



**Milica D. Radić
Dejan M. Petković**

Elektrostatički filteri

Niš, 2014. godine

prazna strana

Milica D. Radić
Dejan M. Petković

ELEKTROSTATIČKI FILTERI

Niš, 2013. godine

Autori

Milica D. Radić, dipl. inž. arhitekture

Profesor dr Dejan M. Petković, dipl. ing. elektronike

Fakultet zaštite na radu u Nišu

Naslov

ELEKTROSTATIČKI FILTERI

Izdanje

Elektronsko izdanje 2013. godine

Elektronsko izdanje 2014. godine

Elektronsko izdanje 2015. godine

Recenzenti

Profesor dr Slavoljub Aleksić, dipl. ing. elektronike

Elektronski fakultet u Nišu

Profesor dr Mladen Stojiljković, dipl. ing. mašinstva

Mašinski fakultet u Nišu

Lektor

Marija Cvetković, dipl. filolog za srpski jezik i književnost

Tehnička obrada

Autori

Korice

Autori

Štampa

Elektronsko izdanje

Katalogizacija

Nekatalogizirano izdanje

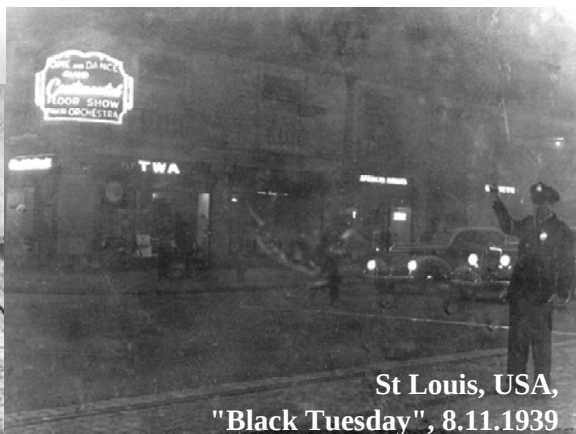
Distribucija

Besplatno izdanje

Upozorenje

Preštampavanje, umnožavanje, kopiranje ili prepisivanje delova rukopisa ili rukopisa u celini nije dozvoljeno bez pisane saglasnosti autora.

Umesto predgovora



St Louis, USA,
"Black Tuesday", 8.11.1939

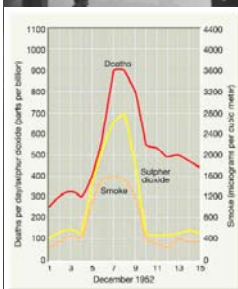


Donora, Pen., USA,
30.31.10.1948

(eratic) and a Democratic name at least
 was of 225,000 for his party's name at least
 live-end State tickets in Wayne and role
 after County, a statewide plurality of, and offensive
 hour 1,000. today the
 (tally) a and cease
 whose use of a burr, (one or) Detroit
 ter and were UN
 er was this and report the v
 nament and cloth force
 ces were REI
 not
 T
 Ser ELECTION—Page 4
**Death of 15
Laid to Smog**
 At Least 50 Ill
in Pittsburgh Area
 DONORA, Pa., Oct. 30.—(P)—
 Fifteen persons died in this mill to
 of 15,000 today and health su
 their deaths app
 multi-
**WORSE THAN 1866
CHOLERA**
Deaths After Fog
 The rise in deaths in the week after
 London's great fog early in December
 was greater than that in the worst week
 of the cholera epidemic in 1866. This
 is disclosed in a report of the health



London, England,
01-15.12.1952



prazna strana

Sadržaj

	Uvod	
1.1	Prečišćavanje vazduha	7
1.2	Prašina, izmaglica i dim	7
1.3	Uređaji koji čestice prikupljaju na svoje zidove	8
1.4	Istorijat razvoja elektrostatičkih filtera	10
	Teorija elektrostatičkih filtera	
2.1	Naelektrisanje koronom	15
2.2	Jonizacija molekula gasa	15
2.3	O homogenosti električnog polja	16
2.4	Čestica u homogenom električnom polju	17
2.5	Viskoznost i <i>Reynoldsov</i> broj	19
2.6	Osnovne jednačine proticanja fluida	20
2.7	Interne sile koje deluju na česticu u fluidu	21
2.8	Sila otpora fluida	22
2.9	<i>Stokesov</i> zakon	22
2.10	Koeficijent sile otpora fluida	25
2.11	Korekcija <i>Stokesove</i> sile otpora fluida	25
2.12	Elektrostatička sila i brzina kretanja čestice	26
2.13	Jednačina efikasnosti prikupljanja čestica	28
2.14	Korekcija <i>Deutsch - Andersonove</i> jednačine	29
2.15	Osnovni parametri filtera i primer proračuna	30
	Elektrostatički filteri u praksi	
3.1	Praktična efikasnost elektrostatičkih filtera	33
3.2	Tipovi elektrostatičkih filtera	37
3.3	Komponente elektrostatičkih filtera	41
3.4	Primeri primene elektrostatičkih filtera	45
3.5	Upravljanje, održavanje i bezbednost	46
3.6	Praćenje rada elektrostatičkih filtera	47
	Zaključak	
4.1	Prednosti i nedostaci elektrostatičkih filtera	49
4.2	Povećanje efikasnosti elektrostatičkih filtera	50
4.3	Laboratorijski model elektrostatičkog filtera	50
	Prilozi	
	Literatura	53
	Indeks imena	55
	Indeks slika	56

prazna strana



Uvod

Prečišćavanje vazduha

Prašina, izmaglica i dim

Uređaji koji čestice prikupljaju na svoje zidove

Istorijat razvoja elektrostatickih filtera

prazna strana

1.1 Prečišćavanje vazduha

Milenijumima su se čovek i priroda skladno razvijali i napredovali. U skorijoj istoriji čovečanstva, zahvaljujući napretku nauke i tehnike, čovek uništava prirodu. Zagađivanje vazduha poprima razmere koje zahtevaju posebnu pažnju u smislu preduzimanja mera zaštite, mada to nije nov civilizacijski fenomen.

Još je 1306. godine Kralj *Edvard I* doneo odluku kojom se ograničava sagorevanje uglja. Dva veka kasnije Kralj *Henry V* je formirao komisiju za ispitivanje zagađenosti vazduha. Jedno od pionirskih dela iz oblasti ekologije je pamflet pisca *Johna Evelyn*a iz 1661. godine u kome se preporučuje izmeštanje industrijskih zona iz centra Londona i formiranje zaštitnog zelenog pojasa oko grada.

Danas se zna da zagađenje vazduha znatno utiče ne samo na kvalitet već i na vek ljudskog života. Najveća zagađenja koja su u poslednjim decenijama odnela najviše žrtvi su se desila 1948. godine u gradu Donora u Pensilvaniji i 1952. godine u Londonu kada je tzv. ubistveni smog bio uzrok smrti oko 5000 osoba.

Poznato je da najveći broj štetnih materija dolazi iz oblasti energetike. Elektrostatički filteri su upravo najefikasniji kada je potrebno filtrirati nano čestice od kojih se inače sastoji leteći pepeo koji je neželjeni produkt sagorevanja fosilnih goriva.

1.2 Prašina, izmaglica i dim

Na osnovu jedne od grubih podela zagađivača vazduha i prečišćivači vazduha su podeljeni u nekoliko kategorija.

- Sakupljači prašine su dizajnirani da prečišćavaju vazduh ili gas prikupljanjem prašine i ostalih nečistoća, koje su štetan proizvod industrijskih ili komercijalnih procesa. Koriste se u mnogim tehnološkim procesima, a mogu da imaju trostruku ulogu. Osim osnovne namene, a to je prečišćavanje vazduha, mogu da se upotrebe za izdvajanje posebno vrednih materija, a takođe i kao deo merne opreme za kontrolu aero zagađenja.
- Sakupljači izmaglica koje nastaju kondenzacijom para i sprejeva koji nastaju raspršavanjem pod pritiskom, sakupljaju čestice u formi finih kapljica tečnosti iz gasa.
- Sakupljači dima i isparenja se koriste za prečišćavanje, uklanjanjem čestica reda veličine manjih od mikrometra. Najčešća upotreba je u termoelektranama, metalurškoj industriji i industriji guma i plastike, itd.

1.3 Uređaji koji čestice prikupljaju na svoje zidove

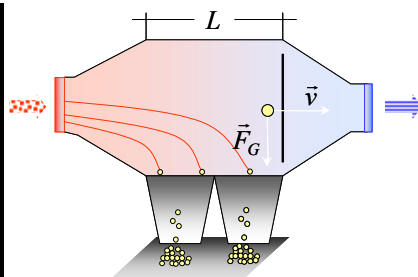
Transportni procesi materije u fluidu mogu biti prirodni i veštački. U procesu odstranjivanja čestica iz vazduha najprimenljiviji su prenos mase usled dejstva gravitacione sile (prirodni proces) i prenos mase pomoću centrifugalne i elektrostatičke sile (veštački procesi).

Svi uređaji koji prikupljaju čestice na svoje zidove (Eng. *Wall collecting devices*) koriste istu opštu ideju i opisuju se istom opštom jednačinom ravnoteže sila koje deluju na česticu. U svi uređajima ovog tipa čestice se nekom silom usmeravaju ka zidu samog uređaja, gde se one međusobno lepe formirajući tako sloj nečistoća koji može biti odstranjen. Postoje tri glavne vrste ovih uređaja prema tri osnovne sile koje se koriste za usmeravanje čestica. U principu svi ovu uređaju su filteri vazduha, ali se u anglo-saksonskoj terminologiji razlikuju i po nazivima. To su

- Gravitacioni filteri (Eng. *Gravity settlers* - taložnici)
- Centrifugalni filteri (Eng. *Cyclone separators* - separatori)
- Elektrostatički filteri (Eng. *Electrostatic precipitators* - taložnici)

▪ Gravitacioni filter je veoma jednostavne konstrukcije. To je dugačka komora kroz koju struji zagađen vazduh. Brzina strujanja je veoma mala tako da ima dovoljno vremena da se čestice iz vazduha usled gravitacione sile F_G natalože na dno komore,

$$F_G = m g .$$



Slika 1. Gravitacioni filter - princip rada

Na izlazu iz komore se postavlja poprečna pregrada kako sav protok ne bi prošao kroz sredinu i time efikasnost filtera bitno smanjio. Međutim, i pored toga efikasnost ovih filtera je veoma mala i direktno zavisi od mase čestica m . I pored jednostavnosti, male cene izrade, montaže i održavanja upotreba ovih filtera je veoma ograničena, a svodi se na otklanjanje čestica značajnije mase.

▪ Znatno veća sila od gravitacione je potrebna da bi čestice bile prinudno dovedene na zidove filtra. Na čestice koje se kreću zakrivljen putanjama linearnom brzinom v deluje centrifugalna sila F_C . Ova sila, osim od mase čestice, zavisi i od poluprečnika krivine r i ugaone brzine ω .

$$F_C = \frac{m v^2}{r} = m \omega^2 r$$

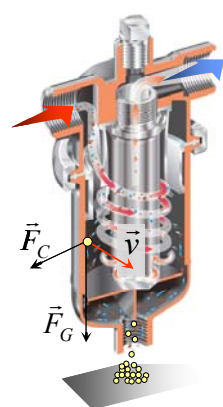
$$\frac{F_C}{F_G} = \frac{m v^2 r}{m g}$$

Na česticu koja se kreće po krivolinijskoj putanji deluje centrifugalna sila koja je uvek veće jačine od gravitacione sile.

To se vidi iz odnosa ovih dveju sila. Na primer, neka je

$$r = 1 \text{ m}, v = 10 \text{ ms}^{-1}, \text{ tada je } F_C \sim 10 F_G.$$

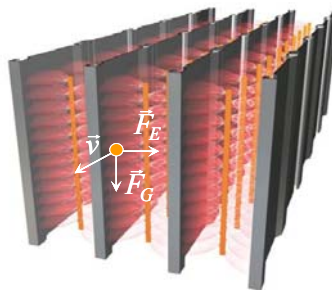
Zagađeni vazduh se tangencijalno uvodi u cilindričnu komoru čine se formira spiralni vrtlog na dole. Vazдушna struja se okreće i po spirali manjeg poluprečnika se vraća na gore. Vazduh je svojim tokom prema dole već oslobođen čestica koje su zalepljene na unutrašnji zid cilindra. Kolekcije čestica zalepljene na zid komore su dovoljno masivne, pa se usled gravitacije spontano spuštaju nadole. Dužina strujnog toka je znatno veća nego kod gravitacionog filtra i iznosi N obima kružnice koji načini vazduh pre nego što uđe u unutrašnji spiralni tok. To omogućava znatno manje ukupne gabarite filtera. Efikasnost ovih filtera je veća od efikasnosti gravitacionih.



Slika 2. Centrifugalni filter – princip rada

Uopšte efikasnost centrifugalnih filtera zavisi od veličine čestica. Za sitne čestice, čestice malog poluprečnika, $2a = d_p < 5 \mu\text{m}$, efikasnost filtriranja ne prelazi 50%. To je kritična granica (Eng. Cut diameter). Dakle, ako je sastav nečistoća u vazduhu takav da nema čestica čiji je dijametar manji od kritičnog ili ako takvih čestica u vazduhu ima procentualno malo, onda je centrifugalni filter pravo rešenje. U današnje vreme ovaj filter je najzastupljeniji filter na svetu. Za priklpljanje čestica malih dimenzija paralelno se vezuje više manjih centrifugalnih filtera što je poznato po nazivom "multiclon". Generalno, ovaj tip filtera je idealan za prašinu nastalu obradom drveta i u sličnim tehnološkim postupcima, a nije nimalo pogodan za čestice malih dimenzija, lepljive čestice i tehnologije u kojima je prisutan katran.

▪ Gravitacioni i centrifugalni filteri nisu efikasni za prikupljanje čestica malih dimenzija, tačnije onih čija je karakteristična dimenzija manja od $5 \mu\text{m}$. Kako se dimenzije čestica smanjuju tako efikasnost ovih filtera drastično opada. Elektrostatička sila je veća i od centrifugalne i od gravitacione sile.



Slika 3. Elektrostatički filter - princip rada

Poređenjem elektrostatičke i gravitacione sile, između elektrona i protona, uočava se da je odnos jačina sila reda 10^{39} .

$$\frac{F_E}{F_G} = -\frac{k_e}{G} \frac{r^2}{r^2} \frac{e^2}{m_e m_p} \approx 2 \cdot 10^{39},$$

gde su k_e i G elektrostatika i gravitaciona konstanta, e i m_e naelektrisanje i masa elektrona u mirovanju i m_p masa protona u mirovanju.

$$k_e = 8.99 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

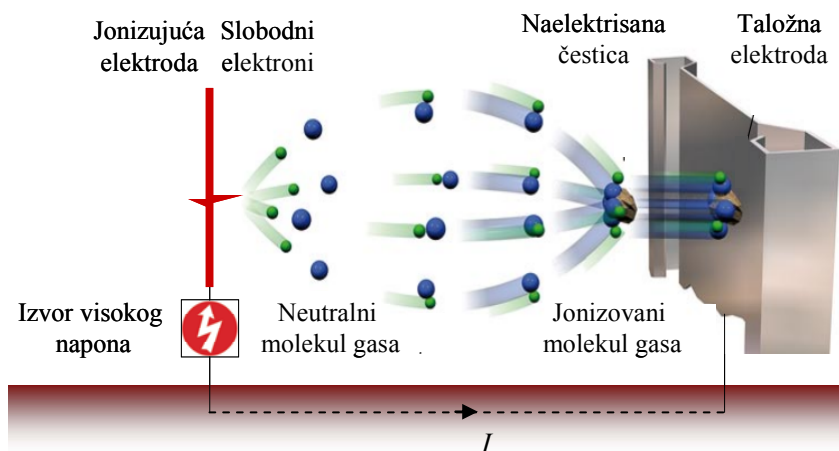
$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

$$e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Princip konstrukcije elektrostatikog filtera postaje očigledan: naelektrisati česticu, dovesti je u električno polje i odstraniti nataloženu česticu.



