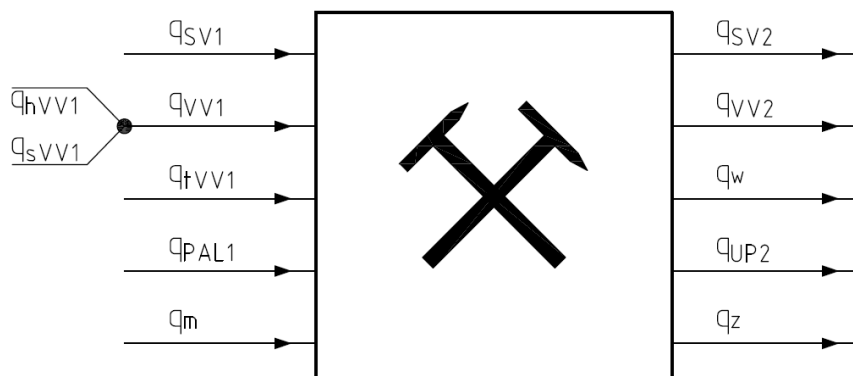
Obr. 27 Schéma mlecího okruhu s recirkulací spalin na TOL.

Rovnice tepelné bilance mlýna s recirkulací spalin

$$q_{SV1} + q_{VV1} + q_{tVV1} + q_{PAL1} + q_m - q_w - q_{SV2} - q_{VV2} - q_{UP2} - q_z = 0$$

Kde:

- člen q_{SV1} představuje měrné teplo spalin nasávaných za EO,
- člen q_{VV1} představuje měrné teplo směsi horkého (q_{hVV1}) a studeného vzduchu (q_{sVV1}) na vstupu do mlýna,
- člen q_{tVV1} představuje měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna,
- člen q_{PAL1} představuje měrné teplo surového paliva na vstupu do mlýna,
- člen q_m představuje měrné teplo vzniklé třením ve mlýně částečnou přeměnou měrné mlecí práce,
- člen q_w představuje měrné teplo na vypaření vody z paliva,
- člen q_{SV2} představuje měrné teplo obsažené ve spalinách za mlýnem,
- člen q_{UP2} představuje měrné teplo vázané v uhelném prášku na výstupu z mlýna,
- člen q_z představuje měrné tepelné ztráty mlecího okruhu.



Obr. 28 Schéma tepelné bilance mlýna s recirkulací spalin.

5.1 Vstupní hodnoty

Tab. 5 Vstupní parametry pro výpočet s recirkulací spalin.

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Výhřevnost surového paliva	Q_i^r	25,5	MJ/kg
Obsah popela v surovém palivu	A_1^r	17	%
Obsah vody v surovém palivu	W_1^r	9	%
Podíl prchavé hořlaviny	V_1^{daf}	32	%
Vstupní množství surového paliva do mlýna	m_{PAL1}	5742	kg/h
Teplota surového paliva na vstupu do mlýna	t_{PAL1}	20	°C
Tlak nasávaného vzduchu (abs.)	p_{VV0}	101325	Pa
Teplota nasávaného vzduchu	t_{VV0}	30	°C
Relativní vlhkost nasávaného vzduchu	f_{iVV0}	0,65	-
Tlak sušícího vzduchu na vstupu do mlýna (abs.)	p_{VV1}	101325	Pa
Teplota směsi horkého a studeného vzduchu na vstupu do mlýna	t_{hVV1}	271	°C
Tlak těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna (abs.)	p_{tVV1}	113825	Pa
Teplota těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna	t_{tVV1}	30	°C
Zbytkový obsah vody v uhelném prášku na výstupu z mlýna	W_2	0,6	%
Objemové množství těsnícího vzduchu do mlýna	O_{tVV1}	950	Nm ³ /h
Měrná mlecí práce	ϵ_m	15,2	kWh/t
Ztráta sdílením tepla do okolí	ξ_s	0,05	-
Tlak primární uhlé směsi za třídičem (abs.)	p_2	104020	Pa

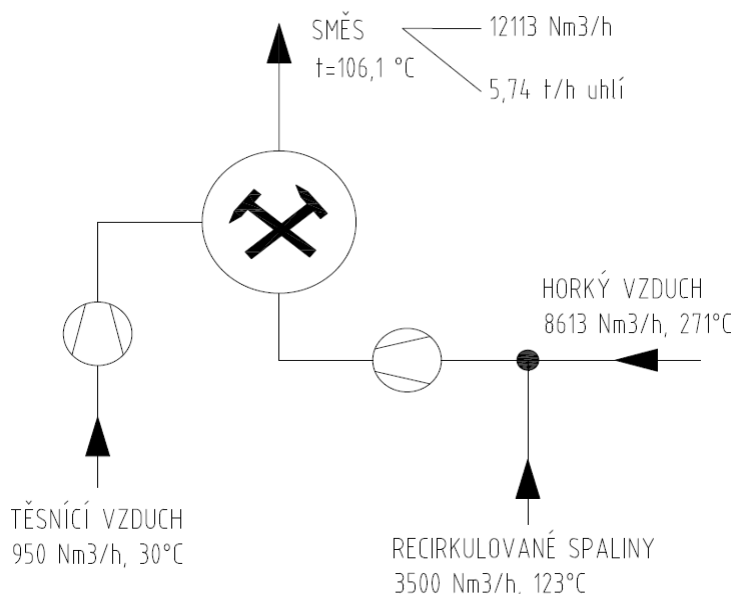
VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Teplota za normálních podmínek	t_N	0	°C
Tlak za normálních podmínek	p_N	101325	Pa
Střední měrná tepelná kapacita	c_{pW1}	4,2	kJ/kg.K
Střední měrná tepelná kapacita zbytkové vody v uhelném prášku	c_{pW2}	4,2	kJ/kg.K
Průtok horkého vzduchu do mlýna	O_{hVV1}	8613	Nm ³ /h
Jemnost mletí	z_{90}	33,15	μm
Teplota nasávaných spalin za EO	t_{SV1}	123	°C
Objemový průtok nasávaných spalin	O_{SV1}	3500	Nm ³ /h
Teplota směsi na výstupu z mlýna	t_{sm2}	106,1	°C

5.2 Rozvaha o potřebném množství vzduchu a spalin

Množství recirkulovaných spalin do mlýna se navrhuje podle toho, kolik je třeba vytěsnit vzduchu. Množství recirkulovaných spalin bylo stanoveno ve spolupráci se společností PROTIS Ostrava Inženýring, s.r.o. a to pro minimální výkon kotle na úrovni 3500 Nm³/h a pro maximální výkon kotle na úrovni 6000 Nm³/h (autor studie: Ing. Zdeněk Jiruše). Tato čísla vychází z tepelného výpočtu mlýna a ze vzduchové bilance kotle. Optimální množství odebíraných spalin pro recirkulaci by mělo být cca 4 – 7 % vyprodukovaných spalin v kotli.

Při minimálním výkonu kotle je v provozu jen spodní patro hořáků, pro které je potřebný průtok horkého vzduchu na úrovni 12 113 Nm³/h. Při tomto výkonu kotle se počítá se zavedením spalin na úrovni 3500 Nm³/h. Přivedením recirkulovaných spalin se průtok horkého vzduchu sníží o 3500 Nm³/h, tedy na hodnotu 8613 Nm³/h.

Na Obr. 29 je znázorněno schéma bilance vzduchu pro spodní patro hořáků.



Obr. 29 Schéma bilance vzduchů pro spodní patro hořáků

5.3 Výpočet složení spalin

Minimální množství kyslíku pro spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2}^{MIN} = 22,39 \cdot \left(\frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right)$$

$$V_{O_2}^{MIN} = 22,39 \cdot \left(\frac{0,654}{12,01} + \frac{0,038}{4,032} + \frac{0,005}{32,06} - \frac{0,034}{32} \right) = 1,409 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-1)$$

Minimální množství suchého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$V_{VS}^{MIN} = \frac{V_{O_2}^{MIN}}{0,21} = \frac{1,409}{0,21} = 6,73 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-2)$$

Množství suchého vzduchu s uvážením přebytku vzduchu $\alpha = 1,3$

$$V_{VS}^{\alpha} = V_{VS}^{MIN} \cdot \alpha = 6,73 \cdot 1,3 = 8,749 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-3)$$

Množství vlhkého vzduchu

$$V_{H_2O} = \varphi \cdot \frac{p_x}{p_c - p_x} \quad (5-4)$$

Z tabulek se určí hodnota $p_x/(p_c - p_x) = 0,034$, potom

$$V_{H_2O} = 0,65 \cdot 0,034 = 0,0221$$

$$f = 1 + V_{H_2O} = 1 + 0,0221 = 1,0221 \quad (5-5)$$

Minimální množství vlhkého vzduchu pro spálení 1 kg paliva

$$V_{VV}^{MIN} = V_{VS}^{MIN} \cdot f = 6,73 \cdot 1,01221 = 6,878 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-6)$$

Množství vlhkého vzduchu s uvážením přebytku vzduchu $\alpha = 1,3$

$$V_{VV}^{\alpha} = V_{VV}^{MIN} \cdot \alpha = 6,878 \cdot 1,3 = 8,942 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-7)$$

Minimální množství složek suchých spalinObjem CO₂:

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{VS}^{MIN}$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,654 + 0,0003 \cdot 6,73 = 1,214 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-8)$$

Objem SO₂:

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,005 = 0,003413 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-9)$$

Objem N₂:

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7805 \cdot V_{VS}^{MIN}$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,01 + 0,7805 \cdot 6,73 = 5,259 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-10)$$

Objem Ar:

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{VS}^{MIN} = 0,0092 \cdot 6,73 = 0,0619 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-11)$$

Minimální množství suchých spalin

$$V_{SS}^{MIN} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar}$$

$$V_{SS}^{MIN} = 1,214 + 0,003413 + 5,259 + 0,0619 = 6,539 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-12)$$

Množství suchých spalin s uvážením přebytku vzduchu

$$V_{SS}^{dV} = (\alpha - 1) \cdot V_{VV}^{MIN} = (1,3 - 1) \cdot 6,878 = 2,063 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-13)$$

Přírůstky objemu spalin jednotlivých složek spalin

$$V_{N_2}^{dV} = V_{SS}^{dV} \cdot x_{N_2} = 2,063 \cdot 0,7805 = 1,61 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-14)$$

$$V_{O_2}^{dV} = V_{SS}^{dV} \cdot x_{O_2} = 2,063 \cdot 0,2095 = 0,432 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-15)$$

$$V_{Ar}^{dV} = V_{SS}^{dV} \cdot x_{Ar} = 2,063 \cdot 0,0092 = 0,0189 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-16)$$

$$V_{CO_2}^{dV} = V_{SS}^{dV} \cdot x_{CO_2} = 2,063 \cdot 0,0004 = 0,0008253 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-17)$$

Objemy složek suchých spalin při uvážení přebytku vzduchu

$$V_{CO_2}^{\alpha} = V_{CO_2} + V_{CO_2}^{dV} = 1,214 + 0,0008253 = 1,215 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-18)$$

$$V_{O_2}^{\alpha} = V_{O_2}^{dV} = 0,432 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-19)$$

$$V_{SO_2}^{\alpha} = V_{SO_2} = 0,00341 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-20)$$

$$V_{N_2}^{\alpha} = V_{N_2} + V_{N_2}^{dV} = 5,259 + 1,61 = 6,87 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-21)$$

$$V_{Ar}^{\alpha} = V_{Ar} + V_{Ar}^{dV} = 0,0619 + 0,0189 = 0,081 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-22)$$

Skutečné množství suchých spalin i s přebytkem vzduchu

$$V_{SS}^{\alpha} = V_{CO_2}^{\alpha} + V_{O_2}^{\alpha} + V_{SO_2}^{\alpha} + V_{N_2}^{\alpha} + V_{Ar}^{\alpha}$$

$$V_{SS}^{\alpha} = 1,215 + 0,432 + 0,00341 + 6,87 + 0,081 = 8,602 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-23)$$

