

zvodima zahvaljujući u prvom redu svojoj manjoj težini. Na tablici 43 prikazano je procentno učešće profila, plosnatih proizvoda i cijevi u prosječnoj potrošnji čelika po svjetskim proizvodnim regionima u periodu od 1955 do 1957. Iz datih podataka jasno se vidi veliko učešće plosnatih proizvoda u razvijenim zemljama. Isto je tako veliko učešće profila u nerazvijenim regionima. Što se tiče cijevi, njihova potrošnja zavisi od razvijenosti industrije nafte i transporta energetskih medija cijevnim vodovima.

Cijena čelika. Za orijentaciju može se navesti da je 1960 jedna tona ugljičnog čelika u obliku lima 1 mm u SR Njemačkoj stajala 600 DM, a odnos cijena različitih legiranih čelika i cijene ugljičnog čelika St 35 bio je kako pokazuje tabl. 44. U SFRJ cijena čelika Č. 0145 u obliku lima debljine 2 mm iznosila je 1687 Nd/t.

S. Grgić

LIT.: Opća djela, priručnici itd. G. Guzzoni, Gli acciai comuni e speciali, Milano 1952. — K. Daeves (Bearb.), Werkstoffhandbuch Stahl und Eisen, Düsseldorf 1953. — C. Johannsen, Geschichte des Eisens, Düsseldorf 1953. — J. M. Camp, C. B. Francis, The making, shaping and treating of steel, Pittsburgh 1957. — A. Bertocci, E. Mariani, I metalli e l'acciaio, Terni 1960. — Akad. Verein Hütten, Taschenbuch für Eisenhüttenleute, Berlin 1961. — W. Dröge, Der Werkstoff Stahl, Leipzig 1962. — H. Grothe (Herausg.), Lexikon der Hütten- und Metalltechnik (Lueger Lexikon der Technik, Bd. 5), Stuttgart 1963. — I. Class, Stähle, u. d. W. Foerst (Herausg.), Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, Bd. 16, Berlin 1965. — F. Lüth, H. König, The planning of iron and steelworks, New York 1967. — Struktura i termička obrada čelika. D. K. Crafts, J. L. Lamont, Steel and its heat treatment, 3 vol., New York 1948/9. — W. Crafts, J. L. Lamont, Hardenability and steel selection, New York 1949. — A. H. Минкевич, Химико-термическая обработка стали, Москва 1950. — C. E. Enos, W. E. Fontaine, Elements of heat treatment, New York 1953. — И. Н. Корнилов, Железные сплавы, 3 т. Москва-Ленинград 1945/56. — W. Ordman, Einführung in das Härten, München 1956. — F. Wever, A. Rose, W. Peter, W. Straßburg, L. Rademacher, Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, 2 Teile, Düsseldorf 1954/58. — H. Ruhfus, Wärmebehandlung der Eisenwerkstoffe, Düsseldorf 1958. — В. С. Мельник, Основы легирования стали, Москва 1959. — A. Stüdemann, Wärmebehandlung der Stähle, München 1960. — K. Daeves, Zustandsschaubild der unlegierten Stähle, Düsseldorf 1960. — А. П. Гуляев, Термическая обработка стали, Москва 1960. — А. А. Шимков, Справочник термиста, Москва 1961. — М. Л. Бернштейн, А. Г. Рахштадт (ред.), Металловедение и термическая обработка стали, 2 т., справочник, Москва 1961. — D. Horstmann & al., Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff und die Grundlagen der Wärmebehandlung der Eisen-Kohlenstofflegierungen, Düsseldorf 1961. — Н. Ф. Болховитинов, Металловедение и термическая обработка, Москва 1961. — S. Guraly, Термичка обрада čelika, Beograd 1962. — M. A. Grossman, Principles of heat treatment, Cleveland 1962. — М. Е. Блантер, Металловедение и термическая обработка, Москва 1963. — Производна čelika. R. Durrer, Die Metallurgie des Eisens, Berlin 1934. — A. MME, Basic open hearth steel making, New York 1951. — K. Eichel, Das basische Windfrischverfahren, Berlin 1952. — K. G. Trubin, Der Siemens-Martin-Prozess, Berlin 1953. — J. L. Bray, Ferrous process metallurgy, New York 1954. — K. G. Trubin, Metallurgija čelika, Москва 1957. — P. Rayson, The metallurgy of tool steel, New York 1962. — F. Sommer, E. Plöckinger, Elektrostahlerzeugung, Düsseldorf 1964. — E. Plöckinger, H. Straube, Die Edeltahlerzeugung, Berlin - New York 1965. — Прерада čelika. E. Siebel, Die Formgebung im bildsamen Zustande, Düsseldorf 1937. — F. Stanković, Mašine alatke i industrijska proizvodna mašina, Deo II: Obrada metala bez rezanja, Beograd 1950. — H. Hoff, Th. Dahl, Grundlagen des Walzverfahrens, Düsseldorf 1950. — A. Geleji, Walzwerks- und Schmiedemaschinen, Berlin 1954. — П. В. Суслов, Кузнечно-прессовое оборудование, Москва 1956. — A. Zelikov, Lehrbuch des Walzwerksbaus, Berlin 1957. — А. Н. Брюханов, Ковка и объемная штамповка, Москва 1957. — H. Sedlaczek, Walzwerke, Berlin 1958. — В. Chalmers, Physical metallurgy, New York 1959. — А. А. Королев, Механическое оборудование прокатных цехов, Москва 1959. — П. И. Полукин и др., Прокатное производство, Москва 1960. — В. Božić, Fizička metalurgija, Beograd 1960. — R. E. Beynon, Roll and mill layout, Pittsburgh 1960. — G. E. Dieter, Mechanical metallurgy, New York 1961. — М. Čaušević, Valjanje i kalibriranje, Beograd 1962. — Коллектив авторов, Прокатное производство, 2 т., Москва 1962. — R. W. Cahm, Physical metallurgy, New York-London 1965. — В. Жаов, Étude de la plasticité et application aux métaux, Paris 1965. — Ю. М. Алексеев, Вступление к теории обработки металлов давлением, прокатом и резанием, Харьков 1967. — Celici za određene svrhe. C. A. Zapffe, Stainless steels, Cleveland 1949. — A. Michel, Aciers à outils, Paris 1950. — J. H. G. Monuperty, Stainless iron and steel, 2 vol., London 1951. — Автомобильные конструкционные стали, справочник, Москва 1951. — И. М. Лейкин, В. Т. Чернашкин, Низколегированные конструкционные стали, Москва 1952. — В. А. Делле, Легированная конструкционная сталь, Москва 1953. — L. Atchison, W. I. Pumphrey, Engineering steels, London 1953. — E. Houdremont, Handbuch der Sonderstahlkunde, Düsseldorf 1956. — А. С. Займовский, А. С. Чудновская, Магнитные материалы, Москва 1957. — W. Küntzsch, H. Klinger, H. Biegler, Technische Baustähle, Halle 1958. — Stahlschlüssel, Marbach a. N. 1959. — М. Ф. Алексеев, Структура и свойства конструкционных и нержавеющих сталей, Москва 1962. — М. В. Приданцев, К. А. Ланская, Стали для машиностроения, Москва 1959. — F. Rapatz, Die Edeltähle, Berlin 1962. — R. Zoja, Acciai speciali da costruzione, Milano 1962. — W. Küntzsch, H. Kulke, Baustähle der Welt, Leipzig 1964. — Кључ за čelik, Zagreb 1966. — Ф. Ф. Химичиш, Нержавеющие стали 1967. — Экономика. United Nations' Economic Commission for Europe, Long-term trends and problems of the European steel industry, Genève 1959. — American Society for Metals, Metals handbook, Novelty, Ohio 1961. — Časopisi. Кузнечно-штамповочное производство, Москва; Металловедение и термическая обработка металлов, Москва; Сталь, Москва. — Stahl und Eisen, Düsseldorf; Archiv für das Eisenhüttenwesen, Düsseldorf; Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf. — Métaux (Corrosion, Industries), Paris. — Iron and Steel, London; Journal of the Iron and Steel Institute, London; Metal Industry, London. — Jernkontoretts Annaler, Stockholm. — Metallurgia Italiana, Milano. — Steel, Bruxelles. — Blast Furnace and Steel Plant, Pittsburgh; Iron Age, Philadelphia; Steel, Cleveland, Ohio; Steel Facts, New York.

K. Kapetanović M. Juvan H. Numić
M. Čaušević S. Grgić A. Sarajlić

ČIŠĆENJE PLINOVA, u širem smislu, skup svih metoda kojima se u tehnici iz plinova uklanjaju primjese nepoželjne u njihovoj primjeni (nečistoće, onečišćenja), bez obzira na to jesu li te primjese plinovite, tekuće ili čvrste. Za uklanjanje plinovitih primjesa iz plinske smjese upotrebljavaju se operacije obrađene na drugom mjestu u ovoj enciklopediji: adsorpcija, apsorpcija i kemijska reakcija; u ovom članku bit će obrađeno čišćenje plinova u užem smislu, tj. metode uklanjanja čvrstih i tekućih onečišćenja suspendiranih u plinu. Iste se metode upotrebljavaju u tehnici i kad glavna svrha operacije nije da se dobije čist plin, nego da se dobije čvrsta ili tekuća tvar koja je u plinu suspendirana. Primjer za primjenu čišćenja plinova od onečišćenja jesu: čišćenje zraka u proizvodnji fotografskih filmova, farmaceutskih proizvoda, namirnica za život i u lakirnicama; zraka koji ulazi u eksplozione motore; čišćenje sumpor-dioksida u kontaktnom načinu proizvodnje sumporne kiseline iz pirita; čišćenje otpadnog zraka iz pilana i radionica za obradu drva, brušenje kamena ili metala, iz mlinova i prostorija gdje se fino samljeven materijal pakuje u vreće; čišćenje dimnih plinova iz kotlovnica, tvornica cementa itd. Čišćenje otpadnih plinova iz talionica, sušara i sl. ide i za tim da očisti plin i za tim da iz njega dobije vrijedni suspendirani materijal. Odvajanje čvrstog produkta suspendiranog u plinu obavlja se metodama čišćenja plinova pri dobivanju mlijeka, jaja, sapuna itd. u prahu, u proizvodnji cink-oksida i čade, pri pneumatskom transportiranju i sušenju materijala, itd.

