



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NÁVRH A VÝVOJ ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE

DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Kvasnička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Karel Kvasnička

ID: 173685

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a vývoj elektrostatického odlučovače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis principu elektrostatického odlučovače
2. Představení základního konstrukčního řešení elektrostatického odlučovače
3. Návrh a vývoj elektrostatického odlučovače
4. Realizace experimentů na elektrostatickém odlučovači

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít technických norem, odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

KVASNIČKA, K. *Návrh a vývoj elektrostatického odlučovače popílku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Návrh a vývoj elektrostatického odlučovače* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 29. května 2018

Podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat své vedoucí bakalářské práce Ing. Michalu Ptáčkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc, ochotu a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Krbalovi, Ph.D. za umožnění realizovat experimentální část v Laboratoři vysokých napětí v rámci CVVOZE Power Laboratories.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem elektrostatického odlučovače a seznámení s problematikou odlučování na těchto odlučovačích. Cílem této práce je sestrojení funkčního modelu elektrostatického odlučovače. Bude popsán princip fungování a konstrukční řešení. Dále je zpracován návrh odlučovače, který se následně realizoval a experimentálně ověřoval ve výzkumné infrastruktuře CVVOZE Power Laboratories.

V první části se práce věnuje popisu legislativy ochrany ovzduší, nejčastějšímu vstupnímu materiálu odlučovačů a popisů základních druhů odlučovačů. Dále je podrobněji rozebrán elektrický odlučovač, jeho oblast použití, konstrukce a jednotlivé konstrukční celky, i nežádoucí provozní stav odlučovače. V druhé části jsou uvedeny rovnice a výpočty pro návrh odlučovače.

V další části je popisován sestrojený odlučovač a jeho laboratorní zkoušky. Odlučovač byl podroben základním napěťovým testům z pohledu svého provozního napětí. Jeho funkčnost vyhověla realizovaným experimentům do 30 kV. Na základě této práce a výroby zařízení lze v budoucnu testovat vlastnosti spalin i ostatních plynů.

KLÍČOVÁ SLOVA: Odlučovač; elektrostatický odlučovač; příměs; koróna; ionizace; odlučivost

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of an electrostatic precipitator and familiarization with the problems of separation on these separators. The aim of this work is to construct a functional model of an electrostatic precipitator. The principle of operation and design will be described. In addition, the design of a separator is elaborated, which was subsequently realized and experimentally verified in the CVVOZE Power Laboratories

Research Infrastructure. The first part deals with the description of the legislation on air protection, the most frequent input material of separators and descriptions of the basic types of separators. In addition, the electric separator, its area of use, construction and individual components, as well as the undesirable operating state of the separator, are further elaborated. In the second part are presented the equations and calculations for the design of the separator.

In the next part, the separator designer and his laboratory tests are described. The separator was subjected to basic voltage tests from the viewpoint of its operating voltage. Its functionality fits the realized experiments up to 30 kV. On the basis of this work and the production of the equipment, it is possible in the future to test the properties of flue gases and other gases.

KEY WORDS: Separator; electrostatic precipitator; admixture; corona; ionization; separability

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM VELIČIN.....	11
SEZNAM ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD.....	14
2 LEGISLATIVA	15
3 POPÍLEK.....	16
4 ODLUČOVAČE	17
4.1 MECHANICKÉ ODLUČOVAČE.....	17
4.2 TEXTILNÍ ODLUČOVAČE	18
4.3 ELEKTRICKÉ ODLUČOVAČE (EO).....	18
5 ELEKTRICKÉ ODLUČOVAČE	20
5.1 OBLASTI POUŽITÍ	20
5.2 KORÓNOVÝ VÝBOJ.....	20
5.3 KONSTRUKCE ELEKTRICKÝCH ODLUČOVAČŮ	21
5.3.1 TRUBKOVÉ.....	21
5.3.2 KOMOROVÉ.....	22
5.4 SKŘÍŇ EO.....	23
5.5 ČIŠTĚNÍ ELEKTROD.....	24
5.5.1 PŘEPADOVÁ KLADIVA.....	24
5.5.2 AKUSTICKÉ MĚNIČE.....	24
5.6 IZOLÁTORY	25
5.7 NEŽÁDOUCÍ PROVOZNÍ STAV	26
5.8 ENERGETIKA	27
6 TEORIE NÁVRHU ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE.....	28
7 VÝPOČET A REALIZACE LABORATORNÍHO EO.....	32
7.1 VÝPOČTY	32
7.2 KONSTRUKCE LABORATORNÍHO EO	36
7.3 ELEKTRODY.....	36
7.3.1 IONIZAČNÍ ELEKTRODY.....	36
7.3.2 USAZOVACÍ ELEKTRODY	37
7.4 SKŘÍŇ	37
8 REALIZACE ZÁKLADNÍCH EXPERIMENTŮ.....	38
9 ZÁVĚR.....	40

POUŽITÁ LITERATURA	41
SEZNAM PŘÍLOH.....	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 5-1 Mokrý vápencová vypírka [8]</i>	20
<i>Obr. 5-1 Voltampérová charakteristika korónového výboje [3]</i>	21
<i>Obr. 5-3 Provedení profilů usazovacích elektrod [3]</i>	22
<i>Obr. 5-4 Komerový horizontální odlučovač [11]</i>	23
<i>Obr. 5-5 Systém přepadových kladiv [12]</i>	24
<i>Obr. 5-6 Akustický měnič [13]</i>	25
<i>Obr. 5-7 Zvonový izolátor s ochranným hrdlem [2]</i>	26
<i>Obr. 5-8 Vliv vrstvy prachu na průběh VA charakteristiky [2]</i>	26
<i>Obr. 6-1 Závislost počátečního kritického a přeskokového napětí na poloměru srčící elektrody [3]</i>	30
<i>Obr. 7-1 Dokončený laboratorní EO</i>	36
<i>Obr. 8-1 Schéma zapojení</i>	38
<i>Obr. 8-2 Mlhovač[16]</i>	39

SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Přípustné expoziční limity vybraných prachů [6]..... 16

Tab. 7-1 Základní parametry navrhnutého odlučovače35

SEZNAM VELIČIN

Symbol	Popis	Jednotka
a	velikost částic	m
d	rozteč elektrod	m
f	měrná usazovací plocha	$\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$
f_i	frekvence	Hz
g	gravitační zrychlení	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
i	měrný elektrický proud	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$
k	koncentrace	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
k_1, k_2	empirické konstanty Whiteheadovy-Brownovy rovnice	$\text{m}^{-1}, \text{m}^{1/2}$
m	hmotnost	kg
p	atmosférický tlak	Pa
q_p	náboj 1 kg prachu	$\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$
r	poloměr ionizační elektrody	m
r_e	referenční vzdálenost	m
s	dráha	m
t	teplota	$^{\circ}\text{C}$
x	počet usazovacích celků/ sekčí	/
z	poloměr ionizační oblasti	m
B	šířka aktivního prostoru	m
D	člen respektující vliv ostatních elektrod soustavy u komorového odlučovače	/
E	intenzita elektrického pole	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$
F	činitel geometrického uspořádání soustavy elektrod	/
L	aktivní délka odlučovače	m
L_p	akustický tlak	dB
O	odlučivost	%
Q_i	náboj iontu	C
Q_v	průtočné množství plynu	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
R	vzdálenost drátové elektrody od elektrod usazovacích	m
S	plocha usazovacích elektrod	m^2
S_p	aktivní průtočná plocha	m^2

U_e	napětí na elektrodách	V
U_0	počáteční napětí	V
U_{0k}	kritické počáteční napětí	V
U_{0kp}	kritické počáteční napětí za přítomnosti příměsi	V
U_p	napětí od prostorového náboje příměsi	V
$U_{př}$	přeskokové napětí	V
δ	poměrná rozteč elektrod	/
ε_0	permitivita vakua	F·m ⁻¹
ε_1	permitivita relativní	/
ϱ	relativní hustota vzduchu	/
ρ_p	prostorový náboj příměsi	C·m ⁻³
Φ	relativní vlhkost vzduchu	%

SEZNAM ZKRATEK**Zkratka***EO**PEL**TZL***Popis**

elektrostatický/ elektrický odlučovač

povolený expoziční limit

tuhá znečišťující látka

1 ÚVOD

Lidstvo vždy bylo závislé na energiích. Dnes dominuje v poptávaných energiích elektrická energie. Většina elektrické energie se vyrábí v uhelných elektrárnách, jelikož uhlí je relativně levná a rozšířená energetická surovina. Spalováním uhlí se ovšem do vzduchu dostávají nebezpečné emise. Proto se postupně vyvinuly různé druhy odlučovačů, které tento problém řeší a které se následně rozšířily do velké části průmyslu. Postupem času se stále zvyšovaly nároky na jejich účinnost, což vyústilo v masivní rozšíření elektrických odlučovačů, v energetice téměř výhradně jich.

V energetice mají elektrické odlučovače nezastupitelné místo, jelikož kombinují vysokou odlučivost s adekvátně vysokými náklady na jejich pořízení a provoz. Bez těchto zařízení by okolí elektráren bylo silně poznamenáno spadem popílku vypouštěného s plynnými emisemi z komínů elektráren, i přítomností velmi malých částic ve vzduchu, který obyvatelé dýchají.

Z počátku byly odlučovače navrhovány a konstruovány podle empirie a odhadů. To se stále vyššími nároky postupně přestávalo stačit a dnes jde o velmi komplexní obor založený na nejmenších detailech, které návrh ovlivňují.

Práce se zabývá návrhem a vývojem experimentálního odlučovače malých rozměrů. To znamená částečné zjednodušení výpočtů. Na rozdíl od průmyslových elektrostatických odlučovačů není v práci počítána odlučovací rychlost, rozměry a průtok vzdušiny je volen s ohledem na kompaktnost zařízení, velikost částic a jejich granulometrické vlastnosti se až na výjimky zanedbávají. Stejně jako u klasických odlučovačů je počítána intenzita elektrického pole, rozsah provozního napětí, počet ionizačních elektrod, povrch usazovacích elektrod atd. Vstupní parametry jsou voleny na základě poznatků z reálných aplikací, aby se vyvinutý experimentální odlučovač co nejvíce blížil reálně instalovaným průmyslovým odlučovačům. Tato práce je základem pro další rozvoj zkoušek a testování materiálů, ale i samotného odlučovače.