Sklika 4. Detalji principa rada elektrostatikog filtera

Elektrostatiki filteri su optimalan izbor za prikupljanje čestica izrazito malih dimenzija (fina prašina). Efikasnost u prikupljanju malih čestica često se meri teorijskim maksimumom. Glavni nedostatak ovog tipa filtera je visoka investiciona vrednost. Drugo, opasnost od pojave varnice, ove filtere čini neupotrebljivim za prikupljanje zapaljivih čestica ili prečišćavanje eksplozivnih smeša.

1.4 Istorijat razvoja elektrostatikih filtera

Potreba za prečišćavanjem vazduha stara je koliko i samo zagađivanje vazduha. Sigurno da su ljudi tu potrebu osetili još kada su se grejali otvorenim plamenom. Izum parne mašine i industrijska revolucija su bili prva kritična tačka u istoriji zagađivanja vazduha. Bio je potreban čitav jedan vek da se elektricitet umeša u prečišćavanje vazduha i čitav jedan vek je već u upotrebi.

- 600 pne *Thalés Miléisos*
oko 384-322 pne *Tales* iz Mileta je prvi zabeležio privlačnu moć čilibara koju ovaj dobija ako se protrlja komadom krzna ili vunenog sukna.
1600. *William Gilbert*
1544 - 1603 Engleski fizičar čija su istraživanja bila aktuelna dva veka. Samo jedno od 125 poglavlja u njegovom kapitalnom delu posvećeno je elektricitetu. Od *Gilberta* potiče naziv elektricitet od grčke reči za čilibar. Nazvan je ocem moderne nauke o elektricitetu. Kapitalno delo: *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*.
1672. *Otto von Guericke*
1602-1686 Prvi je načinio mašinu za proizvodnju statičkog elektriciteta. Kapitalno delo: *Ottonis de Guericke Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica de Vacuo Spatio*
- Stephen Gray*
1666-1736 Engleski bojadžija tkanina *Gray*, radeći porodični posao, u svet nauke ušao je samouk. Eksperimentisao je zajedno sa engleskim sveštenikom po imenu *Granvile Wheeler* (1701-1770) zahvaljujući čijoj upornosti je uočio razliku između provodnika i izolatora, kao i pojavu površinske gustine naelektrisanja.
1733. *Charles-Francois de Cisterny du Fay*
1698 - 1739 Otkriće dve vrste elektriciteta (pozitivni i negativni). Otkriće odbijanja i privlačenja naelektrisanih tela. Kapitalno delo: *Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'attraction et répulsion des corps électriques*. Histoire de l'Academie royale des sciences avec les mémoires de mathématiques et de physique, partie "Mémoires". Paris, Impr. royale, 1735 (année 1733), p. 457-476.
1785. *Charles-Augustin de Coulomb*
1736 - 1806 Francuski inženjer formulisao 1785. poznati zakon koji je po njemu i nazvan-Coulombov zakon. Kapitalno delo: *Second Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme*.
1824. *M. Johann Cristoph Hohlfeld* Važnu ulogu korone u separaciji čestica iz gasova uz pomoć jakog električnog polja je prvi otkrio i objavio nemački matematičar iz Lajpciga, *Hohlfeld*.

1865. *James Clerk*
1873. *Maxwell*
1831 - 1879
- Teorija elektromagnetnih polja je počela sa škotskim matematičarem i fizičarem *Maxwellom*. Do tada su u većoj ili manjoj meri svi rezultati bili eksperimentalni. Kapitalna dela: *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, J. Phil. Trans. of the Royal Soc. of London, 1865; *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Macmillan and Co., London, 1873.
1878. *Robert Nahrwold*
- Vršeci ispitivanja nemački fizičar *Nahrwold* je otkrio da električno pražnjenje naelektrisane igle za šivenje okružene cilindrom može da naelektriše okolni vazduh pri čemu dolazi do prikupljanja čestica prašine. Tokom narednih eksperimenata koje je vršio zidovi cilindra su obloženi glicerinom, a u cilju povećanja kolekcije nataloženih čestica adhezijom.
1885. *Sir Oliver Joseph Lodge*
1851 – 1940
- Prvu konstrukciju za prečišćavanje je kreirao britanski fizičar *Lodge* za potrebe livnice olova u Engleskoj. To je bio neuspešan pokušaj prikupljanja nečistoća iz vazduha.
1905. *Frederick Gardner Cottrell*
1877 – 1948
- Američka hemijska kompanija *DuPont* je 1906. godine angažovala fiziko-hemičara *Cottrella* da ukloni nus proizvod arsenik koji se je javljao prilikom proizvodnje sumporne kiseline. *Cottrell* je shvatio da će centrifugiranje sumporne kiseline ukloniti arsenik. Potom se javio drugi problem, taloženje prečišćene sumporne izmaglice. Tada je *Cottrell* započeo eksperimente sa česticama koje su prolazile pored dve suprotno naelektrisane elektrode. Primetio je da se čestice talože na elektrodi suprotno naelektrisanoj od one koja ih je naelektrisala. To je bio prvi elektrostatički filter. Svoja istraživanja je patentirao 1908. godine.
1916. *Japanska istraživanja*
- Osam rudarskih kompanija u Japanu dobilo je Cottrellova patentna prava i počelo sa primenom elektrostatičkog prečišćavanja.
1919. *Evald Anderson*
- Prva eksperimentalna istraživanja efikasnosti prikupljanja čestica.

1922. *Walther Deutsch* Teorijska analiza efikasnosti elektrostatičkog filtera. Nastanak jednačine za efikasnost elektrostatičkog filtera - *Deutsch-Andersenova jednačina*.
1924. *Hitachi Kameido Factory* Japanska rudarska korporacija je fabrici *Hitachi* ustupila tehnologiju proizvodnje elektrostatičkih filtera, posle čega *Hitachi* postaje jedna od vodećih fabrika u svetu.
1956. *Horace Edgard Rose, Arthur John Wood* Kapitalno delo: *An Introduction to Electrostatic Precipitation in Theory and Practice*, Constable & Co. London, 1956.
1963. *Harry J. White* Kapitalno delo: *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison Wesley and Pergamon Press, New York, 1963.
1964. *Sigvard Matts, Per-Olaf Ohnfeldt* Modifikacija *Deutsch-Andersonove* jednačine. Nastanak *Matts-Ohnfeldt* jednačine.
1971. *Darby Kenneth* Kapitalno delo: *The use of electrostatic forces for the separation of suspended materials in gases and liquids*, Symposium on Electrochemical Engineering, Univ. of Newcastle upon Tyne, April, 1971.

prazna strana

Teorija elektrostatičkih filtera

Naelektrisavanje koronom
Jonizacija molekula gasa
O homogenosti električnog polja
Čestica u homogenom električnom polju
Viskoznost i *Reynoldsov* broj
Osnovne jednačine proticanja fluida
Interne sile koje deluju na česticu u fluidu
Sila otpora fluida
***Stokesov* zakon**
Koeficijent sile otpora fluida
Korekcija *Stokesove* sile otpora fluida
Elektrostatička sila i brzina kretanja čestice
Jednačina efikasnosti prikupljanja čestica
Korekcija *Deutsch - Andersonove* jednačine
Osnovni parametri filtera i primer proračuna

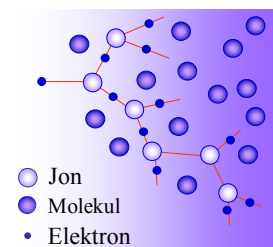
prazna strana

2.1 Naelektrisanje koronom

Razelektrisanje naelektrisanog tela koronom se javlja kada se visoki napon dovede između dve elektrode. Kako svaki sistem teži minimumu energije, tako se i naelektrisana elektroda spontano prazni, što je korona efekat koji je često i vidljiv. Kada se visoki negativni napon dovede na naelektrisanu elektrodu stvara se jako električno polje u okolini te elektrode. Ta okolina je oblast jonizacije. Elektroni iz molekula okolnog fluida se ubrazavajući udaljavaju od negativno naelektrisanе elektrode, zbog odbojnih sila i tako se stvaraju pozitivni joni. Elektroni imaju dovoljno energije da jonizuju svaki molekul sa kojim se sudare. Ovakvi sudari dovode do lavinskog efekta stvaranja novih elektrona i pozitivnih jona sve dok elektroni imaju dovoljno energije da vrše jonizaciju.



Slika 5. Pojava korone

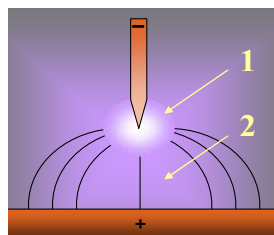


Slika 6. Lavinski efekat

Elektroni stvoreni jonizacijom se vezuju za molekule okolnog fluida i formiraju oblak negativnih jona koji stremlji ka uzemljenoj elektrodi. Joni u blizini negativne elektrode su pozitivni i ostaju u toj oblasti. U stvari, mnogi od njih udaraju direktno u negativnu elektrodu pri čemu izazivaju izbacivanje dodatnih elektrona. Ovo se naziva sekundarna emisija.

2.2 Jonizacija molekula gasa

Kada elektroni napuste oblast jakog električnog polja u neposrednoj okolini negativne elektrode, gube energiju i sporije se kreću. Tada se nalaze u međuprostoru između elektroda sa molekulima gasa za koje se vezuju. Međuelektrodni prostor se naziva oblast strujanja (Eng. *drift*). Molekuli gasa tada dobijaju negativno naelektrisanje. Tako naelektrisaní molekuli bivaju privučeni elektrodom na nultom potencijalu.



Slika 7. Elektrođni sistem

1 - oblast jonizacije
2 - oblast strujanja

Razelektrisanje naelektrisanog tela koronom je važno zbog stvaranja zapreminske gustina naelektrisanja u oblasti ispunjenoj fluidom. Ova pojava može da se upotrebi za naelektrisanje čvrstih čestica manjih dimenzija ili kapi tečnosti, što ima brojne primene poput puderisanja, raspršivanja, separacije čestica, filtriranja, itd.

2.3 O homogenosti električnog polja

Električno polje, za razliku od brzinskog polja fluida, nije vidljivo i može se detektovati samo dejstvom sile na naelektrisanu česticu (telo).

Tako se električno polje i definiše kao količnik elektrostatičke sile i naelektrisanja.

$$\vec{E} = \frac{1}{q} \vec{F} \left[\frac{\text{N}}{\text{C}} \right] = \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

S druge strane, električni (skalar) potencijal φ je brojno jednak radu koji se izvrši pri pomeranju jediničnog naelektrisanja od tačke u kojoj se potencijal određuje do referentne tačke, što znači da potencijal nije jednoznačno određena funkcija. Dve vrednosti potencijala za dve različite referentne tačke razlikuju se za aditivnu konstantu.

Napon, kao razlika potencijala, je jednoznačno određen. Kao izvod potencijala električno polje je jednoznačno određeno.

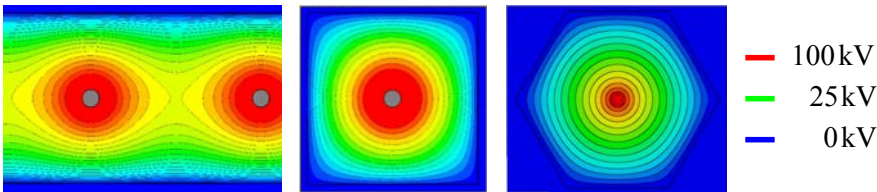
$$\begin{aligned} U &= \varphi_1 - \varphi_2 \text{ [V]} \\ \vec{E} &= -\text{grad } \varphi \end{aligned}$$

Tačnije, prema *Helmholtzovoj* teoremi (*Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz*, 1821-1894) vektorsko polje je jednoznačno određeno ako intenzitet opada sa rastojanjem najmanje kao r^{-2} i ako su poznati prostorni izvodi. Elektrostatičko polje je jednoznačno određeno.

Ako se u jednačini divergencije električno polje izrazi preko potencijala dobija se dobro poznata *Poissonova* (*Denis Poisson*, 1781-1847) jednačina za potencijal. gde je ρ zapreminska gustina naelektrisanja i ϵ dielektrična konstanta sredine.

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \text{rot } \vec{E} &= 0 \\ \text{div (grad } \varphi) &= -\frac{\rho}{\epsilon} \end{aligned}$$

U malom broju slučajeva, uglavnom sa velikim stepenom simetrije, rešenje za raspodelu potencijala se može dobiti u analitičkom obliku. U takve slučajeve spadaju geometrije koje se koriste kod elektrostatičkih filtera.

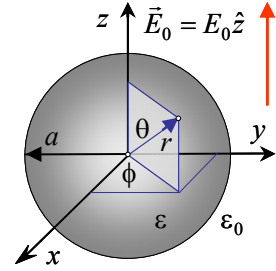


Slika 8. Raspodela električnog potencijala u elektrodnim sistemima
a) žica-ploča, b) žica-kvadratna cev, c) žica-šestougona cev

U problemima elektrostatičkog prečišćavanja čestice koje treba odstraniti se nalaze u stranom električnom polju nekog elektrodnog sistema. Dovoljno velikom okolinom čestice smatra se okolina čija je karakteristična dimenzija (dijametar) bar deset puta veća od najveće dimenzije same čestice. S obzirom na dimenzije čestice, čestica se uvek nalazi u homogenom električnom polju.

2.4 Čestica u homogenom električnom polju

Čestica sfernog oblika poluprečnika a , načinjena od dielektrika propustljivosti ε , nalazi se u homogenom električnom polju $\vec{E}_0 = E_0 \hat{z}$ u vakuumu. Sferni koordinatni (r, θ, ϕ) sistem postavljen je sa koordinatnim početkom u centru sfere. Problem je rotaciono simetričan, pa potencijal $\varphi = \varphi(r, \theta)$ ne zavisi samo od sferne koordinate ϕ i režiran je rešenjem Laplaceove jednačine (Pierre-Simon, marquis de Laplace, 1749-1827) koja zadovoljava granične uslove na površini sfere i u beskonačnosti.



Slika 9. Čestica sfernog oblika u eksternom električnom polju

Dvodimenzionalna Laplaceova jednačina u sfernom koordinatnom sistemu:

$$(1) \sin \theta \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) = 0$$

Metodom razdvajanja promenljivih Laplaceova diferencijalna jednačina raspada se na dve obične diferencijalne jednačine drugog reda. Jednačina po ugaonoj koordinati θ je Legendreova diferencijalna jednačina (Adrien-Marie Legendre, 1752-1833).