Odvajkada se u nekim obrtima i industrijama stvarao prah i dim, i odavna su se u nekim slučajevima poduzimale mjere da se time ne zagađuju radne prostorije i atmosfera okoline — naročito ako je to zahtijevala također ekonomika postupka i ako su na to prisiljavali zakonski propisi. Ali tek u novije vrijeme, s intenzivnim razvojem industrije, s porastom svijesti o štetnosti zagađene atmosfere i sve strožim propisima zakonodavca radi sprečavanja njenog zagađivanja, sa sve većim zahtjevima tehnike i ekonomike postupaka u pogledu čistoće plinova i rekuperiranja u njima suspendiranog praha, tehnika je čišćenja plinova postala posebna važna grana tehnologije, počelo je naučno istraživanje radi objašnjenja teorijskih osnova starih postupaka i razvijanja novih, izrasla je industrija koja izrađuje aparate za čišćenje plinova, s poduzećima često specijaliziranim za izradu i razvoj aparata namijenjenih određenim granama proizvodnje: tvornicama čade, lijevaonicama, tvornicama cementa, talionicama metala, željezarama, mlinovima, kemijskim tvornicama, tvornicama boja, tvornicama plastičnih masa, rudarstvu itd. Uslijed toga su stari postupci u posljednjim godinama znatno dotjerani, ne npr. skruberi i mehanički filtri koakuriraju elektrofiltrima pri uklanjanju submikronskog praha iz plinova, a elektrofiltri se upotrebljavaju također za čišćenje vrućih plinova i plinova pod pritiskom. Među važnija nova dostignuća tehnike čišćenje plinova ide automatska regulacija rada elektrofiltera i gradnja elektrofiltera od prefabriciranih jedinica po modularnom sistemu, što omogućava njihovu primjenu i u manjim postrojenjima.

Veličina čestica praha. Za čišćenje plinova indiferentno je najčešće da li su u njima suspendirane čvrste čestice ili sitne kapljice (u nastavku će se mahom govoriti naprosto o prahu i odparivanju), ali je vrlo važan stupanj disperzije suspendirane tvari. Kako se vidi iz sl. 1, najkrupnije čestice različitih onečišćenja u zraku mogu od najsitnijih biti veće po linearnim dimenzijama i više od hiljadu puta, tj. po volumenu više od milijardu puta; razumljivo je da se za uklanjanje jednih i drugih neće moći upotrijebiti isti aparat, ili i ista metoda, pa je veličina čestica važan parametar pri izboru i konstrukciji aparata za čišćenje plinova. Za karakterizaciju veličine jedne čestice praha upotrebljava se najčešće njezin srednji promjer (d) ili ekvivalentni promjer d_e (tj. promjer kugle istog volumena) u mikronima (mikrometrima, μm), ali kako pri uklanjanju čestica iz plina redovito nije važna samo njihova veličina, nego također specifična masa i oblik, često je uputno veličinu pojedine čestice karakterizirati njenom srednjom brzinom padanja (tonjenja) (w) u mirujućem zraku; ta brzina zavisi od ekvivalentnog promjera d_e , specifične mase ρ_s čestice, od specifične mase ρ_z i dinamičkog viskoziteta zraka η_z prema Stokesovom zakonu:

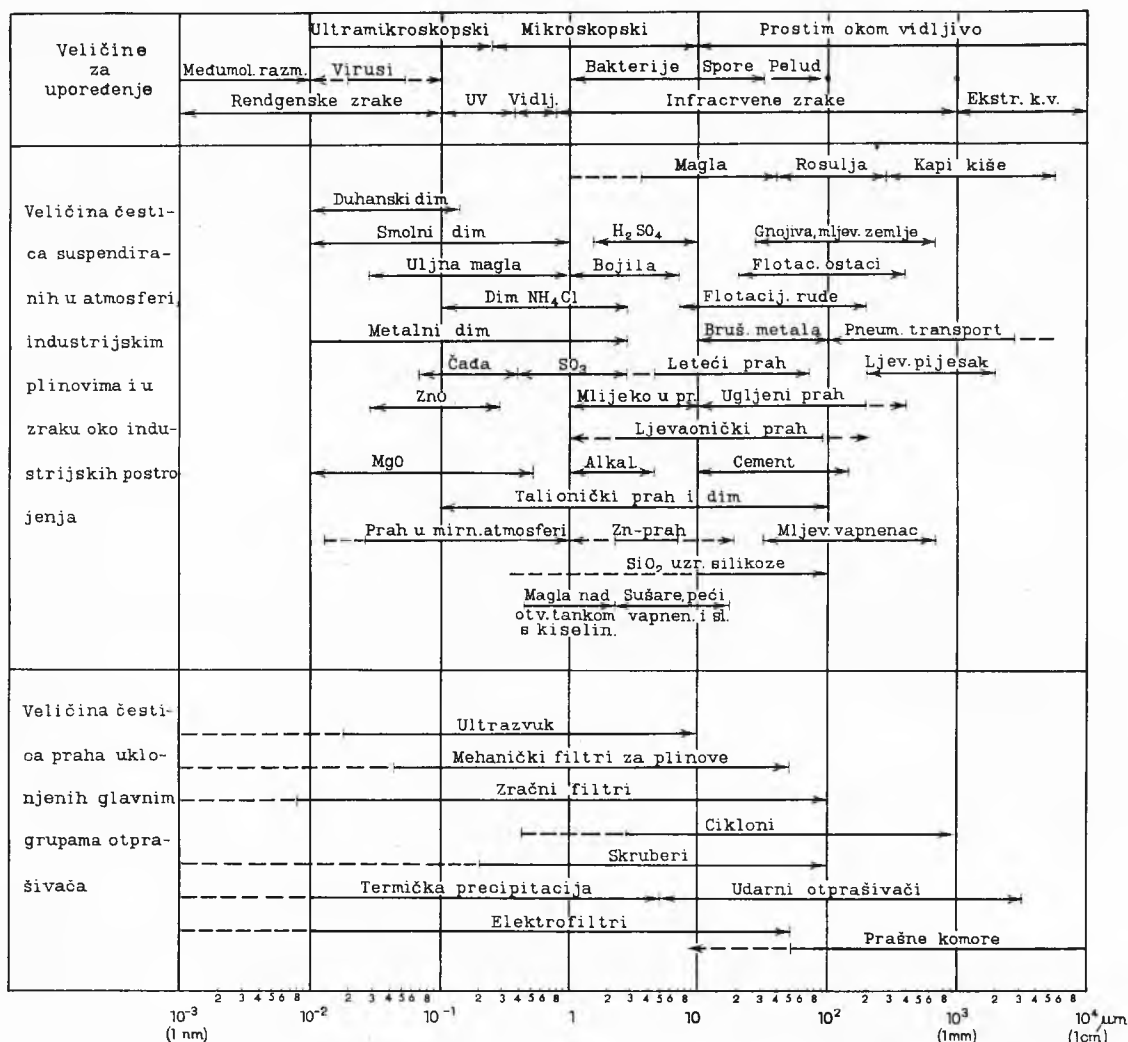
$$w = (\rho_s - \rho_z) \frac{g d_e^2}{18 \eta_z},$$

gdje je g ubrzanje sile teže. Zbog $\rho_z \ll \rho_s$ može se pisati

$$w = \rho_s \cdot g d_e^2 / 18 \eta_z. \quad (1)$$

Iz toga se lako izračuna srednja brzina tonjenja iste čestice u zraku druge temperature i/ili određenog pritiska (drugog viskoziteta), ili u kojem drugom plinu različitog viskoziteta, ako je poznata brzina tonjenja u zraku određene temperature i/ili određenog pritiska (određenog viskoziteta).

U kolektivnu česticu, npr. skupu svih čestica sadržanih u određenom volumenu plina, čestice nisu sve iste veličine. Da bi se stupanj disperznosti u kolektivu čestica nejednake veličine ka-



Sl. 1. Veličina čestica različitih prahova i magla. Područja primjenljivosti aparata za čišćenje plinova

rakterizirao jednim brojem, definiraju se različite srednje veličine čestica. To jest, stvarni kolektiv zamjenjuje se fiktivnim, sastavljenim od čestica jednake veličine d_0 i u takvom broju n_0 da su oba kolektiva u odnosu na određena svojstva ekvivalentna. Označi li se broj čestica koje imaju promjer između d_i i d_{i+1} sa n_i ($i = 1, 2, 3 \dots$), ukupni volumen, ukupna površina, ukupni promjer (sumu promjerâ) i ukupni broj čestica sa V, F, D, N za prvobitni kolektiv a istim oznakama s indeksom 0 za fiktivnu raspodjelu, dobivaju se, uz pretpostavku da čestice imaju oblik kugle, ove jednadžbe za odnose između V_0, F_0, D_0, N_0 i d_0, n_0 , odn. između V, F, D, N i d_i, n_i :

$$\text{Ukupni volumen: } V_0 = n_0 d_0^3 \pi/6; \quad V = (\pi/6) \sum_i n_i d_i^3; \quad (2)$$

$$\text{Ukupna površina: } F_0 = n_0 d_0^2 \pi; \quad F = \pi \sum_i n_i d_i^2; \quad (3)$$

$$\text{Ukupni promjer: } D_0 = n_0 d_0; \quad D = \sum_i n_i d_i; \quad (4)$$

$$\text{Ukupni broj: } N_0 = n_0; \quad N = \sum_i n_i; \quad (5)$$

Lako je uvidjeti da je nemoguće odrediti fiktivni kolektiv čestica koji bi imao i ukupni volumen, i ukupnu površinu, i ukupni promjer, i ukupni broj čestica jednake kao promatrani kolektiv, tj. da je nemoguće istovremeno zadovoljiti sva četiri uvjeta: $V_0 = V, F_0 = F, D_0 = D$ i $N_0 = N$, jer raspoložemo svega dvjema varijablama, n_0 i d_0 . Ako se njihove vrijednosti izračunaju iz jedn. (2) i (3) sa $V_0 = V$ i $F_0 = F$, dobije se *po*

$$d_0 = d_A = \frac{6V}{F} = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2},$$