V práci je obsažen přehled technologií odlučování, zejména elektrickými odlučovači. Popisuje jejich funkční principy, konstrukci a použití. Dále jsou prováděny výpočty nutné pro návrh elektrického odlučovače. Následuje popis sestaveného modelu a zkoušek jeho funkce. V závěru je zhodnoceno splnění cílů práce a nastíněna případná další činnost na zařízení.

2 LEGISLATIVA

Rozvoj společnosti znamená i vypouštění škodlivých emisí z komínů elektráren, tepláren, ale i spaloven komunálních odpadů, cementáren atd. To vede k mnoha zdravotním problémům lidí a ke zkrácování délky dožití. K omezení těchto nežádoucích vlivů jsou zaváděny emisní limity a příslušná legislativa, která je dle [1] následující. V České republice se právy a povinnostmi provozovatelů, znečišťující ovzduší, zabývá zákon č. 01/2012 Sb. Na evropské úrovni je to rámcová směrnice 2008/50/ES „O kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu“ a směrnice 2010/75/EU „O průmyslových emisích“. K dosažení emisních limitů se používají technologie, jako odsiřovací zařízení, denitrifikační procesy a různé odlučovače či filtry. Tato práce se zabývá odlučovači elektrickými či elektrostatickými. Jejich činnost zajišťuje odlučování tuhých znečišťujících látek (TZL) z plynu na výstupním potrubí kotle dříve, než je vypouštěn komíny do atmosféry.

3 POPÍLEK

Popílek je společně se sazemí produktem hoření a vzniká spálením popelovin obsažených v palivu. Typickým producentem jsou tepelné elektrárny spalující uhlí, proto je často používáno spojení „*elektrárenský popílek*“. Dle [2] je definice popílku následující: „*Popílek je nejednotným druhem prachu. Liší se chemickým, granulometrickým a morfologickým složením i svými fyzikálními a fyzikálně chemickými vlastnostmi. Jeho koncentrace ve spalinách závisí jak na palivu samotném, tak na druhu kotle a způsobu spalování*“ [2].

Popílek, pocházející z hnědého a černého uhlí, těženého na území ČR, je podle [3] následujícího složení: oxid křemičitý SiO_2 (46 až 55 %), oxid hlinitý Al_2O_3 (18 až 28 %), a oxid vápenatý CaO (2 až 6 %). Podíl popílku, přecházející do spalin z popelovin, závisí především na technologii spalování uhlí. Procentní zastoupení popelovin přecházejících na popílek uvádí zdroj [4]. Práškové kotle 80 až 90 %, roštové kotle 40 %, cyklonové 30 %, cirkulační fluidní více než 90 %.

Popílek není pouze odpadní surovinou, je zároveň i vstupní surovinou pro širokou oblast výroby, zejména ve stavebnictví. Společnost ČEZ, a.s. [5] uvádí popílek jako suroviny pro výrobu:

- Směsí, stmelených hydraulickými pojivy dle ČSN EN 14227
- Pórového kameniva dle ČSN EN 13055
- Popílkových směsí
- Základkových směsí pro vyplňování prostor po těžbě uhlí
- Maltovin
- Cihlářských pálených výrobků
- Minerálních vláken
- Asfaltových výrobků
- Umělého kameniva
- Slévárenských písků
- Geopolymerů

4 ODLUČOVAČE

Odlučovače mají za úkol odstraňovat, resp. odlučovat pevné částice obsažené v plynu, tzn. prach. Tyto částice mohou vznikat, jak přírodně (vulkanická činnost, písečné bouře a další geologická činnost), tak v důsledku lidské činnosti (doprava, těžba nerostných surovin, spalování atd.). V některých případech mohou být tyto prachy cíleně vyráběny (potravinářství, zpracování nerostných surovin). V případě, že je prach v místě výskytu nežádoucí, je označován jako *tuhá znečišťující látka (TZL)*. Jejich koncentrace je sledována a kontrolována podle platných zákonů a nařízení. Příklad povolených expozičních limitů pro vybrané druhy prachů uvádí tab. 4-1 [6]. K odstraňování těchto částic je používáno odlučovačů. Využívají fyzikální principy, jako je působení gravitace, setrvačných sil, elektrických sil, atd. Podobně jako pevné částice lze z plynu odlučovat i částice kapalné.

Tab. 4-1 Přípustné expoziční limity prachů s převážně nespecifickým účinkem [6]

Látka	PEL (mg·m ⁻³)	Látka	PEL (mg·m ⁻³)
Baryt	10,0	Oxidy železa	10,0
Cement	10,0	Popílek	10,0
Čedič tavený	10,0	Prach z umělého brusiva	10,0
Prach PVC	5,0	Půdní prachy	10,0
Železo a jeho slitiny	10,0	Sádra	10,0
Hliník a jeho oxidy	10,0	Saze	2,0
Hnědé uhlí a lignit	10,0	Siderit	10,0
Mouka	4,0	Škvára	10,0
Ocelářská struska	10,0	Vápenec, mramor	10,0
Prach sklolaminátů	5,0	Vysokopecní struska	10,0

Rozdělení odlučovačů lze provést podle jejich hlavního funkčního principu. Rozdělením způsobů odlučování se zabývá Štorch [3] a dělí je do tří hlavních skupin, podle principů, na kterých fungují.

4.1 Mechanické odlučovače

Mechanické odlučovače jsou nejstarším typem odlučovačů. K odlučování využívají hmotnost částic, resp. síly na ně působící, tj. gravitační, setrvačné a odstředivé síly.

Nejjednodušším typem mechanického odlučovače je usazovací komora, což je v podstatě pouze rozšíření profilu potrubí, kde vlivem snížení rychlosti proudění dochází k usazování částic vlivem gravitační síly. Kvůli své nízké odlučovací schopnosti se v praxi téměř nevyužívá.

Nejrozšířenější typ mechanických odlučovačů je vírový odlučovač, tzv. cyklón. Ten využívá odstředivých sil působících na částice prachu, které vlivem gravitace „kloužou“ po spirálovité dráze na stěně cyklónu, až k výsypnému otvoru umístěnému ve spodní části.

Mezi výhody mechanických odlučovačů patří:

- nízká pořizovací cena,
- nízké provozní náklady,
- provozní spolehlivost,
- jsou vhodné i pro vysoké teploty plynů.

Mezi nevýhody mechanických odlučovačů patří:

- nízká odlučovací schopnost,
- velké rozměry.

4.2 Textilní odlučovače

V dnešní době se pro splnění přísnějších emisních limitů stále častěji přistupuje k použití textilních odlučovačů, tedy filtrů. Jejich princip je založen na průchodu filtrovaného plynu filtračním materiálem, na kterém se zachycují pevné částice. Samotné zachycení částic může být způsobeno více faktory:

- zachycení částice nárazem na vlákno – impakt,
- usazení malé částice na vláknu v důsledku Brownova pohybu – difuze,
- usazení částice ve filtrační vrstvě vlivem gravitace – sedimentace,
- zachycení větší částice než je rozměr pórů filtru – síťovací účinek,
- elektrostatické interakce mezi částicemi a filtrem – elektrostatické účinky.

Mezi výhody filtrů patří:

- vysoká odlučovací schopnost.

Mezi nevýhody filtrů patří:

- vysoká pořizovací cena,
- vyšší provozní náklady,
- velká tlaková ztráta,
- zanášení filtrů,
- filtrace pouze suchých spalin.

4.3 Elektrické odlučovače (EO)

Elektrické odlučovače využívají elektrického pole interagujícím s částicemi rozptýlenými v plynu. V odlučovači jsou umístěné vysokonapěťové a usazovací elektrody. Mezi nimi je ionizované elektrické pole, kde ionty narážejí do molekul odlučovaných částic, ionizují je a tyto ionizované molekuly jsou přitahovány k usazovacím elektrodám, čímž dochází k odlučování. Mizner [7] definuje odlučování jako „*Elektrické odlučování v elektrárenském provozu je proces, při kterém jsou tuhé částice popílku odstraněny z nosného kouřového plynu působení elektrických sil*“ [7]. Elektrické odlučovače existují dvojího typu, trubkové a komorové. Komorové lze dále dělit na vertikální a horizontální. U speciálních aplikací jsou používány tzv. mokré varianty, kde je usazovací elektroda smáčena vodou a usazující se částice jsou odplavovány.

Mezi výhody elektrických odlučovačů patří:

- vysoká odlučovací schopnost, v ideálních podmínkách více než 99 %.

Mezi nevýhody elektrických odlučovačů patří:

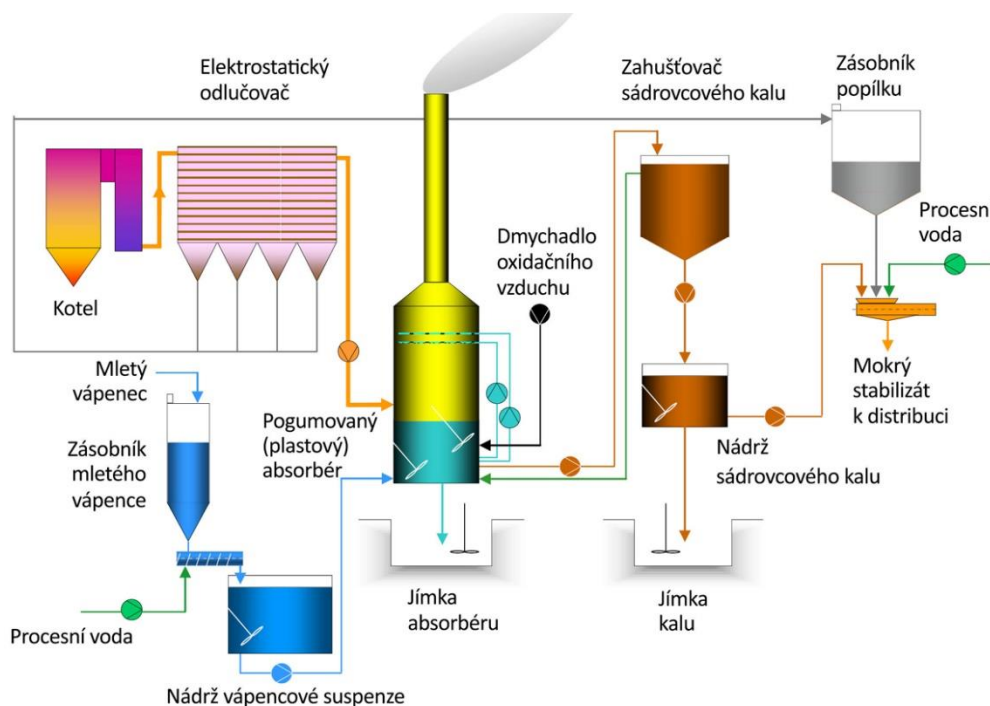
- vyšší pořizovací cena,
- velká zastavěná plocha (horizontální odlučovač),
- možný úlet částic při oklepávání elektrod.