Množství vlhkých spalin s uvážením přebytku vzduchu

$$V_{H_2O}^{\alpha} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{H_2^r}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{W^r}{18,016} + (f - 1) \cdot V_{SV}^{\alpha}$$

$$V_{H_2O}^{\alpha} = \frac{44,8}{100} \cdot \frac{3,8}{4,032} + \frac{22,4}{100} \cdot \frac{9}{18,016} + (1,0221 - 1) \cdot 8,749 = 0,727 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-24)$$

Celkový objem spalin s uvážením přebytku vzduchu

$$V_{SS,c}^{\alpha} = V_{SS}^{\alpha} + V_{H_2O}^{\alpha} = 8,602 + 0,727 = 9,329 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (5-25)$$

Procentuální zastoupení složek vlhkých spalin

$$\omega_{CO_2,SV1}^{\alpha} = \frac{V_{CO_2}^{\alpha}}{V_{SS,c}^{\alpha}} = \frac{1,215}{9,329} = 0,13023 = 13,023 \% \quad (5-26)$$

$$\omega_{SO_2,SV1}^{\alpha} = \frac{V_{SO_2}^{\alpha}}{V_{SS,c}^{\alpha}} = \frac{0,00341}{9,329} = 0,000365 = 0,0365 \% \quad (5-27)$$

$$\omega_{N_2SV1} = \frac{V_{N_2}^\alpha}{V_{SS,c}^\alpha} = \frac{6,87}{9,329} = 0,73641 = 73,641 \% \quad (5-28)$$

$$\omega_{ArSV1} = \frac{V_{Ar}^\alpha}{V_{SS,c}^\alpha} = \frac{0,0809}{9,329} = 0,00867 = 0,867 \% \quad (5-29)$$

$$\omega_{O_2SV1} = \frac{V_{O_2}^\alpha}{V_{SS,c}^\alpha} = \frac{0,432}{9,329} = 0,04633 = 4,633 \% \quad (5-30)$$

$$\omega_{H_2OSV1} = \frac{V_{H_2O}^\alpha}{V_{SS,c}^\alpha} = \frac{0,727}{9,329} = 0,0779 = 7,797 \% \quad (5-31)$$

Hustota spalin při 0 °C a 101,3 kPa

$$\rho_{SV0} = (\omega_{CO_2SV1} \cdot \rho_{CO_2SV1} + \omega_{SO_2SV1} \cdot \rho_{SO_2SV1} + \omega_{N_2SV1} \cdot \rho_{N_2SV1} + \omega_{ArSV1} \cdot \rho_{ArSV1} + \omega_{H_2OSV1} \cdot \rho_{H_2OSV1} + \omega_{O_2SV1} \cdot \rho_{O_2SV1})$$

$$\rho_{SV0} = (0,13023 \cdot 1,976 + 0,000365 \cdot 2,926 + 0,73641 \cdot 1,25 + 0,00867 \cdot 1,783 + 0,0779 \cdot 0,804 + 0,04633 \cdot 1,4289) = 1,323 \text{ kg/m}_n^3 \quad (5-32)$$

Hustota spalin při skutečných podmínkách

$$\rho_{SV1} = \rho_{SV0} \cdot \frac{273}{(273 + t_{SV1})} \cdot \frac{p_{rec}}{0,101325}$$

$$\rho_{SV1} = 1,323 \cdot \frac{273}{(273 + 123)} \cdot \frac{0,107325}{0,101325} = 0,86 \text{ kg/m}_n^3 \quad (5-33)$$

5.4 Měrné teplo nasávaných spalin

Hmotnostní průtok nasávaných spalin

$$m_{SV1} = O_{SV1} \cdot \rho_{SV1} = 3500 \cdot 0,86 = 3010 \text{ kg/h} \quad (5-34)$$

Měrný hmotnostní průtok nasávaných spalin

$$y_{SV1} = \frac{m_{SV1}}{m_{PAL1}} = \frac{3010}{5742} = 0,524 \text{ kg/kg} \quad (5-35)$$

Měrný hmotnostní tok vodní páry obsažené ve spalinách

$$y_{H_2OSV1} = \frac{\rho_{H_2OSV1} \cdot \frac{\omega_{H_2OSV1}}{100} \cdot O_{SV1}}{m_{PAL1}} = \frac{0,804 \cdot \frac{7,797}{100} \cdot 3500}{5742} = 0,0382 \text{ kg/kg} \quad (5-36)$$

Hmotnostní podíl CO₂ v nasávaných spalinách

$$x_{CO_2SV1} = \frac{\rho_{CO_2SV1} \cdot \frac{\omega_{CO_2SV1}}{100} \cdot O_{SV1}}{m_{SV1}} = \frac{1,976 \cdot \frac{13,023}{100} \cdot 3500}{3010} = 29,923 \text{ kg/kg} \quad (5-37)$$

Hmotnostní podíl SO₂ v nasávaných spalinách

$$x_{SO_2SV1} = \frac{\rho_{SO_2SV1} \cdot \frac{\omega_{SO_2SV1}}{100} \cdot O_{SV1}}{m_{SV1}} = \frac{2,926 \cdot \frac{0,0365}{100} \cdot 3500}{3010} = 0,124 \text{ kg/kg} \quad (5-38)$$

Hmotnostní podíl N₂ v nasávaných spalinách

$$x_{N_2SV1} = \frac{\rho_{N_2SV1} \cdot \frac{\omega_{N_2SV1}}{100} \cdot O_{SV1}}{m_{SV1}} = \frac{1,25 \cdot \frac{73,641}{100} \cdot 3500}{3010} = 107,036 \text{ kg/kg} \quad (5-39)$$

Hmotnostní podíl O₂ v nasávaných spalinách

$$x_{O_2SV1} = \frac{\rho_{O_2SV1} \cdot \frac{\omega_{O_2SV1}}{100} \cdot O_{SV1}}{m_{SV1}} = \frac{1,4289 \cdot \frac{4,633}{100} \cdot 3500}{3010} = 7,698 \text{ kg/kg} \quad (5-40)$$

Hmotnostní podíl vodní páry v nasávaných spalinách

$$x_{H_2OSV1} = \frac{\rho_{H_2OSV1} \cdot \frac{\omega_{H_2OSV1}}{100} \cdot O_{SV1}}{m_{SV1}} = \frac{0,804 \cdot \frac{7,79}{100} \cdot 3500}{3010} = 7,289 \text{ kg/kg} \quad (5-41)$$

Střední měrná tepelná kapacita CO₂ (stanovená mezi teplotami 0 °C a t_{SV1})

$$\bar{c}_{pCO_2SV1} = -8 \cdot 10^{-8} \cdot t_{SV1}^2 + 0,00035634 \cdot t_{SV1} + 0,841$$

$$\bar{c}_{pCO_2SV1} = -8 \cdot 10^{-8} \cdot 123^2 + 0,00035634 \cdot 123 + 0,841 = 0,884 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-42)$$

Střední měrná tepelná kapacita SO₂

$$\bar{c}_{pSO_2SV1} = -1 \cdot 10^{-7} \cdot t_{SV1}^2 + 0,00028124 \cdot t_{SV1} + 0,607$$

$$\bar{c}_{pSO_2SV1} = -1 \cdot 10^{-7} \cdot 123^2 + 0,00028124 \cdot 123 + 0,607 = 0,640 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-43)$$

Střední měrná tepelná kapacita N₂

$$\bar{c}_{pN_2SV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{SV1}^2 + 0,0001092 \cdot t_{SV1} + 1,025$$

$$\bar{c}_{pN_2SV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 123^2 + 0,0001092 \cdot 123 + 1,025 = 1,037 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-44)$$

Střední měrná tepelná kapacita O₂

$$\bar{c}_{pO_2SV1} = -3 \cdot 10^{-8} \cdot t_{SV1}^2 + 0,00014684 \cdot t_{SV1} + 0,91$$

$$\bar{c}_{pO_2SV1} = -3 \cdot 10^{-8} \cdot 123^2 + 0,00014684 \cdot 123 + 0,91 = 0,928 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-45)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry

$$\bar{c}_{pH_2OSV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{SV1}^2 + 0,00032937 \cdot t_{SV1} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2OSV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 123^2 + 0,00032937 \cdot 123 + 1,829 = 1,869 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-46)$$

Střední měrná tepelná kapacita nasávaných sušících spalin

$$\bar{c}_{pSV1} = \frac{x_{CO_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pCO_2SV1} + \frac{x_{SO_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pSO_2SV1} + \frac{x_{N_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pN_2SV1} + \frac{x_{O_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pO_2SV1} + \frac{x_{H_2OSV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2OSV1}$$

$$\bar{c}_{pSV1} = \frac{29,923}{100} \cdot 0,884 + \frac{0,124}{100} \cdot 0,640 + \frac{107,036}{100} \cdot 1,0371 + \frac{7,698}{100} \cdot 0,928 + \frac{7,289}{100} \cdot 1,869 = 1,583 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-47)$$

Měrné teplo nasávaných sušících spalin

$$q_{SV1} = y_{SV1} \cdot \bar{c}_{pSV1} \cdot t_{SV1} = 0,542 \cdot 1,583 \cdot 123 = 102,084 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-48)$$

5.5 Měrné teplo sušícího vzduchu na vstupu do mlýna

Měrná vlhkost nasávaného vzduchu (z tabulek f (t_{VVO}; f_{ivvo}; p_{vvo}))

$$d_{VVO} = 0,0174 \text{ kg}_{H_2O}/\text{kg}_{VS}$$

Hustota sušícího vzduchu (z tabulek f (t_{VVO}; d_{vvo}; p_{vvo}))

$$\rho_{VV1} = 1,1522 \text{ kg}/\text{Nm}^3$$

Celkový hmotnostní průtok sušícího vzduchu

$$m_{VV1} = O_{VV1} \cdot \rho_{VV1} = 8610 \cdot 1,1522 = 9920,44 \text{ kg}/\text{h} \quad (5-49)$$

Měrný hmotnostní průtok sušícího vzduchu

$$y_{VV1} = \frac{m_{VV1}}{m_{PAL1}} = \frac{9920,44}{5742} = 1,728 \text{ kg}_{VV}/\text{kg}_{PAL} \quad (5-50)$$

Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažené v sušícím vzduchu

$$y_{H_2OVV1} = \frac{d_{VVO} \cdot y_{VV1}}{1 + d_{VVO}} = \frac{0,0174 \cdot 1,728}{1 + 0,0174} = 0,0296 \text{ kg}_{H_2OVV}/\text{kg}_{PAL} \quad (5-51)$$

Hmotnostní podíl vodní páry obsažené v sušícím vzduchu

$$x_{H_2OVV1} = \frac{y_{H_2OVV1}}{y_{VV1}} \cdot 100 = \frac{0,0296}{1,728} = 1,713 \% \quad (5-52)$$

Střední měrná tepelná kapacita suchého sušícího vzduchu

$$\bar{c}_{phVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{VV1}^2 + 0,00011146 \cdot t_{VV1} + 0,991$$

$$\bar{c}_{phVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 271^2 + 0,00011146 \cdot 271 + 0,991 = 1,0205 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K} \quad (5-53)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry obsažené v sušícím vzduchu

$$\bar{c}_{pH_2OVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{VV1}^2 + 0,00032937 \cdot t_{VV1} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2O_{hVV1}} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 271^2 + 0,00032937 \cdot 271 + 1,829 = 1,918 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-54)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhké sušícího vzduchu

$$\bar{c}_{pVV1} = \left(1 - \frac{x_{H_2O_{VV1}}}{100}\right) \cdot \bar{c}_{pVS1} + \frac{x_{H_2O_{VV1}}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2O_{VV1}}$$

$$\bar{c}_{pVV1} = \left(1 - \frac{1,713}{100}\right) \cdot 1,0205 + \frac{1,713}{100} \cdot 1,918 = 1,036 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-55)$$