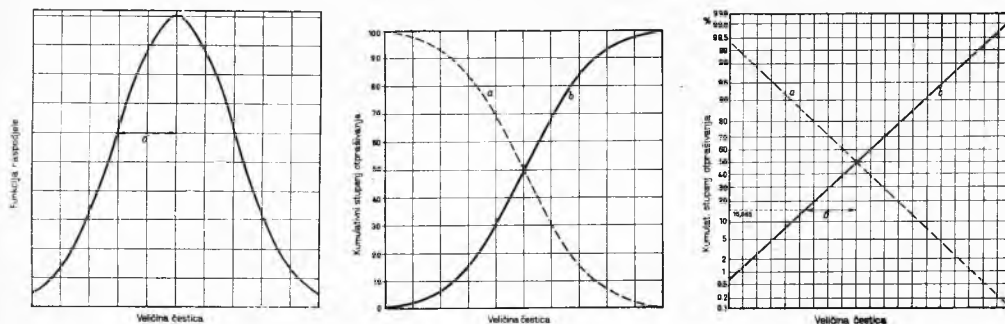
koji imaju sve čestice fiktivnog kolektiva s istom ukupnom površinom i istim ukupnim volumenom kao promatrani kolektiv; broj čestica tog fiktivnog kolektiva nije jednak broju čestica promatranog kolektiva. Ako sve čestice praha imaju istu specifičnu težinu, volumenski srednji promjer istovremeno je i *težinski srednji promjer*, koji se dobije i kad se pojedine frakcije važu namjesto da im se broje čestice. Ako se podijele jedn. (4) i (5), sa $D_0 = D$ i $N_0 = N$, dobije se *aritmetički srednji promjer*:

$$d_0 = \bar{d} = \frac{D}{N} = \frac{\sum_i n_i d_i}{\sum_i n_i}.$$

U ovom slučaju fiktivni kolektiv ima isti broj čestica kao promatrani, promjer čestica fiktivnog kolektiva prosjek je (aritmetička sredina) promjerâ čestica promatranog; ukupna površina i volumen čestica u oba su kolektiva različiti. Već prema prilikama birat će se za izražavanje stepena disperznosti jedan ili drugi srednji promjer (ili koji treći, dobiven drugom kombinacijom dviju od jednadžbi 2-5). Treba, međutim, pri tom držati na umu da su dva kolektiva, i u slučaju da su im čestice zaista kugle, ekvivalentni isključivo u pogledu odnosnih geometrijskih svojstava, a fizički se mogu ponašati i različito. U slučaju da čestice imaju oblik od kugle (i među sobom) različit oblik, treba, da bi se postigla ekvivalentnost i u određenom geometrijskom pogledu, primijeniti odgovarajuće korektore za odstupanje od pretpostavljenog oblika.

Za izbor i konstrukciju otprašivača plinova nije dovoljno znati prosječnu ili srednju veličinu čestica praha, već je potrebno imati i informaciju o njegovom *granulometrijskom sastavu*, tj. raspodjeli

čestica po veličini. Ta se raspodjela može prikazati histogramom ili krivuljom raspodjele (v. Čada, str. 6 i 7) — koji mogu prikazivati bilo udio broja čestica pojedinih frakcija u ukupnom broju bilo težinski udio pojedinih frakcija po veličini u ukupnoj težini — a najčešće se daje u obliku integralne krivulje funkcije raspodjele, koja se naziva *kumulativnom krivuljom raspodjele* ili *karakteristikom* praha. Ordinata svake tačke te krivulje pokazuje kolik udio u ukupnoj težini kolektiva čestica predstavljaju sve čestice s promjerom manjim (sl. 2 a) ili većim (sl. 2 b) od promjera prikazanog pripadnom apscisom. Nacrtna na tzv. vjerojatnosnom papiru, kumulativna krivulja raspodjele prikazana je pravcem ako su čestice kolektiva po veličini normalno raspodijeljene, tj. ako ta krivulja predstavlja integralnu krivulju Gaussove funkcije raspodjele; drukčije raspodijeljeni kolektivi prikazani su obično krivuljama koje se od pravca mnogo ne razlikuju. U nedostatku



Sl. 2. Krivulje raspodjele normalno raspodijeljenog kolektiva čestica. Lijevo Gaussova krivulja, u sredini kumulativna krivulja raspodjele, desno ista u aritmetičko-vjerojatnosnoj anamorfozi

potpunije granulometrijske analize praha, često se s dovoljnom tačnošću može pretpostaviti da su čestice po veličini normalno raspodijeljene i na vjerojatnosnom papiru nacrtati približna karakteristika praha, kao pravac, na osnovu malog broja podataka. Priklon tog pravca to je veći što su šire granice unutar kojih veličine čestica odstupaju od srednje vrijednosti. Mjera za tu veličinu odstupanja je standardna devijacija σ , koja je na Gaussovoj krivulji prikazana razlikom apscisa maksimuma i tačke infleksije. Budući da površina ispod dijela Gaussove krivulje između maksimuma i tačke infleksije predstavlja 34,135% cjelokupne površine ispod krivulje, nagib pravca koji prikazuje kumulativnu raspodjelu normalno raspodijeljenog kolektiva čestica takav je da ordinatama tačaka pravca između 50% i 50 — 34,135 = 15,865% odgovaraju apscise između srednje vrijednosti i vrijednosti σ (v. Statistika).

Zaprašenosť plina, tj. masa čvrstih ili tekućih čestica suspendiranih u jedinici volumena plina, dalji je podatak koji je često

Tablica 1
ZAPRAŠENOST ZRAKA I NEKIH INDUSTRIJSKIH PLINOVA

Zrak, mg/m ³		
na selu	0,02...0,10	u tvornici cementa
u gradskim ulicama	1...3	u brusionici metala i
u industrijskim radionicama	1...100	čistionici liva
Industrijski plinovi, g/m ³		
iz peći za taljenje olova i kositra	3...20	generatorski plin iz kam. ugljena, prah
grotleni plin visoke peći	19...200	katran
iz Siemens-Martin-peći	0,5...15	iz sušnica i kalcinatora gline
iz lučnih elektro-peći	4...10	iz sušnica za vapno, sadru, pijesak
iz peći za prženje pirita	5...15	iz sušnica za kameni ugljen
iz cementnih rotirnih peći	5...20	iz cijevnih sušnica za mrki ugljen
iz sušnica sirovina za cement	20...80	dimni plinovi iz ložišta ugljenim prahom
iz vapnenica i sl. peći	10...25	dimni plinovi iz ložišta s roštanjem
generatorski plin iz mrkog ugljena, prah	5...50	
katran	13...18	

potreban u izboru otprašivača. Izražava se u gramima ili miligramima po kubnom metru, u engleskom sistemu mjera u grainima na kubnu stopu ili 1000 kubnih stopa (1 gr./1000 cu.ft. = 2,288 mg/m³). Tabl. 1 prikazuje u kojim se rasponima kreće zaprašenosť atmosfere i nekih industrijskih plinova.

Zajedničke karakteristike aparata za čišćenje plinova.

Gotovo svi aparati za čišćenje plinova djeluju time što se u njima suspendirane čestice prisiljavaju da se kreću u pravcu različitom od pravca strujanja plina. Uslijed tog kretanja čestice ili dolaze u dodir s nekom čvrstom ili tekućom površinom na kojoj se skupljaju, ili se koncentriraju u jednom dijelu struje plina koji se zajedno s njima odbacuje ili odvodi u sekundarni proces čišćenja. Odvojeno kretanje čestica može se izazvati na različite načine: iskorištavanjem efekata inercije (npr. i centrifugalne sile), djelovanjem vanjskih polja (elektrostatičkog, akustičkog, termičkog, gravitacijskog) i molekularnim gibanjem (difuzijom). Uslijed te identičnosti fizičkih osnova svih glavnih načina odvajanja praha iz plina, one se načelno mogu prikazati istim skupom matematičkih izraza. Analitički se opći izrazi za kretanje čestica zbog zamršenosti djelovanja navedenih sila ne mogu postaviti, ali iz njihove načelne

identičnosti sledi da će se na sve operacije odvajanja praha moći primijeniti na isti način dimenzijska analiza, tj. moći će se provesti korelacija eksperimentalno određenih podataka o učinku aparature sa jednom serijom bezdimenzijskih parametara (v. Dimenzijska analiza). Konkretno se radi o tome da se prikaže korelacija između dva najvažnija podatka za utvrđivanje učinka i ekonomičnosti aparature: stupnja otprašivanja i pada pritiska, s jedne strane, i različitih karakterističnih parametara, kao veličine čestica praha, brzine strujanja plina i gibanja čestica, gustoće plina i čestica praha, viskoziteta i difuzivnosti plina, dimenzija aparature, s druge strane, za geometrijski slične aparate. Bezdimenzijske grupe koje dolaze u obzir kad nema djelovanja vanjskih polja jesu: Reynoldsov broj $Re = d v_p \rho_p / \eta$ (omjer sila inercije i viskoznosti), Schmidov broj $Sc = \eta / \rho_p D_p$ (omjer sila difuzije i viskoznosti), Stokesov broj $Sk = d^2 \rho_p v_p / 18 \eta l$ (jedan modificirani Reynoldsov broj pomnožen s omjerom jedne dimenzije čestice i jedne dimenzije aparata za čišćenje), Eulerov broj $Eu = \Delta p / \rho_p v_p^2$ (omjer sila pritiska i viskoznosti). U tim bezdimenzijskim izrazima d znači promjer čestica, v brzinu, ρ gustoću, η viskozitet, D koeficijent difuzije, l karakterističnu dimenziju aparature, Δp pad pritiska, a indeksi p i $\check{c}$ odnose se na plin odn. čestice praha. Za aparate koji se koriste djelovanjem vanjskih polja — kao električkog i gravitacijskog — u račun ulaze dalje bezdimenzijske grupe koje sadrže njihove parametre.

Stupanj dobrote otprašivača ili **stupanj (potpunosti) otprašivanja** η obično se definira kao odnos mase praha koji ulazi u aparat i mase praha koji izlazi iz aparata s određenom masom plina. Taj bezdimenzijski broj, prema π -teoremu dimenzijske analize, za geometrijski slične aparate funkcija je samo serije bezdimenzijskih brojeva, i to, kad nema djelovanja vanjskih polja, brojeva Re , Sc i Sk ; oblik te funkcije treba odrediti eksperimentalno. Uobičajeni postupak da se ta funkcija izrazi umnoškom potencija bezdimenzijskih brojeva ne može se bez daljeg primijeniti u ovom slučaju jer stupanj otprašivanja ima maksimalnu vrijednost 1. Stoga se tehnička efektivnost aparata, namjesto da se izrazi udjelom mase praha koji je iz plina uklonjen, izražava s pomoću udjela mase praha koji je u plinu ostao, omjera $(1 - \eta)$, i to brojem $E = \ln [1/(1 - \eta)] = -\ln(1 - \eta)$. Taj broj, koji se zove faktor dekontaminacije, očito se mijenja od 0 do ∞ kad se η mijenja od 0 do 1, pa se može prikazati kao umnožak potencija bezdimenzijskih brojeva:

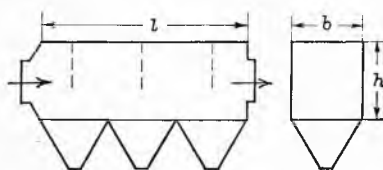
$$E = \ln [1/(1 - \eta)] = -\ln(1 - \eta) = K_E Re^m Sc^n Sk^p, \quad (6)$$
gdje se koeficijent K_E i eksponenti m , n , p moraju odrediti korelacijom s eksperimentalnim podacima.
Pad pritiska načelno se može, analogno, prikazati izrazom:
$$Eu = K_{\Delta p} Re^q Sc^r Sk^s. \quad (7)$$

U narednom poglavlju, kad će biti govora o pojedinim aparatima za čišćenje plinova, pokazat će se kako se te jednadžbe modificiraju za neke od tih aparata i kako se primjenjuju.