5 ELEKTRICKÉ ODLUČOVAČE

Elektrické odlučovače bývají často označovány jako elektrostatické. To není přesné, jelikož při chodu zařízení dochází v elektrickém poli k pohybu částic mezi elektrodami a tím k průchodu elektrického proudu tzn., že elektrostatické pole přechází na pole elektrické.

5.1 Oblasti použití

Oblast použití elektrických odlučovačů je velmi široká. Nejvíce se uplatňují v energetice - elektrárny, teplárny, výtopny, spalovny odpadů, menší podnikové zdroje. EO jsou dnes součástí větších celků, které odstraňují i další škodliviny jako jsou oxidy síry, dusíku, či uhlíku. Příkladem může být mokrá vápencová vypírka pro odsiřování spalin, která je zobrazena na Obr. 5-1 [8].



Obr. 5-1 Mokrý vápencová vypírka [8]

Další uplatnění mají odlučovače v sektoru výroby cementu k odprašování rotačních pecí či různých mlýnic, v hutní výrobě při odprašování spékacích pásů, dopravních cest a vysokopecního plynu [3], [9].

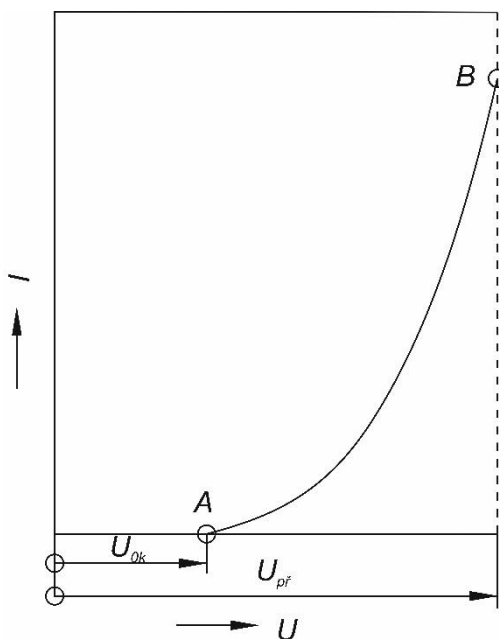
Mimo průmysl se elektrické odlučovače používají k odstraňování kouře a mastných par z kuchyňských provozů [10].

5.2 Korónový výboj

Korónový výboj je druh neúplného výboje, vznikající na elektrodách s malým poloměrem zakřivení, či na hrotech při překročení kritického počátečního napětí U_{0k} .

Přivede-li se na elektrody usměrněné napětí, vznikne elektrostatické. Většina molekul v plynu proudícím okolo elektrod je neutrálních a elektrické pole nijak neovlivňuje jejich pohyb. Současně je ale v plynu obsaženo malé množství iontů a elektronů, které vznikly ionizací před vstupem do oblasti elektrod (tepelná ionizace, ionizace kosmickým zářením...). Elektricky nabitě částice interagují s elektrickým polem a jsou přitahovány k elektrodám opačné polarity. Má-li napětí dostatečnou velikost, elektrické pole urychluje nabitě částice, které jsou následně schopny narážet

do neutrálních molekul a předáním své kinetické energie je ionizovat. Tento proces se nazývá nárazová ionizace. Pohyblivost iontů je závislá na jejich hmotnosti m , náboji Q_i , na dráze s , kterou překonají do srážky a na intenzitě elektrického pole E , resp. na velikosti napětí U . Zvyšováním napětí roste intenzita E , což vede k zrychlování pohybu iontů a tím roste i jejich potenciál ionizovat další částice. Napětí lze zvyšovat maximálně na hranici přeskokového napětí $U_{př}$, nad kterou dochází k elektrickému průrazu a přeskoku mezi elektrodami. Závislost proudu na napětí, tedy voltampérová charakteristika korónového výboje je na Obr. 5-2 [3].



Obr. 5-2 Voltampérová charakteristika korónového výboje [3]

V praxi je používána záporná koróna, protože je stabilnější a dovoluje odlučovač provozovat při vyšším napětí a větším proudu. Kladná koróna se využívá jen v aplikacích, ve kterých je čištění vzduch pro prostory obývané lidmi, jelikož při ní vzniká méně škodlivého ozónu, než při koróně záporné [2].

5.3 Konstrukce elektrických odlučovačů

Konstrukcí elektrických odlučovačů se zabývá Štorch [3], který popisuje konstrukční části EO následně: skříň EO, vysokonapěťové a usazovací elektrody, jejich zavěšení a systém oklepávání obou druhů elektrod.

5.3.1 Trubkové

Trubkové odlučovače byly prvním typem elektrických odlučovačů. Dnes se používají jen ve speciálních aplikacích, jako je použití za vysokých teplot, odlučování kapalných příměsí [2]. Jejich hlavní nevýhoda vychází ze samotné konstrukce odlučovače. Při oklepávání elektrod padají usazeniny aktivním prostorem trubky odlučovače, běžně i několik metrů. Proudem vzduchu jsou strhávány do úletu a odlučivost klesá.

Základ trubkových odlučovačů tvoří obvykle svisle umístěné trubky, čtyřstěny nebo šestistěny, sloužící jako usazovací elektroda. Na jejich koncích jsou elektrody spojeny s nosnou

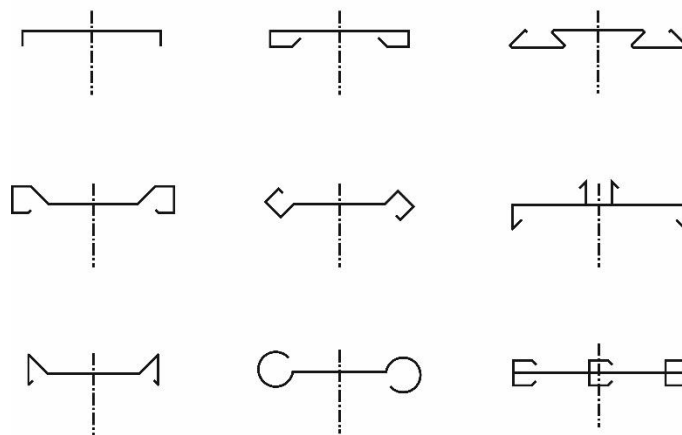
deskou, která je připevněna ke skříni odlučovače. Tato deska zároveň zabraňuje vnikání plynu do prostoru mimo elektrody. Vysokonapěťové drátové elektrody jsou zavěšeny na horní závěsný rám izolovaný od skříně odlučovače. Tyto vysokonapěťové elektrody procházejí osou usazovacích trubek a na konci jsou opatřeny napínacím závažím. Pro zajištění konstantní rozteče drátových elektrod, resp. vzdálenosti vysokonapěťové elektrody od usazovací, procházejí drátové elektrody ve spodní části pomocným vodícím roštem. Aby se tento rošt vlivem proudění plynu co nejméně pohyboval, bývá spojován s horním rámem pomocí distančních trubek.

Při odlučování velkých množství plynu se paralelně zařazuje více takovýchto souborů (sekcí) obvykle s vlastním zdrojem vysokého napětí. Velikost sekcí se volí vzhledem k možnostem oklepávání usazenin, velikosti proudu a napětí atd.

5.3.2 Komorové

Komorové odlučovače jsou novějším typem EO a jsou další generací této skupiny odlučovačů. Komorové odlučovače lze rozdělit na komorové horizontální a komorové vertikální. Nejrozšířenější jsou odlučovače horizontální. Vertikální odlučovače jsou používány ve speciálních aplikacích nebo tam, kde je nedostatek místa pro odlučovač horizontální. Obě varianty lze dále rozlišovat podle toho, jestli je k odstraňování usazenin používáno mechanických systémů, nebo proud vody. Takové varianty jsou nazývány „suché“, resp. „mokré“.

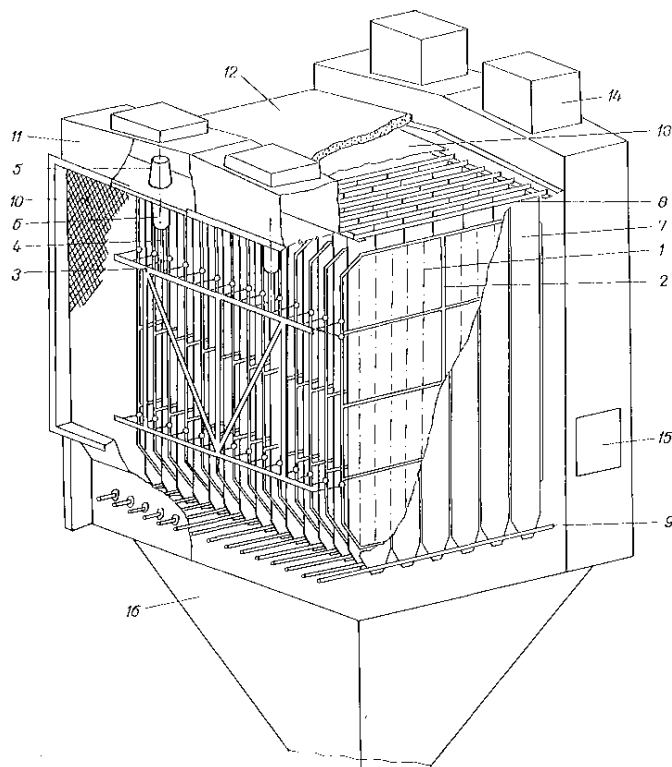
Hlavní část komorových odlučovačů tvoří, stejně jako u odlučovače trubkového, systém elektrod. Ty jsou k sobě umístěny paralelně, podélně ve směru proudění plynu. Vysokonapěťové elektrody bývají drátové, nebo hrotové, instalovány v pomocných rámech. Tyto rámy jsou dále zavěšeny na vodorovné závěsné rošty, které zajišťují konstantní vzdálenost obou druhů elektrod. Ke skříni jsou obvykle připevněny čtyřmi táhly s izolátory. Elektrody jsou umístěny v rovině osové souměrnosti mezi jednotlivé usazovací elektrody. Usazovací elektrody jsou skládány z různých ocelových profilů, navržených k co největšímu zadržení příměsí obsažených v plynu Obr. 5-3 [3]. Usazovací elektrody bývají upevněny volně pomocí čepů na závěsném trámci. Ve spodní části jsou přichyceny k oklepávacímu trámci, podélně volně uloženému, na který jsou přenášeny rázy z oklepávacích kladiv. V příčném směru na směr proudění je třeba zajistit vedení horních i dolních trámců k udržení stejné vzdálenosti mezi elektrodami.