Granični uslovi:

$$(2) \varphi(a-, \theta) = \varphi(a+, \theta)$$

$$(3) \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=a-} = \varepsilon_0 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \Big|_{r=a+}$$

$$(4) \lim_{r \rightarrow \infty} \varphi = -E_0 z = -E_0 r \cos \theta$$

$$\varphi = R(r) T(\theta)$$

$$T'' + \cot \theta T' + n(n+1)T = 0$$

$$T_n = D_1 P_n(\cos \theta) + D_2 Q_n(\cos \theta)$$

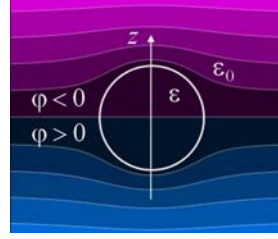
Rešenja ove jednačine su Legendreovi polinomi prve i druge vrste, $P_n(\cos \theta)$ i $Q_n(\cos \theta)$, respektivno. Kako je na z -osi ($\theta = 0$ i $\theta = \pi$) potencijal konačan, to Legendreove polinome druge vrste treba odbaciti, pa je rešenje potencijal u obliku $\varphi_n = R_n T_n = (C_1 r^n + C_2 r^{-n-1}) P_n(\cos \theta)$.

Kada se ima u vidu da su polje i potencijal konačne veličine u koordinatnom početku i beskonačnosti, u izrazu za potencijal učestvovaće samo prva dva partikularna rešenja.

Konstatnte integracije C_1 i C_2 određuju se iz graničnih uslova (2) i (3) pa je

$$\varphi = \begin{cases} C_1 \cos \theta, & r \leq a \\ \left(-E_0 r + \frac{C_2}{r^2} \right) \cos \theta, & r \geq a \end{cases}$$

$$(5) \quad \varphi = \begin{cases} -\frac{3\varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} E_0 r \cos \theta, & r \leq a \\ -\left(1 - \left(\frac{a}{r}\right)^3 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0}\right) E_0 r \cos \theta, & r \geq a \end{cases}$$



Slika 10. Sfera u električnom polju – ekvipotencijale

Naelektrisana sfera stvara dodatno električno polje koje je suprotnog smera od smera spoljašnjeg polja. Isto električno polje bi stvorio i električni dipol koji je smešten u centru sfere, a ima dipolni moment

$$(6) \quad p = 4\pi\varepsilon_0 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} a^3 E_0.$$

Površinska gustina indukovanih naelektrisanja, η , jednaka je intenzitetu vektora polarizacije, $\vec{P}$, odnosno

$$(7) \quad \eta = P = \frac{p}{V} = 3\varepsilon_0 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} E_0, \quad \text{gde je} \quad V = \frac{4}{3} a^3 \pi.$$

Ukupna količina indukovanog naelektrisanja je

$$(8) \quad q = \eta S = 12\pi\varepsilon_0 a^2 \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} E_0, \quad \text{gde je} \quad S = 4a^2 \pi.$$

Idealni provodnik se može smatrati dielektrikom čija je dielektrična propustljivost beskonačna, pa sledi

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} = 1 \quad \Rightarrow \quad (9) \quad q = 12\pi\varepsilon_0 a^2 E_0,$$

što je *Pauthenierova* jednačina koja opisuje proces zasićenja čestice naelektrisanjem u eksternom, homogenom električnom polju (*Marcel Pauthenier*, 1887-1972).

Praškovi			Granule		
Materijal	a [μm]	$\varepsilon / \varepsilon_0$	Materijal	a [μm]	$\varepsilon / \varepsilon_0$
Cementni prah	1-50	5.0-10.0	Silikatni pesak	50-5000	2.5-3.5
Leteći pepeo	1-500	1.7-2.0	Gvozdeni opiljci	2-10	2.3-14.0
Gipsani prah	1-10	2.5-6.0	Drveni opiljci	15-300	1.5-8.0
Brašno	1-50	2.5-3.0	Krečnjak	5-500	2.3-9.0

2.5 Viskoznost i Reynoldsov broj

Viskoznost je otpor fluida ili unutrašnje trenje. Viskoznost je mera otpora fluida da teče.

Koeficijent dinamičke ili apsolutne viskoznosti, μ , je brojno jednak sili koja između slojeva jedinične površine fluida održava jedinični gradijent brzine.

Viskoznost	
Dinamička	Kinematička
(10) $\tau = \mu \frac{dv}{dz} [\text{Pa}]$	(11) $\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$

Za razliku od ostalih vrsta trenja, ovo zavisi od brzine. Definicioni izraz za dinamičku viskoznost je poznat i kao *Newtonov zakon trenja* (*Sir Isaac Newton*, 1642-1727). Kinematička viskoznost je odnos dinamičke viskoznosti i masene gustine. Recipročna vrednost viskoznosti je fluidnost.

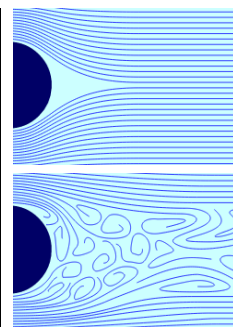
Dinamička i kinematička viskoznost vazduha pri normalnom pritisku			
$P = 10^5 \text{ Pa}$	$T = 0^\circ \text{ C}$	$T = 20^\circ \text{ C}$	$T = 40^\circ \text{ C}$
$\mu [\text{Pa s}]$	$17.09 \cdot 10^{-6}$	$18.08 \cdot 10^{-6}$	$19.04 \cdot 10^{-6}$
$\rho [\text{kg/m}^3]$	1.283	1.205	1.128
$\nu [\text{m}^2/\text{s}]$	$13.22 \cdot 10^{-6}$	$15.00 \cdot 10^{-6}$	$16.88 \cdot 10^{-6}$

Reynoldsov broj je bezdimenzionalna veličina koja prikazuje odnos inercijalnih i viskoznih sila i zavisi od karakteristične linearne dimenzije objekta, $L = \sqrt{S}$.

$$(12) \quad \text{Re} = \frac{F_{\text{inertial}}}{F_{\text{viscous}}} = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Na osnovu ovog broja određuju se osnovni tipovi strujanja fluida. Prvo je *Stokes*, (*Sir George Gabriel Stokes*, 1st Baronet, 1819-1903) primenio ovaj odnos da bi pojednostavio neke proračune, a trideset godina kasnije ga je popularisao *Reynolds* (*Osborne Reynolds*, 1842-1912).

Za male vrednosti *Reynoldsovog* broja viskozne sile su dominantne, što je osnova laminarnog strujanja i fluid se kreće bez lateralnog mešanja međusobno paralelnih slojeva. Za ekstremno male vrednosti *Reynoldsovog* broja javlja se sporo oticanje što je *Stokesov* protok (Eng. *Creeping flow*, *creep*-puziti). Pri velikim vrednostima *Reynoldsovog* broja inercijalne sile su dominantne, što proizvodi vrtloženja i što je karakteristika turbulentnog strujanja. Pri turbulentnom strujanju odvajaju se mali paketi čestica koji stvaraju vrtloge, što dovodi do lateralnog mešanja slojeva.



Slika 11. Strujanje oko sfere

Tipovi strujanja fluida		
$Re < 2300$	$2300 < Re < 4000$	$4000 < Re$
Laminarno strujanje	Prelazna oblast	Turbulentno strujanje
$F_{viscous} > F_{inertial}$	$F_{viscous} \approx F_{inertial}$	$F_{viscous} < F_{inertial}$

Reynolds je istraživao kada prestaje laminarno, a kada počinje turbulentno strujanje. Eksperimentom sa cevi kružnog poprečnog preseka i dijametra L je utvrdio granice koje su navedene u gornjoj tabeli. Međutim, osim vrste fluida, na rezultat eksperimenata znatno utiče oblik poprečnog preseka cevi i završna obrada zidova cevi. Sa današnjim mogućnostima izvođenja kako fizičkog tako i numeričkog eksperimenata, je utvrđeno da je strujanje laminarno ako je $Re < 2100$, a da je sigurno turbulentno ako je $Re > 3000$. Vrednostima *Reynoldsovog* broja koje se nalaze između ovih granica odgovara prelazni režim u kome dolazi do raslojavanja i stvaranja vrtloga, što se često naziva vrtložnim strujanjem.



Slika 12. Od laminarnog do turbulentnog strujanja

Stokesov protok odgovara veoma malim vrednostima *Reynoldsovog* broja, $Re < 0.1$. U praksi se, zbog jednostavnosti, često uzima $Re < 1$, čime se svesno čini greška od oko 13%. U ovom režimu strujanja osnovne jednačine mehanike fluida dobijaju jednostavnije oblike, jer se zbog vrlo sporog strujanja fluida u tim jednadlinama zanemaruju inercijalni članovi. Tako se pruža mogućnost analitičkog rešavanja nekih inače složenih problema, kao što je na primer proticanje fluida oko objekta sfernog oblika.

2.6 Osnovne jednačine proticanja fluida

Jednačina kontinuiteta opisuje protok (fluks) neke konzervativne veličine, kao što je količina naelektrisanja, količina kretanja, energija ili u ovom slučaju masa. Jednačina kontinuiteta je samo lokalni tj. diferencijalni oblik zakona o održanju.

$$(13) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\rho \vec{v})$$

Jednačina koja opisuje kretanje fluida u opštem obliku je *Navier-Stokesova* jednačina (*Claude Louis Marie Henri Navier*, 1785-1836).

$$(14) \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \operatorname{div} \vec{v} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v}$$

gde je p pritisak i f zapreminska gustina spoljašnjih sila koja deluju na fluid.

Kod nestišljivog fluida i stacionarnog protoka izvodi po vremenu su nula. $\left\| (15) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \Rightarrow \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0 \right.$

Slučaju koji će biti od interesa je stacionarni protok nestišljivog fluida oko tela sfernog oblika. Tada je i $\vec{f} = 0$, pa je sistem jednačina koji opisuje ovaj problem:

$$(16) \quad \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad \operatorname{grad} p = \mu \Delta \vec{v}.$$

2.7 Interne sile koje deluju na česticu u fluidu

U brzinskom polju fluida na česticu deluju tri dominantne sile. To su gravitaciona sila, sila potiska i sila otpora fluida ili sila viskoznosti, F_G , F_B i F_D respektivno. Izrazi za izračunavanje prve dve sile su poznati.

Drugi Newtonov zakon.

Archimedesov princip.

(Ἀρχιμήδης, 287-212 p.n.e.)

Indeksi p i f se odnose na česticu i fluid.

$$F_G = m_p g = \rho_p V_p g$$

$$F_B = m_f g = \rho_f V_p g$$

Međutim, sila otpora fluida zavisi od brzine čestice u odnosu na fluid. Još je *Newton* pretpostavio da je ta zavisnost kvadratna. Kasnije je utvrdio da je koeficijent srazmernosti za sferu 0.5 što se slaže sa najnovijim istraživanjima.

$$F_D \sim a \rho S v^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho S v^2$$

Nobelovac *Lord Rayleigh (John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh, 1842-1919)* je primetio da otpor fluida zavisi od koeficijenta trenja i uvrstio ga u izraz.

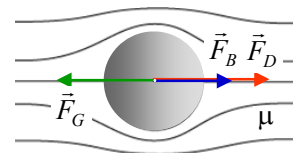
$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D S v^2$$

U stanju ravnoteže, čestica nema ubrzanje i postiže konstantnu, tj. krajnju brzinu,

$$F_G - (F_B + F_D) = 0,$$

koja se može odrediti iz jednaline ravnoteže.

$$V_p = \frac{4}{3} a^3 \pi = \frac{1}{6} d_p^3 \pi \quad d_p = 2a$$



Slika 13. Čestica sfernog oblika u brzinskom polju fluida

2.8 Sila otpora fluida

Otpor fluida se odnosi na sile koje deluju na čvrsto telo u pravcu kretanja fluida i uvek se suprostavljaju kretanju objekta kroz fluid.

Oblik i protok				
Površinsko trenje	100%	90%	10%	0%
Otpor fluida	0%	10%	90%	100%

Sila otpora fluida (Eng. Drag Force, Drag – kočnica, vući) zavisi od osobina fluida, brzine objekta u fluidu i od veličine i oblika čestice, tj površine poprečnog preseka, S , koji je upravan na pravac kretanja,

$$(17) \quad F_D = \frac{1}{2} \rho_f v^2 C_D(\text{Re}) S.$$

U jednačini sile otpora, koja je prema nekim izvorima poznata i kao *Reyleighova* jednačina, C_D je bezdimenzioni koeficijent otpora fluida, koji zavisi od *Reynoldsovog* broja, i čija se vrednost uglavnom eksperiment-alno određuje.

2.9 Stokesov zakon

Opšti problem proticanja fluida oko tela sfernog oblika nije moguće rešiti analitički. Međutim, u slučaju *Stokesovog* protoka, moguće je naći analitičko rešenje. Matematički modeli jednačine kontinuiteta i *Navier-Stokesove* jednačine imaju jednostavniji oblik koji diktira fizika procesa.

Jednačina kontinuiteta biće automatski zadovoljena ako se brzina protoka predstavi kao rotor neke pomoćne vektorske funkcije, jer je divergencija rotora jednaka nuli. Ta pomoćna funkcija, ψ , je funkcija toka (Eng. *Stream function*, *strem*-tok). Ovome treba dodati da je rotor brzine jednak nuli.

Čestica sfernog oblika poluprečnika a , nalazi se u brzinskom polju nestišljivog fluida. Sferni koordinatni (r, θ, ϕ) sistem postavljen je sa koordinatnim početkom u centru sfere. Problem je rotaciono simetričan, pa rešenje ne zavisi od ugaoe koordinate ϕ .

$$\psi = \psi(r, \theta)$$

$$\vec{v} = \text{rot } \vec{\psi}$$

$$\text{div } \vec{v} = \text{div}(\text{rot } \vec{\psi}) = 0$$

$$\text{rot } \vec{v} = 0$$

$$\vec{v} = v_r(r, \theta) \hat{r} + v_\theta(r, \theta) \hat{\theta}$$

$$v_\phi = 0$$

$$\frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} = 0$$

Dakle, u sfernom koordinatnom sistemu će biti

Stokesov protok

U Sfernom koordinatnom sistemu

$$(18) \quad \vec{v} = \text{rot} \left(\frac{1}{r \sin \theta} \psi \hat{\phi} \right) \quad \blacktriangleright \quad \vec{v} = v_r \hat{r} + v_\theta \hat{\theta} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \hat{r} - \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial r} \hat{\theta}$$

$$(19) \quad \text{div } \vec{v} = 0 \quad \blacktriangleright \quad \text{div } \vec{v} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (v_\theta \sin \theta)$$

$$(20) \quad \text{grad } p = \mu \Delta \vec{v} \quad \blacktriangleright \quad \begin{aligned} \text{grad } p &= \frac{\partial p}{\partial r} \hat{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \hat{\theta} \\ \Delta \vec{v} &= \frac{2}{r} \frac{\partial \vec{v}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cot \theta \frac{\partial \vec{v}}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial \theta^2} \end{aligned}$$

Kada se komponente brzine V_r i V_θ zamene u *Navier-Stokesovu* jednačinu sledi

$$(21) \quad \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\sin \theta}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \right)^2 \psi = 0$$

Rešenje dobijene diferencijalne jednačine se traži metodom razdvajanja promenljivih (kao i kod rešavanja *Laplaceove* jednačine). Dobija se operatorska jednačina za nepoznatu funkciju radijalne koordinate.

Kada se dobijeni izraz razvije, dobija se *Eulerova* (*Leonhard Euler*, 1707-1783) diferencijalna jednačina četvrtog reda,

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{2}{r^2} \right) \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{2}{r^2} \right) R = \frac{d^4 R}{dr^4} - \frac{d^2}{dr^2} \left(\frac{2R}{r^2} \right) - \frac{2}{r^2} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{4}{r^2} R = 0,$$

ili nakon sređivanja

$$r^4 \frac{d^4 R}{dr^4} - 4r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + 8r \frac{dR}{dr} - 8R = 0.$$

Ova jednačina se rešava smenom $R \rightarrow r^n$, što dovodi do karakteristične jednačine

$$((n-2)(n-3)-2)((n-1)n-2)=0,$$

koja ima četiri rešenja $n = -1, 1, 2, 4$. Linearna kombinacija ovih rešenja daje opšte rešenje.

$$(22) \quad \psi = \left(C_1 \frac{1}{r} + C_2 r + C_3 r^2 + C_4 r^4 \right) \sin^2 \theta,$$

koja zadovoljava granične uslove na površini sfere i u beskonačnosti.