Podjela aparata za čišćenje plinova. Aparati za čišćenje plinova običavaju se dijeliti na suhe — u kojima se čestice praha skupljaju na suhim čvrstim ploham ili vlaknima — i na mokre — u kojima se skupljaju na kapima tekućine, površinama tekućih slojeva ili ovlaženim vlaknima. Prema načinu kojim se čestice praha u njima odvajaju od struje plina, aparati se mogu grubo podijeliti na gravitacijske otprašivače, inercijske otprašivače, elektrostatičke precipitatore, ultrazvučne precipitatore, termičke precipitatore i aparate koji djeluju koristeći se istovremeno djelovanjem difuzije, inercijom čestica i njihovim direktnim zadržavanjem sabirnim površinama. Najvažniji gravitacijski otprašivač je *prašna komora*, od inercijskih otprašivača najvažniji je *ciklon*, a osim njega se upotrebljavaju *udarni otprašivači* i *mehanički centrifugalni otprašivači*. Od precipitatora upotrebljavaju se u velikoj mjeri jedino elektrostatički precipitatori, zvani također *elektrofiltri*. U posljednju grupu, aparate s kombiniranim djelovanjem, idu *filtri*, punjene kolone i *skruberi* različitih konstrukcija. U nastavku će se obraditi glavne vrste aparata za čišćenje plinova ne držeći se nijedne od navedenih klasifikacija, koje se i ne mogu uvijek strogo provesti, a između sebe se presijecaju.

Gravitacijski i udarni otprašivači

Prašna komora (sl. 3) je najstariji i najjednostavniji uređaj za otprašivanje plinova. To je u najjednostavnijoj izvedbi prazna horizontalna komora pravokutnog presjeka u kojoj se strujanje plina usporava toliko da komponenta brzine čestica u smjeru sile teže (vertikalna) postaje znatno veća od komponente u smjeru strujanja plina (horizontalne), pa se čestice odvajaju od plina time što padaju (tonu) na dno komore. Ako je w brzina tonjenja čestice određene veličine, v_p brzina strujanja plina u komori i l duljina komore, vertikalni put s koji će prevaliti čestica za vrijeme t ($t = l/v_p$) dok prijeđe horizontalnu udaljenost l bit će $s = wt = w l/v_p$. Sve čestice praha te veličine koje se pri ulazu u komoru nalaze na udaljenosti $x \leq s$ od dna komore dospjet će da padnu na dno, a sve koje se nalaze na većoj udaljenosti $s < x \leq h$ bit će odnesene strujom plina iz komore i izbjeći će taloženju. Čestice



Sl. 3. Prašna komora. Umetanjem pregrada (crtkano) poboljšava se uslijed inercijskog djelovanja stupanj dobrote odvajanja praha, ali se povećava pad pritiska

su u plinu jednolično raspoređene, pa su i čestice uočene veličine jednolično raspoređene po visini komore, stoga je omjer masa ukupno taloženih i prisutnih čestica te veličine, tj. stupanj otprašivanja η_w u odnosu na čestice te veličine (*frakcijski stupanj otprašivanja*) jednak omjeru dužina s i h :

$$\eta_w = \frac{s}{h} = \frac{wl}{v_p h} = \frac{wb}{q}, \quad (\eta \leq 1). \quad (8)$$

Pri tom je

$$q = A v_p = b h v_p \quad (9)$$

protok plina kroz komoru (volumen u jedinici vremena), b širina komore, A presjek komore okomito na smjer strujanja.

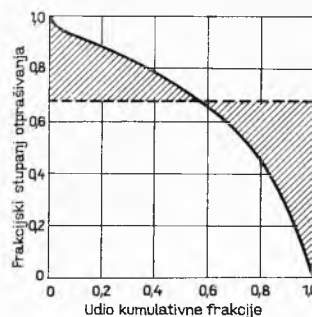
Za najmanje čestice koje se u prašnoj komori upravo još istalože iz plina (*granične čestice* veličine d_g i brzine tonjenja w_g) vrijedi $\eta_w = 1$, te je

$$1 = \frac{w_g b l}{q} \quad (10)$$

Podijeli li se s tom jednadžbom jednadžba (8), dobije se: $\eta_w = w/w_g$, prema jedn. (1), $\eta_w = \frac{d^2}{d_g^2}$.

Krivulja frakcijske dobrote otprašivanja, koja prikazuje zavisnost između η_w i w/w_g odn. d^2/d_g^2 , za prašnu je komoru, dakle (teorijski) pravac; ona je nezavisna od granulometrijskog sastava praha te predstavlja karakteristiku otprašivača.

Ukupni stupanj otprašivanja η može se iz frakcijskih stupnjeva za pojedine veličine čestica izračunati tako da se kolektiv čestica



Sl. 4. Određivanje ukupnog stupnja otprašivanja iz frakcijskih stupanja grafičkom integracijom

podijeli na frakcije sa srednjim veličinama d_i odn. w_i , za svaku frakciju odredi odgovarajući η_{wi} prema jedn. (8), i ti frakcijski stupnjevi otprašivanja nanesu nad težinskim udjelima odgovarajućih frakcija u kolektivu (prema kumulativnoj funkciji težinske raspodjele kolektiva) u pravokutnom koordinatnom sistemu; srednja ordinata dobivene krivulje (za koju su na sl. 4 šrafirane površine jednake)

predstavlja ukupni stupanj otprašivanja aparata za dati prah. Ukupni stupanj otprašivanja ne predstavlja dakle, poput frakcijskog, karakteristiku otprašivača, nego zavisi i od granulometrijskog sastava praha.

Prašna se komora projektira za određenu graničnu česticu, tj. za potpuno uklanjanje svih zrna granične veličine d_g . Iz jedn. (10) s jedn. (1) i (9) slijedi:

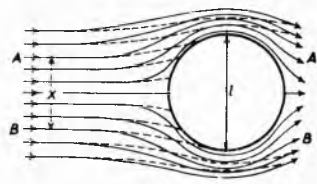
$$l = \frac{18 h v_p \eta_p}{\gamma_p d_g^2} = \frac{18 h q \eta_p}{A \gamma_p d_g^2} = \frac{18 q \eta_p}{b \gamma_p d_g^2}$$

(η je ovdje viskozitet!). S pomoću tih se jednadžbi mogu izračunati dimenzije prašne komore za potpuno uklanjanje čestica granične veličine d_g i većih, za dani protok q plina specifične težine γ_p i viskoznosti η . Presjek A treba birati tako da uz dati q brzina strujanja v_p nije tolika da uzvrtlava istaloženi prah; obično v_p treba da je manji od ~ 3 m/s. Kako se vidi iz jedn. (8), η pri datom q ne zavisi od visine komore h , pa se ta visina može slobodno birati. Nezavisnost dobrote čišćenja od visine komore iskorištava se umećanjem horizontalnih pregrada u visoku komoru, što je ekvivalentno smještanju većeg broja paralelno spojenih komora na istoj tlocrtnoj površini. Nedostatak je takve komore s pregradama što ju je znatno teže čistiti nego praznu i što se pregrade na visokim temperaturama mogu deformirati.

Prašne komore mogu se, prema vrsti plina, temperaturi itd. graditi od najrazličitijih materijala i zbog svoje jednostavne konstrukcije one su jeftine u nabavci, a i u pogonu, budući da je pad pritiska kroz njih malen: on nastaje poglavito zbog mjesnih otpora na ulazu i izlasku plina. Ipak, praktički je korisnost prašne komore ograničena na uklanjanje čestica većih od $40 \mu\text{m}$, jer bi za uklanjanje manjih čestica komora morala biti pretjerano velika.

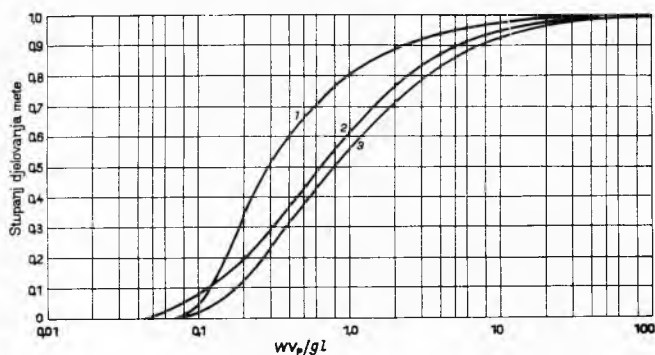
Udarni otprašivači su inercijski uređaji u kojima se struja plina onečišćenog prahom sukobljava s površinama koje su joj poput zapreke stavljen na put (*deflektorima*); struja se plina time skreće s puta, dok čestice praha, zbog inercije, nalete na deflektor i na njemu se skupljaju. Skupljeni prah, prema konsistenciji, sam otpada s deflektora, ili se zbacuje time što se oni u određenim razmacima vremena potresaju, ili se splakuje vodom.