Obr. 5-3 Provedení profilů usazovacích elektrod [3]

Komorové EO jsou z pravidla rozděleny do několika, za sebou řazených, sekcí. Důvody jsou mechanické i elektrické a to hlavně požadavek na oddělené napájení každé sekce. Hlavním výhodou takto děleného odlučovače je zajištění provozu i při závadě na některé ze sekcí.

Nejčastějším důvodem nefunkčnosti sekce je přeskok oblouku mezi elektrodami. Konstrukce komorového odlučovače je znázorněna na Obr. 5-4 [11].



Komorový horizontální odlučovač – jedna sekce

1 — ionizační elektroda; 2 — nosný rám ionizačních elektrod; 3 — závěsný rám;
 4 — závěsné táhlo; 5 — izolátor; 6 — ochranná trubka; 7 — sběrací elektroda;
 8 — nosný trám sběrací elektrody; 9 — vodící a oklepávací trámy;
 10 — rozdělovačí stěna; 11 — nosník skříně; 12 — střecha skříně; 13 — mezistrop;
 14 — komůrky izolátorů; 15 — průřez; 16 — sběrač

Obr. 5-4 Komorový horizontální odlučovač [11]

5.4 Skříň EO

Vnější obal neboli skříň EO, je v podstatě kouřovod se zvětšeným průřezem potrubí. Větší průřez je nutný z důvodu snížení rychlosti proudícího plynu a tedy ke správné funkci odlučovače. Na vstupu do odlučovače se umísťují různé systémy, jako vodící lopatky, či rozdělovací mříže, pro rovnoměrné rozdělení proudícího plynu s nečistotami a pro dosažení maximální účinnosti EO. Dále jsou uvnitř skříně umísťovány další krycí plechy, které zabraňují proudění plynu do nežádoucích míst, jako např. mezi stěnu skříně a usazovací elektrodu nebo k izolátorům atd.

Hlavní funkcí skříně EO je funkce nosná. Skříň musí být dostatečně dimenzována na zátěž všech elektrod, oklepávacích trámů, pomocných rámců, izolátorů, případně izolace. V zimním období se k tomuto výčtu přidává zátěž sněhem. Skříň je také částečně namáhaná podtlakem uvnitř odlučovače a je opatřena ložisky, kvůli tepelné dilataci.

Ve spodní části odlučovače jsou umísťovány výsyvky, do kterých padají odloučené nečistoty. V případě suchých odlučovačů jsou výsyvky pro odvod jejich obsahu vybaveny šnekovými nebo redlerovými dopravníky.

Další z aspektů, který musí skříň splňovat, je její těsnost. V případě, že by byl do odlučovače přisáván vzduch, např. výsypkami, mohlo by docházet k rozvířování prachu a ke snížení celkové odlučivosti.

V případech, kdy by bylo vnější prostředí chladnější do té míry, že by se plyn uvnitř odlučovače ochlazoval pod hodnotu rosného bodu, je potřeba odlučovač tepelně izolovat. V opačném případě bude v odlučovači kondenzovat vodní pára, bude docházet ke korozi a bude se zvyšovat riziko lepení odloučených nečistot, což by mohlo vést k ucpávání výsypek odlučovače.

5.5 Čištění elektrod

Čištění elektrod je pro provoz EO velice důležitá činnost. Při zanedbání čištění dochází k usazování nečistot na obou elektrodách, což nepříznivě ovlivňuje chod odlučovače.

5.5.1 Přepadová kladiva

K odstranění vzniklých nánosů na usazovacích a částečně i na ionizačních elektrodách je použit oklepávací systém s přepadovými kladivy. Ta údery na závěsy elektrod, dodávají dostatek energie k „odrhnutí“ vrstev usazenin od elektrod, viz Obr. 5-5 [12]. Pohony oklepávací systémů bývají umístěovány vně skříně EO a spojení s hřídelí kladiv je řešeno pomocí izolačních spojek. Pro odstranění usazenin je zapotřebí dosahovat zrychlení kladiv v řádu stovek g [3].



Obr. 5-5 Systém přepadových kladiv [12]

5.5.2 Skrápěné elektrody

Skrápěné elektrody se používají v odlučovačích, ve kterých by se odlučovaná příměs na usazovacích elektrodách lepila, a nebylo možné ji oklepáváním odstraňovat. Elektrody jsou skrápěné shora, odloučená příměs stéká do jímacích nádrží a je dále distribuována ke zpracování. Společně s tímto systémem je nutností přítomnost vodního hospodářství.

5.5.3 Akustické měniče

Alternativou k mechanickému odstraňování nánosů může být akustický měnič. Akustický měnič je širokopásmový zdroj zvuku o nízké frekvenci f_1 (64 - 272 Hz) a hladině akustickém tlaku L_p (137 - 147 dB v referenčním místě r_e 1 m). Zvuk, který je zaveden do čištěného prostoru, rozkmitává částice vzduchu, které svým působením uvolňují částice usazených nečistot [13].

Konstrukci akustického měniče tvoří těleso měniče a zvukovod. V tělese měniče je umístěna membrána, která je rozkmitávána přiváděným stlačeným vzduchem a zároveň v tělese měniče

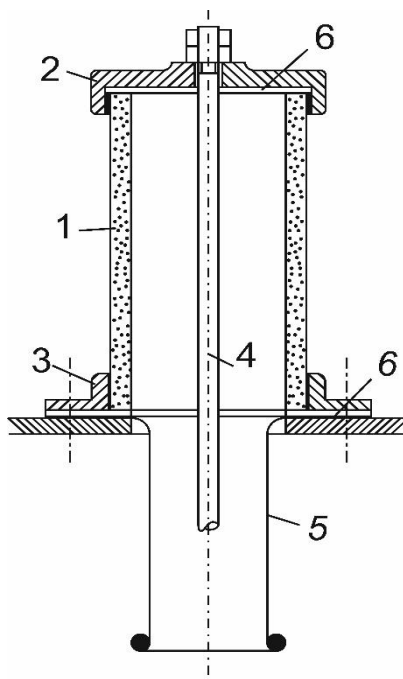
vzniká turbulentní proudění vzduchu. Tím vzniká zvuk o daných parametrech, který je vyváděn zvukovodem do určeného prostoru [13]. Příklad akustického měniče je uveden na Obr. 5-6 [13].



Obr. 5-6 Akustický měnič [13]

5.6 Izolátory

Jelikož jsou usazovací elektrody uzemněny a ionizační elektrody jsou pod napětím, je třeba je vzájemně elektricky izolovat. To uvnitř EO zajišťuje plyn v aktivní části. V místech, kde prochází napájecí vodiče, nebo kde je vnitřní vestavba upevněna na skříň se používají izolátory. V EO nejsou pro izolátory optimální podmínky, protože se často dostávají do styku s příměsí plynu, která znečišťuje jejich povrch, případně s vlhkostí. Oba tyto faktory mohou snižovat izolační schopnost daných prvků a v krajních případech zapříčinit nefunkčnost odlučovače. Izolátory, ať už zvonové, průchodkové, či podpěrné se často musí chránit proti zanášení prachem, aby se nemohla na jejich povrchu nahromadit vrstva prachu, přes kterou by došlo k přeskoku a tím ke ztrátě funkčnosti izolátoru. Tomu lze předejít instalací tzv. ochranných hrdel, což je kovový válec, umístěný okolo závěsného táhla pod izolátorem. Válec je uzemněn, tím zde vzniká elektrické pole, a proto funguje jako trubkový odlučovač. Zvonový izolátor s ochranným hrdlem je uveden na Obr. 5-7 [2].



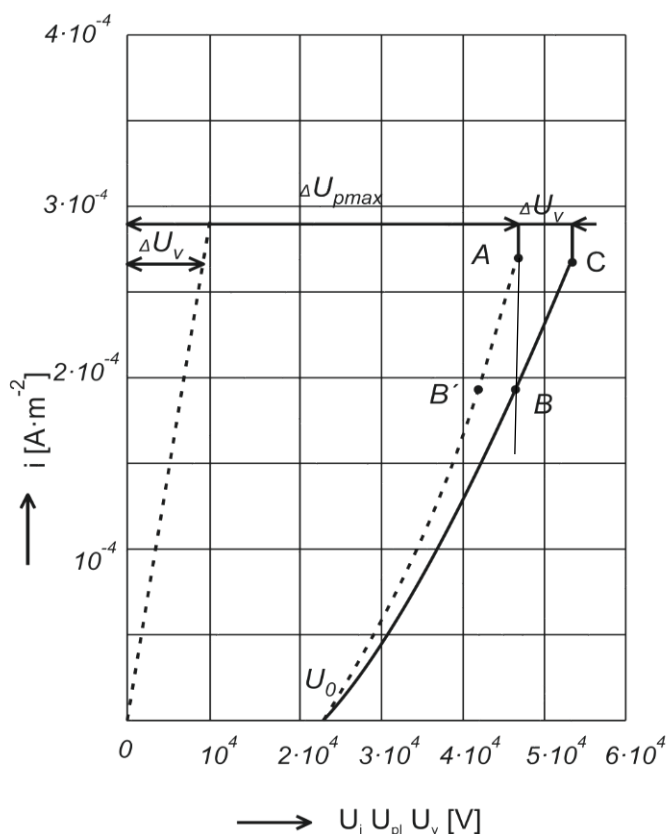
1 – těleso izolátoru; 2 – horní armatura; 3 – spodní armatura;
4 – závěsné táhlo; 5 – ochranná trubka; 6 – „měkké“ podložky

Obr. 5-7 Zvonový izolátor s ochranným hrdlem [2]

5.7 Nežádoucí provozní stav

Nežádoucí provozní stav popisuje Štorch [3]. Při provozu odlučovače se na stěnách uzemněných elektrod usazují částice z odlučovaného plynu. Prochází-li částice odlučovačem, je ionizována, získává náboj a je přitahována uzemněné elektrodě. Pokud má materiál příměsí malý měrný odpor ($<10^2 \Omega\text{m}$), částice po dotyku s usazenou vrstvou ztrácí svůj záporný náboj, přijímá kladný náboj a je z vrstvy odpuzována. Je-li třecí síla mezi částicí a usazenou vrstvou menší než odpudivá síla elektrického pole, je částice vytržena zpět do proudícího plynu a celý odlučovací proces se opakuje. Má-li materiál příměsí velký odpor, usazená částice se vybíjí pomalu, postupně je obkloповána dalšími částicemi, vzniká souvislá vrstva a zůstává na svém místě až do oklepávání elektrod.