Měrné teplo sušícího vzduchu na vstupu do mlýna

$$q_{VV1} = y_{VV1} \cdot \bar{c}_{pVV1} \cdot t_{VV1} = 1,728 \cdot 1,036 \cdot 271 = 484,98 \text{ kJ/kg} \quad (5-56)$$

5.6 Měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna

Hustota těsnícího vzduchu (z tabulek f (t_{tVV0} ; d_{VV0} ; p_{VV0}))

$$\rho_{tVV1} = 1,1522 \text{ kg/Nm}^3$$

Celkový hmotnostní průtok těsnícího vzduchu

$$m_{tVV1} = O_{tVV1} \cdot \rho_{tVV1} = 950 \cdot 1,1522 = 1094,59 \text{ kg/h} \quad (5-57)$$

Měrný hmotnostní průtok těsnícího vzduchu

$$y_{tVV1} = \frac{m_{tVV1}}{m_{PAL1}} = \frac{1094,59}{5742} = 0,191 \text{ kg}_{VV}/\text{kg}_{PAL} \quad (5-58)$$

Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažené v těsnícím vzduchu

$$y_{H_2O_{tVV1}} = \frac{d_{VV0} \cdot y_{tVV1}}{1 + d_{VV0}} = \frac{0,0174 \cdot 0,191}{1 + 0,0174} = 0,0033 \text{ kg}_{H_2O_{hVV}}/\text{kg}_{PAL} \quad (5-59)$$

Hmotnostní podíl vodní páry obsažené v těsnícím vzduchu

$$x_{H_2O_{tVV1}} = \frac{y_{H_2O_{tVV1}}}{y_{tVV1}} \cdot 100 = \frac{0,0033}{0,191} = 1,713 \% \quad (5-60)$$

Střední měrná tepelná kapacita suchého těsnícího vzduchu

$$\bar{c}_{ptVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{tVV1}^2 + 0,00011146 \cdot t_{tVV1} + 0,991$$

$$\bar{c}_{ptVS1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 30^2 + 0,00011146 \cdot 30 + 0,991 = 0,994 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-61)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry obsažené v těsnícím vzduchu

$$\bar{c}_{pH_2OVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{tVV1}^2 + 0,00032937 \cdot t_{tVV1} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2OVV1} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 30^2 + 0,00032937 \cdot 30 + 1,829 = 1,839 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-62)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhkého těsnícího vzduchu

$$\bar{c}_{ptVV1} = \left(1 - \frac{x_{H_2O tVV1}}{100}\right) \cdot \bar{c}_{ptVS1} + \frac{x_{H_2O tVV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2O tVV1}$$

$$\bar{c}_{ptVV1} = \left(1 - \frac{1,713}{100}\right) \cdot 0,994 + \frac{1,713}{100} \cdot 1,839 = 1,0088 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-63)$$

Měrné teplo těsnícího vzduchu na vstupu do mlýna

$$q_{tVV1} = y_{tVV1} \cdot \bar{c}_{ptVV1} \cdot t_{tVV1} = 0,191 \cdot 1,0088 \cdot 30 = 5,769 \text{ kJ/kg} \quad (5-64)$$

5.7 Měrné teplo vstupního surového paliva**Střední měrná tepelná kapacita hořlaviny při teplotě paliva na vstupu do mlýna**

$$\bar{c}_{ph1} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{V_1^{daf}}{100}\right) \cdot (130 + t_{PAL1})$$

$$\bar{c}_{ph1} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{32}{100}\right) \cdot (130 + 20) = 1,0965 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-65)$$

Střední měrná tepelná kapacita popele při teplotě paliva na vstupu do mlýna

$$\bar{c}_{pA1} = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{t_{PAL1}}{1000}\right) = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{20}{1000}\right) = 0,72 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-66)$$

Obsah hořlaviny v surovém palivu

$$h_1 = 100 - A_1^r - W_1^r = 100 - 17 - 9 = 74 \% \quad (5-67)$$

Střední měrná tepelná kapacita paliva při teplotě paliva na vstupu do mlýna

$$\begin{aligned} \bar{c}_{pPAL1} &= \bar{c}_{ph1} \cdot \frac{h_1}{100} + \bar{c}_{pA1} \cdot \frac{A_1^r}{100} + \bar{c}_{pW1} \cdot \frac{W_1^r}{100} \\ \bar{c}_{pPAL1} &= 1,0965 \cdot \frac{74}{100} + 0,72 \cdot \frac{17}{100} + 4,2 \cdot \frac{9}{100} = 1,312 \text{ kJ/kg} \cdot K \end{aligned} \quad (5-68)$$

Měrné teplo paliva na vstupu do mlýna

$$q_{PAL1} = \bar{c}_{pPAL1} \cdot t_{PAL1} = 1,312 \cdot 20 = 26,236 \text{ kJ/kg} \quad (5-69)$$

5.8 Měrné teplo vzniklé třením ve mlýně**Koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo (dle [17])**

$$k_m = 0,6 \quad (5-70)$$

Měrné teplo vzniklé třením ve mlýně

$$q_m = 3,6 \cdot k_m \cdot \varepsilon_m = 3,6 \cdot 0,6 \cdot 15,2 = 32,832 \text{ kJ/kg} \quad (5-71)$$

5.9 Měrné teplo spotřebované na odpaření vody paliva**Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažené v celkovém množství vzduchu na vstupu**

$$\begin{aligned} y_{H_2OVV1} &= \frac{d_{VV0} \cdot (y_{VV1} + y_{tVV1})}{1 + d_{VV0}} \\ y_{H_2OVV1} &= \frac{0,0174 \cdot (1,728 + 1,191)}{1 + 0,0174} = 0,0329 \text{ kg}_{H_2OVV} / \text{kg}_{PAL} \end{aligned} \quad (5-72)$$

Skutečná měrná vlhkost vzduchu za mlýnem

$$d_2 = \frac{y_{H_2OSV1} + y_{H_2OVV1} + \Delta W}{y_{SV1} + y_{VV1} + y_{tVV1} - y_{H_2OSV1} - y_{H_2OVV1}}$$

$$d_2 = \frac{0,0474 + 0,0329 + 0,0845}{0,806 + 1,728 + 0,191 - 0,0474 - 0,0329} = 0,0623 \text{ kg/kg} \quad (5-73)$$

Množství uvolněné vody z paliva při sušení

$$\Delta W = \frac{W_1^r - W_2}{100 - W_2} = \frac{9 - 0,6}{100 - 0,6} = 0,0845 \text{ kg/kg} \quad (5-74)$$

Entalpie vody obsažené v palivu na vstupu do mlýna (z tabulek f (t_{PAL1} ; p_1))

$$i_{w1} = 84 \text{ kJ/kg} \quad (5-75)$$

Parciální tlak vodní páry ve směsi za mlýnem

$$p_{H_2O_2} = \frac{p_2 \cdot d_2}{0,622 - d_2} = \frac{101325 \cdot 0,0623}{0,622 - 0,0623} = 9469,6 \text{ Pa} \quad (5-76)$$

Entalpie vodní páry ve směsi za mlýnem (z tabulek f (t_{sm2} ; $p_{H_2O_2}$))

$$i_{w2} = 2699,1 \text{ kJ/kg} \quad (5-77)$$

Měrné teplo potřebné pro odpaření vody z paliva

$$q_w = \left[\frac{W_1^r - W_2}{100 - W_2} \right] \cdot (i_{w2} - i_{w1}) = \left[\frac{9 - 0,6}{100 - 0,6} \right] \cdot (2699,1 - 84) = 220,994 \text{ kJ/kg} \quad (5-78)$$

5.10 Měrné teplo vázané ve spalinách za mlýnem

Střední měrná tepelná kapacita CO₂ při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pCO_2SV2} = -8 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00035634 \cdot t_{sm2} + 0,841$$

$$\bar{c}_{pCO_2SV2} = -8 \cdot 10^{-8} \cdot 106,1^2 + 0,00035634 \cdot 106,1 + 0,841 = 0,878 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-79)$$

Střední měrná tepelná kapacita SO₂ při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pSO_2SV2} = -1 \cdot 10^{-7} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00028124 \cdot t_{sm2} + 0,607$$

$$\bar{c}_{pSO_2SV2} = -1 \cdot 10^{-7} \cdot 106,1^2 + 0,00028124 \cdot 106,1 + 0,607 = 0,636 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-80)$$

Střední měrná tepelná kapacita N₂ při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pN_2SV2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,0001092 \cdot t_{sm2} + 1,025$$

$$\bar{c}_{pN_2SV2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 106,1^2 + 0,0001092 \cdot 106,1 + 1,025 = 1,036 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-81)$$

Střední měrná tepelná kapacita O₂ při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pO_2SV2} = -3 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00014684 \cdot t_{sm2} + 0,91$$

$$\bar{c}_{pO_2SV2} = -3 \cdot 10^{-8} \cdot 106,1^2 + 0,00014684 \cdot 106,1 + 0,91 = 0,925 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-82)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pH_2OSV2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00032937 \cdot t_{sm2} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2OSV2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 106,1^2 + 0,00032937 \cdot 106,1 + 1,829 = 1,864 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-83)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhkých spalin při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pSV2} = \frac{x_{CO_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pCO_2SV2} + \frac{x_{SO_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pSO_2SV2} + \frac{x_{N_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pN_2SV2} + \frac{x_{O_2SV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pO_2SV2} + \frac{x_{H_2OSV1}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2OSV2}$$

$$\bar{c}_{pSV2} = \frac{29,923}{100} \cdot 0,878 + \frac{0,124}{100} \cdot 0,636 + \frac{107,036}{100} \cdot 1,036 + \frac{7,698}{100} \cdot 0,926 + \frac{7,289}{100} \cdot 1,864 = 1,579 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-84)$$

Měrné teplo vázané ve spalinách za mlýnem

$$q_{SV2} = y_{SV1} \cdot \bar{c}_{pSV2} \cdot t_{sm2} = 0,542 \cdot 1,579 \cdot 106,1 = 87,836 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-85)$$

5.11 Měrné teplo ve vzduchu za mlýnem**Měrný hmotnostní průtok vodní páry obsažený ve vzduchu za mlýnem**

Do výpočtu měrného tepla vzduchu není zahrnuta vodní pára uvolněná z paliva při sušení, protože je zahrnuta ve výpočtu q_w .

$$y_{H_2OVV2} = y_{H_2OVV1} \quad (5-86)$$

Hmotnostní podíl vodní páry obsažené ve vzduchu za mlýnem

$$x_{H_2OVV2} = \left(\frac{y_{H_2OVV2}}{y_{VV1} + y_{tVV1}} \right) \cdot 100$$

$$x_{H_2OVV2} = \left(\frac{0,0191}{1,728 + 0,191} \right) \cdot 100 = 1,713 \% \quad (5-87)$$

Střední měrná tepelná kapacita suchého vzduchu ve vzduchu za mlýnem

$$\bar{c}_{pVS2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00011146 \cdot t_{sm2} + 0,991$$

$$\bar{c}_{pVS2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 106,1^2 + 0,00011146 \cdot 106,1 + 0,991 = 1,003 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-88)$$

Střední měrná tepelná kapacita vodní páry obsažené ve vzduchu za mlýnem

$$\bar{c}_{pH_2OVV2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot t_{sm2}^2 + 0,00032937 \cdot t_{sm2} + 1,829$$

$$\bar{c}_{pH_2OVV2} = -1 \cdot 10^{-8} \cdot 106,1^2 + 0,00032937 \cdot 106,1 + 1,829 = 1,864 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-89)$$

Střední měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu za mlýnem

$$\bar{c}_{pVV2} = \left(1 - \frac{x_{H_2OVV2}}{100} \right) \cdot \bar{c}_{pVS2} + \frac{x_{H_2OVV2}}{100} \cdot \bar{c}_{pH_2OVV2}$$

$$\bar{c}_{pVV2} = \left(1 - \frac{1,713}{100} \right) \cdot 1,003 + \frac{1,713}{100} \cdot 1,864 = 1,018 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-90)$$