Stupanj dobrote udarnog otprašivača može se svesti na stupanj dobrote pojedinog njegovog elementa na kojemu se prah skuplja, tzv. *stupanj iskorištenja mete* (target efficiency) η_t . To je omjer mase čestica koje se sudaraju sa deflektorom (metom) i mase čestica sadržane u ukupnom volumenu plina koji prilazi zapreci. Tako, npr., za cilindrični deflektor prema sl. 5 samo one čestice koje se pri prilazu meti nalaze između strujnica A i B na kraju će se s njome sudariti i na njoj se zadržati, pa će efektivnost mete biti $\eta_t = x/l$. Može se pokazati dimenzijskom analizom da η_t



Sl. 5. K definiciji stupnja iskorištenja mete

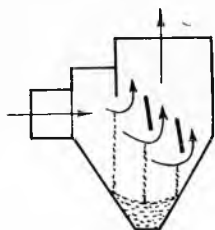
mora biti funkcija Stokesova broja $Sk = d^2 \rho_g v_g / 18 \eta l$, koji se s pomoću jedn. (1) može transformirati u oblik $Sk = w v_p / g l$ (v_p se od v_g razlikuje samo jednim bezdimenzijskim faktorom). Za jednostavne oblike mete oblik se te funkcije može odrediti klasičnom hidrodinamikom, za zamršenije oblike treba ga eksperimentima utvrditi. Sl. 6 prikazuje zavisnost između η_t i $w v_p / g l$ za tri



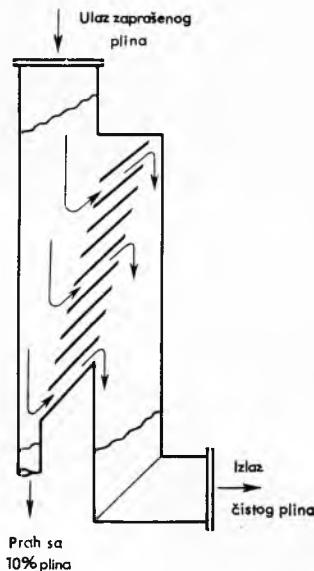
Sl. 6. Zavisnost stupnja iskorištenja nekih meta od bezdimenzijske grupe $w v_p / g l$ 1 Vrpca (l je širina vrpce), 2 kugla, 3 cilindar (l je polumjer kugle odn. presjeka cilindra)

oblika mete i za uvjete pod kojima za kretanje čestica važi Stokesov zakon. Ovakve krivulje, iako važe strogo samo za pojedinačnu metu u beskonačnom plinu i za određene uvjete (oblik mete, priroda strujanja) mogu korisno poslužiti za više ili manje aproksimativno predskazivanje stupnja dobrote udarnih otprašivača. Sl. 7 prikazuje tipični aparat za čišćenje plina po principu udarnog otprašivanja. Takvi se aparati konstruiraju općenito za pad pritiska 0,2...4 cm H₂O i za uklanjanje čestica pretežno većih od 10...20 μ m.

Jedan od najstarijih tipova inercijskog otprašivača je otprašivač sa žaluzijama (sl. 8). U njemu se struja onečišćenog plina sukobljava s elementima



Sl. 7. Primjer udarnog otprašivača



Sl. 8. Otprašivač sa žaluzijama

žaluzija, koji skreću glavnu struju plina, očišćenu od praha, tako da izlazi između njih u okolinu, a manji dio struje (~10%), obogaćen prahom, nastavlja put i izvlači se u sekundarni odjeljivač praha ili izbacuje na nekom mjestu udaljenom od ulaza plina u otprašivač. Otprašivač sa žaluzijama po pravilu nije pogodan za velike koncentracije abrazivnog praha, ali zbog svoje jednostavne i kompaktne konstrukcije u novije je vrijeme našao širu primjenu za čišćenje plinova kojima je onečišćenje malo preveliko za običnu filtraciju. Njime se može postići stupanj otprašivanja iznad 90% čestica od 10 μ m, uz pad pritiska od 5 cm H₂O.

Centrifugalni otprašivači

Ciklon je zbog jednostavne konstrukcije i ekonomičnog pogona najrašireniji aparat za čišćenje plinova od praha i uopće za razdvajanje faza u plinskim disperzijama. U njemu se za odvajanje praha od plina upotrebljava centrifugalna sila, koja nastaje time što se onečišćeni plin tjera kroz ulazni nastavak (obično)

pravokutnog presjeka u cilindričnu komoru na koju se nastavlja konični dio aparata (sl. 9). U ciklonu se time stvara dvostruki vrtlog u kojemu se plin kreće najprije na periferiji aparata spiralno odozgo dolje a onda kroz sredinu komore odozdo gore pa napolje kroz centralnu cijev, uvučenu odozgo u komoru do ispod razine ulaza plina. Pod djelovanjem centrifugalne sile čestice se kreću radialno prema zidu komore i na njemu se nakupljaju; prah se spušta po zidu i oduzima se dolje iz ciklona. Ponekad, npr. kad su suspendirane čestice tekuće ili su ljepljive te same ne bi padale niz zid, zid se pokriva slojem tekućine koja prima čestice praha i splakuje ih do izlaza iz ciklona.

Teorija strujanja plina kroz ciklon. Strujanje plina — kao i kretanje čestica praha — i u najjednostavnijem ciklonu u stvari je zamršeno, te nije u svim pojedinostima ni poznato ili objašnjeno. Ali uz pojednostavnjujuće pretpostavke može se dobiti uvid koristan pri konstrukciji i ocjeni ciklona u različitim njegovim primjenama.

Ako se u prvom približenju zanemari unutrašnje trenje, otpor strujanja uslijed trenja o zidove, mjesnih otpora itd. i aksijalna brzina strujanja plina (tj. činjenica da se plin ne kreće po krivulji u ravnini presjeka nego po prostornoj krivulji) slijedi iz zakona o konstantnosti impulsa vrtnje: $m v_t r = \text{konst.}$, a zbog $m = \text{konst.}$:

$$v_t r = \text{konst.}, \quad (11)$$

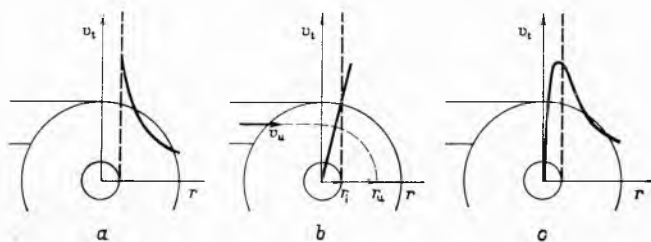
gdje je v_t obodna (tangencijalna) brzina strujanja plina na udaljenosti r od osi ciklona. Sa smanjenjem promjera obodna brzina strujanja dakle naglo raste po hiperbolnom zakonu i u samoj osi vrtnje ($r = 0$) morala bi postati beskonačno velika (sl. 10a). To znači da sa smanjenjem udaljenosti od osi vrtnje pritisak postaje sve manji i u osi vrtnje bi morao iščezavati. Međutim, pritisak ne može postati manji nego što je pritisak na izlazu iz komore, stoga na određenoj udaljenosti r_1 , koja uglavnom odgovara polumjeru izlazne cijevi, obodna brzina plina prestaje rasti, obrazuje se kao neka unutarnja granica vrtloga i onkraj te granice jezgra ili drugi vrtlog, u kojem se plin kreće po drugom zakonu nego u vanjskom vrtlogu. Pokazuje se, naime, da se jezgra okreće kao da ima beskonačno velik viskozitet ili kao da je čvrsto tijelo, tj. s konstantnom kutnom brzinom, odn. obodnom brzinom proporcionalnom udaljenosti od osi vrtnje (sl. 10b). Uslijed viskoznosti plina obodna brzina ne raste tako naglo s opadanjem udaljenosti od osi vrtnje kao što to traži hiperbolni zakon (prema eksperimentalnim istraživanjima za viskozni plin važi zakon $v_t^2 r = \text{konst.}$, tj. v_t raste s recipročnom vrijednosti kvadratnog korijena od r), a trenje o zidove i mjesni otpori također modificiraju zavisnost obodne brzine o radijusu vrtnje, tako da se obodna brzina stvarno mijenja u zavisnosti od radijusa vrtnje u načelu prema krivulji prikazanoj na sl. 10 c.

Ako se sad uzme u obzir i aksijalna komponenta brzine (a radialna se i dalje zanemaruje), vrijedi prema Bernoulliju (za plin bez viskoznosti):

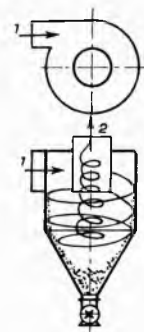
$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v_a^2}{2g} + \frac{v_t^2}{2g} = \text{konst.}, \quad (12)$$

gdje je v_a aksijalna, a v_t obodna (tangencijalna) brzina.

U radialnom smjeru je pad pritiska u diferencijalnom dijelu tekućine, npr. u paralelepipedu dimenzija a , b presjeka okomi-



Sl. 10. Tangencijalna brzina strujanja u presjeku ciklona



Sl. 9. Djelovanje ciklona. 1 Ulaz, 2 izlaz plina

tog na radijalni smjer i debljine dr u radijalnom smjeru, jednak (akceleracija puta masa kroz površinu):

$$dp = -\frac{v_t^2}{r} \cdot \frac{dm}{F} = -\frac{v_t^2}{r} \cdot \frac{a \cdot b \cdot dr}{a \cdot b} \varrho = -\frac{v_t^2}{r} \varrho dr. \quad (13)$$

Prema jednadžbi (11):

$$r v_t = \text{konst.}, \quad r = \text{konst.} \cdot \frac{1}{v_t}, \quad dr = -\text{konst.} \cdot \frac{dv_t}{v_t^2} = -r \frac{dv_t}{v_t},$$

a to uvršteno u (13) daje

$$dp = -\varrho v_t dv_t = -\frac{\gamma}{g} v_t dv_t,$$

što integrirano daje:

$$\frac{p}{\gamma} = \frac{v_t^2}{2g} + \text{konst.}$$

Iz ove posljednje jednadžbe i (12) slijedi:

$$v_a^2/2g = \text{konst.} \quad \text{i} \quad v_a = \text{konst.},$$

tj. aksijalna je brzina u svim tačkama plinske struje jednaka.

Djelovanje radijalne komponente brzine slijedi iz razmatranja datog u nastavku (pri kojem je zanemarena aksijalna komponenta brzine). Prema zakonu kontinuiteta, kroz svaku koaksijalnu cilindarsku plohu u cilindričnoj komori ciklona mora da prolazi ista količina plina $v_r \cdot A = v_r \cdot 2\pi r l = \text{konst.}$, gdje je v_r radijalna komponenta brzine, A površina, l duljina cilindra. Iz toga slijedi: $v_r r = \text{konst.}$, a to podijeljeno s jednadžbom momenta impulsa vrtnje, $v_t r = \text{konst.}$, daje $v_r/v_t = \text{konst.}$ To znači da je kut α između strujnice i radijusvektora u cijelom ciklonu konstantan, tj., ako se zanemaruju unutrašnji i vanjski otpori strujanju, strujnice su logaritamске spirale. U slučaju viskoznih plinova i prisutnosti otpora strujanju, radijalna komponenta brzine zbog zakona kontinuiteta ostaje jednaka, a tangencijalna stremlje više ili manje vrijednosti $v_t \rightarrow \text{konst.}$, tj. spirala postaje strmija, arhimedska.