Na površini sfere brzina fluida je jednaka nuli. U beskonačnosti brzina je jednaka brzini slobodnog strujanja fluida, v_0 .	U beskonačnosti $r \rightarrow \infty$ (23) $v_r = v_0 \cos \theta$ $v_\theta = -v_0 \sin \theta$	Na površini sfere $r = a$ (24) $v_r = 0$ $v_\theta = 0$
---	--	--

Ova brzina bi bila u celom fluidu da nema objekta koji unosi perturbacije. Iz graničnog uslova u beskonačnosti određuju se konstante C_3 i C_4 , a iz graničnog uslova na površini sfere konstante C_1 i C_2 . Tako se dobija

$$(25) \quad \psi = \frac{1}{2} r^2 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{a}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right) v_0 \sin^2 \theta$$

$$C_1 = \frac{1}{4} a^3 v_0,$$

$$C_2 = -\frac{3}{4} a v_0,$$

$$C_3 = \frac{1}{2} v_0,$$

$$C_4 = 0.$$

$$(26) \quad v_r = \left(1 - \frac{3}{2} \frac{a}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right) v_0 \cos \theta, \quad v_\theta = -v_0 \left(1 - \frac{3}{4} \frac{a}{r} - \frac{1}{4} \left(\frac{a}{r} \right)^3 \right) v_0 \sin \theta.$$

Kada se komponente brzina zamene u *Navier-Stokesovu* jednačinu, nakon sređivanja slede izrazi iz kojih je moguće odrediti pritisak.

$$(27) \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 3\mu \frac{a}{r^3} v_0 \cos \theta, \quad \frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{3}{2} \mu \frac{a}{r^3} v_0 \sin \theta.$$

Tako se za pritisak dobija

$$(28) \quad p = \int_r^\infty \frac{\partial p}{\partial r} dr = p_0 + \frac{3}{2} \mu \frac{a}{r^2} v_0 \cos \theta \quad \Rightarrow \quad p|_{r=a} = \frac{3}{2a} \mu v_0 \cos \theta.$$

Tangencijalno naprežanje se dobija iz komponenti za brzinu,

$$(29) \quad \tau_{r\theta} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) \quad \Rightarrow \quad \tau_{r\theta}|_{r=a} = \frac{3}{2a} \mu v_0 \sin \theta.$$

Konačno za ukupnu silu otpora fluida se dobija

$$(30) \quad F_D = \oint_S (\tau_{r\theta}|_{r=a} \sin \theta + p|_{r=a} \cos \theta) dS, \quad \text{gde je} \quad dS = a^2 \sin \theta d\theta d\phi$$

Nakon rešavanja integrala sledi čuveni *Stokesov zakon* za silu otpora fluida.

$$(31) \quad F_D = 6\pi \mu a v_0$$

Poslednji rezultat se dobija kao zbir dve komponente otpora, pri čemu je jedna trećina posledica sila **pritiska** (Eng. *Form drag*), a dve trećine veličine otpora su posledica viskoznih sila (Eng. *Viscous drag*).

2.10 Koeficijent sile otpora fluida

Opšti oblik jednačine otpora fluida (17) koja je poznata i kao generalna forma *Newtonove* jednačine otpora fluida, važi za područje turbulentnih protoka, odnosno za velike vrednosti *Reynoldsovog* broja. Za čestice malih dimenzija koje se kreću malim brzinama i *Reynoldsov* broj je mali, pa se *Newtonov* zakon više ne može primeniti. Ovo je područje laminarnog strujanja, gde se sila otpora fluida određuje prema *Stokesovom* zakonu (31). U cilju određivanja koeficijenta sile otpora fluida C_D u *Stokesovom* režimu potrebno je uporediti sile otpora fluida za *Stokesov* laminarni i *Newtonov* turbulentni režim strujanja fluida,

$$(17) \dots\dots\dots \frac{1}{2} \rho v^2 C_D(\text{Re}) S = F_D = 6\pi\mu a v. \dots\dots\dots (31)$$

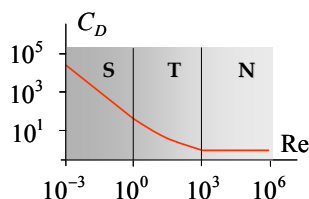
Odavde sledi izraz za traženi koeficijent u kome figuriše površina poprečnog preseka čestice S koja je upravna na pravac strujanja fluida. Kad se u izraz uključi *Reynoldsov* broj (12) sledi konačan izraz.

$$\left\{ \begin{array}{l} C_D(\text{Re}) = \frac{12\pi\mu a}{\rho v S} \\ C_D(\text{Re}) = \frac{24}{\text{Re}} \frac{a^2\pi}{S} \end{array} \right.$$

Međutim, *Stokesov* zakon je izveden pod pretpostavkom da je čestica oblika sfere poluprečnika a . Tada je površina poprečnog preseka $S = a^2\pi$.

Koeficijent otpora fluida za tranzitni režim i *Newtonov* režim se određuje eksperimentalno, pošto je *Reynoldsov* broj poznat podatak. Numerička vrednost se dobija aproksimacijom empirijski dobijenih krivih.

S - <i>Stokesov</i> režim	$C_D = \frac{24}{\text{Re}}$
T - Tranzitni režim	$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{1}{6} \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right)$
N - <i>Newtonov</i> režim	$C_D = 0.44$



Slika 14. Koeficijent otpora fluida

2.11 Korekcija Stokesove sile otpora fluida

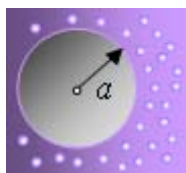
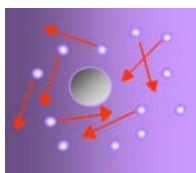
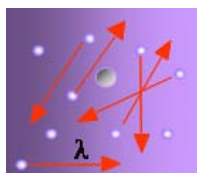
Stokesov zakon je izveden pod brojnim pretpostavkama. Međutim, kritična pretpostavka *Stokesovog* zakona je da je relativna brzina fluida na površini čestice jednaka nuli.

- Strujanje je laminarno.
- Strujanje je veoma sporo.
- Čestice su sfernog oblika.
- Fluid i čestica su homogeni.
- Površina je čestice je glatka.
- Nema interakcije između čestica.

To je tačno za kontinualan fluid. Za česticu je fluid kontinualan sve dok su molekuli fluida znatno manji od nje same tj. fluid je nevidljiv. Ako su čestice veoma male, čak manje od molekula fluida, fluid za česticu postaje vidljiv, kao medijum pun šupljina. Čestica često proklizi (Eng. *Slip*) kroz fluid, bez sudara sa molekulima fluida. Odnos srednje dužine slobodnog puta molekula fluida λ i dominantne poprečne dimenzije čestice u fluidu, kao što je ekvivalentni dijametar $d_p = 2a$, definiše režim strujanja.

Taj odnos je poznat kao *Knudsenov broj* (Martin Knudsen, 1871–1949).
$$(32) \quad Kn = \frac{\lambda}{2a}$$

Za velike vrednosti *Knudsenovog* broja režim strujanja je neophodno uzeti u obzir prilikom proračune sile otpora fluida.

a) $Kn \ll 1$ b) $Kn \approx 1$ c) $Kn \gg 1$

Slika 15. Režimi strujanja fluida

- a) Kontinualni režim
- b) Prelazni režim
- c) Slip režim

Tako je otpor fluida manji od izračunatog, pa je silu viskoznosti potrebno redukovati.

$$(33) \quad F_D = \frac{1}{C_c} 6\pi\mu a v_0$$

Postoje različite korekcije za ovu namenu, ali najpoznatija i najviše upotrebljavana je poznata kao *Cunninghamov* korektivni slip faktor (*Ebenezer Cunningham*, 1881-1977).

$$(34) \quad C_c = 1 + \frac{\lambda}{2a} \left(c_1 + c_2 e^{-c_3 \frac{2a}{\lambda}} \right)$$

$$C_c = 1 + Kn \left(c_1 + c_2 e^{-\frac{c_3}{Kn}} \right)$$

Tipično za vazduh		
$\lambda = 0.066\mu\text{m}$	$2a$	C_c
$c_1 = 2.514$	$0.01\mu\text{m}$	22.781
$c_2 = 0.800$	$1\mu\text{m}$	1.168
$c_3 = 0.550$	$10\mu\text{m}$	1.017

gde je: λ - srednja dužina slobodnog puta čestice (između dva sudara), i
gde su c_i , $i = 1, 2, 3$ - koeficijenti koji se eksperimentalno određuju.

2.12 Elektrostatička sila i brzina kretanja čestice

Na česticu u filteru deluju sledeće sile: inercijalna, gravitaciona, sila potiska, sila otpora fluida i jedna ili više stranih sila, električnog ili

neelektričnog porekla. U elektrostatičkom filteru to je $F_E = qE$ Coulombova sila (Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806).

Kada se radi o vazduhu zagađenom prašinama, dakle česticama male mase, gravitaciona sila se može zanemariti, sila potiska je već uzeta u obzir, a elektrostatička sila je u ravnoteži sa silom inercije i silom otpora fluida (33).

$$\left. \begin{aligned} \sum F &= 0 \\ F_E &= m \frac{dw}{dt} + F_D \end{aligned} \right\}$$

Neka je m masa čestice i neka je w brzina kretanja čestice ka taložnoj elektrodi (Eng. *Drift velocity*), koja se javlja zbog privlačnih elektrostatičkih sila. Tada iz uslova ravnoteže sila sledi diferencijalna jednačina

$$\frac{dw}{dt} + w \frac{6\pi\mu a}{C_c m} = \frac{q}{m} E.$$

Diferencijalna jednačina je linearna, prvog reda i razdvaja promenljive, pa je opšte rešenje oblika

$$w = C \exp\left(-\frac{6\pi\mu a}{m C_c} t\right) + \frac{qEC_c}{6\pi\mu a}$$

gde je C konstanta integracije koja se određuje se iz početnog uslova $w(0) = 0$, tako da je konačno

$$(35) \quad w = \left(1 - \exp\left(-\frac{6\pi\mu a}{m C_c} t\right)\right) \frac{qEC_c}{6\pi\mu a}$$

Već za vreme $t > 0.01s$ eksponent se može zanemariti. To je isto kao i da se zanemari ubrzanje čestice, tj. kao da se izjednače elektrostatička sila i sila otpora fluida.

Sa tim zanemarivanjem dobija se konačni izraz za brzinu kretanja čestice ka taložnoj elektrodi, koja je poznata još i kao *drift, terminal, migration, settling velocity*.

$$(36) \quad w = \frac{qEC_c}{6\pi\mu a}$$

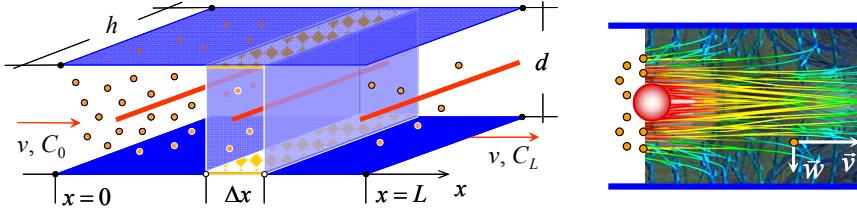
Jačina električnog polja koje vrši jonizaciju čestica je približno ista kao i jačina polja koje privlači naelektrisanе čestice, $E \approx E_0$.

Na osnovu izraza za količinu naelektrisanja za česticu od dielektrika, sfernog oblika, koja se nalazi u homogenom elektrostatičkom polju (8), računa se brzina kretanja čestice w ka taložnoj elektrodi.

$$(37) \quad w = \frac{2\varepsilon_0 a}{\mu} C_c \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} E_0^2$$

Na isti način bi se tretirala i savršeno provodna česticu ($\varepsilon \rightarrow \infty$), gde je količina naelektrisanja data izrazom (9). Sa neznatnim izmenama u razmatranju raspodele električnog polja mogu biti obrađene šuplje dielektrične čestice, što ovde nije od interesa.

2.13 Jednačina efikasnosti prikupljanja čestica



Slika 16. Taloženje čestica i efikasnost prikupljanja

Izvođenje jednačine za efikasnost prikupljanja čestica je bazirano na nekoliko pretpostavki.

- Koncentracija čestica u bilo kom poprečnom preseku je uniformna.
- Protok fluida je laminaran i odvija se stalnom brzinom.
- Brzina kretanja čestica je stalna.
- Nema ponovnog ulaska već prikupljenih čestica u među prostor.

Radi jednostavnosti, neka je kanal kroz koji protiče fluid (gas, vazduh) ograničen sa samo dve strane pomoću ravnih ploča koje se nalaze na međusobnom rastojanju d . Kanal je dužine L i širine h . Fluid struji kroz kanal stalnom brzinom v . Naelektrisane čestice se brzinom w talože na zidove kanala zbog privlačnih elektrostatičkih sila. Zbog toga koncentracija čestica u fluidu $C(x)$ postepeno opada duž pravca strujanja x . Razlika ukupnih masa na ulasku i izlasku iz dela zapremine $\Delta V = d h \Delta x = d h v \Delta t = 2 w \Delta t h \Delta x$ čini masu čestica nataloženih na dve elementarne površine $2\Delta S = 2\Delta x h$, što daje jednačinu masenog bilansa

$$(38) \quad C(x)v\Delta t h d - C(x+\Delta x)h d v\Delta t = C(x + \frac{\Delta x}{2})h 2\Delta x w\Delta t.$$

Kada se postavljena jednačina podeli vremenskim intervalom Δt sledi analogna jednačina za protoke, a kada se još podeli elementarnom dužinom Δx sledi

$$-h d v \frac{C(x+\Delta x) - C(x)}{\Delta x} = 2h w C(x + \frac{\Delta x}{2}).$$

U graničnom slučaju, kada $\Delta x \rightarrow 0$,

$$-h d v \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{C(x+\Delta x) - C(x)}{\Delta x} = 2h w \lim_{\Delta x \rightarrow 0} C(x + \frac{\Delta x}{2}).$$

Leva strana jednačine predstavlja prvi izvod koncentracije, pa sledi diferencijalna jednačina

Jednačina razdvaja promenljive, a treba je integraliti po celoj dužini kanala, tj od $x=0$ do $x=L$.

Neka su $C(0)=C_0$ i $C(L)=C_L$ koncentracije čestica na ulazu u kanal i izlazu iz kanala.

Kako su $S=2hL$ i $Q=vh d$ ukupna taložna površina i protok fluida, to sledi konačno rešenje.

$$\begin{aligned} \frac{dC(x)}{dx} &= -\frac{2hw}{hdv}C(x). \\ \int_0^L \frac{1}{C(x)} dC(x) &= -\frac{2hw}{vd} \int_0^L dx \\ \ln \frac{C_L}{C_0} &= -\frac{2hLw}{hdv} \\ (39) \quad C_L &= C_0 e^{-\frac{wS}{Q}} \end{aligned}$$

Efikasnost prikupljanja čestica η definsana je odnosom

$$(40) \quad \eta = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = 1 - \frac{C_L}{C_0} = 1 - e^{-\frac{wS}{Q}},$$

što je *Deutsch-Andersonova* jednačina.