Měrné teplo vzduchu za mlýnem

$$q_{VV2} = (y_{VV1} + y_{tVV1}) \cdot \bar{c}_{pVV2} \cdot t_{sm2}$$

$$q_{VV2} = (1,728 + 0,191) \cdot 1,018 \cdot 106,1 = 207,17 \text{ kJ/kg} \quad (5-91)$$

5.12 Měrné teplo vázané v uhelném prášku za mlýnem

Obsah popela v uhelném prášku

$$A_2 = A_1^r \cdot \left(\frac{100 - W_2}{100 - W_1^r} \right) = 17 \cdot \left(\frac{100 - 0,6}{100 - 9} \right) = 18,57 \% \quad (5-92)$$

Obsah hořlaviny v uhelném prášku

$$h_2 = 100 - A_2 - W_2 = 100 - 18,57 - 0,6 = 80,83 \% \quad (5-93)$$

Střední měrná tepelná kapacita hořlaviny při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{ph2} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{V_1^{daf}}{100} \right) \cdot (130 + t_{sm2})$$

$$\bar{c}_{ph2} = 0,84 + 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,13 + \frac{32}{100} \right) \cdot (130 + 106,1) = 1,159 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-94)$$

Střední měrná tepelná kapacita popela při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pA2} = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{t_{sm2}}{1000} \right) = 0,5 \cdot \left(1,42 + \frac{106,1}{1000} \right) = 0,71 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-95)$$

Střední měrná tepelná kapacita uhelného prášku při teplotě směsi za mlýnem

$$\bar{c}_{pUP2} = \bar{c}_{ph2} \cdot \frac{h_2}{100} + \bar{c}_{pA2} \cdot \frac{A_2}{100} + \bar{c}_{pW2} \cdot \frac{W_2}{100}$$

$$\bar{c}_{pUP2} = 1,159 \cdot \frac{80,83}{100} + 0,71 \cdot \frac{18,57}{100} + 4,2 \cdot \frac{0,6}{100} = 1,094 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-96)$$

Měrné teplo vázané ve spalinách za mlýnem

$$q_{UP2} = \left(\frac{100 - W_2}{100 - W_1^r} \right) \cdot \bar{c}_{pUP2} \cdot t_{sm2}$$

$$q_{UP2} = \left(\frac{100 - 0,6}{100 - 9} \right) \cdot 1,094 \cdot 106,1 = 106,231 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-97)$$

5.13 Tepelné ztráty mlecího okruhu

Tepelné ztráty mlecího okruhu (5 až 15 % z přivedeného tepla sušícího média přejde sdílením tepla do okolí)

$$q_z = \xi_s \cdot (q_{VV1} + q_{tVV1} + q_{SV1})$$

$$q_z = 0,05 \cdot (484,984 + 5,769 + 102,084) = 90,96 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-98)$$

5.14 Rovnice tepelné bilance mlecího okruhu

$$q_{SV1} + q_{VV1} + q_{tVV1} + q_{PAL1} + q_m = q_w + q_{SV2} + q_{VV2} + q_{UP2} + q_z$$

$$\begin{aligned} 102,084 + 484,984 + 5,769 + 26,236 + 32,832 \\ = 220,994 + 87,836 + 207,174 + 106,231 + 29,642 \end{aligned}$$

$$651,905 \text{ kJ/kg} \cdot K \approx 651,878 \text{ kJ/kg} \cdot K \quad (5-99)$$

6 NÁVRH SYSTÉMU RECIRKULACE SPALIN

Na začátku návrhu recirkulace spalin jsem stál před otázkou, zda pro recirkulaci spalin použít řešení s jedním společným ventilátorem pro dva mlýny nebo použít řešení se dvěma ventilátory, vždy s jedním ventilátorem pro jeden mlýn. S ohledem na dobré zkušenosti z jiných projektů a studií jsem zvolil řešení se dvěma ventilátory. Je na zvážení, provozovatele, zda v rámci feasibility study neposoudit i řešení s jedním ventilátorem.

Místo odběru spalin bylo zvoleno za EO. Kdyby se spaliny odebíraly před EO, tak díky vysoké koncentraci popílku by mohl být problém s abrazií mlýnského ventilátoru a s průnikem popílku do kotelný přes netěsné labyrinty a dveře do mlýna.

Na základě výše uvedených skutečností volím recirkulaci spalin za EO, kde se koncentrace tuhých částic pohybuje na úrovni 76 mg/m^3 , přičemž koncentrace TZL před MO (mechanický odlučovač) a EO je na úrovni cca $13\,000 \text{ mg/m}^3$. [23], [13]

Vlastní systém recirkulovaných spalin se skládá z:

- recirkulačních ventilátorů,
- základů pro ventilátory recirkulovaných spalin
- kanálů recirkulovaných spalin,
- klapek,
- polní instrumentace (MaR),
- části elektro.

V dalších kapitolách je popsán návrh systému.

6.1 Recirkulační ventilátor

Potřebné množství spalin vychází z výpočtu mlýna s a bez recirkulace spalin a dále ze vzduchové bilance kotle. Z realizovaných výpočtů vyplynulo toto zadání pro recirkulační ventilátor.

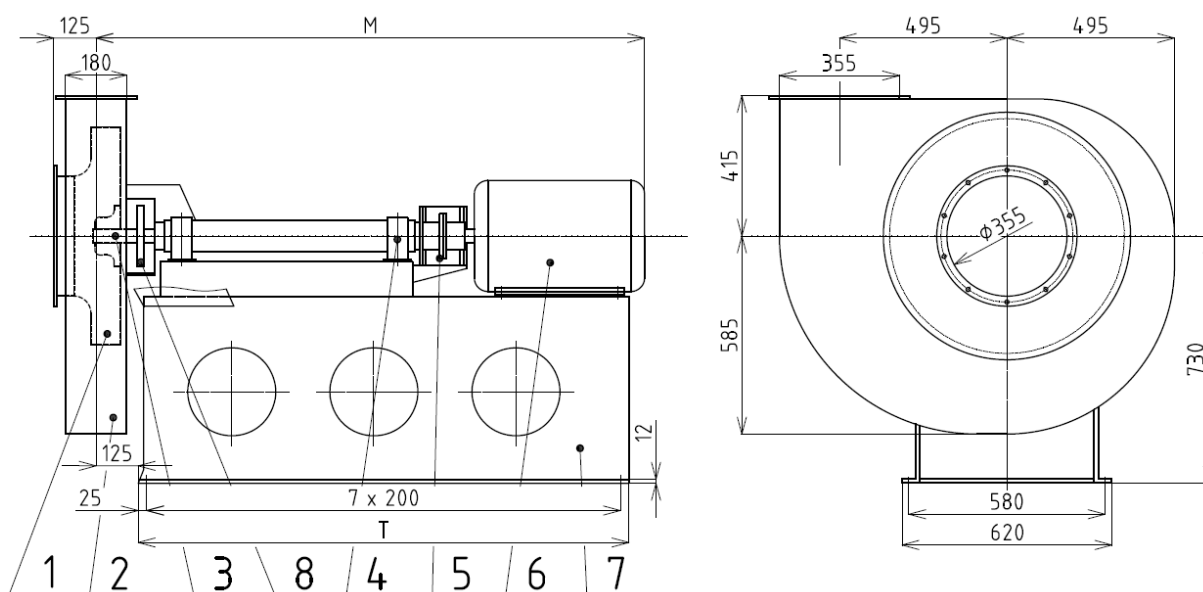
Tab. 6 Tabulka hodnot pro poptávku ventilátoru.

Parametr	Hodnota
Dopravní množství [Nm^3/h]	3500 až 6000
Tlak media v místě odběru [Pa]	0 až +200
Tlaková ztráta na straně sání [Pa]	150 až 270
Tlak media v místě připojení [Pa]	+ 1 500 až + 2 000
Tlaková ztráta na straně výtlaku [Pa]	3600 až 3800
Teplota v místě odběru [$^{\circ}\text{C}$]	95 až 135
Médium	Spaliny
Hustota spalin [kg/m^3]	cca 0,86
Rosný bod spalin [$^{\circ}\text{C}$]	130 – 135

Parametr	Hodnota
Koncentrace popílku v suchých spalinách při 6 % O ₂ [mg/Nm ³]	76
Obsah O ₂ ve spalinách [%]	4,63

V rámci návrhu byla oslovena společnost Klima, a.s.. Na základě poptávky, která zahrnovala celou řadu dalších informací, byla obdržena nabídka č. 8587. Nabídka ventilátoru je uvedena v příloze č. 1 diplomové práce.

Pro realizaci recirkulace spalin navrhuji 2 ks radiálních recirkulačních ventilátorů RVI 630 (viz Obr. 30).



Obr. 30 Radiální ventilátor RVI 630.

(Pozn.: Rozměry M, T se určují podle přiřazeného elektromotoru).

Hlavní části:

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. Oběžné kolo | 5. Spojka |
| 2. Spirální skříň | 6. Elektromotor |
| 3. Hřídel | 7. Stolička s rámem |
| 4. Ložisková skříň | 8. Chladicí kotouč |

6.2 Návrh potrubní trasy spalinovodů

V této kapitole je realizován návrh kanálů recirkulovaných spalin.

6.2.1 Volba profilu spalinovodu

Častěji se pro dopravu spalin používají kanály obdélníkového průřezu, tvořené ocelovými plechy a vyztužené úhelníky. Obdélníkový průřez spalinovodů umožňuje vhodněji využít prostor kolem kotle, protože poměr stran lze dosti variabilně měnit a taktéž umožňuje snadnější použití komplikovanějšího vedení než u kruhového průřezu.

Naopak výhodou kruhového potrubí je, že při proudění média potrubím nevzniká taková hlučnost jako u hranatého profilu. Další výhodou je lepší tuhost při stejné tloušťce stěny (hrnaté profily musí mít vyztužení) a rychlejší a snadnější montáž. [7]

S ohledem na skutečnost, že se jedná o malé průtoky spalin a relativně malé rozměry potrubí, byl zvolen kruhový profil.

6.2.2 Dimenzování potrubí

Průřez spalinovodu byl navržen ze známého objemového průtoku a zvolené rychlosti 15 m/s. Doporučené rychlosti spalin po podobné aplikace se volí v rozmezí 6 – 15 m/s. Výjimečně se volí rychlost až 20 m/s. Při vysokých rychlostech vznikají značné tlakové ztráty, případně i eroze popílkem. Naopak při malých rychlostech se zase snadno vytvoří nánosy z popílku. [7]

Množství recirkulovaných spalin tak, jak bylo již uvedeno v předchozí kapitole, se pohybuje v rozmezí od 3500 do 6000 m³/h. Pro návrh bylo uvažováno s objemem spalin na úrovni 4000 m³/h.

Průtok v potrubí

$$\dot{V} = 4000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 1,111 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Rychlost v potrubí

$$w = 15 \text{ m/s} \rightarrow \text{voleno}$$

Průměr potrubí

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \rho \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,111}{\pi \cdot 0,86 \cdot 15}} = 0,331 \text{ m} \rightarrow \text{voleno DN 315} \quad (6-1)$$

Pro potrubí recirkulovaných spalin bylo zvoleno potrubí DN 315 s vnějším průměrem 321 mm a tloušťkou stěny 4 mm z katalogového listu vzduchotechnického potrubí skupiny III od společnosti ZVVZ [25]. Tloušťka stěny 4 mm by měla být dostatečná, protože spaliny v potrubí budou již s minimálním množstvím popílku a nemělo by tedy docházet k intenzivní abrazi.