Sve u svemu može se zaključiti da čestice plina prolaze odozgo dolje kroz ciklon po prostornoj krivulji kakvu opisuje tačka koja se kreće sve većom brzinom s periferije prema centru po spirali, u ravnini koja se istovremeno jednoličnom brzinom kreće odozgo dolje u pravcu okomitom na tu ravninu.

Pad pritiska u ciklonu. Padu sile pritiska u radijalnom smjeru mora držati ravnotežu centrifugalna sila, tj. uvjet ravnoteže sila u smjeru radijusa r glasi:

$$\varrho \frac{v_t^2}{r} = \frac{dp}{dr}.$$

Označi li se sa v_u brzina struje plina na ulazu u ciklon, a sa r_u udaljenost ulaza od osi ciklona (v. sl. 9), vrijedi: $v_u r_u = v_t r$, a iz toga proizlazi:

$$v_t = \frac{v_u r_u}{r} \quad \text{i} \quad \varrho \frac{v_u^2 r_u^2}{r^3} = \frac{dp}{dr} \quad \text{ili} \quad dp = \varrho \frac{v_u^2 r_u^2}{r^3} dr,$$

iz čega integriranjem slijedi pritisak za proizvoljni radijus r , ako na izlaznom radijusu r_1 vlada pritisak p_1 :

$$p = p_1 - \frac{\varrho v_u^2 r_u^2}{2} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r^2} \right).$$

Postavi li se $r = r_u$, slijedi iz toga pritisak na ulazu koji je potreban da bi se tamo održala brzina v_u . Pad pritiska između ulaza i izlaza je onda:

$$\Delta p = p_u - p_1 = \frac{\varrho v_u^2}{2} \left[\left(\frac{r_1}{r_u} \right)^2 - 1 \right].$$

Dakle i kad nema unutarnjeg i vanjskog trenja, odn. otpora strujanju, za pogon ciklona je potreban izvjestan pad pritiska. Ekvivalent utrošenog rada nalazi se u energiji rotacije plina koji izlazi. Činjeni su pokusi da se ta energija bar većim dijelom reupirira, ali kod većine ciklona se ona danas uglavnom gubi. Teorijski se pad pritiska povećava uslijed viskoznosti plina i vanjskih otpora strujanju. Razvite su metode s pomoću kojih se, uz izvjesne pojednostavnjujuće pretpostavke, može približno izračunati faktični ukupni pad pritiska iz dimenzija ciklona i protoka određenog plina.

Prema jednoj tako dobivenoj formuli pad pritiska u ciklonu dat je ovom jednadžbom:

$$\Delta p = \varrho \frac{v_u}{2} \left[16 \frac{A}{d^2} - 4 \frac{A}{\pi d^2} \left(1 + \lambda \frac{L_1}{d_1} \right) - 1 \right],$$

gdje je A površina presjeka ulazne cijevi ciklona ($v_u A$ je protok plina), d i L promjer i duljina odvodne cijevi, λ koeficijent otpora u odvodnoj cijevi.

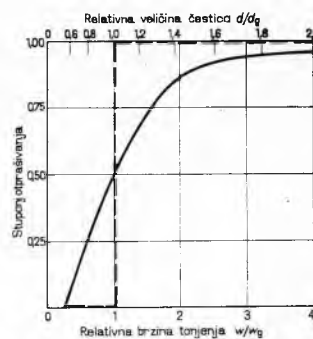
Kretanje čestica praha i stupanj otprašivanja u ciklonu.

Na česticu praha u ciklonu djeluju centrifugalna sila $F_c = G v_t^2/g r$, koja česticu tjera radijalno prema zidu ciklona, i otpor zraka koji se tom radijalnom kretanju čestice suprotstavlja. Pretpostavi li se važenje Stokesova zakona, taj otpor iznosi $F_{otp} = G v_r/w$ (G je težina čestice, v_t obodna brzina, v_r radijalna brzina, r udaljenost čestice od osi vrtnje, w srednja brzina tonjenja čestice u mirnom plinu, g ubrzanje sile teže; v. i jedn. 1). Može se zamisliti da se podjela čestica na one koje putuju prema zidu ciklona i one koje bivaju odnesene iz ciklona zbiva na granici unutrašnjeg i vanjskog vrtloga, tj. na cilindru polumjera r_1 , jednakog polumjeru izlazne cijevi ciklona, i visine h , jednake visini operativnog dijela ciklona. Na udaljenosti r_1 od osi vrtnje obodna je brzina w_{r1} , a radijalna brzina plina jednaka je $w_{r1} = V/2 r_1 \pi h$ (gdje je V protok plina). Čestica na toj udaljenosti od osi vrtnje (na granici vrtloga) za koju je centrifugalna sila jednaka sili otpora zraka neće biti ni odnesena na zid ciklona ni strujom plina uklonjena iz ciklona, nego će se zadržati na plaštu spomenutog cilindra (praktički: polovica čestica frakcije kojoj pripada ta čestica zadržat će se u ciklonu a polovica će izbjeći uklanjanju iz plina). Veličina te granične čestice (za koju je, dakle, frakcijski stupanj odvajanja praha 50%) izračunava se iz gornjih jednadžbi, sa $F_c = F_{otp}$ izražena kao brzina tonjenja:

$$w_g = \frac{v_r r_1 g}{v_{t1}} = \frac{V g}{2 \pi h v_{t1}^2}. \quad (14)$$

Izražena pomoću promjera, veličina je granične čestice d_g , zbog jedn. (1), proporcionalna drugom korijenu od w_g : $w_g = k d_g^2$. Sve čestice koje su veće od d_g prema idealnim pretpostavkama uklanjale bi se iz plina (tj. za njih bi bio frakcijski stupanj otprašivanja $\eta_w = 100\%$), sve koje su manje, izbjegle bi odvajanju (tj.

za njih bi frakcijski stupanj potpunosti odvajanja praha η_w bio jednak nuli). Teorijska krivulja frakcijske dobrote otprašivanja imala bi dakle u dijagramu koji prikazuje zavisnost frakcijske dobrote otprašivanja od veličine čestica [izražene kao omjer $w/w_g = (d/d_g)^2$] oblik crtkane linije u sl. 11. Praktično će krivulja frakcijske dobrote otprašivanja imati oblik izvučene linije, tj. neke će čestice manje od d_g biti zadržane u ciklonu, a neke veće od d_g bit će odnesene iz ciklona, zbog toga što nisu ispunjene sve pretpostavke idealnog modela, a naročito,



Sl. 11. Krivulja frakcijske dobrote otprašivanja ciklona

obodna brzina plina i čestica na plohi razdvajanja čestica po veličini nije konstantna. Ako je krivulja frakcijske dobrote otprašivanja određena eksperimentalno ili polueksperimentalno, iz nje se može odrediti w_g odn. d_g kao veličina čestice za koju je frakcijski stupanj otprašivanja jednak 0,5, a ukupni se stupanj otprašivanja može iz nje i funkcije raspodjele čestica praha po veličini odrediti kako je prikazano na str. 118.

Pri primjeni dimenzijske analize, tj. jednadžbe (6), može se zanemariti Schmidov broj, budući da sile difuzije (Brownovo gibanje) u radu ciklona nema udjela. Jedn. (6) svodi se dakle na jednadžbu:

$$E = K_E \text{Sk}^m \text{Re}^n.$$

Stokesov broj Sk može se transformirati ovako:

$$\text{Sk} = \frac{1}{18} \cdot \left(\frac{d^2 \varrho_c}{l^2 \varrho_p} \right) \cdot \text{Re},$$

što, uvršteno u prethodnu jednadžbu, daje (sa $K_E' = K_E/18$):

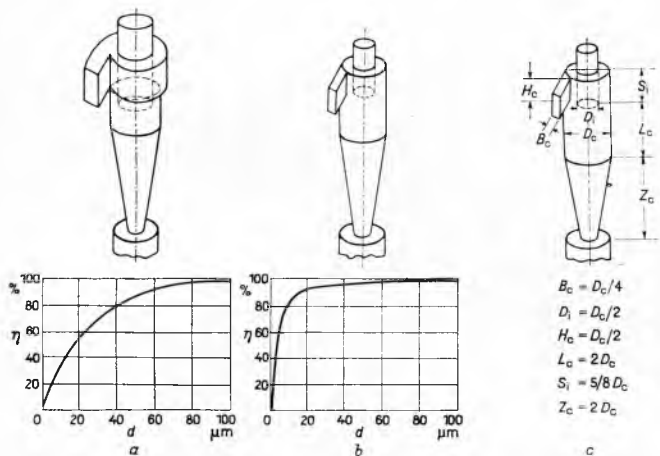
$$E = K_E' \left(\frac{d^2 \rho_c}{l^2 \rho_p} \right)^m \left(\frac{v l}{\eta} \right)^{m+n} \quad (15)$$

Konstantu K_E' i eksponente m i n treba za svaku konstrukciju ciklona posebno odrediti eksperimentalno; m je uvijek pozitivan, n obično negativan i često po apsolutnoj vrijednosti blizak m , tj. Re^{m+n} je često blizak jedinici. U takvom slučaju prethodna jednadžba se svodi na ovu:

$$E \approx K_E' \left(\frac{d^2 \rho_c}{l^2 \rho_p} \right)^m, \quad (16)$$

tj. stupanj otprašivanja plina za određeni aparat, plin i prah zavisan je samo od veličine čestica i bit će prikazan krivuljom dobrote otprašivanja analognom izvučenoj krivulji u sl. 11. Ta se krivulja u pogodnoj anamorfози može prikazati kao pravac (sl. 12). Jednadžbe (15) i (16), odn. grafički prikazi poput sl. 12, mogu se upotrijebiti da se podaci za stupanj otprašivanja dati od proizvođača aparata za određeni aparat, prah i plin preračunaju na drugi prah, drugi plin i drugi, ali geometrijski slični, aparat. Spomenute jednadžbe i grafički vrijede ne samo za ciklone, nego i za druge inercijske otprašivače.