Do ove jednačine je prvo došao *Anderson (Evald Anderson)* 1919. godine. Zatim je *Deutsch (Walther Deutsch)* 1922, godine teorijski izveo istu jednačinu, čime su postavljeni temelji za proučavanje efikasnosti filtriranja vazduha na kojima se i danas, posle skoro jednog veka, grade teorijska i eksperimentalna istraživanja. I pored svih nedostataka koje ova jednačina ima, a koji su posledica zanemarivanja i uprošćavanja datih u pretpostavkama, ova jednačina pruža jasnu predstavu o tome da na efikasnost filtriranja bitno utiču površina elektroda i brzina strujanja fluida. Koncentracija nečistoća u fluidu, koja se ne pojavljuje eksplicitno u jednačini za efikasnost, sadržana je u njoj implicitno kroz izraz za brzinu taloženja čestica w . Takođe, ova jednačina je veoma delotvorna za proračun potrebnih površina i broja taložnih elektroda kada je zadata potrebna efikasnost filtera.

2.14 Korekcija *Deutsch-Andersonove* jednačine

Na tačnost *Deutsch-Andersonove* jednačine utiče nejednakost veličine čestica, što dovodi do modifikacije jednačine. Teorijska brzina kretanja čestica ka taložnoj elektrodi w treba da bude zamenjena eksperimentalno utvrđenom veličinom, što je srednja brzina kretanja svih čestica.

Prva takva modifikacija je poznata kao *Matts-Ohnfeldt* jednačina (*Sigvard Matts, Per-Olaf Ohnfeldt*). U ovoj modifikaciji pojavljuje se dodatni parametar k koji se eksperimentalno utvrđuje. Praksa je pokazala da se

najveći broj zadovoljavajuće tačnih rezultata dobija za $k=0.5$. Treba primetiti da se za $k=1$ i teorijsku brzinu migracije dobija *Deutsch-Andersonova* jednačina.

Drugi pokušaj poboljšanja *Deutsch-Andersonove* jednačine je poznat kao *Whiteova* korekcija (*Harry J. White*). U ovoj korekciji čiji cilj je bio uprošćavanje izraza pojavljuje se srednja brzina čestica što se u principu nimalo ne razlikuje od brzine koju su upotrebili prethodnici. Jasno, da se u sva tri slučaja vrednosti za brzine razlikuju i uzimaju se iz tabela do kojih se došlo eksperimentalnim putem.

<i>Deutsch-Anderson</i> 1922	<i>Matts-Ohnfeldt</i> 1964	<i>White</i> 1982
$\eta = 1 - e^{-\frac{wS}{Q}}$	$\eta = 1 - e^{-w_k \left(\frac{S}{Q}\right)^k}$	$\eta = 1 - e^{-\frac{w_e S}{Q}}$

$w_k = 1$	Izračunata efikasnost prikupljanja čestica η [%]					
	$k = 1.0$	$k = 0.8$	$k = 0.6$	$k = 0.5$	$k = 0.4$	$k = 0.2$
$S/Q = 1$	63.2	63.2	63.2	63.2	63.2	63.2
$S/Q = 2$	86.5	82.5	78.0	75.6	78.8	68.3
$S/Q = 3$	95.0	91.0	85.5	82.3	78.8	71.2
$S/Q = 5$	99.3	97.3	92.8	89.3	85.1	80.2
$S/Q = 7$	99.9	99.1	96.0	92.9	88.7	83.3

2.15 Osnovni parametri filtera i primer proračuna

Tipičan primer proračuna elektrostatičkog filtera sastoji se u određivanju površine i broja taložnih elektroda kada se efikasnost filtera unapred zada. Osim efikasnosti filtera unapred se zadaje i protok vazduha jer zavisi od tehnološkog procesa, a to znači od oblasti gde će filter biti primenjen, a čime je automatski poznata dielektrična konstanta čestica i njihov dijametar. Podrazumeva se da je potrebno prikupljati čestice malih dimenzija. Obično se zadaje međuelektrodni radni napon jer najvećim delom utiče na cenu ukupnog uređaja. Sa takvim polaznim podacima svi međurezultati i konačni rezultat su jednoznačno određeni.

Filter	Fluid – vazduh	Čestice – leteći pepeo
$U = 25 \text{ kV}$	$\mu = 18.08 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$	$2a = d_p = 1 \mu\text{m}$
$L \times h \times d = 6 \times 3 \times 1 \text{ m}$	$\lambda = 0.066 \mu\text{m}$	$\varepsilon = 1.713 \varepsilon_0$

$Q = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$	
$\eta = 0.99$		
Da bi se izračunao <i>Cunninghamov</i> korekcionni slip faktor, treba sračunati <i>Knudsenov</i> broj,		
(32) $Kn = \frac{\lambda}{2a} = 0.066$,		
(33) $C_c = 1 + Kn(2.514 + 0.8e^{-0.55/Kn}) = 1.166$.		
Iz zadatog međuelektrodnog napona izračunava se jačina električnog polja,		
$E = \frac{2U}{d} = 50 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$.		
Količina naelektrisanja na čestici najčešće se pretpostavlja i to kao broj zalepljenih elektrona. Međutim, ovde je prikazano da je pravilnije tu količinu naelektrisanja izračunati,		
(8) $q = 12\pi\epsilon_0 a^2 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} E_0 = 1.6 \cdot 10^{-23} E_0 = 5 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C} = 5 \cdot e$.		
Teorijska brzina kretanja čestica ka taložnoj elektrodi izračunava se prema izvedenoj formuli i sa tim rezultatom se nastavlja proračun,		
(37) $w = \frac{2\epsilon_0 a}{\mu} C_c \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon + 2\epsilon_0} E_0^2 = 0.274 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}}$.		
Iz zadatih efikasnosti i protoka izračunava se ukupna potrebna površina taložnih elektroda,		
(40) $\eta = 1 - e^{-\frac{wS}{Q}} \Rightarrow S = -\frac{Q}{w} \ln(1 - \eta) = 504 \text{m}^2$.		
Dalji proračun nije obavezan. Za zadate dimenzije taložne elektrode izračunava se broj potrebnih elektroda. Treba voditi računa da je efektivna površina unutrašnjih elektroda dva puta veća od spoljnjih.		
$n = \frac{S}{S'} = \frac{S}{2hl} = 14$,		
$S = 2 \cdot 18 + 13 \cdot 2 \cdot 18 = 504 \text{m}^2$.		

Treba primetiti da je teorijska brzina migracije veoma mala (**reda milimetra**). Zbog toga se u praktičnim proračunima uzima efektivna brzina migracije, w_e , koja se dobija eksperimentalnim metodama i koja je za red veličine veća. Na taj način se pri istim parametrima dobija nerealan stepen efikasnosti. Da bi se dobili realniji rezultati, u proračun se uključuje

odnos S/Q , koji se na osnovu datog tehnološkog postupka takođe uzima iz tablica, i koji je nazvan specifična površina za taloženje (Eng. *SCA-Specific Collection Area*). Međutim, na oba načina se dolazi do približno istih rezultata.

prazna strana



Elektrostatički filteri u praksi

Praktična efikasnost elektrostatičkih filtera

Tipovi elektrostatičkih filtera

Komponente elektrostatičkih filtera

Primeri primene elektrostatičkih filtera

Upravljanje, održavanje i bezbednost

Praćenje rada elektrostatičkih filtera

prazna strana

3.1 Praktična efikasnost elektrostatičkih filtera

Kao što je pokazano u prethodnim izlaganjima, problem kretanja čestice u kombinovanom brzinskom polju fluida i električnom polju je veoma složen i u opštem slučaju ovaj problem nije moguće analitički rešiti. Prvo pojednostavljenje, koje ne utiče bitno na opštost razmatranja, se sastoji u pretpostavci da je čestica sfernog oblika i da je idealno glatka. To omogućava da se analitički odredi ukupna količina naelektrisanja na čestici ali je problem kretanja čestice i dalje veoma složen. Zatim se u daljem pokušaju rešavanja pretpostavlja da je relativna brzina čestice u odnosu na fluid veoma mala. Ova pretpostavka problem dovodi do nivoa na kome je moguće odrediti silu kojom se fluid suprostavlja kretanju čestice. Konačno se zanemaruju svi uticaji osim onog koji potiče od električnog polja i dobija se izraz za teorijsku brzinu kretanja naelektrisanе čestice. Taj izraz važi pod uslovom da su sve učinjene pretpostavke tačne i da su sva zanemarivanja opravdana. To u praksi nije tako. Zato se pribegava korekciji dobijenih izraza za silu otpora fluida i brzinu kretanja čestice. Svi korekcionni faktori su empirijski dobijeni. Mnogobrojna laboratorijska ispitivanja su pokazala da se sa tako korigovanim izrazima može vršiti dalja analiza, a pre svega se misli na efikasnost prikupljanja čestica. Sam izraz za efikasnost filtera je veoma jednostavan pa se lako proverava da je elektrostatički filter veoma efikasan posebno kada se radi o veoma malim česticama (nano čestice). Zbog veoma velike efikasnosti, a to znači upotrebne vrednosti, elektrostatički filteri su od prve primene pa do danas predmet istraživanja. Za poslednjih sto godina na elektrostatičkom filteru su se promenili sklopovi za upravljanje, dodavani su elektronski sklopovi za automatsko upravljanje, dodavana je merna oprema, ali se suštinski ništa nije promenilo. Međutim, bitno se proširilo polje primene i broj instalacija i baš to je prouzrokovalo brojna laboratorijska ispitivanja i ispitivanja na terenu. Ono što nije bilo moguće dodati, i onako složenom, matematičkom modelu dodavano je kroz različite korekcije.

- Od svih veličina temperatura ima najveći uticaj na projektovanje konstrukcije filtera. Temperatura gasa mogu biti tako visoke da se zbog termičkih naprezanja konstrukcija filtera posebno projektuje. Temperatura utiče na zapreminu gasa koji se filtrira. Za tople gasove potrebni su veći gabariti, zbog povećanog protoka gasa i potrebne veće površine taložnih elektroda. Temperatura utiče i na jačinu adhezionih i kohezionih svojstava čestica, a time na koncentraciju čestica u gasu i na debljinu nataloženog sloja prašine. U prostom električnom kolu, kojim se može predstaviti elektrostatički filter, strujno kolo se zatvara konvekcijom strujom kroz jonizovani gas i kondukcijom strujom preko taložne elektrode. Ta dva dela ovog kola imaju električnu otpornost čija vrednost bitno zavisi od temperature. Efikasnost filtera sigurno zavisi od gustine gasa i debljine

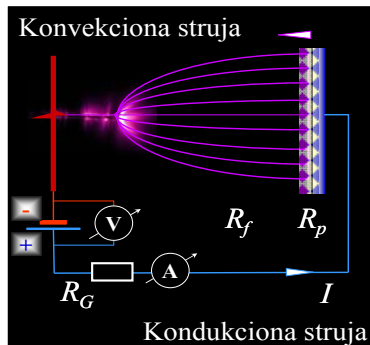
nataloženog sloja čestica, dakle od električne otpornosti elektrostatičkog filtera, što znači od radne temperature.

Ukupna otpornost filtera se sastoji od redne veze otpornosti gasa, otpornosti nataloženog sloja čestica i unutrašnje otpornosti generatora.

$$R_u = R_f + R_p + R_G.$$

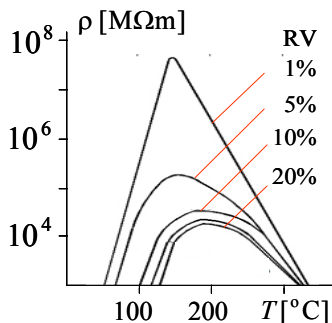
Moguće je izmeriti samo ukupnu otpornost, ali je nemoguće odrediti tačan udeo otpornosti gasa i taloga u ukupnoj otpornosti. Zato se specifična otpornost čestica određuje eksperimentalnim postupcima, tj. merenjem napona i struje na uzorku nataložene prašine jediničnih dimenzija.

Zavisnost otpornosti od temperature je veoma složena funkcija hemijskog sastava gasa, procenta vlažnosti, oblika čestica, brzine strujanja gasa. Sem toga, te funkcionalne zavisnosti se razlikuju za jonizovani gas i sloj nataložene prašine. Jedini poznati rezultati su dobijeni ili statistički ili eksperimentalno. Tako je utvrđena i srednja vrednost specifične otpornosti različitih vrsta taloga iz različitih tehnoloških postupaka (oko $1 \text{ G}\Omega\text{m}$).



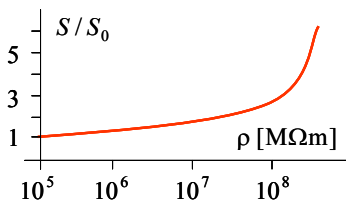
Slika 17. Električno kolo elektrostatičkog filtera

$$\rho = R \frac{S}{l} = \frac{U}{I} \frac{S}{l} [\Omega\text{m}]$$

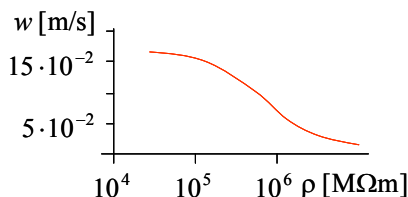


Slika 18. Zavisnost specifične otpornosti taloga od temperature i procenta vlažnosti

Potrebna površina taložnih elektroda za zadatu efikasnost i srednju vrednost specifične otpornosti je uzeta za referentnu, S_0 , pa se odatle dobija relativna površina i potrebna površina pri izmenjenim uslovima. Isključivo merenjem su dobijeni i podaci o promeni brzine migracije sa promenom specifične otpornosti.



Slika 19. Relativna površina taložnih elektroda zavisi od specifične otpornosti



Slika 20. Zavisnost brzine migracije od specifične otpornosti

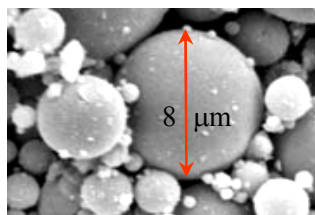
Međutim, kvantitativna veza između električne otpornosti i efikasnosti filtera ne postoji. Ova veza je data samo kvalitativno i rezultat je eksperimentalnih istraživanja. Na osnovu specifične otpornosti čestice zagađivača su svrstane su u četiri klase. Najčešće se razvrstavanje vrši u tri kalase. U sledećoj tabeli data je podela na četiri klase.

		$\rho [\text{M}\Omega\text{m}]$	Kvalitativni opis
Specifična otpornost	Niska	$<10^2$	Slabe elektrostatičke sile. Napon i struja u u operativnim granicama. Zanemarljiv pad napona na talogu. Smanjena sposobnost taloženja.
	Normalna	$10^2 - 10^5$	Dovoljno jake elektrostatičke sile. Napon i struja u u operativnim granicama. Zanemarljiv pad napona na talogu. Velika sposobnost taloženja.
	Umerena	$10^5 - 10^7$	Umereno jake elektrostatičke sile. Početak varničenja. Nezanemarljiv pad napona na talogu. Smanjena sposobnost taloženja.
	Visoka	$>10^7$	Vrlo jake elektrostatičke sile. Prekid proticanja struje. Vrlo veliki pad napona na talogu. Pojava povratne korone. Ozbiljno smanjena sposobnost taloženja.