Jako materiál potrubí volím ocel 11 353. Tato ocel je vhodná na trubkové konstrukce staticky namáhaných součástí (i svařované), potrubí pro vedení oleje, nafty, vody, páry, vzduchu, plynu, na spojovací součásti potrubí apod. Je vhodná pro parametry média do 4 MPa a 200°C, nebo 3,2 MPa a 300 °C. [4]

Jednotlivé potrubní díly budou spojeny pomocí přírub, s tím že nejdelší díl potrubí bude mít max. 6 m z důvodu dopravitelnosti. Rozebíratelné spojení je výhodnější z hlediska budoucích oprav a výměn jednotlivých dílů.

Skutečná rychlost pro zvolené potrubí

$$w_{skut} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot \rho \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 1,111}{\pi \cdot 0,86 \cdot 0,313^2} = 16,79 \text{ m/s} \quad (6-2)$$

6.2.3 Návrh trasy

Návrh trasy vychází z omezených dispozičních možností v kotelně a v zákotlí. Návrh trasy vycházel z obdržných dispozic kotle a ze zaměření realizovaného ve dnech 21. 3. 2015 v TOL. Dispoziční možnosti jsou značně komplikované s ohledem na skutečnost, že původní návrh 100 t/h kotle byl situován do prostor hnědouhelného kotle o výkonu 75 t/h. Návrh trasy byl optimalizován tak, aby si vyžádal co nejméně úprav stávajícího zařízení.

6.2.3.1 Trasa k mlýnu M31

Ventilátor spalin bude umístěn vedle druhého vstupu do kotelny, blíže k mlýnu M31. Konkrétně bude stát místo stávajícího ventilátoru od nefunkčního kotle K4 (viz Obr. 31), který se bude demontovat. Dále bude ustaven na železobetonovém základě vysokém 0,5 m kvůli povodním. Součástí ventilátoru jsou tkaninové kompenzátory, které jsou umístěny sání i výtlačku ventilátoru.



Obr. 31 Pozice stávajícího vzduchového ventilátoru kotle K4 – místo pro nový ventilátor

Potrubí na straně sání bude vycházet z kouřovodu jdoucí za EO ve výšce + 3,7 m a bude procházet nad chodbou tak, aby byl zachován průjezdný profil. Před napojením na ventilátor bude na trati umístěna uzavírací klapka, která bude dostupná ze země. Délka potrubí na sání je 9,6 m.

Na straně výtlaku bude potrubí procházet přes cihlovou stěnu kotelny ve výšce + 2,65 m. Za stěnou bude na trati umístěno měření průtoku, dále pak regulační klapka a za ní měření tlaku a teploty. Aby byly tyto komponenty obslužitelné, navrhnul jsem k tomuto úseku plošinu s ocelovým roštem a žebříkem ve výšce + 2,4 m. Po 2 m od stěny se potrubí začne zvedat až na výšku 6 m. Potrubí bude zavěšeno cca 1 m pod stropem. Po zatočení k mlýnu povede pod schodištěm. Trasa bude končit napojením na potrubí s přívodem horkého vzduchu do mlýna (viz Obr. 32). Délka potrubí na výtlaku je 23 m.



Obr. 32 Napojení na přívod horkého vzduchu do mlýna M31.

Detailní vedení trasy, umístění jednotlivých komponent a zavěšení potrubí je zobrazeno na výkresech č. DP-001-2015, DP- 002-2015 a DP-005-2015 uvedených v příloze této práce.

6.2.3.2 Trasa k mlýnu M32

Ventilátor k mlýnu M32 je umístěn před budovou kompresorovny (viz Obr. 33, na stejně vysokém železobetonovém základě jako předešlý ventilátor. Součástí ventilátoru jsou tkaninové kompenzátory, které jsou umístěny sání i výtlaku ventilátoru. Kouřovod jdoucí z EO bude přímo před ventilátorem. Délka potrubí na straně sání je jen 1,2 m. Před ventilátorem bude ještě umístěna uzavírací klapka.

Na výtlaku se bude potrubí zvedat do výšky + 4,3 m. Potrubí dále povede mezi točitém schodištěm a plošinou. Bude potřeba prodloužit stávající plošinu, aby bylo dostupné měření tlaku, teploty a průtoku a regulační klapka.



Obr. 33 Prostor, ve kterém se bude nacházet ventilátor do mlýna M32.

Dále bude trasa pokračovat nad chodbou mezi dvěma objekty, a bude procházet nad vraty do budovy kotelny (viz Obr. 34).



Obr. 34 Vstup do budovy kotelny.

Po průchodu do kotelny povede potrubí cca 0,6 m od stěny, aby jej bylo možné zavěsit na strop (viz Obr. 35).



Obr. 35 Pokračování trasy do mlýna M32.

Před zadní stěnou kotelny bude potrubí zatáčet k potrubí s horkým vzduchem do mlýna a bude se zvedat pod úhlem 25° , aby se dostalo na výšku + 6 m. Napojení na přívod horké směsi vzduchu, bude zhruba 1 m pod stropem, tak aby potrubí recirkulace nekolidovalo se stávajícím potrubím okolo (viz Obr. 36). Délka potrubí na výtlačku je 36,6 m.



Obr. 36 Napojení na přívod horkého vzduchu do mlýna M32.

Detailní vedení trasy, umístění jednotlivých komponent a zavěšení potrubí je zobrazeno na výkresech č. DP-003-2015, DP-004-2015 a DP-005-2015 uvedených v příloze této práce.

6.2.4 Tlaková ztráta potrubní trasy

6.2.4.1 Tlaková ztráta potrubní trasy k mlýnu M31

Kinematická viskozita

$\nu = 23,87 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \rightarrow$ voleno ze skript doc. Budaje – Parní kotle (str. 24)

Reynoldsovo kritérium

$$Re = \frac{w_{skut} \cdot d}{\nu} = \frac{16,23 \cdot 0,313}{23,87 \cdot 10^{-6}} = 196690 \rightarrow \text{turbulentní proudění} \quad (6-3)$$

Absolutní drsnost

$k = 0,04 \text{ mm} \rightarrow$ pro svařované nezkorodované ocelové potrubí

Relativní drsnost

$$\varepsilon = \frac{k}{d} = \frac{0,00004}{0,313} = 0,000128 \quad (6-4)$$

Součinitel tření pro turbulentní proudění

$$\lambda = \frac{1,318}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} = \frac{1,318}{\left[\ln \left(\frac{0,000128}{3,7 \cdot 0,313} + \frac{5,74}{196690^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0184 \quad (6-5)$$

a) Tlaková ztráta třením na sání

$$\Delta p_{z,t,s} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho = 0,0184 \cdot \frac{9,6}{0,313} \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86 = 55 \text{ Pa} \quad (6-6)$$

b) Tlaková ztráta třením na výtlačku

$$\Delta p_{z,t,v} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho = 0,0184 \cdot \frac{23}{0,313} \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86 = 131 \text{ Pa} \quad (6-7)$$

Součinitele místní tlakové ztráty

1) Koleno 90°: $\xi_{kol90} = 0,226 \rightarrow$ voleno dle [19]

2) Kompenzátory: $\xi_{komp} = 0,5 \rightarrow$ voleno dle [20]

3) Regulační klapka:

$$\xi_{reg} = 0,001599 \cdot \frac{d^4}{K_{VS}^2} = 0,001599 \cdot \frac{313^4}{4740^2} = 0,68 \quad (6-8)$$

$K_{VS} = 4740 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow$ pro zvolenou klapku Fluex 37161 při 100% otevření

4) Uzavírací klapka: $\xi_{uzav} = 0,13 \rightarrow$ voleno dle [15]

5) Přejechod z $\emptyset 321$ na $\emptyset 355 \rightarrow$ dle [19] zanedbatelné

6) Přejechod z 180×355 na $\emptyset 321$: $\xi_{pr} = 0,056 \rightarrow$ dle [19]

Trvalá tlaková ztráta průtokoměru V-Cone

$\Delta p_Q = 3200 \text{ Pa} \rightarrow$ zjištěno od firmy Hennlich dle zadaných parametrů

a) Tlaková ztráta místní na sání

$$\Delta p_{z,m,s} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho \quad (6-9)$$

$$\Delta p_{z,m,s} = (4 \cdot \xi_{kol90} + 2 \cdot \xi_{komp} + \xi_{uzav}) \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho$$

$$\Delta p_{z,m,s} = (4 \cdot 0,151 + 2 \cdot 0,5 + 0,13) \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86$$

$$\Delta p_{z,m,s} = 210 \text{ Pa}$$

b) Tlaková ztráta místní na výtlaku

$$\Delta p_{z,m,v} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_Q \quad (6-10)$$

$$\Delta p_{z,m,v} = (4 \cdot \xi_{kol90} + 2 \cdot \xi_{komp} + \xi_{reg} + \xi_{pr}) \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_Q$$

$$\Delta p_{z,m,v} = (4 \cdot 0,151 + 2 \cdot 0,5 + 0,68 + 0,056) \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86 + 3200$$

$$\Delta p_{z,m,v} = 3484 \text{ Pa}$$

Celková tlaková ztráta (externí)

$$\Delta p_{ext} = \Delta p_{z,t,s} + \Delta p_{z,t,v} + \Delta p_{z,m,s} + \Delta p_{z,m,v}$$

$$\Delta p_{ext} = 55 + 131 + 210 + 3484 = 3880 \text{ Pa} \quad (6-11)$$

Tlak média v místě odběru je přibližně roven atmosférickému tlaku. Přetlak média v místě připojení je cca 2000 Pa. Aby byl dodržen tlakový spád, dopravní tlak ventilátoru $\Delta p_{c,v}$ musí být minimálně 6000 Pa.

$$\Delta p_{c,v} - \Delta p_{ext} > p_{přip}$$

$$107\,325 - 3\,880 > 103\,325 \text{ [Pa (abs.)]} \quad (6-12)$$

6.2.4.2 Tlaková ztráta potrubní trasy k mlýnu M32

Předešlé hodnoty jsou totožné, výpočet se liší až ve výpočtu tlakových ztrát, díky rozdílné délce a tvarové složitosti potrubní trasy.

a) Tlaková ztráta třením na sání

$$\Delta p_{z,t,s} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho = 0,0184 \cdot \frac{1,2}{0,313} \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86 = 7 \text{ Pa} \quad (6-13)$$

b) Tlaková ztráta třením na výtlaku

$$\Delta p_{z,t,v} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho = 0,0184 \cdot \frac{36,6}{0,313} \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86 = 208 \text{ Pa} \quad (6-14)$$

Součinitele místní tlakové ztráty

- 1) Koleny 90°: $\xi_{kol90} = 0,151 \rightarrow$ voleno dle [19]
- 2) Koleny 45°: $\xi_{kol45} = 0,098 \rightarrow$ voleno dle [19]
- 3) Kompenzátory: $\xi_{komp} = 0,5 \rightarrow$ voleno dle [20]
- 4) Regulační klapka:

$$\xi_{reg} = 0,001599 \cdot \frac{d^4}{K_{VS}^2} = 0,001599 \cdot \frac{313^4}{4740^2} = 0,68 \quad (6-15)$$

$K_{vs} = 4740 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow$ pro zvolenou klapku Fluex 37161 při 100% otevření

- 5) Uzavírací klapka: $\xi_{uzav} = 0,13 \rightarrow$ voleno dle [15]
- 6) Přechod z $\emptyset 324$ na $\emptyset 355 \rightarrow$ dle [19] zanedbatelné
- 7) Přechod z 180×355 na $\emptyset 324$: $\xi_{pr} = 0,056 \rightarrow$ dle [19]