S narůstající vrstvou usazenin se zároveň zvětšuje její měrný odpor ρ a spád napětí ve vrstvě ΔU_v . Spád napětí je součinem měrného odporu vrstvy ρ , tloušťky vrstvy s a měrného proudu i procházející vrstvou. Vlivem rostoucí vrstvy usazených částic se voltampérová charakteristika nahýbá doprava od $B'A$ ke křivce BC a je méně strmá Obr. 5-8 [2]. Pokud vrstva usazenin stále narůstá, dojde při určité tloušťce k průrazu už v bodě B, namísto v bodě A při nulové tloušťce usazenin, vlivem zvýšeného elektrického namáhání plynu mezi částicemi ve vrstvě. Průraz zapříčiní ionizaci v okolí místa průrazu, do okolí jsou emitovány kladné ionty, které neutralizují nabitě částice v odlučovacím prostoru, což má za následek pokles odlučovací rychlosti a tím i účinnosti odlučovače. Tento jev se nazývá zpětná koróna. Při průrazu vrstvy prachu se zároveň snižuje přeskokové napětí.



Obr. 5-8 Vliv vrstvy prachu na průběh VA charakteristiky [2]

Odstranění zpětné koróny lze dosáhnout více způsoby. Jedním z nich je snížením měrného odporu vrstvy usazenin snížením rozdílu mezi provozní teplotou a rosným bodem plynu. Dalším způsobem je snížení měrného proudu procházející vrstvou prachu současně s dostatečným napětím dodáním elektronegativních plynů zvyšující přeskokové napětí snížením pohyblivosti iontů. Poslední možností je provoz s nízkým měrným proudem a nízkým provozním napětím z čehož plyne nutnost zvětšit plochu usazovacích elektrod k docílení dané odlučivosti [3].

5.8 Energetika

V současnosti je pro odlučování popílku ze spalin u společnosti ČEZ, a.s. (největší provozovatel tepelných elektráren v ČR) dle [14] používáno odlučovačů: elektrostatických, textilních, cyklónových případně i jejich vzájemná kombinace. Pokud je používán cyklónový odlučovač bývá předřazován před odlučovač elektrický. Cyklónový odlučovač nemá dostatečnou účinnost na odstranění všeho popílku, proto je doplňován o elektrický odlučovač, který může být dimenzován na menší koncentrace znečištění a který může dočišťovat procházející plyn téměř 100%.

Stejně jako u nás se i ve světové energetice používají hlavně elektrické odlučovače. V jejich prospěch hraje zejména vysoká odlučivost a malá tlaková ztráta. Těchto parametrů dohromady je u jiných druhů odlučovačů v podstatě nemožné dosáhnout. [15]

6 TEORIE NÁVRHU ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE

V této kapitole budou uvedeny zásady pro návrh EO. Provedení odlučovače bude komorové, jelikož je v praxi nejčastěji používáno. Proto se všechny rovnice a ostatní detaily budou vztahovat právě na tento konkrétní typ EO. Návrhem a výpočtem EO se zabývá Böhm [2].

Jedním z nejdůležitějších parametrů odlučovače je provozní napětí. Základním bodem k jeho určení je výpočet kritické počáteční intenzity elektrického pole E_{0k} ($V \cdot m^{-1}$), ze které se vypočítá potřebné napětí, aby ionizovaným plynem začal procházet elektrický proud.

$$E_{0k} = k_1 \cdot \vartheta \cdot \left(1 + \frac{k_2}{\sqrt{\vartheta \cdot r}} \right), \quad (6.1)$$

kde k_1 ($V \cdot m^{-1}$) a k_2 ($m^{1/2}$) jsou empirické konstanty, které ovlivňuje geometrické uspořádání elektrod, jejich polarita a stav a druh plynu, odlučovačem procházející. Při teplotě $T_0=298$ K a tlaku $p_0=101325$ Pa uvádí [2] hodnoty konstant pro zápornou korónu a soustavu elektrod paralelních válců následovně: $k_1= 31,02 \cdot 10^5$ a $k_2= 3,08 \cdot 10^{-2}$, ϑ je relativní hustota a r je poloměr ionizační elektrody.

Relativní hustotu ϑ lze vypočítat jako:

$$\vartheta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}. \quad (6.2)$$

K dosažení korónového výboje a tedy funkčnosti EO je nutné přivést odpovídající napětí U . To se skládá ze složek úbytku napětí na vrstvě příměsi U_v , napětí U_p reprezentující prostorový náboj příměsi a napětí U_e , což je napětí na elektrodách.

$$U = U_v + U_p + U_e \quad (6.3)$$

Vzhledem k velikosti celkového napětí lze úbytek napětí na vrstvě příměsi U_v zanedbat. Následně je napětí vyjádřeno jako:

$$U = U_p + U_e. \quad (6.4)$$

Napětí U_p se pro komorový odlučovač určí jako:

$$U_p = \frac{\rho_p \cdot R^2}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1}, \quad (6.5)$$

kde ρ_p je hustota prostorového náboje příměsi, ε_0 a ε_1 je permitivita vakua ($F \cdot m^{-1}$) a relativní permitivita ($/$).

Hustota prostorového náboje příměsi ρ_p je součinem koncentrace k ($kg \cdot m^{-3}$) a náboje 1 kg prachu q_p ($C \cdot kg^{-1}$). [3]

$$\rho_p = k \cdot q_p \quad (6.6)$$

Napětí U_e lze vyjádřit pomocí E_{0k} , poloměru r a činitelem geometrického uspořádání soustav elektrod F a za podmínky $r < 0,1R$.

$$U_e = U_{0k} = r \cdot F \cdot E_{0k} \quad (6.7)$$

Činitel geometrického uspořádání soustav elektrod F se pro jednotlivá uspořádání elektrod liší. Pro soustavu více elektrod umístěných mezi dvěma rovinnými plochami, tzn. pro komorový odlučovač je činitel F vyjádřen:

$$F = \ln \frac{4 \cdot R}{\pi \cdot r} + D, \quad (6.8)$$

kde D je člen respektující vliv ostatních elektrod soustavy u komorového odlučovače.

$$D = \sum_{n=1}^n \ln \frac{\cosh \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot \delta + 1}{\cosh \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot \delta - 1}, \quad (6.9)$$

kde n je počet ionizačních elektrod sekce odlučovače a δ je poměrná rozteč elektrod, která je podílem d/R . Hodnota δ je obvykle volena jako 1,1, pro rovnoměrné rozložení elektrostatického pole.

Výsledné napětí U , které je třeba přivést na odlučovač je tedy:

$$U = U_{0k} + U_p = U_{0kp}, \quad (6.10)$$

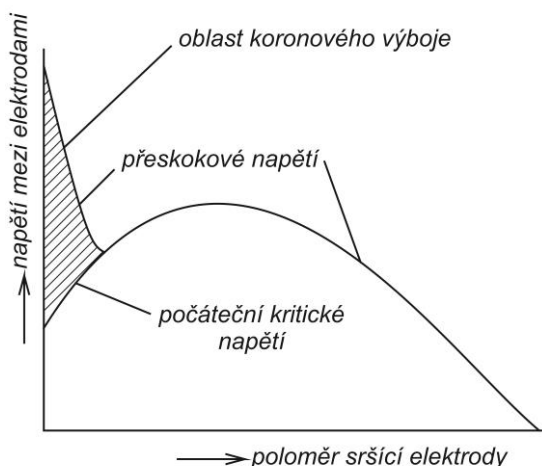
kde U_{0kp} značí počáteční kritické napětí ve znečištěném plynu s hustotou prostorového náboje příměsi ρ_p .

Vztah pro výpočet počátečního napětí U_0 u komorového odlučovače je podle Štorcha [3] výrazně jednodušší a je přibližně:

$$U_0 \approx E_0 \cdot r \cdot \ln \frac{4R}{3r}. \quad (6.11)$$

Napětí, při kterém probíhá korónový výboj, je zdola omezeno počátečním napětím a shora jej určuje přeskokové napětí jak je vidět na Obr. 6-1 [3], kde je blíže vidět závislost na poloměru ionizující elektrody. Při napětím větším než je přeskokové, přechází korónový výboj v přeskok a odlučovač se tak stává nefunkčním.

$$U_{pr} = k_1 \cdot F \cdot \left[(0,1 \cdot \vartheta \cdot R) + k_2 \cdot \sqrt{(0,1 \cdot \vartheta \cdot R)} \right] \quad (6.12)$$



Obr. 6-1 Závislost počátečního kritického a přeskovového napětí na poloměru sršící elektrody [3]

Základním parametrem odlučovačů obecně z pohledu ekologie, resp. čištění spalin, tedy z pohledu jejich samotného účelu, je odlučivost. Odlučivost O (%) vyjadřuje kvalitu vycištění plynu jako podíl mezi zachyceným množstvím prachu a množstvím přivedeným do odlučovače.

Odlučivost EO lze určit pomocí Deutschova vztahu. Ten byl určen za zjednodušujících předpokladů, že je odlučovač napájen stejnosměrným napětím, neuvažuje se přechodný stav pohybu příměsi, náboj částic příměsi a intenzita elektrického pole E se v podélném směru odlučovače nemění. Tyto předpoklady by znamenaly, že střední rychlost odlučování w bude konstantní v celé aktivní délce odlučovače. V praxi tomu tak není, avšak pro potřeby této práce bude zmíněné zjednodušení akceptováno.

Deutschův vztah odlučivosti pro komorový odlučovač dle [3] je následující:

$$O = 1 - e^{-\frac{L \cdot w}{R \cdot v}}, \quad (6.13)$$

kde je L pracovní délka odlučovače (m), w je střední odlučovací rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), R je vzdálenost vysokonapěťové a sběrací elektrody (m) a v je rychlost proudění plynu odlučovačem ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

V technické praxi se rychlost proudění v pohybuje mezi $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Rychlost se volí tím menší, čím je odlučovaná příměs plynu více disperzní (jemnozrnná).