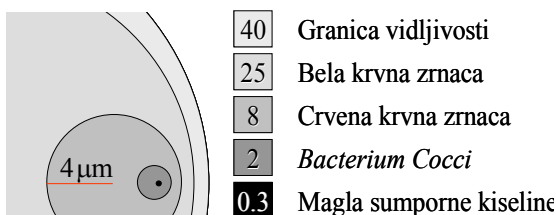
* Čestice sa niskom specifičnom otpornošću se lako naelektrišu i lako razelektrišu. Vezane su slabim adhezionim silama za taložnu elektrodu, pa se tako razelektrisane vraćaju nazad u gas i ponovo treba da se naelektrišu.

** Čestice sa umerenom i visokom specifičnom otpornošću se teško naelektrišu i teško razelektrišu kada stignu na taložnu elektrodu. Između sloja nataloženih čestica i taložene elektrode, koja je na nultom potencijalu, javlja se snažno električno polje koje može da proizvede dodatnu koronu ili povratnu (Eng. *back corona*). Nataložene čestice su jakim adhezionim silama vezane za taložnu elektrodu, što može da stvori probleme sa istresanjem.

▪ Drugi važan faktor koji doprinosi efikasnosti elektrostatičkog filtera je veličina čestice. Dijametar čestice pojavljuje se u izrazima za silu otpora fluida, koeficijent otpora fluida i brzinu migracije čestice. Kasnijim pregrupisavanjem i kombinovanjem izraza uticaj dijametra čestice na efikasnost filtra postaje zamaskiran. Veličina čestice utiče na efikasnost, a kako u zagađenom gasu postoje čestice različitih dijametara potrebno je detektovati frakcionu efikasnost, tj. efikasnost filtera za samo jedan dijametar. Već je više puta naglašeno da elektrostatički filteri spadaju u klasu visokoefikasnih filtera. Najveću efikasnost pokazuju pri prikupljanju veoma malih čestica, upravo tamo gde druge vrste filtera nisu od koristi. I pored toga što se u nekim delovima, a posebno se misli na brzinu migracije čestica, rezultati proračuna ne podudaraju sa izmerenim vrednostima, za efikasnost elektrostatičkih filtera se dobijaju veoma dobra slaganja.



Slika 21. Uveličana fotografija taloga

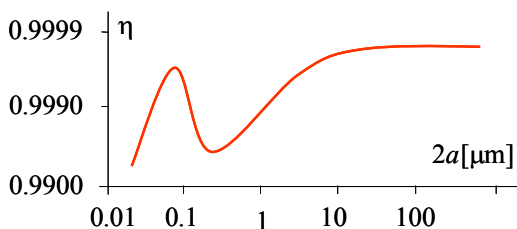


Slika 22. Poređenje dijametara čestica

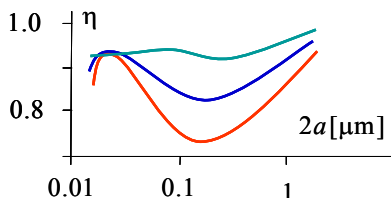
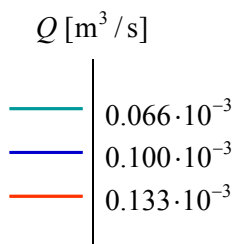
Sa druge strane eksperimentalno određivanje frakcione efikasnosti ne predstavlja naročiti problem jer se radi o merenju ukupnih masa laboratorijski pripremljenih čestica na ulasku u filter i izlasku iz filtera. Tako je uočen i jedan paradoksalan rezultat.

Eksperimenti su pokazali da za čestice dijametra od oko $0.5\mu\text{m}$ efikasnost elektrostatičkih filtera opada.

Sa postojećim teorijskim modelom ovu pojavu nije moguće objasniti.



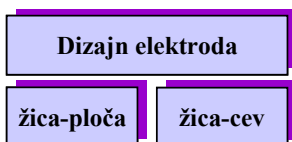
Slika 23. Uticaj dijametra čestice na efikasnost



Slika 24. Pad efikasnosti filtera

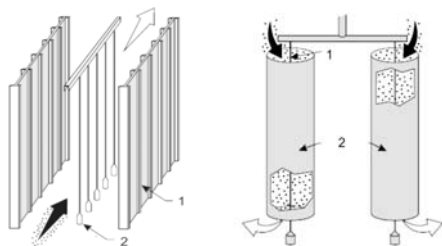
3.2 Tipovi elektrostatičkih filtera

Elektrostatički filteri se mogu klasifikovati na osnovu više kriterijuma. Neke od podela se zasnivaju na osnovu dizajna jonizujućih i taložnih elektroda, na osnovu temperature gasa koji se prečišćava, na osnovu konstrukcije komora u filteru, na osnovu načina prikupljanja čestica koji zavisi od tehnologije procesa i na osnovu tipa taložnih elektroda.

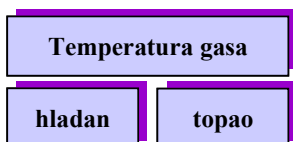


Aktivne elektrode su žice, a pasivne elektrode ploče ili cevasti profili različitih poprečnih preseka. Većinom, pločasti taložnici se koriste u suvim postupcima filtriranja, a cevasti (tubularni) u vlažnim postupcima.

Na sledećim slikama šematski su prikazana dva osnovna tipa filtera sa ravnom i cevastom neutralnom tj. taložnom elektrodom. Jonizujuće elektrode su žice, koje su zategnute tegovima kako bi se prevenirao slučajni dodir elektroda i kratak spoj. Vrlo retko je jonizujuća elektroda u obliku ploče.

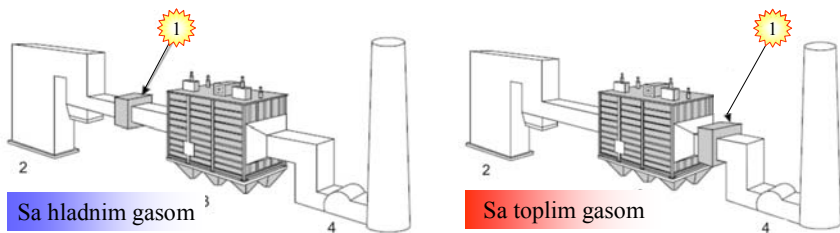


Slika 25. Dizajn elektroda
1. jonizujuća elektroda 2. taložna elektroda



Elektrostatički filteri se takođe grupišu prema temperaturi gasa koji ulazi u filter. Gas se smatra hladnim ako mu je temperatura niža od 200°C .

Prvi elektrostatički filteri bili su upravo filteri sa hladnim gasom i ravnim taložnim elektrodama. Međutim, u mnogim industrijama (proizvodnja cementa, čeličane, termo-elektreane i slično) zagađen topao gas je nezaobilazna posledica tehnološkog postupka. Topao gas ima na desetine puta veću zapreminu od hladnog pa je potrebna veća površina taložnih elektroda. Sa druge strane usled visokih temperatura dolazi do deformacija cele konstrukcije koje su posledica različitih termičkih naprezanja, pa su neophodna dodatna mehanička poboljšanja. Primena filtera za hladan gas u uslovima rada sa toplim gasom znači znatno gabaritniji i skuplji filter. Prvo i očigledno rešenje je nađeno u hlađenju gasa pre nego što uđe u filter. Otuda i potiče podela filtera na hladnostrane (Eng. *Cold Side*) i toplostrane (Eng. *Hot Side*) u zavisnosti od toga da li se filter ugrađuje pre ili posle hladnjaka (Eng. *preheater*-predgrevač). Jezička neusaglašenost koja se ovde javlja ne bi trebalo da stvori zabunu, jer se radi o izmenjivaču toplote koji višak energije vraća u tehnološki postupak.



Slika 26. Filteri sa toplim i hladnim gasom

1. hladnjak (*preheater*), 2. kotao - *boiler*, 3. filter, 4. ventilator

Filteri za topao gas rade u režimu između 300°C i 400°C . Taložne elektrode su uglavnom cevastog tipa. Sva konstruktivna rešenja su prilagođena zadatim radnim uslovima. Filteri za topao gas su skuplji, a i praksa je pokazala kratak vek pouzdanog rada. Sa druge strane ovi filteri su znatno manje podložni koroziji i što je najvažnije smanjuju otpornost gasa pa time povećavaju efikasnost filtera. Ova osobina je od velikog značaja posebno od kada se u termoelektranama većinom koristi ugalj sa malim procentom sumpora što posledično daje visoko električno otporne gasove.

Dizajn filtera

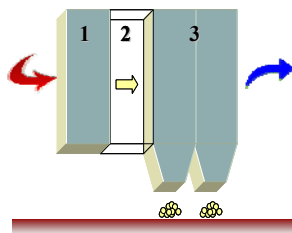
jednofazni

dvofazni

U jednofaznim filterima se proces jonizacije, naelektrisavanja i taloženja vrši u jednoj komori. U dvofaznim filterima se taloženje čestica vrši u zasebnoj komori.

Kod jednofaznih filtera radni napon je za red veličine veći (čak do 300 kV) nego kod dvofaznih. Naelektrisane čestice migriraju prema taložnim pločastim ili cevastim elektrodama odakle se sakupljaju istresanjem ili nekim drugim postupkom. Ceo postupak se odvija u jednom električnom polju i u jednoj zapremini, dakle u jednoj fazi.

Dvofazni filter se razlikuje od jednofaznog i po dizajnu i po naponima koji se primenjuju. Kod dvofaznih filtera jonizaciona komora se sastoji od pozitivno naelektrisanih žičanih ili štapastih elektroda koje se dovode na jednosmerni napon reda veličine desetak kilovolti. Pozitivno naelektrisane čestice utiču u drugu komoru u kojoj se vrši prikupljanje na negativno naelektrisane taložne elektrode, što je druga faza prečišćavanja.



Slika 27. Dvofazni filter

1. jonizaciona komora
2. tok naelektrisanih čestica
3. taložna komora

Napon negativno naelektrisanih elektroda može da bude istog reda veličine kao u jonizacionoj komori. Jednofazni filteri koriste za rad visoki napon (do 300 kV) za naelektrisavanje čestica. Naelektrisane čestice migriraju prema taložnim pločastim ili cevastim elektrodama odakle se sakupljaju

istresanjem ili nekim drugim postupkom. Ceo postupak se odvija u jednom električnom polju i u jednoj zapremini, dakle u jednoj fazi. Dvofazni filter se razlikuje od jednofaznog i po dizajnu i po naponima koji se primenjuju. Kod dvofaznih filtera jonizaciona komora se sastoji od pozitivno naelektrisanih žičanih ili štapastih elektroda koje se dovode na jednosmerni napon reda veličine desetak kilovolti. Pozitivno naelektrisane čestice utiču u drugu komoru u kojoj se vrši prikupljanje na negativno naelektrisane taložne elektrode, što je druga faza prečišćavanja. Napon negativno naelektrisanih elektroda može da bude istog reda veličine kao u jonizacionoj komori. Dvofazni taložnici su prvobitno izrađeni za prečišćavanje vazduha u kombinaciji sa sistemom za klimatizaciju. Koriste se skoro isključivo za prikupljanje tečnih aerosola.



Bilo koji tip elektrostatičkog filtera može da radi i u suvom i u vlažnom režimu. Suštinska razlika u prikupljanju čestica zapravo ne postoji. Razlika je u načinu odstranjivanja već prikupljenih čestica.

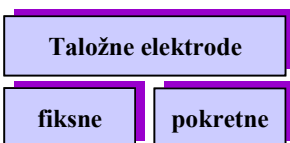
Za razliku od filtera koji rade u suvom postupku (Eng. *Dry ESP*), kod filtera koji rade u vlažnom režimu (Eng. *WESP-Wet ESP*) taložne elektrode se ispiraju vodom. Ispiranje može da bude kontinualno ili periodično.

U principu voda se može upotrebiti i pre procesa naelektrisanja čestica. Ako se vodena prašina ubacuje u gas (koji se prečišćava) pre ulaska u jonizacionu komoru neke od čestica će biti otežane i silom gravitacije privučene na dno filtera.



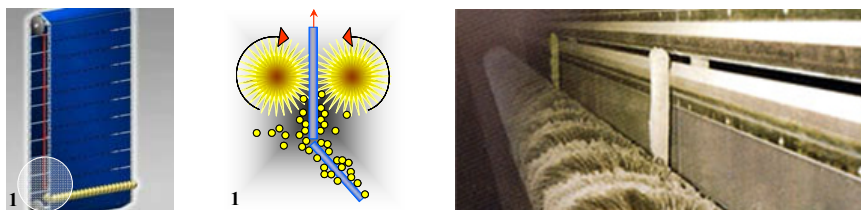
Slika 28. Ispiranje taložnih elektroda

Sama ideja prečišćavanja vodenom prašinom je veoma stara. Takođe, postoje podaci da je zapravo prvo nastao filter sa vlažnim postupkom rada (patentirao *Dr Cottrell*, 1908.), a zatim filter sa suvim postupkom (prvi put upotrebljen u *Detroit Edison* kompaniji, 1922.). Filteri sa vlažnim postupkom imaju izvesne prednosti. Nije potrebno otresanje taložnih elektroda čime se smanjuje broj mehaničkih pokretnih delova, a pouzdanost uređaja povećava. Ovi filteri su veoma pogodni za prikupljanje lepljivih čestica, čestica koje sa vazduhom čine eksplozivne smeše i čestica koje imaju veoma malu električnu provodnost. Sa druge strane ovakvi filteri imaju i niz nedostataka. Voda veoma ubrzava koroziju, pa ceo filter treba da bude izrađen od nekorozivnih materijala. Još veći nedostatak je što prikupljena voda mora posebno da se prerađuje što postupak filtriranja čini najmanje duplo skupljim.



Filteri koji koriste suvi postupak za odstranjivanje nataloženih čestica mogu da budu konstruisani sa fiksnim ili pokretnim taložnim elektrodama.

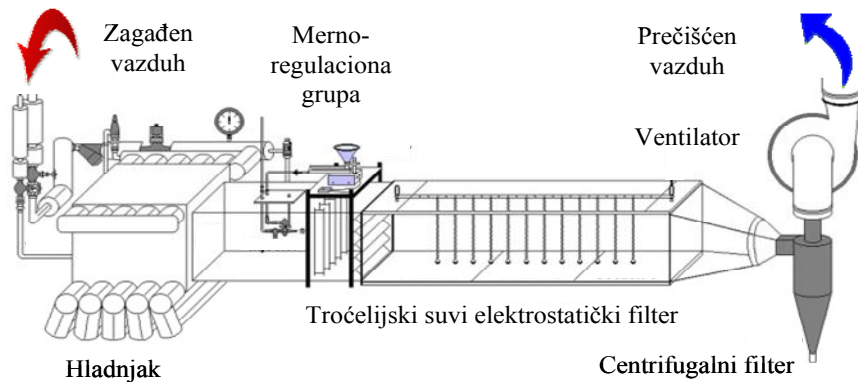
Taložne elektrode se izrađuju u vidu beskonačne pokretne trake koja se kreće uz rotirajuće četke čime je otklanjanje nataloženih čestica znatno efikasnije u odnosu na tipove koji koriste otresanje.



Slika 29. Pokretne taložne elektrode sa četkama



Data podela elektrostatičkih filtera nije isključiva. U praksi postoje modeli koji objedinjuju više tipova. Na primer, jedan od najčešćih tipova je jednofazni filter tipa žica-ploča za suhu tehnologiju i hladan dimni gas. Na sledećoj slici prikazana je jedna drugačija kombinacija.