Trvalá tlaková ztráta průtokoměru V-Cone

$\Delta p_Q = 3200 \text{ Pa} \rightarrow$ zjištěno od firmy Hennlich dle zadaných parametrů

a) Tlaková ztráta místní na sání

$$\Delta p_{z,m,s} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho \quad (6-16)$$

$$\Delta p_{z,m,s} = (2 \cdot \xi_{komp} + \xi_{uzav}) \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho$$

$$\Delta p_{z,m,s} = (2 \cdot 0,5 + 0,13) \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86$$

$$\Delta p_{z,m,s} = 137 \text{ Pa}$$

b) Tlaková ztráta místní na výtlaku

$$\Delta p_{z,m,v} = \Sigma \xi \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_Q \quad (6-17)$$

$$\Delta p_{z,m,v} = (5 \cdot \xi_{kol90} + 2 \cdot \xi_{komp} + \xi_{kol45} + \xi_{reg} + \xi_{pr}) \cdot \frac{w_{skut}^2}{2} \cdot \rho + \Delta p_Q$$

$$\Delta p_{z,m,v} = (5 \cdot 0,151 + 2 \cdot 0,5 + 0,098 + 0,68 + 0,056) \cdot \frac{16,79^2}{2} \cdot 0,86 + 3200$$

$$\Delta p_{z,m,v} = 3514 \text{ Pa}$$

Celková tlaková ztráta (externí)

$$\Delta p_{ext} = \Delta p_{z,t,s} + \Delta p_{z,t,v} + \Delta p_{z,m,s} + \Delta p_{z,m,v}$$

$$\Delta p_{ext} = 7 + 208 + 137 + 3514 = 3866 \text{ Pa} \quad (6-18)$$

Tlak média v místě odběru je přibližně roven atmosférickému tlaku. Přetlak média v místě připojení je cca 2000 Pa. Aby byl dodržen tlakový spád, dopravní tlak ventilátoru $\Delta p_{c,v}$ musí být minimálně 6000 Pa.

$$\Delta p_{c,v} - \Delta p_{ext} > p_{přip}$$

$$107\,325 - 3\,866 > 103\,325 \text{ [Pa (abs.)]} \quad (6-19)$$

6.2.5 Návrh izolace spalínového kanálu

Teplota povrchu zařízení nesmí překročit podle normy ČSN 07 0620 50 °C. Pro izolaci kanálů recirkulovaných spalin je navržena izolace z minerální vaty a hliníkového plechu. Výpočet izolace v programu IsoCal je uveden v příloze č. 2. Pro teplotu spalin za EO a požadovanou teplotu povrchu oplechování kanálu recirkulovaných spalin vychází izolace o tloušťce 30 mm.

6.2.6 Návrh kompenzace potrubí

V další části návrhu recirkulace spalin bylo nutné vyřešit problematiku tepelných dilatací.

Recirkulační ventilátor bude mít na sání i výtaku kompenzátory, které jsou součástí dodávky těchto ventilátorů.

Po konzultaci s technickými pracovníky, jsem axiální tkaninové kompenzátory na trati umístil pouze před odběr spalin a na připojení k potrubí s horkým vzduchem do mlýna. Pro přesné stanovení parametrů kompenzátoru je potřeba znát síly působící v místě připojení, to jsem však ve své práci neřešil. Zbytek trasy se bude kompenzovat pouze tvarem a vhodným rozmístěním uchycení. Umístění závěsů a podpěr je uvedeno na výkresech č. DP-001-2015, DP-002-2015, DP-003-2015 a DP-004-2015.

Při 100 °C se běžná ocel roztáhne zhruba o 1 mm na 1 m délky potrubí. V našem případě máme spaliny o teplotě 135 °C a potrubí z oceli 11 353, roztažnost by tedy měla vyjít o něco větší.

Roztažnost na 1 m délky potrubí

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot (t_{spalin} - t_{okolí}) = 1 \cdot 11,7 \cdot 10^{-6} \cdot (135 - 20) = 0,0013455 \text{ m} \quad (6-20)$$

6.3 Uzavírací armatury

Uzavírací armatury musí zajistit 100 % těsnost. Po konzultaci s technickými pracovníky bude na trase použita uzavírací klapka model 5570B od společnosti ABO a regulační klapka model Fluex 37161 od společnosti MPR Valves. Jejich konstrukce je patrná na Obr. 37 a Obr. 38.



Obr. 37 Uzavírací klapky ABO. [9]



Obr. 38 Regulační klapky Fluex 37161. [12]

6.4 Polní instrumentace

Aplikace bude vybavena:

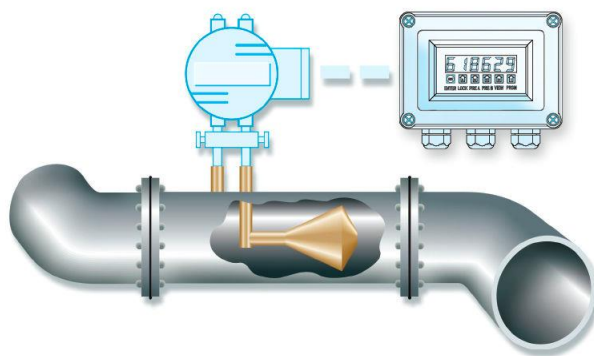
- 2 ks měření tlaku,
- 2 ks měření teploty,
- 2 ks měření průtoku.

Jejich umístění je patrné z výkresů č. DP-001-2015 a DP-003-2015 uvedených v příloze diplomové práce.

Pro místní měření teploty jsem zvolil univerzální bimetalový přesný teploměr s nerezovým pouzdem od firmy Pförtner, konkrétně typ 32.12 (viz Obr. 39).

Pro místní a dálkové měření tlaku jsem zvolil jednotku složenou ze snímače tlaku DMP 331 a DMP 333, a ze zobrazovacího displeje PA 430 (viz Obr. 41). Obojí od firmy JSP, s.r.o..

Pro měření množství recirkulovaných spalin jsem zvolil průtokoměr V-Cone® od společnosti McCrometer (viz Obr. 40).

Obr. 39 Teploměr
od firmy Pförtner.
[8]

Obr. 40 Průtokoměr V-Cone®. [5]

Obr. 41 Snímač tlaku
od firmy JSP. [6]

6.5 Algoritmy řízení

Nejsou předmět návrhu.

6.6 Odhad nákladů

Tab. 7 Odhad nákladů.

Název	Cena bez DPH [Kč]
Projektové práce	
Projekt KKS	70 000,-
Realizační projekt strojní části	650 000,-
Projekt elektro a MaR	150 000,-
Projekt stavební části	55 000,-
Dodávky	
Recirkulační ventilátory – 2 ks	390 080,-
Frekvenční měniče rec. ventilátorů – 2 ks	72 600,-
Betonový základ – 2 ks	90 000,-
Potrubí o hmotnosti 2 400 kg (i s přírubami)	105 000,-
Regulační klapky – 2 ks	188 840,-
Uzavírací klapky – 2 ks	223 220,-
Závěsy	40 000,-
Kompenzátory – 3 ks	41 600,-
Nátěrový systém	20 000,-
Izolace a oplechování 71 m ²	130 000,-
I/O karty	42 000,-
Rozvaděče elektro	100 000,-
Měření tlaku – 2 ks	14 660,-
Měření teploty – 2 ks	6 040,-
Měření průtoku – 2 ks	310 000,-
Demontáže	
Demontáže části kotle K4	250 000,-

Název	Cena bez DPH [Kč]
Montáže	
Montáže strojní části	1 500 000,-
Montáže elektro	150 000,-
Montáže MaR	120 000,-
SW práce v DCS	180 000,-
Seřízení a uvedení do provozu	350 000,-
Dodavatelská dokumentace	60 000,-
Cena celkem bez DPH [Kč]	5 309 040,-

ZÁVĚR

Diplomová práce řešila návrh systému recirkulovaných spalin pro práškový granulační kotel K3 na úrovni prefeasibility study. Součástí návrhu byl tepelný výpočet mlýnice s přímým foukáním uhelného prášku do kotle s a bez recirkulace spalin. Model tepelného výpočtu mlýna byl v rámci svého návrhu verifikován s využitím provozních dat a s využitím tepelného výpočtu kotle s a bez recirkulace spalin.

Diplomová práce se dále zabývala ve své teoretické části problematikou primárních opatření realizovaných na kotlích v souvislosti s novou směrnicí o průmyslových emisích. Recirkulace spalin je jednou z nejpoužívanějších metod snižování emisí NO_x zejména při provozu kotlů v oblasti minimálních výkonů.

V další části diplomové práce je proveden ideový návrh systému recirkulace spalin včetně kvalifikovaného odhadu nákladů na jeho realizaci.

Při zpracování diplomové práce byly použity rovněž i další informace, například informace z měření celkové odlučivosti odlučovacích zařízení zařazených za kotlem. Ze zpráv z těchto měření bylo možné čerpat informace o koncentracích popílků za kotlem a za odlučovacím zařízením.

Pokud by došlo k instalaci systému recirkulace spalin na kotel K3 musel by provozovatel dále řešit i níže uvedené problémy spojené s instalací technologie recirkulace spalin:

- nové posouzení systému podle NV 406/2004 Sb. (ATEX137),
- instalaci čidel detekující úniky CO do prostoru mlýnice,
- těsnost mlýnů a jejich příslušenství.

Tyto výše uvedené problémové oblasti neřeší ani oborová norma OEG 38 0802 – Práce v parních elektrárnách a teplárnách ani normy ČSN 07 4009 (Předpisy pro zařízení na přípravu uhelného prášku) a ČSN 07 4010 (Provoz, obsluha a údržba zařízení na přípravu uhelného prášku). Při výpočtech byly rovněž použity aktuální PTCH spalovaného paliva.

Celkové náklady na realizaci systému recirkulovaných spalin, je možné odhadnout na cca 5,31 mil. Kč. Instalace systému recirkulovaných spalin bude mít rovněž dopad na kvalitu spalování, nedopaly a vlastní spotřebu elektrické energie. Tyto dopady bude možné ověřit až v rámci komplexních zkoušek nové technologie.

Je nutné podotknout, že k dané problematice existuje v ČR velmi malé množství dostupné literatury a získání ucelených poznatků z již realizovaných systémů recirkulace spalin je velmi komplikované.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Ball-ring mills. In: FPM S.A. [online]. [cit. 2014-10-28]. Dostupné z: <http://www.paleniska.pl/portal/pub/view/0x4764b?lang=en>
- [2] CLAUDIUS PETERS: Mineral Grinding Technology [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.claudiuspeters.com/documents/en/350/claudius-peters-ash-handling-brochure-en.pdf>
- [3] ČERNÝ, Václav, Jiří TEYSSLER a Břetislav JANEBA. 1983. Parní kotle. 1. vyd. Praha: SNTL, 858 s.
- [4] Feromat: Jakosti ocelí. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [5] HENNLICH: Průtokoměr V-Cone. [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: <http://www.hennlich.cz/produkty/prvky-pro-mereni-a-regulaci-prutokomery-prutokomery-na-principu-tlakove-diference-7530/v-cone.html>
- [6] JSP měření a regulace: Snímače relativního a absolutního tlaku DMP 331 a DMP 333. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_tlaku_a_tlakove_diference/snimace_tlaku_a_tlakove_diference_s_analogovym_vystupem/dmp-331-dmp-333-snimace-relativniho-absolutniho-tlaku.html
- [7] KADRNOŽKA, Jaroslav. Tepelné elektrárny a teplárny. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984, 607 s.
- [8] ManoMarket: 31 – bajonetové pouzdro, spodní přípoj. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.manomarket.cz/31-bajonetove-pouzdro-spodni-pripoj-114.html>
- [9] Marinfo.cz: Detail produktu. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.marinfo.cz/excentricka-uzaviraci-klapka-5590b-dn300-16/dp-34277/>
- [10] Moje Brno: Výbuch brněnské teplárny na Špitálce [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.mojebrno.jecool.net/inka--brno-dalsi-zajimavosti-teplarna-spitalka-1975-1978.html>
- [11] Money.pl: Wybuch pyłu węglowego w Elektrowni Dolna Odra [online]. 2010. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://manager.money.pl/galerie/wybuch-pylu-weglowego-w-elektrowni-dolna-odra-g19829.html>
- [12] MPR Valves: Fluex 37161. [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.mprvalves.cz/eshop-fluex-37161.html>
- [13] ORGREZ. 2015. Měření spalin v Teplárně Olomouc. Brno. Technická zpráva. ORGREZ.