Konstrukcija ciklona. Cikloni se prave u širokom rasponu dimenzija (od desetak centimetara do nekoliko metara promjera) i vrlo različitim izvedbama, prema prirodi i veličini protoka plina, prema vrsti praha i veličini njegovih čestica, prema potrebnom stupnju otprašivanja i raspoloživom padu pritiska. Optimalna konstrukcija u svakom pojedinom slučaju predstavlja kompromis između rješenja koja daju najbolji stupanj odvajanja praha i najmanje investicijske i pogonske troškove (najveći protok plina i

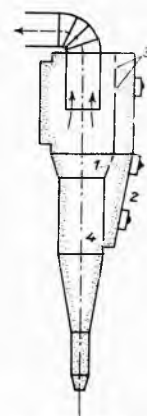


Sl. 13. Izvedbe ciklona. a) Ciklon velikog kapaciteta, b) ciklon visokog stupnja otprašivanja, c) dimenzije standardnog ciklona

najmanji pad pritiska). Npr. sl. 13 prikazuje ciklone oblika koji je najobičajniji u procesnim i nekim drugim industrijama; sl. 13 c daje standardne odnose dimenzija, sl. 13 a i b dva izvedena ciklona s jednakim padom pritiska; jedan, s dimenzijama sličnim standardnima, ima visoki stupanj odvajanja praha (kako pokazuje krivulja frakcijske dobrote otprašivanja ispod slike), a drugi veliki protok uz slabiji stupanj otprašivanja. Da bi se smanjili gubici ulaznog momenta i održao zadani pad pritiska, ciklon sl. 13 a ima uvod plina pomoću pužnog difuzora. Sl. 14 prikazuje veliki ciklon za grubo

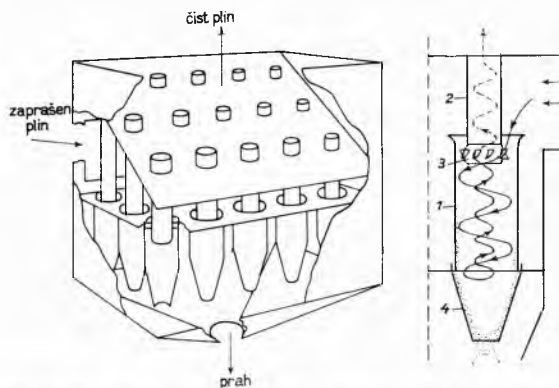
Sl. 14. Ciklon za čišćenje grotlenog plina visoke peći

suho čišćenje grotlenog plina visoke peći; radi smanjenja pada pritiska dovod je plina izveden u obliku spirale, a skretanje očišćenog plina u centralnu odvodnu cijev olakšavaju provodni limovi. Sl. 15 prikazuje ciklon po van Tongeren. Taj ciklon ima na gornjem dijelu plašta procjepe 1 i 3 kroz koje centrifugalna sila baca sitnije čestice praha u prašni kanal 2; kroz njega prah pada u donji dio ciklona i procjepom 4 se ubacuje u sabirni konus. Činjenica da je centrifugalna sila, a time i stupanj odvajanja praha, to veća što je promjer ciklona manji, iskorištava se u *multiklonima* (multiciklonima, sl. 16), u kojima je (radi postizanja potrebnog protoka) paralelno spojen veći broj ciklona malog promjera (15...25 cm). Kad je promjer ciklona tako malen, pri prostom tangencijalnom uvodu plina nastali bi vrlo veliki gubici momenta, stoga se u njima spiralno gibanje plina postiže ugrađenim privodnim uređajem s lopaticama.



Sl. 15. Ciklon po van Tongeren

U ciklone spadaju i centrifugalni otprašivači u kojima struja plina ne mijenja smjer (sl. 17). Takvi uređaji zauzimaju malo mjesta i imaju mali pad pritiska, ali (poput otprašivača sa žalu-



Sl. 16. Multiklon. Lijevo: pogled s djelomično uklonjenim zidovima, desno: presjek kroz jedan od malih ciklona

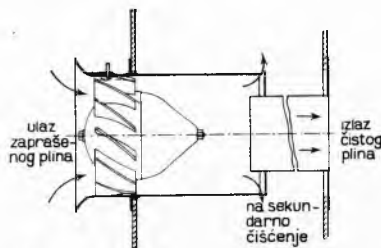
zijama) ne odvajaju prah u potpunosti, nego iz njih izlazi struja plina koja sadrži prah u većoj koncentraciji i koja se vodi u sekundarne otprašivače, redovito obične ciklone.

Mehanički centrifugalni otprašivači proizvode centrifugalnu silu za odvajanje praha jednim rotorom s lopaticama. U stvari, to je centrifugalni ventilator koji ima na kućištu otvor za odvođenje jednog dijela plina s prahom što su ga lopatice bacile na zid kućišta. Glavna je prednost takvih uređaja njihova kompaktnost i lakoća kojom se ugrađuju. Stupanj odvajanja praha valjda je jednak kao za ciklon s istim padom pritiska, jer ti uređaji razvijaju, istina, veću centrifugalnu silu nego ciklon, ali su putovi odvajanja manji i veća je turbulencija, pa se jedan dio taloženog praha ponovo podiže.

R. Podhorsky

Elektrostatički precipitatori (elektrofiltri)

Elektrofiltri ili elektrostatički precipitatori su uređaji u kojima se čestice praha ili sitne kapljice uklanjaju iz disperzije u plinu time što se električki nabiju djelovanjem jedne elektrode (ionizacijske) uslijed čega se onda, privučene drugom elektrodom (kolektorskom), na njoj talože.



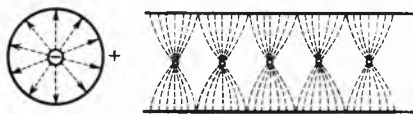
Sl. 17. Ciklon s jednosmjernim strujanjem plina

Talijan Beccaria prvi je (1771) saopćio pojave koje je promatrao pri električnom izbijanju kroz zadimljenu atmosferu. Nijemac Hohlfeld je 1824 opazio da se dim sadržan u boci izgubi kad se u nj zaroni električki nabita žica, a na boci se stvara naslaga čađe. Taj su pokus nezavisno od njega izvršili Francuz Guitard 1850 i Englez Lodge 1880, ali tek su počevši od 1904 te pojave pobliže ispitali Walker i Lodge u Velikoj Britaniji, Möller u Njemačkoj i Lewis, Davidson, Marscher, Dion, Blake, a naročito Cottrell, Schmidt i dr. u USA. J. F. Cottrell je 1906 konstruirao prve uređaje koji su u praksi dali zadovoljavajuće rezultate. G. 1951 H. J. White je proučavao i detaljnije rasvijetlio električne događaje pri elektrofiltraciji.

Danas se na svijetu nalazi u pogonu vrlo velik broj elektrostatičkih precipitatora. U USA od ukupnog njihova broja otpada na termoelektrane 60%, na industriju čelika 10%, na ostalu metaluršku industriju 7%, na industriju cementa 10% i na kemijsku i druge industrije 10%.

Teorijski osnovi elektrofiltracije. Nabijanje čestica praha pri elektrofiltraciji vrši se tako da se plin u kome su one suspendirane prilikom prolaza između obje elektrode umjetno ionizira, pa nastali ioni plina električki nabiju čestice. Za ionizaciju plina upotrebljava se pojava korone jer je taj postupak ionizacije jednostavan i jeftin.

Korona (v. *Električna izbijanja u plinovima*) predstavlja kombinaciju između tamnog i tinjajućeg izbijanja. Njezine su manifestacije emisija svjetla u neposrednoj blizini elektrode i siktav zvuk. Pojavljuje se kad gradijent jačine električnog polja oko elektrode ili voda prekorači određenu graničnu vrijednost, a njeno stvaranje zavisi od visine napona, od oblika i rastojanja elektroda, od gustoće, vlage, provodljivosti, pritiska i temperature plina. Pojava korone to je jača što je polumjer zakrivljenja površine izbijanja manji, tj. što su električne silnice zbijenije; stoga se ionizacijskoj elektrodi daje što manji presjek i ona se pravi ponekad od pogodno profilirane žice s ostrim bridovima, npr. višekutnog ili zvjezdolikog presjeka, ili se upotrebljava bodljikava žica. Kolektorska elektroda, budući da je na njoj korona nepoželjna, izrađuje se, naprotiv, što veća i u obliku ploče ili cijevi. Da bi se korona pojavila samo na jednoj elektrodi, polje mora biti heterogeno, tj. imati veću jakost u okolini ionizacijske nego u okolini kolektorske elektrode (sl. 18). Korona se može pojaviti na elektrodi priključenoj bilo na pozitivan visoki napon bilo na negativan.



Sl. 18. Električno polje u elektrostatičkom precipitatoru. a Kolektorska elektroda u obliku cijevi, b kolektorska elektroda u obliku ploče. Ionizacijska elektroda ima u oba slučaja oblik žice

Negativna je korona stabilnija od pozitivne te napon narinut elektrodi može biti viši kad je ona negativna, ali se onda stvara više ozona i oksida dušika nego kad je pozitivna; stoga se elektrode za ionizaciju u elektrofiltrima redovito priključuju na negativan napon, a na pozitivan samo u filtrima za zrak kad je prisutnost ozona i oksida dušika nepoželjna.

Zbog pojave korone plin koji struji između obje elektrode ionizira se; ioni koji se pri tom stvaraju kreću se pod utjecajem jakog električnog polja prema elektrodama, pozitivni ioni prema negativnoj a negativni prema pozitivnoj elektrodi, i to brzinom od 40–50 m/s. Ioni koji tom brzinom udaraju na ionizacijsku elektrodu izbijaju iz njezine površine elektrone, koji, ubrzani električnim poljem, udaraju u molekule plina i time izazivaju njegovu ionizaciju; ioni plina koji lete prema kolektorskoj elektrodi na svom putu nabijaju čestice praha bilo sudarima kojima se prenosi električni naboj bilo prijanjanjem iona uz čestice. Ovo potonje prevladava pri nabijanju najsitnijih čestica tzv. ionskom difuzijom. Nabijene čestice putuju prema kolektorskoj elektrodi zajedno s ionima, čije ih strujanje i mehanički povlači sa sobom (električni vjetar).