Slika 30. Kombinovani filter gasa

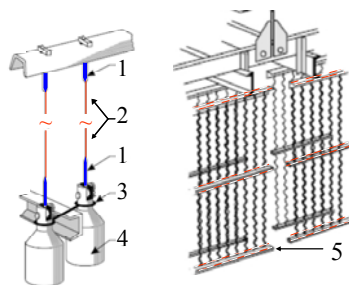
3.3 Komponente elektrostatičkih filtera

Svi elektrostatički filteri, bez obzira na tip i namenu, sadrže sledeće osnovne komponente:

- aktivne negativne elektrode za jonizaciju (Eng. *discharge*),
 - pasivne pozitivne elektrode za prikupljanje čestica (Eng. *collection*),
 - sistem viskog napona (Eng. *transformer-rectifier set*),
 - sistem za čišćenje taložnih elektroda (Eng. *raper*),
 - kućište (Eng. *shell*) sa sistemom za prikupljanje čestica (Eng. *hopper*)
- Jonizujuće elektrode su žičane elektrode koje su u odnosu na ostale delove filtera dovedena na visoki električni potencijal. U sam filter ove elektrode se montiraju pomoću izolatora koji imaju visoku električnu čvrstoću (napon proboja).

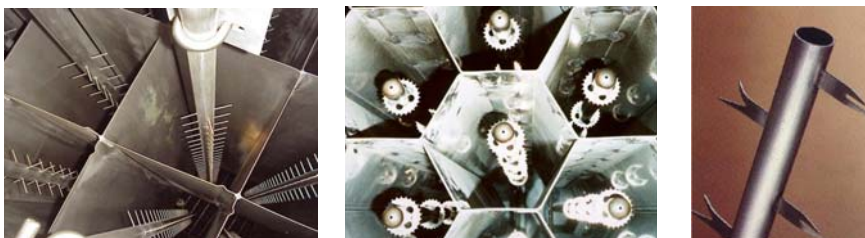
Da bi izbegao dodir sa sa nekim od delova filtera žice moraju biti zategnute (obično pomoću tegova) ili montirane u kruti ram. Uvek se vodi računa o projektovanim međusobnim rastojanjima i rastojanjima do pasivnih taložnih elektroda.

Znatno češće jonizacione elektrode se izrađuju kao štapovi, tj. od cevi malog poluprečnika čime se postiže mehanička krutost, jednostavnija montaža i održavanje.



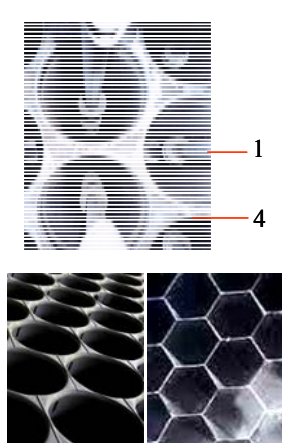
Slika 31. Aktivne elektrode
1. izolator - uvodnik, 2. žica,
3. odstoynik, 4. teg
5. delovi ramovskog ukrucenja

Poznato je da je gustina naelektrisanja na šiljcima i ostrim krajevima veća nego na zaobljenim, pa se jonizujuće elektrode obogaćuju takvim dodacima, čime se povećava jačina električnog polja u oblasti jonizacije.

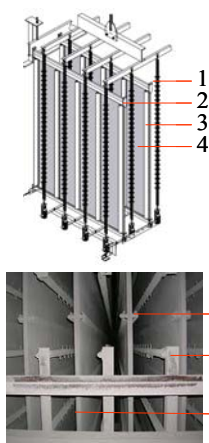


Slika 32. Jonizujuće elektrode obogaćene šiljcima

- Taložne elektrode su cevaste različitih oblika poprečnih preseka ili pločaste. Pločaste su ili profilisane ili ravne sa rebrima za ukrucenje. Elektrode takođe mogu biti fiksne ili pokretne. Izbor tipa elektrode zavisi od uslova ugradnje i predviđenih normativa za održavanje.



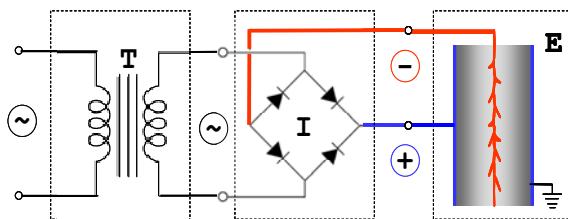
Slika 33. Cevaste elektrode



Slika 34. Pločaste elektrode

1. jonizujuća elektroda, 2. ram, 3. rebra za ukrućenje, 4. taložna elektroda

▪ Elektrosistem viskog napona kontroliše jačinu električnog polja koje se stvara između aktivnih i pasivnih elektroda. Transformator i ispravljač su osnovni delovi ovog sistema. Transformator podiže naizmenični napon na potrebnu vrednost, a zatim se pomoću ispravljačkog dela dobija visoki jednosmerni napon. Ispravljač je najčešće izveden kao diodni most tako da se ispravljavu obe poluperiode naizmeničnog napona.



Slika 35. Principijelna klasična šema napajanja elektrostatičkog filtera
Transformator-Ispravljač-Elektrostatički filter

Za funkcionisanja elektrostatičkog filtera potrebne su jačine električnog polja od nekoliko desetina kilovolti po metru. To znači da elektrosistem treba da obezbedi izlazni napon istog reda veličine. Savremena rešenja za dobijanje visokog napona baziraju na prekidačkim elektronskim kolima (Eng. *Switching*) i podizanju ulazne frekvencije.

U literaturi se ovaj sistem redovno naziva TR set (Eng. *Transformer-Rectifier set*) bez obzira što su za pravilno funkcionisanje ovog sistema neophodna dodatna elektronska kola za stabilizaciju i podešavanje napona i struje, zatim za kontrolu korone i snage, kao i zaštitna električna kola. Dakle, ceo sistem je veoma složen u elektronskom pogledu, a najjednostavniji delovi su upravo transformator i ispravljač.

Zavisno od potrebne snage ceo sistem može da zauzima desetak kubnih metara i bude težak više tona. Sa druge strane dovođenje visokog napona na jonizujuće elektrode je veoma delikatan zadatak. Visokonaponski kablovi moraju da budu zaštićeni od spoljašnjih uticaja, nedostupni neovlašćenim licima, zaštićeni od mogućeg proboja i mehaničkih oštećenja.



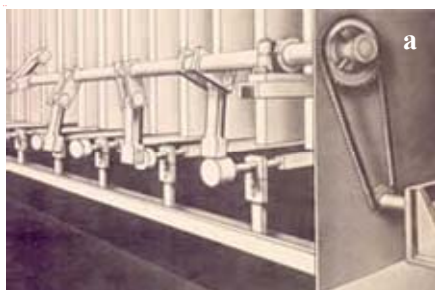
Slika 36. Transformatorsko-ispravljački sistem
levo- Transformator bez kućišta
desno- 1. TI sistem, 2. Otresaći elektroda

Zbog svega toga ceo sistem mora da bude što bliži mestu korišćenja visokog napona, tj. što bliži elektrodama za jonizaciju. Jedno od rešenja je gabaritni deo visokonaponskog sistema montirati na sam vrh filtera.

▪ Sistemi za čišćenje taložnih elektroda mogu biti realizovani na različite načine. Načini uklanjanja prašine zavise od tipa filtera. Kod filtera sa vlažnim postupkom prikupljanja, elektrode se ispiraju vodom. Kod filtera sa suvim postupkom prikupljanja generalno postoje dva načina otresanja čestica sa taložnih elektroda. Češći način je prinudno vibriranje taložnih elektroda, udaranjem mehaničkim ili elektromagnetnim čekićima. Drugi način su pokretne taložne elektrode koje prolaze pored sistema četki.

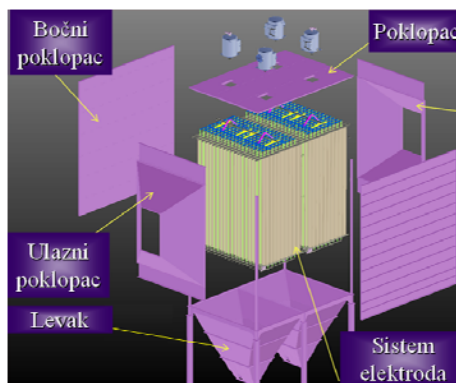


Slika 37. Elektromagnetni čekići na krovu elektrostatičkog filtera



Slika 38. Otresaći u elektrostatičkim filterima
a) Mehanički, b) Magnetno-gravitacioni, c) Elektromagnetni

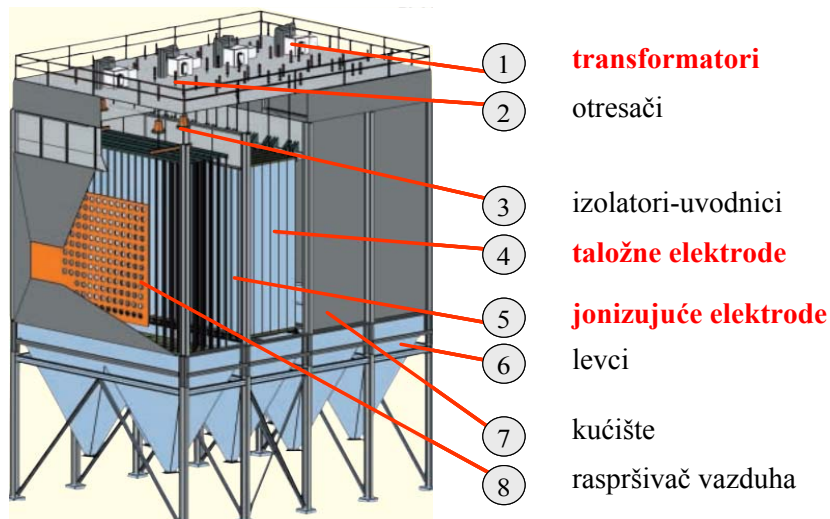
- Kućište ima zaštitnu ulogu. Štiti uređaj od spoljnih uticaja i štiti ljude od povređivanja visokim naponom i povređivanja kod kojih su mogući uzroci mehaničke komponente sistema. Konstruktivno gledano kućište je neophodan deo i služi kao osnova za gradnju celog sistema. Sastavni deo kućišta su levci i sistem za prikupljanje čestica koje su otresene sa taložnih elektroda.



Slika 39. Kućište sa levcima

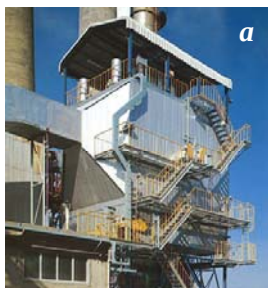
Nagomilana prašina se odvodi iz bunkera na deponiju ili eventualnu preradu pomoću transportera (pneumatski, pužasti, trakasti).

- Konačno, elektrostatički filter u celosti prikazan je na sledećoj slici.



Slika 40. Elektrostatički filter sa svim sastavnim komponentama.

3.4 Primeri primene elektrostatičkih filtera



a) Livnica gvožđa



b) Spaljivanje otpada



c) Industrija gume



d) Livnica gvožđa



e) Spaljivanje otpada



f) Industrija gume



g) Hemijska industrija



h) Rafinerija



i) Laboratorija



j) Sobni



k) Kuhinjski



k) Radionički



l) Za auto

m) Primena u
tunelima po
by-pass principu

slika 41. Primena elektrostatičkih filtera

a-f) suvi industrijski, g-i) vlažni imdustrijski, j-l) neindustrijski, m) spjecijalni.

3.5 Upravljanje, održavanje i bezbednost

Obaveze proizvođača:

1. Lak pristup svim oblastima za održavanje - ventilatori, motori, levci, uređaji za pražnjenje, amortizeri, kontrolori nivoa protoka dimnog gasa i temperature, izolatori, istresači, TR setovi, negativne i taložne elektrode.
2. Lak pristup svim oblastima za kontrolu i testiranje.
3. Nezavisnost instalacione procedure od klimatskih uslova.

Obaveze korisnika ili montažera su sledeće vizuelne kontrole:

1. Kontrola ravnomerne distribucije dimnih gasova u celom uređaju. To obuhvata: sistem cevi, pokretna krilca ventilatora, pregradne ploče i ulazne otvore sa rupičastim difuznim pločama koje utiču na distribuciju dimnih gasova. Nepropisna instalacija izaziva pojačan protok vazduha u nekim oblastima i tako smanjuje efikasnost pri prikupljanju, a prouzrokuje ponovno ulaženje prikupljene prašine, posebno tokom ciklusa istresanja.
2. Kontrola potpune zaštite sistema elektrostatičkog filtera od vansistemskog prikupljanja prašine. Unutrašnje i spoljašnje curenje vazduha na spojevima panela kućišta ili na pristupnim mestima za održavanje, ili stvara dodatan protok vazduha koji treba da se spreči ili čini da gas koji se procesuiru zaobiđe kolektor. Unutrašnje curenje vazduha u sistemu visoke temperature (elektrostatički filter za topao dimni gas) je izuzetno štetno jer stvara hladne tačke koje mogu dovesti do kondenzacije vlage ili kiseline i moguće korozije. Pored toga, unutrašnje curenje vazduha i kondenzacija vlage može da izazove zgrušavanje letećeg pepela u levku i tako čini da normalno uklanjanje prašine uređajima za pražnjenje postane veoma teško. Najbolji način da se otkrije curenje je stalna kontrola zida iz unutrašnjosti sistema tokom dana.
3. Kontrola pravilne instalacije negativnih i taložnih elektroda. Taložne elektrode se obično prve ugrađuju, a žice za pražnjenje ili kruti okviri se postavljaju naknadno. Provera se vrši za svaki deo elektrode radi sigurnosti da su elektrode strogo vertikalne i ispravno poredane.
4. Kontrola pravilne instalacije otresača. Otresači za taložne ploče i negativne elektrode bi trebalo da budu ugrađeni i postavljeni u skladu sa specifikacijama proizvođača. Provera da li magnetno-impulsni istresači udaraju u pomoćni okvir na taložnoj ploči je obavezna. Učestalost rada istresača i intenzitet se mogu podesiti kasnije, u toku eksploatacije filtera.

5. Kontrola pravilne instalacije izolacije. Većina sistema elektrostatičkih filtera koristi termičku izolaciju kako bi se održala visoka temperatura dimnog gasa. Ovo sprečava kondenzaciju na levcima, elektrodama ili u cevima. Pošto je većina filtera ugrađena na otvorenom prostoru, treba proveriti da li su sve površine i oblasti gde potencijalno može doći do gubitka toplote adekvatno izolovane.
6. Kontrola pravilne instalacije i kontrola rada uređaja za pražnjenje. Važno je da se proverí rad uređaja za pražnjenje pre nego što ceo sistem elektrostatičkog filtera počne sa radom. Prepuni levci su uobičajeni operativni problem, koji se može izbeći pravilnom instalacijom i održavanjem uređaja za pražnjenje. Detektori nivoa prašine u levcima su ugrađeni kao alat za održavanje i imaju upozoravajuću ulogu.
7. Kontrola pravilne instalacije ventilatora. Treba proveriti da li ventilatori pravilno rotiraju i vibriraju i da li su podešene pokretačke komponente. Ventilatori bi trebalo da budu bezbedno montirani na komponentama koje imaju dovoljnu masu kako bi prekomerne vibracije bile eliminisane.
8. Pored gore navedenih stavki, svaki ugrađeni elektrostatički filter treba da ima poseban spisak koji sadrži jedinstvene konstrukcione karakteristike tog uređaja. Ekipa koja ga ugrađuje treba da pripremi spisak pre početka završne inspekcije i početnog pokretanja.