- [14] PSP Engineering a.s. [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: http://www.pspeng.cz/Brochure/Vertikalni%20mlyny%20KTM_CZ.pdf
- [15] ROČEK, Jaroslav. *Průmyslové armatury*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2002, 253 s. ISBN 80-7333-000-8.
- [16] Rspb: HRD SYSTÉM – ZAŘÍZENÍ NA POTLAČENÍ VÝBUCHU. [online]. [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: <http://www.rspb.cz/produkt/hrd-system/>
- [17] SKÁLA, Zdeněk. *Palivové hospodářství*. Vyd. 1. Brno: VUT, 1987, 153 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně).
- [18] ŠEVELOVÁ, Kamila, Kamil STÁREK, Ivo BERKA, Jan HEROSCH a Petr SALVET. VŠB. Parní kotle: Tepelná bilance mlýna [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>
- [19] Technika prostředí: Obecný výpočet tlakových ztrát místním odporem. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/Tlakova-ztrata-mistnimi-odpory>
- [20] Tzb-info: Vliv místních odporů na tlakové ztráty v potrubí Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubi>. [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/8514-vliv-mistnich-odporu-na-tlakove-ztraty-v-potrubi>
- [21] UHROVÁ, Ilona. 2013. Tzbinfo: Šíření plamene po vrstvě prachu tvořené dřevní biomasou Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/pozarni-ochrana/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou> [online]. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pozarni-ochrana/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou>
- [22] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů [online]. Praha, 2002 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skrinavo.html>. Skripta. Vysoká škola chemicko-technologická.
- [23] VŠB-CENTRUM ENET. 2015. Měření množství O₂ ve spalinách a koncentrace tuhých částic za EO kotle K3 v Teplárně Olomouc. Ostrava. Technická zpráva. VŠB-Centrum ENET.
- [24] Výzkumné energetické centrum: Vysoká škola báňská. [online]. [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/tvorba.pdf>
- [25] ZVVZ MACHINERY: Potrubí skupiny III [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://www.zvvz.cz/data/files/192kmd120322.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**Seznam použitého značení**

Značka	Jednotka	Popis veličiny
A	[%]	obsah popele
A_r	[%]	obsah argonu
C	[%]	obsah uhlíku, podíl spalitelných látek
c	[%]	podíl nespalitelných látek
c_p	[kJ/kg.K]	měrná tepelná kapacita
d	[kg/kg]	měrná vlhkost
d	[m]	průměr potrubí
f	[-]	celkové zvětšení objemu suchého vzduchu vlhkostí
f_i	[-]	relativní vlhkost
h	[%]	hořlavina
H	[%]	obsah vodíku
i	[kJ/kg.K]	měrné teplo
k	[m]	absolutní drsnost
k_m	[-]	koeficient určující část mechanické energie přeměněné v teplo
K_{vs}	[m ³ /h]	průtokový součinitel
L	[m]	délka
m	[kg/s; kg/h]	hmotnostní tok
N	[%]	obsah dusíku
O	[Nm ³ /kg _{paliva}]	objem složky ve spalinách
O	[Nm ³ /s; Nm ³ /h]	objemový tok

Značka	Jednotka	Popis veličiny
O₂	[%]	obsah kyslíku
p	[Pa]	tlak
p_N	[Pa]	normální tlak 101 325 Pa
q	[kJ/kg]	měrné teplo
Q_i	[kJ/kg]	výhřevnost
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[%]	obsah síry
t	[°C]	teplota
t_N	[°C]	normální teplota 0 °C
Ṁ	[m ³ /h, m ³ /s]	objemový průtok
V	[Nm ³ /kg]	množství vzduchu
V_{daf}	[%]	obsah prchavého podílu hořlaviny
W	[%]	obsah vody, vlhkost paliva
w	[m/s]	rychlost
x	[%]	hmotnostní podíl složek ve spalinách
X	[%]	poměrné množství
y	[kg/kg]	měrný hmotnostní průtok
z₉₀	[%]	zbytek na síti 90 μm
α	[-; °C ⁻¹]	přebytek vzduchu; koeficient délkové roztažnosti oceli
Δ	[Nm ³ /kg _{paliva} , kJ/kg]	přírůstek
ΔL	[m]	délková roztažnost potrubí
Δp	[Pa]	tlaková ztráta, tlakový rozdíl
ε	[-]	relativní drsnost

Značka	Jednotka	Popis veličiny
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ξ	[%]	ztráta
ξ	[-]	součinitel místní ztráty
ρ	[kg/m ³]	měrný objem (hustota)
Σ		celkový stav
φ	[-]	relativní vlhkost
ω	[%]	objemový podíl
λ	[-]	součinitel tření

Seznam dolních indexů

Dolní index	Význam
0	stav nasávaného vzduchu
1	vstup do mlýna
2	výstup z mlýna
A	popelovina
C	uhlík
c	celkový
c,v	dopravní ventilátoru
celk	celkový stav
CO	oxid uhelnatý
CO₂	oxid uhličitý
ext	celková (externí)
f	fyzické teplo

Dolní index	Význam
h	hořlavina
H₂O	voda, vodní pára
kol45	koleno 45°
kol90	koleno 90°
komp	kompenzátor
max	maximální
N	normální podmínky
N₂	dusík
okolí	okolí
PAL	surové palivo
POP	popílek
pr	přechod potrubí
přip	místo připojení
Q	průtokoměr
rec	recirkulovaný stav
red	reduované
reg	regulační klapka
sal	sálání do okolí
skut	skutečné
sm	směs za mlýnem
SO₂	oxid siřičitý
spalin	spaliny
SS	suché spaliny

Dolní index	Význam
SV	vlhké spaliny
sVV	studený vlhký vzduch
tVV	těsnící vzduch
UP	uhelný prášek
uzav	uzavírací klapka
VS	suchý vzduch
VV	směs studeného a horkého vzduchu; vlhký vzduch
W	voda
x	vodní pára na mezi sytosti
z	tepelné ztráty mlecího okruhu
z,m,s	místní ztráta na sání
z,m,v	místní ztráta na výtlaku
z,t,s	ztráta třením na sání
z,t,v	ztráta třením na výtlaku

Seznam horních indexů

Horní index	Význam
a	analytický stav
daf	zdánlivá hořlavina
dV	přírůstky objemu

MIN	minimální
r	surový stav
α	přebytek vzduchu

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
EO	elektroodlučovák
HRD	(high rate discharge) zařízení na potlačení výbuchu
MaR	měření a regulace
MO	mechanický odlučovák
OFA	(over Fire Air) dohořivací vzduch
PTCH	požárně technická charakteristika
SW	software
TOL	teplárna Olomouc

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Letecký snímek TOL.	11
Obr. 2 Mechanismy vzniku NO _x	13
Obr. 3 Tvorba různých druhů NO _x v závislosti na teplotě. [24]	14
Obr. 4 Dodatečný přívod vzduchu. [24]	15
Obr. 5 Vliv dodatečného přívodu vzduchu. [24]	15
Obr. 6 Přívod vzduchů a paliva. [24].....	16
Obr. 7 Bohatá a chudá směs. [24]	16
Obr. 8 Závislost CO a NO _x na přebytku vzduchu. [24]	16
Obr. 9 Pohled na mlecí elementy.	18
Obr. 10 Detail vzduchové dýzy.....	18
Obr. 11 Princip mlýnice s kroužkovými mlýny. [1]	19
Obr. 12 Kroužkový mlýn s dynamickým třídičem. [2].....	19
Obr. 13 Hydraulický systém kroužkového mlýna. [2].....	20
Obr. 14 Absorbování síly od nárazu. [2].....	20
Obr. 15 Výbuchový trojúhelník. [21].....	21
Obr. 16 Minimalizace výbuchového tlaku. [16]	22
Obr. 17 Proces potlačení výbuchu. [16].....	23
Obr. 18 Výbuch v teplárně na Špitálce. [10].....	23
Obr. 19 Výbuch v elektrárně Dolna Odra. [11]	23
Obr. 20 Řez kotlem K3.	25
Obr. 21 3D schéma mlýnice a mlecích okruhů	28
Obr. 22 Stávající desing mlýna.	30
Obr. 23 Desing mlýna s dynamickým třídičem.	30
Obr. 24 Detail stávajících práškovodu.	31
Obr. 25 Schéma mlecího okruhu bez recirkulace spalin na TOL.	33
Obr. 26 Schéma tepelné bilance mlýna bez recirkulace spalin.	34
Obr. 27 Schéma mlecího okruhu s recirkulací spalin na TOL.	44
Obr. 28 Schéma tepelné bilance mlýna s recirkulací spalin.	45
Obr. 29 Schéma bilance vzduchů pro spodní patro hořáků	46
Obr. 30 Radiální ventilátor RVI 630.....	63
Obr. 31 Pozice stávajícího vzduchového ventilátoru kotle K4 – místo pro nový ventilátor ...	65
Obr. 32 Napojení na přívod horkého vzduchu do mlýna M31.	66
Obr. 33 Prostor, ve kterém se bude nacházet ventilátor do mlýna M32.	67
Obr. 34 Vstup do budovy kotelny.	67
Obr. 35 Pokračování trasy do mlýna M32.	68
Obr. 36 Napojení na přívod horkého vzduchu do mlýna M32.	68
Obr. 37 Uzavírací klapky ABO. [9].....	74
Obr. 38 Regulační klapky Fluex 37161. [12].....	74
Obr. 39 Teploměr od firmy Pförtner. [8]	74
Obr. 40 Průtokoměr V-Cone®. [5]	74
Obr. 41 Snímač tlaku od firmy JSP. [6].....	74

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní parametry kotle K3.....	24
Tab. 2 Technické parametry mlýnů.....	26
Tab. 3 Parametry ventilátoru těsnícího vzduchu	27
Tab. 4 Vstupní parametry pro výpočet bez recirkulace spalin.	34
Tab. 5 Vstupní parametry pro výpočet s recirkulací spalin.	45
Tab. 6 Tabulka hodnot pro poptávku ventilátoru.	62
Tab. 7 Odhad nákladů.....	75

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Nabídka recirkulačního ventilátoru	
Příloha č. 2	Výpočet izolace	
Příloha č. 3	Izometrie k mlýnu M31 na straně výtlaku	– výkres č. DP-001-2015
Příloha č. 4	Izometrie k mlýnu M31 na straně sání	– výkres č. DP-002-2015
Příloha č. 5	Izometrie k mlýnu M32 na straně výtlaku	– výkres č. DP-003-2015
Příloha č. 6	Izometrie k mlýnu M32 na straně sání	– výkres č. DP-004-2015
Příloha č. 7	Půdorys kotelný	– výkres č. DP-005-2015
Příloha č. 8	PI diagram kotle s recirkulací spalin	– výkres č. DP-006-2015

Příloha 1

KLIMA

Klima a.s.
Eduard Kučera
Tel. 388 601 323
EMAIL: kucera@klimacz.cz

naše značka: 99/2015/EK
Poptávka: **Ventilátory**

V Prachaticích 25.2.2015

Nabídka č. 10659 Platnost nabídky do: 31.5.2015

1. Předmět plnění: **2ks Ventilátorů RVI 630** dle přiložené technicko-cenové specifikace
2. Termín plnění: cca **10** týdnů od podpisu kupní smlouvy
3. Cena dodávky: **390 080,- Kč/2ks** bez DPH a bez dopravy
4. Platební podmínky: záloha **30 %** po podpisu KS, zbytek po dodávce splatnost 21 dnů
5. Záruční doba: **12** měsíců od splnění dodávky, záruka se netýká dílů podléhajících běžnému opotřebení (např. těsnění, gumové event. pryžové díly atd.)
6. Doprava: dle INCOTERMS 2000 – EXW Prachatice
7. Nabídku vyřizují: ve věcech technických: Kovář – tel. 388 601 266
ve věcech obchodních: Kučera – tel. 388 601 323

V případě, že dojde ke zvýšení cen vstupních materiálů o více než 5%, si vyhrazujeme právo úpravy ceny.