Předchozí rovnici lze upravit do následujícího tvaru:

$$O = 1 - e^{-f \cdot w}, \quad (6.14)$$

kde f ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) je měrná usazovací plocha, tzn. poměr S/Q , což je podíl plochy usazovací elektrody ve směru kolmém na směr proudění S (m^2) k průtočnému objemu plynu Q_v ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a w ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) je střední odlučovací rychlost. Výše uvedené rovnice platí pro nezanesené elektrody.

Určení střední odlučovací rychlosti w je velmi komplexní a přesáhlo by rámec této práce. Rychlost w závisí např. na vzdálenosti vysokonapěťové a sběrací elektrody, činiteli geometrického uspořádání soustavy elektrod, permitivitě, součiniteli nabíjení, na tvarovém součiniteli elektrostatického pole, atd. Výpočet proto bude nahrazen odhadem, založeným na skutečných hodnotách v praktických aplikacích.

Z rovnice odlučivosti (6.2) lze vyjádřit měrnou sběrací plochu f .

$$f = \frac{\ln(1 - O)}{-w} \quad (6.15)$$

Jelikož je měrná usazovací plocha f poměrem usazovací plochy S k průtočnému množství plynu Q_v , lze určit poměr obou parametrů s ohledem na výslednou velikost zařízení.

$$f = \frac{S}{Q_v} \quad (6.16)$$

Průtočné množství Q_v ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je určeno součinem aktivní průtočné plochy S_p (m^2) a rychlosti proudění spalin v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$Q_v = S_p \cdot v \quad (6.17)$$

Nyní lze, při znalosti vzdálenosti R , lze vypočítat aktivní výšku elektrod H (m).

$$H = \frac{S_p}{2 \cdot R \cdot x}, \quad (6.18)$$

kde x určuje počet usazovacích celků, tzn. počet dvou usazovacích elektrod s jedním rámem ionizačních elektrod mezi nimi. Jmenovatel rovnice 6.18 udává celkovou šířku aktivního prostoru.

Pro určení aktivní délky odlučovače L , lze využít rovnici (6.14). Vyjádřením této veličiny rovnice přechází na následující tvar.

$$L = \frac{(1 - O) \cdot R \cdot v}{-w} \quad (6.19)$$

7 VÝPOČET A REALIZACE LABORATORNÍHO EO

Část parametrů EO nelze exaktně určit, ale je třeba si je zvolit podle konkrétní aplikace. Další možností je odhad na základě předchozích instalací. Tato skutečnost je zapříčiněná tím, že se některé rovnice vzájemně ovlivňují, obsahem stejných neznámých, např. rovnice 6.17 a 6.19. Výsledek se musí upravit např. podle prostorových poměrů na místě instalace. Zároveň nelze určit konkrétní pořadí jednotlivých rovnic a je nutné jejich velkou část provádět souběžně.

Jelikož konstruovaný odlučovač je zamýšlen jako experimentální k ukázce principů činnosti, budou voleny rozměry, rychlosti nebo účinnosti s ohledem na výslednou velikost celého zařízení a provozního napětí. Není cílem navrhnout EO se všemi parametry běžnými v praxi. Odlučovací rychlost w bude vzhledem ke komplexnosti výpočtu a neznalosti všech parametrů odlučované příměsi zvolena jako $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ což je nejčastěji uváděná rychlost odlučování např. Štorchem [3].

7.1 Výpočty

Při zvolené odlučivosti $O=90\%$, poloměru ionizačních elektrod $r=0,2 \text{ mm}$, vzdálenosti mezi ionizační a uzemněnou elektrodou $R=30 \text{ mm}$, rychlosti proudění plynu $v=0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a odlučovací rychlosti $w=0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a relativní hustotě plynu $\vartheta=1$, je počáteční kritická intenzita elektrického pole:

$$E_{0k} = 3,102 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{3,08 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{1 \cdot 2 \cdot 10^{-4}}} \right) = 9857811,325 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}. \quad (7.1)$$

Následně se určí napětí U_p . Budeme předpokládat velikost částic $a=5\cdot 10^{-6}$, kterým připadá náboj $q_p=37,5\cdot 10^{-4} \text{ C}\cdot\text{kg}^{-1}$ a koncentraci $k=6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ vycházející z průměrné hodnoty pro hnědouhelné granulační kotle. Relativní permitivita popílku je 3. [3]

Nejdříve se vypočítá prostorový náboj příměsi ρ_p ,

$$\rho_p = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 37,5 \cdot 10^{-4} = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ C}\cdot\text{m}^{-3}, \quad (7.2)$$

následně napětí od prostorového náboje příměsi U_p :

$$U_p = \frac{2,25 \cdot 10^{-5} \cdot 0,03^2}{2 \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot 3} = 381,1750 \text{ V}. \quad (7.3)$$

Pro výpočet dalších složek napětí je nutné vypočítat činitel uspořádání elektrod F . Nejprve minimální aktivní délka odlučovače:

$$L_{min} = \frac{(1 - 0,9) \cdot 0,03 \cdot 0,5}{-0,1} \doteq 0,35 \text{ m}. \quad (7.4)$$

Následuje rozteč elektrod d . Při aktivní délce odlučovače $L=0,35 \text{ m}$ a v praxi obvyklé poměrné rozteči ionizačních elektrod $\delta=1,1$, lze vypočítat rozteč elektrod d :

$$d = \delta \cdot R, \quad (7.5)$$

$$d = 1,1 \cdot 0,03 = 0,033. \quad (7.6)$$

Rozteč jednotlivých drátů elektrod je 33 mm, z toho lze spočítat počet drátů jedné elektrody n .

$$n = \frac{L}{d} \quad (7.7)$$

$$n = \frac{350}{33} = 10,61 \doteq 11 \quad (7.8)$$

do jedné sekce odlučovače tedy lze umístit 11 ionizačních elektrod- $n=11$. A nyní lze provést výpočet členu D .

$$D = \sum_{n=1}^{11} \ln \frac{\cosh \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot 1,1 + 1}{\cosh \frac{\pi}{2} \cdot n \cdot 1,1 - 1} = 2,2291 \quad (7.9)$$

Teď již lze vypočítat činitel F :

$$F = \ln \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2}}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-4}} + 2,2291, \quad (7.10)$$

$$F = 7,4813. \quad (7.11)$$

Napětí na elektrodách U_e :

$$U_e = U_{ok} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 7,4813 \cdot 9857811,325 = 14,7498 \text{ kV}. \quad (7.12)$$

Napětí, které je třeba přivést na elektrody pro fungování zařízení je kritické počáteční napětí a napětí od prostorového náboje příměsi.

$$U = U_{okp} = U_{ok} + U_p = 14,7498 + 0,3812 = 15,1310 \text{ kV} \quad (7.13)$$

Z rovnice 7.8 a 7.9 vyplývá, že napětí od prostorového náboje příměsi U_p je v porovnání s celkovým počátečním napětím velmi malé. Při menších koncentracích k , než je použitých $6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ lze napětí U_p téměř zanedbat, ale být si vědom toho, že reálné napětí bude vyšší. Pokud by byla koncentrace pevných částic vyšší, je už nutné zvážit, zda toto napětí zanést do výpočtů.

Podle Štorcha [3] je potřebné počáteční napětí následující:

$$U = 9857811,325 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{4 \cdot 0,03}{3 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 10,4460 \text{ kV.} \quad (7.14)$$

Z porovnání obou počátečních napětí vyplývá, že výsledek podle [3] je téměř o 30 % nižší. To je pravděpodobně způsobeno zejména zanedbáním členu respektující vliv ostatních elektrod soustavy D a napětí prostorového náboje příměsi U_p .

A již samotné přeskokové napětí $U_{př}$. Za podmínky $z \leq 0,1 R$, je přeskokové napětí následující:

$$U_{př} = 3,102 \cdot 10^6 \cdot 7,1326 \cdot \left[(0,1 \cdot 1 \cdot 0,03) + 3,08 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{(0,1 \cdot 1 \cdot 0,03)} \right] = \quad (7.15) \\ 108,7708 \text{ kV.}$$

Provozní napětí by se tedy mělo pohybovat v rozmezí od 10,446 kV resp. 15,130 kV do 108,7708 kV. Tento výsledek je pravděpodobně velmi nadhodnocený.

Dále je nutné dokončit návrh rozměrů zařízení. Pro další výpočty se nejprve určí měrná usazovací plocha.

$$f = \frac{\ln(1 - 0,9)}{-0,1} = 23,0259 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1} \quad (7.16)$$

Následně lze spočítat aktivní plochu elektrod S . K tomu je zapotřebí znát objem protékané vzdušiny. V tomto případě jí určuje ventilátor Dospel 100 s průtokem $Q_v = 0,0278 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$S = \frac{f \cdot Q_v}{2} \quad (7.17)$$

$$S = \frac{23,0259 \cdot 0,0278}{2} \doteq 0,315 \text{ m}^2 \quad (7.18)$$

Z průtočného množství Q_v a rychlosti proudění lze použitím rovnice 6.17 spočítat aktivní průtočnou plochu S_p (m^2).

$$S_p = \frac{0,0278}{0,5} = 0,054 \text{ m}^2 \quad (7.19)$$

Při volbě tří paralelních sekcí elektrod jde určit šířka aktivního prostoru jako:

$$B = x \cdot 2R, \quad (7.20)$$

$$B = 3 \cdot 0,06 = 0,18 \text{ m.} \quad (7.21)$$

Nyní lze vypočítat výšku aktivního prostoru H .

$$H = \frac{S}{L \cdot x} \quad (7.22)$$

$$H = \frac{0,315}{0,35 \cdot 3} = 0,3 \text{ m} \quad (7.23)$$

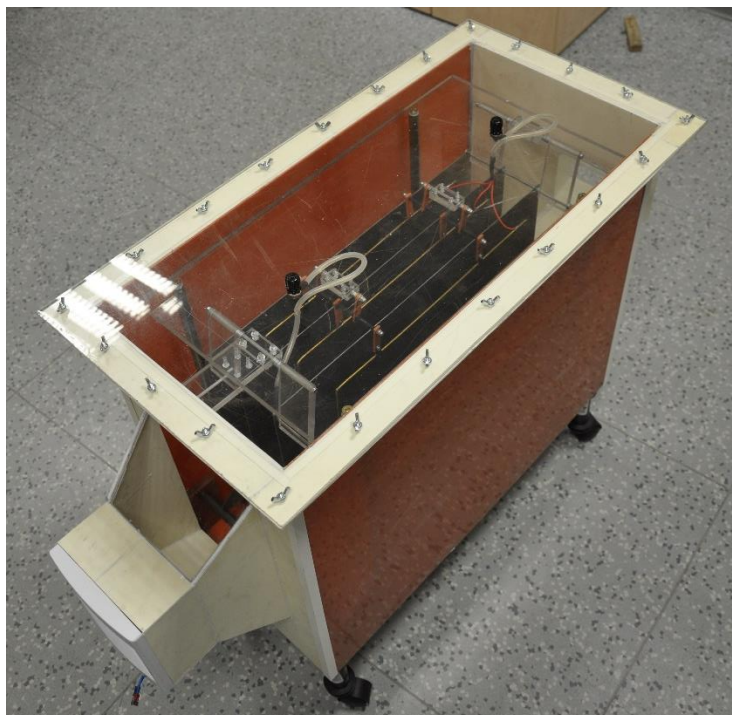
V následující tabulce *Tab. 7-1* jsou vidět základní parametry navrhovaného odlučovače