3.6 Praćenje rada

Za pravilan operativni rad i održavanje sistema neophodno je tokom upotrebe, u realnom vremenu, pratiti najvažnije karakteristike sistema. U današnjim elektrostatičkim filterima sve bitne karakteristike se prate automatski, a mogući problemi se signaliziraju.

- ♦ Karakteristika napon/struja.
- ♦ Neprozirnost izlaznog fluida.
- ♦ Temperatura fluida.
- ♦ Protok fluida.
- ♦ Sastav i vlažnost fluida.
- ♦ Nagomilavanje prašine.

prazna strana

Zaključak

Prednosti i nedostaci elektrostatičkih filtera

Povećanje efikasnosti elektrostatičkih filtera

Laboratorijski model elektrostatičkog filtera



prazna strana

4.1 Prednosti i nedostaci elektrostatičkih filtera

Prednosti	Nedostaci
Koristi se mali radni pritisak, za razliku od centrifugalnih filtera.	Veća potrošnja električne energije u odnosu na druge tipove filtera.
Radi sa velikim protocima gasa, čak do $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.	Neophodan je visok stepen zaštite ljudstva i visoka obučenost.
Ima visoku efikasnost prikupljanja nano čestica, čak do 99.9%. Efikasnost se smanjuje sa porastom dijametra čestice.	Efikasnost filtera zavisi od dijametra čestica.
Jednako efikasno otklanja suve, vlažne čestice i maglenu prašinu.	Efikasnost filtera zavisi od otpornosti čestica. Efikasnost se smanjuje sa porastom otpornosti čestica.
Efikasan u otklanjanju lepljivih i korozivnih čestica.	Neupotrebljivi su za čestice koje sa vazduhom prave eksplozivne smeše.
Može da radi sa gasovima jako visokih temperatura, čak do 850°C .	Teško prilagodljiv prilikom promene parametara tehnološkog procesa.
Dugačko vreme bezotkaznog rada, tj. visok stepen pouzdanosti.	Mala mogućnost demontaže i premeštanja, posebno zbog velikih gabarita.
Mali troškovi eksploatacije.	Velika početna investiciona ulaganja

4.2 Povećanje efikasnosti elektrostatičkih filtera

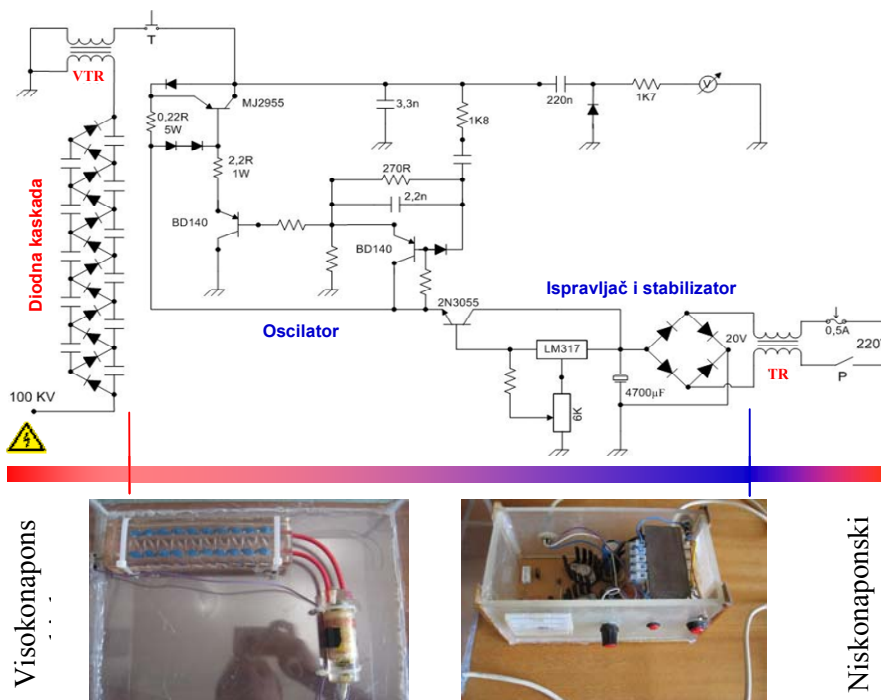
Sledeći faktori utiču na povećanje efikasnosti filtera:

1. Povećanje površine taložnih elektroda.
2. Smanjenje brzine kretanja gasa koji se prečišćava.
3. Povećanje brzine kretanja čestica ka taložnoj elektrodi.
 - Smanjenje viskoziteta gasa.
 - Povećavanje temperature gasa.
 - Smanjenje međuelektrodnog napona.
4. Smanjenje specifične otpornosti čestica.
 - Podešavanje radne temperature.
 - Povećavanje procenta vlažnosti gasa.
 - Povećavanje provodnosti aditivima.
 - Učestalije otresanje taložnih elektroda.

4.3 Laboratorijski model elektrostatičkog filtera

Laboratorijski elektrostatički filter je zamišljen kao skroman uređaj za demonstraciju principa rada industrijskih filtera i stoga se sastoji od najvažnijih delova neophodnih da se ovaj cilj ostvari. Od industrijskog napajanja, $U_m = 220\text{V}$, $f_m = 50\text{Hz}$ mrežni transformator na izlazu daje napon do $U_n = 20\text{V}$ iste učestanosti. Ovo primarno smanjenje napona nije neophodno i ovde omogućava upotrebu jeftinijih elektronskih komponenti. Klasični ispravljački deo od četiri diode u *Greco*vom spoju (*Leo Grec*) daje jednosmeran napon koji se zatim stabilise i reguliše u opsegu $0 - 20\text{V}$. Sa satabilizatora napon se uvodi u oscilatorno kolo koje povećeva učestanost na $f_n = 20\text{kHz}$. Talasni oblik napona je pravougaon. Napon se dovodi do visokofrekventnog i visokonaponskog transformatora na čijem izlazu se sada dobija $U_f = 0 - 5\text{kV}$, $f = 20\text{kHz}$. Konačno diodnom kaskadom napon se ispravlja i podiže na željenu vrednost $U_f = 0 - 100\text{kV}$, $f = 20\text{kHz}$. Projektovan je negativan polaritet.

Visoki napon se dovodi do aktivnih elektroda koja su i ovom slučaju izvedene u vidu rešetki. Pasivne elektrode (taložnik) su na nultom potencijalu. Za ovaj laboratorijski uređaj nije predviđeno nikakvo istresanje. Razmak između elektroda može da se podešava u opsegu $1 - 4\text{cm}$. Razmak treba da bude podešen tako da električno polje u sistemu za dati napon bude maksimalno, a da pri tome ne dođe do pojave varničenja. Protok vazduha obezbeđuju dva ventilatora (usisni i izduvni) i nije predviđena regulacija brzine strujanja vazduha. Dimenzije filterskog dela su $0.25 \times 0.12 \times 0.12\text{m}$.



UPOZORENJE: Pre upotrebe na kraj visokonaponskog kabla obavezno dodati zaštitni otpornik $1\text{ M}\Omega$. Uredjaj je opasan po zdravlje i život!

Slika 42. Laboratorijski elektrostatički filter

Laboratorijskom uređaju treba dodati regulacionu i mernu opremu kada bi mogao da posluži za detaljna istraživanja.



prazna strana



Prilozi

Literatura
Indeks imena
Indeks slika

prazna strana

Literatura

- [1] Ádám TAMUS, Tamás Ivancsy, István KISS, István Berta, *Improved modelling of impulse mode ESP energization*, Journal of Physics: Conference Series, No. 142, 2008, pp. 1-4.
- [2] Albert W. Yuen, *Collector current density and dust collection in Wire-Plate Electrostatic Precipitators*, PhD thesis, School of Materials Science and Engineering, University of New South Wales, 2006.
- [3] Anatol Jaworek, Andrzej Krupa, Tadeusz Czech, *Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review*, Journal of Electrostatics No. 65, 2007, pp. 133–155.
- [4] Dejan M. Petković. *Elektrostatičko polje u radnoj i životnoj sredini-prvi deo (teorija elektrostatičkog polja)*. Rolerprint. Niš. 2005. ISBN: 86-80261-39-4.
- [5] Dragutin M. Veličković et al. *Zbirka rešenih ispitnih zadataka iz elektromagnetike-prvi deo*, Elektronski fakultet, Niš, 2000. ISBN: 86-80124-20-8
- [6] Guann-Yu Liu, Tzu-Ming Chen, Chuen-Jinn Tsai. *A modified Deutsch-Anderson equation for predicting the nanoparticle collection efficiency of electrostatic precipitators*, Aerosol and Air Quality Research, No.12, 2012, pp. 697-706. ISSN: 1680-8584.
- [7] Karl B. Schnelle and C. Brown. *Air Pollution Control Tehnology Handbook. Chapter 24: Electrostatic Precipitator*. CRC Press LLC. 2002.
- [8] Kazutoshi Asano, Chang-rag Choi, Kyoko Yatsuzuka, Hun-chan Lim, *Characteristics of a model two-stage precipitator*, Proceedings of ICESPVII, 1998, Kyongju, Korea.
- [9] M. Feldkamp, M. Dickamp, C. Moser, *CFD simulation of Electrostatic Precipitators and Fabric Filters State of the Art and Applications*, 11th International Conference on Electrostatic Precipitation, pp.141, 150.
- [10] M. C. R. Falaguasta, J. Steffens, E. E. Valdes and J. R. Coury, *Overall collection efficiency of a plate-wire electrostatic precipitator operating on the removal of PM_{2.5}*, Lat. Am. appl. res, Vol. 38, No. 2, Bahia Blanca abr, 2008. ISSN: 0327-0793.
- [11] M. Majid, H. Wiggers, P. Wazel, *Dust Resistivity Measurement and Onset of Back Corona in Electrostatic Precipitators*, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, Vol.5, No.2, 2011, pp. 185-190.

- [12] Navin Tarun Parasram, *Particle motion in electrostatic precipitators*, PhD Thesis, University of London, Imperial College of Science, 2001.
- [13] Sabah O. H. Al-Shujairi, *Comparing Electrostatic Precipitator Performance of Two-Stage with Single-Stage to Remove Dust from Air Stream*, International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 4, Issue 2, 2013, ISSN 2229-5518.
- [14] Thomas Keeler, Robert R. Crynack, *Upgrade Methods and Technology for Electrostatic Precipitators*, Environment & Innovation in Mining and Mineral Technology Conference, Santiago, Chile, 1998.
- [15] Yakov S. Khodorkovsky, Michael R. Beltran. *Fundamental principles of similarity with reference to the collection efficiency of an ESP*, Proceedings, ICESP VII, Sep.20-25, 1998, Kyongju, Korea.
- [1] <http://www.hitachi-pt.com/products/energy/dustcollection/>
- [2] http://www.neundorfer.com/knowledge_base/electrostatic_precipitators.aspx
- [3] http://www.hamonusa.com/hamonresearchcottrell/products/esp_fundamentals
- [4] <https://engineering.dartmouth.edu/~d30345d/courses/engs37/ESPs.pdf>
- [5] <http://www.epa.gov/ttn/caaa/t1/reports/sect5-2.pdf>
- [6] http://aerosol.ees.ufl.edu/aerosol_trans/section06.html
- [7] http://web2.clarkson.edu/projects/crcd/me537/notes/aerosols/aerosols_page5.html
- [8] <http://www.math.nyu.edu/faculty/childres/chpseven.PDF>
- [9] <http://www.see.ed.ac.uk/~johnc/teaching/fluidmechanics4/2003-04/fluids2/node27.html>
- [10] http://web.mit.edu/fluids-modules/www/low_speed_flows/2-5Stokes.pdf
- [11] http://web2.clarkson.edu/projects/fluidflow/courses/me637/1_2Drag.pdf
- [12] <http://www.thermopedia.com>

Indeks imena

<i>Anderson</i>	12, 13, 29, 30
<i>Archimedes</i>	21
<i>Cottrell</i>	12, 39
<i>Coulomb</i>	11, 26
<i>Cunningham</i>	26, 31
<i>Deutsch</i>	13, 29, 30
<i>du Fay</i>	11
<i>Euler</i>	23
<i>Gilbert</i>	11
<i>Gray</i>	11
<i>Grec</i>	50
<i>Guericke</i>	11
<i>Helmholtz</i>	16
<i>Hohlfeld</i>	11
<i>Kenneth</i>	13
<i>Knudsen</i>	26, 31
<i>Laplace</i>	17, 23
<i>Legendre</i>	17
<i>Lodge</i>	12
<i>Matts</i>	13, 29, 30
<i>Maxwell</i>	12
<i>Nahrwold</i>	12
<i>Navier</i>	20, 22, 23, 24
<i>Newton</i>	19, 21, 25
<i>Ohnfeldt</i>	13, 29, 30
<i>Pauthenier</i>	18
<i>Poisson</i>	16
<i>Rayleigh</i>	21
<i>Reynolds</i>	19, 20, 22, 25
<i>Rose</i>	13
<i>Stokes</i>	19, 20, 22, 23, 24, 25
<i>Thalés</i>	11
<i>White</i>	13, 30
<i>Wood</i>	13

Indeks slika

Slika	Opis	Strana
1	Gravitacioni filter - princip rada	8
2	Centrifugalni filter – princip rada	9
3	Elektrostatički filter - princip rada	9
4	Detalji principa rada elektrostatičkog filtera	10
5	Pojava korone	15
6	Lavinski efekat	15
7	Elektrodni sistem	15
8	Raspodela električnog potencijala u elektrodnim sistemima	16
9	Čestica sfernog oblika u eksternom električnom polju	17
10	Sfera u električnom polju – ekvipotencijale	18
11	Strujanje oko sfere	19
12	Od laminarnog do turbulentnog strujanja	20
13	Čestica sfernog oblika u brzinskom polju fluida	21
14	Koeficijent otpora fluida	25
15	Režimi strujanja fluida	26
16	Taloženje čestica i efikasnost prikupljanja	28
17	Električno kolo elektrostatičkog filtera	34
18	Zavisnost specifične otpornosti taloga od temperature i ...	34
19	Relativna površina taložnih elektroda zavisi od otpornosti	34
20	Zavisnost brzine migracije od specifične otpornosti	34
21	Uveličina forografija taloga	36
22	Poređenje dijametara čestica	36
23	Uticaj dijametra čestice na efikasnost	36
24	Pad efikasnosti filtera	36
25	Dizajn elektroda	37
26	Filteri sa toplim i hladnim gasom	38
27	Dvofazni filter	38
28	Ispiranje taložnih elektroda	39
29	Pokretne taložne elektrode sa četkama	40
30	Kombinovani filter gasa	40
31	Aktivne elektrode	41
32	Jonizujuće elektrode obogaćene šiljcima	41
33	Cevaste elektrode	42
34	Pločaste elektrode	42
35	Principijelna klasična šema napajanja elektrostatičkog filtera	42
36	Transformatorsko-ispravljački sistem	43
37	Elektromagnetni čekići na krovu elektrostatičkog filtera	43
38	Otresaći u elektrostatičkim filterima	43
39	Kućište sa levcima	44
40	Elektrostatički filter sa svim sastavnim komponentama.	44
41	Primena elektrostatičkih filtera	45
42	Laboratorijski elektrostatički filter	51

Umesto pogovora

Harbin, Kina, 23. 11. 2013.



'Choking Smog' Shuts Down Huge Chinese City

POLLUTION READING WAY BEYOND DANGEROUS LEVEL

(NEWSER) - The northeastern Chinese city of Harbin, population 11 million, has virtually shut down today thanks to air pollution; the smog is so heavy in places that you can't see beyond about 30 feet. It's this bad: "We were all late for class today because we couldn't... [More »](#)