Děkujeme za Vaši poptávku a dovoluujeme si Vás požádat o vyjádření před ukončením platnosti nabídky. Pokud nedojde k realizaci, z jakého důvodu. Pokud jednání trvá, sdělte požadavek na prodloužení platnosti nabídky.

S pozdravem

Ing. Karel Hopfinger
výrobně-technický ředitel a prokurista

Příloha: TOS nabídky 10659, charakteristika ventilátorů



Klima a.s., Štěrboholská 560/73, 102 00 Praha,
Provozovna: Krumlovská 38, 383 32 Prachatice
Czech Republic
www.klimacz.cz, info@klimacz.cz

Tel.: +420 388 601 154
Fax: +420 388 316 942

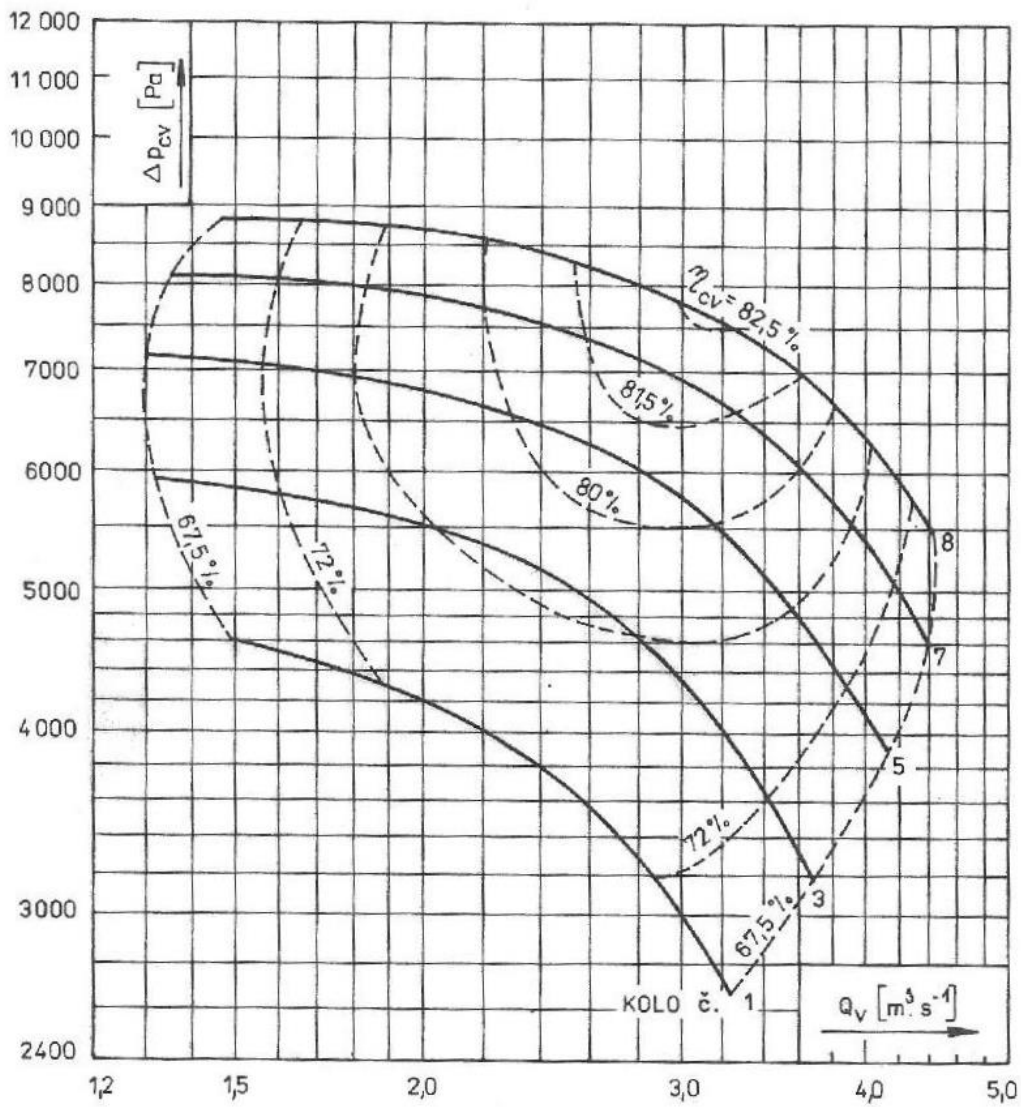
IČO: 28061047

Nabídkový list - technicko ekonomické informace		Číslo nabídky: 10659	
Zákazník: VEOLIA Energie Česká Republika a.s., Olomouc Adresa : Kontaktní osoba : Tel. / E-mail: IČO :		Požadovaný termín odeslání:	
		Skutečný termín odeslání:	
Technický popis			
Počet [ks]	Cenová nabídka	Hmotnost [kg]	Cena [Kč]
	Nabídka ventilátorů dle technického zadání		
2	Ventilátor RVI 630 – 3N – X⁰ PP 123340.12 – AOM 160M/2920 Provedení ATYP. Ventilátor se spojkou, letmo uložené kolo, svařovaná stolička, chladič kotouč. ATYP - části přicházející do styku se spaliny včetně hřídele z mat. 1.4301 (17240) – nebezpečí rosného bodu Motor (požadavek ATEX – směrnice 94/9/ES) není specifikována zona, proto volen:	960	215 860,-
2	MOTOR SIEMENS 160 M AOM 160 M 02; 15 kW, 2920 ot.min. ⁻¹ , 50 Hz, 400 VD, IMB 3, IP 55 3Termistory ve vinutí. Napájen f.měničem, měnič není předmětem nabídky. Motor je v provedení ZONA 1, ochrana d (pevný závěr) Nevýbušnost C x II 2 G EE x d II CT 4 Hmotnost motoru 130 kg – započtena u ventilátoru Úprava ventilátoru pro snímání chvění. Teplota ložisek se u této velikosti nemonitoruje (tukové mazání). Regulace pouze. změnou otáček a to snižováním. Aerodynamická regulace v sání ventilátoru se u této velikosti nevyrábí. Nátěr – SELEMIX DIRECT.7-532/RAL 5002 (60µm), nerez části bez nátěru		89 780,-
	Dokumentace – 2 x česky – to je: - návod k používání - osvědčení o jakosti a kompletnosti OJK - prohlášení o shodě CE		600,-
Vypracoval: Karel Kovář <i>K.Kovář</i>		Datum: 23.2.2015	CENY: 23.2.2015 V.KOVÁŘ <i>V.Kovář</i>
			List č. : 1 Listů : 2

Nabídkový list - technicko ekonomické informace		Číslo nabídky: 10659	
Zákazník: VEOLIA Energie Česká Republika a.s., Olomouc Adresa : Kontaktní osoba : Tel. / E-mail: IČO :		Požadovaný termín odeslání:	
		Skutečný termín odeslání:	
Technický popis			
Počet [ks]	Cenová nabídka	Hmotnost [kg]	Cena [Kč]
	Parametry – pro 1ks $Q = 1,66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ $\Delta p_{cv} = 3870 \text{ Pa}$ při $t = 135^\circ\text{C}$ – spaliny Výpočet proveden pro ró spalin $0,8 \text{ kgm}^{-3}$ Při otáčkách 2920 min^{-1} Další parametry snižováním otáček. Hlučnost 1,5 m od obrysu ventilátoru (za podmínek volného prostoru) nepřesáhne 85 dB(A). Tepelná izolace není požadována. Kotvení – pružné uložení Je-li ventilátor kotven na úrovni terénu nebo podlahy.kotelny (ne v patře) pružné uložení nedoporučujeme!		
12	Izolátor P 66 + kotvení do betonu (plastové) Kotvení do ocelové konstrukce nutno dohodnout. Rozmístění izolátorů až po stanovení X ⁰ (poloha skříně – viz. příloha).	12	12 000,-
2	Kompenzátor sání DN355 – 125 (KOMPAFLEX -> tkanina) vč. vodícího plechu, přírub a protipřírub – do teplot 200°C	19	25 400,-
2	Kompenzátor výtlaku 355x180–125 (KOMPAFLEX->tkanina) vč. vodícího plechu, přírub a protipřírub -- do teplot 200°C	19,4	22 200,-
	Těsnicí a spojovací materiál.	7	700,-
	Expedice – 2 x paleta smrk 15 kg Smontováno, izolátory přiloženy, spoj.mat.v obalu. Příloha – rozměry 2 x A4 Jako diagnostiku mohutnosti kmitání nabízíme:		1 200,-
2	Snímač vibrací s převodníkem ASV 6 Rozsah $0 \div 20 \text{ mm/s}$, proudový výstup $4 \div 20 \text{ mA}$ Kabel 5 m, napájení $12 \div 34 \text{ Vdc}$, krytí IP 65		22 340,-
		Σ	<u>390 080,-</u>
Vypracoval : Karel Kovář <i>Kovář</i>		Datum : 23.2. 2015	CENY :23.2.2015 V.KOVÁŘ <i>V.Kovář</i>
		List č. : 2	Listů : 2

Diagram 5 CHARAKTERISTIKA VENTILÁTORU RVI 830

$n = 2900 \text{ min}^{-1}$, $\rho = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$



Poznámka : pro ventilátory poháněné přímo lze použít pouze kola č. 1, 5, 8.

Příloha 2



IsoCal

Výpočet tepelných ztrát

Verze programu: 3.06

Čas/datum: 18:25 19.05 2015

Držitel licence: David Pawlitko , VUT Brno

Projekt: Recirkulace spalin

Název zařízení:

Zodpovědná osoba: Bc. David Pawlitko

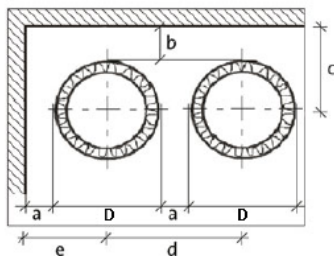
Název souboru: C:\Users\David\Desktop\tloušťka izolace.gcl



Výpočet tepelné ztráty	Požadovaná tl. izolace	Stand. tl. izolace
Tloušťka izolace	27.5 mm	30.0 mm
Povrchová teplota izolace	50.0 °C	48.2 °C
Tepelná ztráta	163.0 W/m	152.6 W/m
Součinitel prostupu tepla izolovaného potrubí	1.42 W/mK	1.33 W/mK
Tepelná vodivost izolace	0.050 W/mK	0.042 W/mK
Souč. přestupu tepla vně	4.6 W/m ² K	4.5 W/m ² K
Souč. přestupu tepla uvnitř	38.6 W/m ² K	38.6 W/m ² K
Vnitřní povrchová teplota na výstupu	131.2 °C	131.0 °C
Tepelná ztráta bez izolace (emisivita = 0.50)	1030.4 W/m	-
Energetická úspora po zaizolování	84 %	85 %
Souč. přestupu tepla uvnitř	38.6 W/m ² K	38.6 W/m ² K

Výpočet tepelné ztráty	Vstupní hodnoty
Typ	Kruhové potrubí
Průměr potrubí	321.0 mm
Délka potrubí	1.00 m
Kalkulační kritérium	Maximální povrchová teplota
Povrchová teplota	50.0 °C
Izolační produkt - vrstva 1	Orstech LSP 40 (EN 12667-měřené hodnoty) (Isover)
Vnější povrchová úprava	Hliníkový plech
Emisivita povrchu	0.13
Teplota média	135.0 °C
Okolní teplota	20.0 °C
Prostředí	Vnitřní (přirozené proudění)
Průtok	16.79 m/s
Neizolované potrubní závěsy	Ne

Doporučené odstupové vzdálenosti



- a: 300 mm
- b: 100 mm
- c: 290 mm
- d: 681 mm
- e: 490 mm
- D: 381 mm