Tab. 7-1 Základní parametry navrhnutého odlučovače

aktivní délka odlučovače L	0,35 m
výška H	0,3 m
šířka jedné sekce B	0,06 m
vzdálenost vysokonapěťové a ionizační elektrody R	0,03 m
počet sekcí (paralelně)	3
střední odlučovací rychlosti w	$0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
rychlost proudění plynu odlučovačem v	$0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
průtočné množství plynu Q_v	$0,027 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
celková odlučivost O	90 %
poloměr ionizační elektrody r	$2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
počáteční kritické napětí U_k	15,131 kV

7.2 Konstrukce laboratorního EO

Konstrukce odlučovače je pojata jako modulární, tzn., že skříň odlučovače a elektrody nejsou vzájemně pevně spojeny a modul elektrod lze zaměnit za jiný. To umožňuje větší variabilitu zařízení. Proudění uvnitř EO je řešeno jako podtlakové, kdy je ventilátor umístěn na konci odlučovacího procesu. To zajišťuje větší životnost motoru ventilátoru, jelikož kolem něj nebude proudit takové množství nečistot jako u přetlakového řešení. Oklepávání elektrod je ruční, pomocí táhel. Celkové rozměry zařízení (bez výškově nastavitelných nohou) jsou 390 x 580 x 1060 mm. Realizovaný návrh zařízení je vidět na Obr. 7-1.



Obr. 7-1 Dokončený laboratorní EO

7.3 Elektrody

Ionizační i usazovací elektrody jsou konstruovány jako jeden celek, který lze vertikálně vysunout ze skříně odlučovače. Oba druhy elektrod jsou zavěšeny na transparentní desce, pro lepší vizuální přehled uvnitř. Elektrody jsou záměrně větší, než je spočítáno, aby jejich uchycení nezasahovalo do aktivní plochy. Spodní část modulu elektrod tvoří rám z plastového plochého profilu 50 x 10 mm a obě plochy jsou odděleny kovovými distančními rozpěrami. Zavěšení je řešeno jako pohyblivé v podélné ose odlučovače, aby mohlo probíhat oklepávání elektrod. Elektrické připojení je zajištěno přístrojovými konektory a vysokonapěťovými kabely s provozním napětím 20 kV.

7.3.1 Ionizační elektrody

Rám ionizačních elektrod je vyroben z ohýbaného mosazného drátu průměru 3 mm. Celkový rozměr rámu činí 365 x 315 mm. Na jeho horní a spodní příčce je 11 otvorů s rozstupem 33 mm pro protažení samotných elektrod. Elektrody jsou zhotoveny z měděného vodiče průměru 0,4 mm, který je na začátku a konci připájen k rámu. Soubor ionizačních elektrod je celkově tvořen třemi totožnými, paralelně umístěnými, rámy s ionizačními elektrodami v osové vzdálenosti 60 mm.

Soubor ionizačních elektrod je zavěšen pomocí plastových závěsníků, které zároveň slouží jako izolátory. Závěsy jsou uloženy otočně tak, aby umožňovaly pohyb elektrod pro jejich oklepávání.

Oklepávání elektrod je zajištěno pomocí pružin a táhla. Soubor ionizačních elektrod je v zadní části přichycený dvojicí pružin k rámu. Ty zajišťují dostatečný zpětný tah, když dojde k vysunutí souboru elektrod v podélném směru pomocí táhla, které je umístěno v přední stěně skříně EO. Vymrštěním zpět se elektrody odstraní nánosy usazenin.

7.3.2 Usazovací elektrody

Usazovací elektrody jsou tvořeny ocelovým plechem o rozměrech 300 x 500 mm a o tloušťce 1,5 mm. Čtyři jednotlivé elektrody jsou navzájem spojeny závitovými tyčemi v osové vzdálenosti 60 mm. Elektrody jsou zavěšeny pomocí čtyř závěsných pásů na horní desku. Napnutí souboru elektrod zajišťuje pružina v horní části. Ve spodní části jsou elektrody opatřeny dorazovými plochami, které nárazem do příčky zastaví pohyb elektrod, čímž dojde k oklepání usazených nečistot. Stejně jako u ionizačních, tak i u usazovacích elektrod je v jejich přední části umístěno táhlo pro jejich oklep.

7.4 Skříň

Skříň odlučovače je vyrobena z plastových desek různé tloušťky a plexiskla spojovaných šroubováním a lepením.

Základ skříně tvoří rám o rozměrech 300 x 660 mm, který je vyroben z plastového plochého profilu 50 x 10 mm. Vnitřní část rámu vyplňují dvě kónické výsyvky pro odvod odloučených částic. Obě výsyvky jsou opatřeny transparentní stěnou pro vizuální kontrolu a uzavíratelným dnem s těsněním pro zamezení přísávání vzduchu. Stěny a čela jsou vyrobeny z plastových desek tloušťky 2, resp. 4 mm vysokých 540 mm. Jejich horní hrana je zakončena přírubou s těsněním a se šrouby pro uzavírání transparentním vrchním víkem. Víko je zajišťováno pomocí křídlových matic a je opatřeno přístrojovými konektory pro připojení vysokonapěťových kabelů od modulu elektrod.

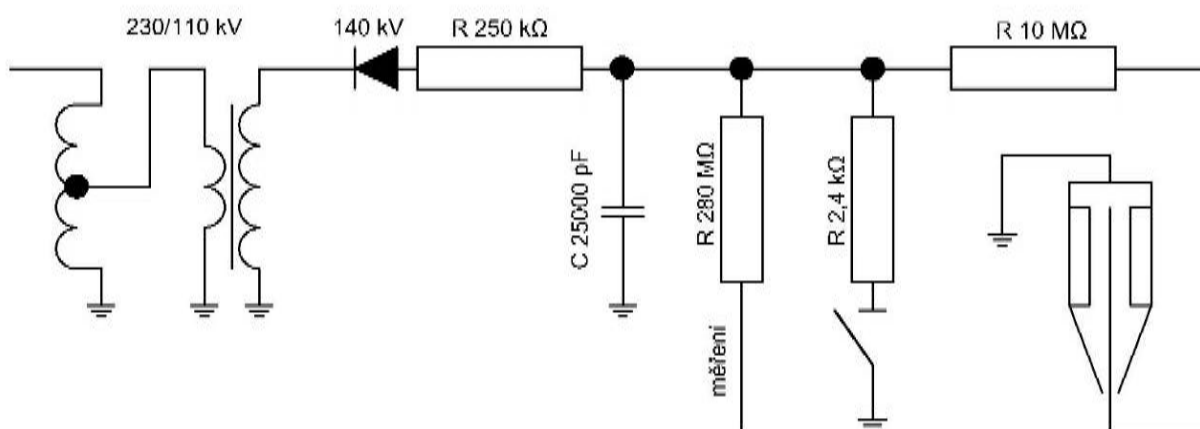
Na obou čelech skříně EO je difuzor, resp. konfuzor zajišťující přechod potrubí menšího rozměru na rozměr odpovídající velikosti elektrod (300 x 180 mm). Na zadní konfuzor je napojen ventilátor.

Ventilátor je poháněn jednofázovým asynchronním motorem, Dospel 100 o výkonu 15W, provozním napětí 230V/50Hz, a průtokem $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Asynchronní motor byl zvolen z důvodu větší odolnosti vůči elektrostatickému poli než motor stejnosměrný.

8 REALIZACE ZÁKLADNÍCH EXPERIMENTŮ

Jelikož bylo navrženo a vyrobeno nové experimentální zařízení, bylo nejdříve nezbytné provést experimenty zaměřující se na jeho zkušební provoz, resp. na ověření jeho bezpečného provozu. Zařízení bylo nejprve testováno pomocí Wimshurstova generátoru pro zkoušku, zda se v konstrukci nenachází kriticky slabé místo, co se týče elektrické pevnosti a zda má smysl pokračovat ve zkoušce. Generátor se ovšem pro tento účel ukázal jako slabý, jelikož dokázal vyvinout napětí pouze okolo 2 kV.

Následně bylo přistoupeno ke zkoušce na zkušebním stavebnicovém zařízení v Laboratoři vysokých napětí v rámci CVVOZE Power Laboratories. Schéma zapojení je vidět na Obr. 8-1



Obr. 8-1 Schéma zapojení

První zkouška ověřovala zařízení z hlediska bezpečnosti provozu. Kritickým parametrem pro tuto zkoušku je elektrická pevnost izolačních vzdáleností v EO. Napětí bylo zvyšováno od 0 kV do 22 kV. Při 10 až 13 kV začaly dráty ionizačních elektrod vibrovat, což je pravděpodobně známka přítomnosti koróny. Při 22 kV byla koróna již jasně zřetelná na téměř celé délce drátů ionizačních elektrod. Použitým napětím 22 kV sice bylo překročeno jmenovité napětí kabelů, ale jen nepatrně, což by měly kabely v dané situaci vydržet. Při zkoušce nedošlo k průrazům a zařízení obstálo. Z hlediska určení správnosti výsledků rovnic 7.13 a 7.14 je výsledek zkoušky nejednoznačný, jelikož nelze určit, která z rovnic více odpovídá naměřenému výsledku. Zkreslení mohlo např. způsobit prvotní odhad odlučovací rychlosti, nebo použití příměsí s odlišnými parametry.

Následně byl zapojen ventilátor EO a provedla se zkouška jeho funkce při zapnutém napájení elektrod EO, zdali nebude ventilátor ovlivňován elektrickým polem. Tato část dopadla úspěšně.

Po ověření bezpečnosti provozu odlučovače, bylo možné přistoupit k dalším experimentům. Ty měly za úkol ověřit samotnou funkčnost tohoto laboratorního odlučovače, tedy zda odlučuje přivedené nečistoty. Z důvodů uzavřených testovacích prostor nebylo možné provádět test při zapnutém ventilátoru a proudění znečištění. Proto byl výstupní otvor odlučovače utěsněn a vstupním otvorem bylo vháněno znečištění do odlučovače. Na ionizační elektrody bylo přivedeno záporné napětí 15 kV a vneseno znečištění. Prostor se postupně pročišťoval a po 4 až 6 vteřinách byl prostor čistý. Vizualní kontrolu komplikoval fakt, že horní transparentní plocha EO se zamlžila a tudíž nebyly ideální podmínky pro pozorování.

Další zkouškou byla zkouška průrazného napětí. Tato zkouška byla v podstatě pokračováním zkoušky bezpečnosti provozu. Jelikož je odlučovač spojen s napájecími konektory kabely do jmenovitého napětí 20 kV, nebyla tato mez významně překračována, aby nedošlo ke zničení zařízení před otestováním jeho funkčnosti. Po provozních testech se už mohlo přistoupit k této, potenciálně destruktivní, zkoušce.

Napětí bylo postupně zvyšováno od 0 kV do 30 kV bez známek průrazu. Na této hodnotě byla zkouška ukončena. Její dalším pokračováním by se jen zvyšoval potenciál destrukce tohoto experimentálního zařízení. Vzhledem ke svým rozměrům není jasné, jak velké škody by mohl elektrický výboj napáchat. Tato zkouška ukázala, že odlučovač je schopen pracovat s vyšším napětím, než bylo předpokládáno. To je pravděpodobně způsobeno tím, že vysokonapěťové kabely prochází pouze nevodivým plexisklem a od uzemněných částí jsou dostatečně vzdálené. Proto je zde menší pravděpodobnost přeskočení elektrického oblouku.

Posledním experimentem bylo testování odloučení polystyrenových kuliček při 15 kV. Po vnesení kuliček do aktivního prostoru byla jejich velká část přitažena usazovacími elektrodami. Další část propadla do výsypek, jelikož se ukázalo, že kuličky jsou příliš velké a těžké. K jejich dokonalému odloučení by bylo zapotřebí silnějšího ventilátoru, resp. rychlejšího proudění aktivním prostorem a případně vyššího provozního napětí.

Jako zdroj znečištění byl použit mlhovač FOG 800 FT Obr. 8-2 [16] o výkonu 800 W se schopností vyvinout $5,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ „mlhy“. Mlhovač byl naplněn směsí triethylen-glykolu, monopropylen-glykolu, dipropylen-glykolu a demineralizované vody [17].



Obr. 8-2 Mlhovač [16]

Toto zařízení bylo použito, jelikož dokáže vyvinout velké množství plynu, který lze na odlučovači čistit. Jeho použitím samozřejmě dochází k určitému zkreslení, oproti použití částic uvažovaných v návrhu. Hlavní funkcí mlhovače bylo s jeho pomocí ověřit základní fungování sestaveného experimentálního odlučovače. Tohoto cíle bylo úspěšně dosaženo.

Na realizované experimenty by bylo vhodné navázat komplexním měřením a vyhodnocením parametrů, na které byl odlučovač navržen. Například měřením s proudícím plyne, nebo celkové návrhové odlučivosti.

9 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a sestrojít experimentální elektrostatický odlučovač. V úvodu práce byla rozebírána problematika elektrických odlučovačů. První část byla věnována legislativě s odlučovači spojenou, elektrárenským popílkem jako materiálem produkovaným EO a obecným rozdělením druhů odlučovačů. Druhá část se zaměřovala konkrétně na elektrické odlučovače. Byly popsány dva hlavní druhy odlučovačů, jejich konstrukce, systém oklepávání, izolátory, zpětná koróna atd. Dále byl uveden postup k výpočtu parametrů, jako je rozměr zařízení, objem protékané vzdušiny a rozsah provozního napětí a jejich číselné hodnoty. Následoval popis vyrobeného laboratorního odlučovače s jeho rozměry, parametry a materiály použitými ke stavbě. Nakonec byl popisován průběh experimentálního ověřování a měření na zhotoveném zařízení a zhodnocení těchto zkoušek.

Pro realizaci byl vybrán komorový odlučovač s mechanickým oklepáváním elektrod, který představuje typický příklad elektrostatického odlučovače používaného v průmyslu. Jako materiál, z něhož byl funkční model odlučovače vyroben, byl zvolen převážně plast pro své dobré izolační a mechanické vlastnosti. Odlučovač byl zkonstruován v modulárním provedení, tzn., že je možné vyjmout celý modul elektrod a nahradit ho jiným s požadovanými vlastnostmi. Výpočet parametrů tohoto zařízení byl částečně zjednodušen tím, že některé veličiny byly zvoleny. Tento krok byl nutný zejména proto, že nebyly známé vstupní parametry příměsí, kterou bude zařízení reálně testováno a dalším důvodem byla snaha o dosažení relativně kompaktních rozměrů zařízení. Hlavním zjednodušením, které potenciálně může ovlivňovat uváděné závěry, bylo zvolení odlučovací rychlosti. Její určení by přesáhlo rámec této práce, a proto byla zvolena podle hodnot používaných v provozovaných průmyslových odlučovačích. Hlavní parametr pro provozování odlučovače, tedy provozní napětí, bylo počítáno standartním způsobem. Ověřením funkčnosti sestrojeného zařízení se zatím potvrzuje platnost postupu návrhu a výpočtů s danými předpoklady a zjednodušeními. Při zkoušce zařízení bylo dokonce dosaženo vyššího napětí, než bylo předpokládáno. Zjednodušený postup návrhu, použitý v této bakalářské práci, nelze aplikovat na velká průmyslová zařízení, kde je kladen nárok na velmi vysoké hodnoty odlučivosti za co nejmenších nákladů a kde je mnoho dalších činitelů ovlivňující chod takového odlučovače. Správnost těchto kroků bude možné zcela potvrdit až po provedení dalších testů a experimentů, jako je např. ověření odlučivosti zařízení.

Jelikož byl sestrojen funkční laboratorní model elektrostatického odlučovače, lze říci, že cíl práce byl splněn. Další možnou činností na odlučovači může být ověření projektované odlučivosti zařízení, nebo návrh a stavba zkrápěných usazovacích elektrod, jakožto dalšího modulu elektrod, používaných pro lepivé příměsí. Zařízení bude používáno k testování vlastností spalin, ostatních plynů a jejich příměsí, atd. Dále bude sloužit pro potřeby VUT, jako nástroj k popularizaci oboru elektroenergetika, na akcích pro veřejnost. Odlučovač může být prostředkem, jak veřejnosti přiblížit konkrétní proces ve zmenšeném měřítku a tím např. zvýšit zájem o technické vzdělání obecně, případně přímo o tento obor.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Legislativa a metodické pokyny. *Ministerstvo životního prostředí: Ochrana ovzduší* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2015 [cit. 2017-10-16]. Dostupné z: http://www.env.cz/cz/legislativa_metodicke_pokyny_ovzduši
- [2] BÖHM, Jaroslav. *Elektrické odlučovače*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977. Ochrana životního prostředí.
- [3] ŠTORCH, Otakar. *Čištění průmyslových plynů a exhalací odlučovači*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974. Ochrana životního prostředí.
- [4] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *TECHNOLOGIE OCHRANY OVZDUŠÍ A ČIŠTĚNÍ ODPADNÍCH PLYNŮ* [online]. Praha: VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ, ©2002 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <http://uchop.vscht.cz/files/uzel/0011054/1-86.doc>
- [5] Vedlejší energetické produkty: Popílek. *ČEZ Energetické produkty* [online]. Hostivice: ČEZ Energetické produkty [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <http://www.cezep.cz/cs/vedlejsi-energeticke-produkty/popilek>
- [6] Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.: Nařízení vlády, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci. In: . Praha, 2007, číslo 361. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-361>
- [7] MIZNER, Martin. *Ověření elektrické pevnosti izolátoru elektrostatického odlučovače*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Radek Procházka.
- [8] Mokrý vápencová vypírka. In: *Tenza* [online]. Brno [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cistení-spalin/mokra-vapencova-vypirka/>
- [9] REFERENCE: Reference dodavatelského programu ZVVZ-Enven Engineering, a.s. *ZVVZ GROUP: Dodavatel zařízení pro ekologii* [online]. Milevsko: ZVVZ-Enven Engineering, ©2017 [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: <http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/reference.html>
- [10] Our products: ESP Range. *Purified air* [online]. Romford [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://purifiedair.com/our-products/esp-range/>
- [11] MIZNER, Martin. *Ověření elektrické pevnosti izolátoru elektrostatického odlučovače*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Radek Procházka.
- [12] BROŽÁK, Kamil. *Celkový pohled na uspořádání jednosekcevého elektrického odlučovače* [online]. In: . 2012 [cit. 2018-01-23]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55258
- [13] Akustické měniče. In: *Http://www.i-tes.cz/* [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.i-tes.cz/profile/akusticke-menice-2810>
- [14] *UHELNÉ ELEKTRÁRNÍ SKUPINY ČEZ* [online]. ČEZ [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_group_and_coal_power_plants.pdf
- [15] HAQUE, Shah. *Thermal Power Plant - Performance Improvement of Electrostatic Precipitator* [online]. New York: Knovel, 2010 [cit. 2018-01-09]. ISBN 978-1-61583-679-6. Dostupné z: 1url.cz/BtOZA

- [16] FOG 800 FT. In: *ROBE lighting* [online]. ROBE lighting, 2018© [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.robe.cz/fog-800-ft/>
- [17] SAFETY DATA SHEET (SDS) MATERIAL SAFETY DATA SHEET (MSDS). In: *Look Solutions* [online]. Wilmington: Look Solutions, ©2017, 24. 4. 2014 [cit. 2018-05-27]. Dostupné z: <http://looksolutionsusa.com/wp-content/uploads/2016/07/msds-fluid-new-16-part-format.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha A</i>	Ionizační elektrody
<i>Příloha B</i>	Modul ionizačních a usazovacích elektrod
<i>Příloha C</i>	Pohled na odlučovač shora
<i>Příloha D</i>	Detail uspořádání elektrod v odlučovači
<i>Příloha E</i>	Zapojení zkušebního obvodu
<i>Příloha F</i>	Zkouška funkčnosti odlučovače
<i>Příloha G</i>	Zkouška odloučení polystyrenových kuliček