Najveća moguća količina elektriciteta Q koja se može skupiti na sitnoj kuglastoj čestici praha prilikom prolaza kroz elektrofiltr pod normalnim uslovima, tj. broj na njoj skupljenih elementarnih naboja ne , iznosi

$$Q = ne = 3 E_k k d^2/4,$$

gdje E_k znači jakost električnog polja u blizini čestice, d promjer čestice, a k faktor manji od 1 koji zavisi od gustoće iona, brzine kretanja iona i vremena za koje je čestica izložena nabijanju. Sila F kojom takvu česticu privlači kolektorska elektroda iznosi prema tome

$$F = E_k Q = E_k n e = 3 E_k E_c k d^2/4,$$

gdje E_k znači jakost električnog polja u blizini kolektorske elektrode. Kretanju čestice prema kolektorskoj elektrodi suprotstavlja se optor plina, koji iznosi prema Stokesovom zakonu:

$$F_{otp} = 3 \pi \eta d w,$$

gdje je η viskozitet plina, d promjer čestice (kuglaste), w brzina kretanja čestice. Kad čestica, ubrzavana silom F , postigne toliku brzinu da otpor zraka postane jednak toj sili (što se zbiva nakon vrlo kratkog vremena), čestica se dalje kreće jednolično brzinom koja se izračunava iz $F_{otp} = F$, tj. $3 \pi \eta d w = k E_k E_c d^2/4$. Ta je brzina taloženja prema tome:

$$w = \frac{k E_k E_c d}{4 \pi \eta}. \quad (17)$$

Jakosti polja E_k i E_c zavise od narinutog napona i udaljenosti elektroda. E_c je teško ocijeniti; dovoljno je tačno uzeti da je $E_c = E_k$. Stokesov zakon važi samo za čestice veličine iznad $1 \mu\text{m}$. Zbog vraćanja taloženih čestica u struju plina, nejednolike raspodjele plina i dr., mjerenjem određene neto-brzine taloženja čestica obično su znatno manje od teorijskih; kreću se između 1,5 i 30 cm/s. Za čestice manje od $1 \mu\text{m}$ nađeno je da je brzina taloženja uglavnom nezavisna od veličine čestica. Najmanje čestice obično se nose na taložnu elektrodu djelovanjem električnog vjetra, kojemu je brzina reda veličine 1 cm/s.

Stupanj otprašivanja u elektrofiltru, izražen pomoću pokazatelja E (v. str. 117) jednak je umnošku prosječne brzine taloženja i omjera između efektivne površine A kolektorske elektrode i protoka plina kroz elektrofiltr (V):

$$E = -\ln(1 - \eta) = w \frac{A}{V} \text{ ili } \eta = 1 - e^{-wA/V}, \quad (18)$$

pri čemu η znači stupanj potpunosti odvajanja praha. Budući da je brzina taloženja w prema jedn. (17) općenito zavisna od veličine čestice, stupanj otprašivanja dobiven prema jedn. (18) predstavlja frakcijski stupanj otprašivanja za čestice određene veličine (v. str. 118). Međutim, pokazalo se da se ta jednadžba — uslijed kompenzirajućeg djelovanja spomenutih utjecaja koji uzrokuju da je praktična brzina taloženja različita od teorijske — može praktički upotrebljavati za izračunavanje ukupnog stupnja otprašivanja ako se za w uvrsti eksperimentalno određena prosječna brzina taloženja.

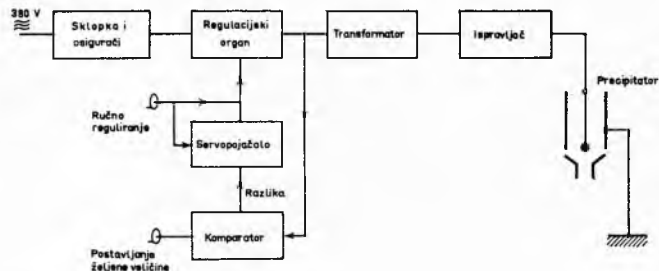
Elektrofiltri se obično projektiraju za određeni stupanj odvajanja praha (obično između 90,0 i 99,0%), pa jedn. (18) služi za dimenzioniranje aparata, tj. određivanje površine taloženja za određeni protok plina.

Izvedba elektrofiltera. Elektrofilterarski uređaji za prečišćavanje plinova sastoje se načelno od izvora istosmjerne električne struje visokog napona, ionizacijske ćelije i kolektora praha. Prema konstrukciji mogu se takvi uređaji podijeliti na jednostepene i dvostepene uređaje. Kod jednostepenog elektrofiltera, tzv. Cottrellovog precipitatora, ionizacijska ćelija i kolektor praha spojeni su u jednu zajedničku jedinku; kod dvostepenih uređaja plin se ionizira u jednom, a čestice talože u drugom stepenu. Dok se jednostepeni uređaji upotrebljavaju pretežno u industriji, dvostepeni se uređaji primjenjuju uglavnom za čišćenje zraka u prostorijama, i to obično u vezi s klimatizacijskim uređajima. Ponekad, kad se traži velik stepen čistoće plina, primjenjuju se i dva elektrofiltera u seriji, tj. prečišćeni plin iz prvog uređaja prolazi još i kroz drugi.

Elektrofiltri su najšire primjenljivi aparati za čišćenje plinova. Danas se grade elektrofiltri za protoke plina od 1 do 10 000 m³/min, s koncentracijama praha od 0,0002 do 200 g/m³. Prečišćavaju se njima plinovi koji imaju temperaturu do 650 °C i pritisak do 30 kPa/cm². Čestice veličine od 0,1 do 200 μm odvajaju se stupnjem potpunosti do 99,9%. Pad pritiska kroz aparat je malen: 5–25 mm Hg, za čišćenje 1000 m³ plina na minutu potrebna je snaga od 1–20 kW.

Jednostepeni elektrofiltri sastoje se od izvora električne struje visokog napona s regulacijom i od precipitatora u kome se vrši i ionizacija plina i kolekcija praha (sl. 19).

Izvor istosmjernne struje visokog napona sastoji se od kutije sa sklopka i osigurača, upravljačke kutije za ručno, ili daljinsko, ili automatsko posluživanje, regulacijskog elementa, visokonaponskog transformatora i ispravljača koji izmjeničnu struju dobivenu iz transformatora pretvara u istosmjernu struju visokog napona.



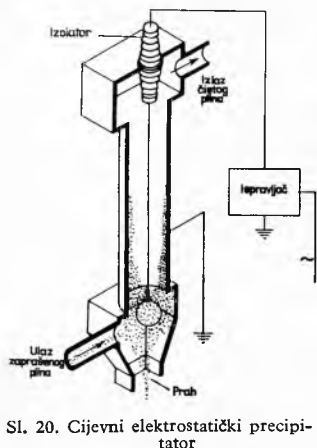
Sl. 19. Shema regulacije napona na ionizacijskoj elektrodi jednostepenog elektrofiltra

Kao ispravljači za ovu svrhu služe: mehanički ispravljači sa segmentima i četkicama koje okreće sinhroni motor, ispravljači sa elektronkama ili poluprovodnički silicijumski ispravljači (v. *Ispravljanje i pretvaranje električne struje*). Jačina ispravljene struje je kod ovih uređaja malena: iznosi 250...1000 mA, naponi se kreću od 25 do 125 kV, ali obično iznose 35...45 kV.

Radi postizanja što boljeg pročišćavanja, kod cijevnih i poluprovodničkih ispravljača primjenjuje se često i automatska regulacija procesa. Regulacija struje vrši se s pomoću nekog regulacijskog organa kao što su prigušnice s predmagnetiziranjem ili drugim elektronskim regulatorima, npr. tiratronima. Shemu takva regulacijskog sistema prikazuje slika 19. U takvom uređaju za regulaciju snage upoređuju se mjerenjem struje i napona stvarno dobivene vrijednosti s unaprijed postavljenim podacima. Ukoliko stvarni podaci odstupaju od postavljenih, javljaju se naponi greške koji se vode u servopojalo. Ono djeluje na regulacijski organ, koji prema tome smanjuje ili povećava struju. Uvijek je pored automatskog upravljanja predviđeno i ručno, kojim se može premostiti automatski uređaj. Uređaj za automatsku regulaciju snage održava ionizaciju plina u takvim granicama da, uz primjenu najveće snage i pri postizanju najvećeg efekta uređaja, još ne dolazi do preskakivanja iskara između elektroda. Regulacija djeluje dovoljno brzo da spriječi napone koji bi mogli izazvati iskrenje.

Grade se dvije vrste jednostepenih precipitatora: cijevni i pločasti.

Element *cijevnog precipitatora* je uzemljena kolektorska elektroda u obliku vertikalne cijevi, u čijoj je osi izolirano razapeta (obično pomoću utega) ionizacijska elektroda u obliku žice ili šipke (sl. 20). Budući da udaljenost između elektroda smije iznositi najviše 10...20 cm pa je time promjer cijevi ograničen, potreban se kapacitet postiže paralelnim spajanjem potrebnog broja cijevistih elemenata, koji su često smješteni u zajedničko kućište. Dužina cijevi iznosi 2...5 m. Radi uštede prostora prave se cijevi ponekad kva-



Sl. 20. Cijevni elektrostatički precipitator



Sl. 21. Grupa cijevnih precipitatora



Sl. 22. Pločasti elektrostatički precipitator

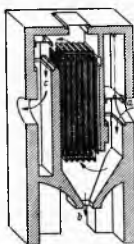
dratnog ili šestorokutnog presjeka (sl. 21). Ionizacijske elektrode *pločastih precipitatora* jednake su kao u cijevnim ali se nalaze između paralelno smještenih (redovito sa stropa komore obješenih) uzemljenih pravokutnih kolektorskih elektroda (sl. 22) u obliku ravnih ili valovitih ploča, šipkastih zastora, kutija s rupicama ili prorzima itd. Postoje mnoge izvedbe kojima konstruktori nastoje postići da se prah određene vrste najbrže i najpotpunije ukloni s kolektorske elektrode. Dimenzije ploča su obično 1...2 x 3...6 m. Veći broj ploča skupljen je obično u grupe sa zajedničkim kućištem. Plin može strujati među pločama u horizontalnom ili u vertikalnom smjeru; danas se grade pretežno elektrofiltri s horizontalnim strujanjem plina.

Razmak među kolektorskim elektrodama bira se prema koncentraciji praha u plinu, jer manji razmak među kolektorskim elektrodama doduše snižuje potrebni napon na ionizacijskim elektrodama i smanjuje dimenzije cijelog postrojenja, ali povećava teškoće u pogonu uslijed začepljenja prahom. Ako su koncentracije praha vrlo velike, povoljno je u prednjem dijelu filtra ploče smjestiti na većem razmaku nego na zadnjem.

Za dobar rad elektrofiltra važno je da se plin među elektrode jednolično raspodijeli. Da se to postigne, plin prije ulaza u filter obično prolazi kroz otvore rupičaste pregrade umetnute u vod.

Cijevni elektrofiltri upotrebljavaju se većinom za uklanjanje suspendiranih kapljica (magla) iz plina ili čvrstih čestica u malim koncentracijama, kad se skupljeni prah može splaknuti s kolektorske elektrode vodom. U tim slučajevima uklanjanje taloženog materijala ne čini teškoća jer on slobodno otječe s elektrode. Pločasti elektrofiltri se redovito upotrebljavaju za čišćenje velikih količina plina u kome je suspendiran suhi prah u većim koncentracijama. Da bi se uklonio skupljeni prah s kolektorskih elektroda, one se elektromagnetskim uređajima periodički potresa. Ponekad se i ionizacijske elektrode moraju potresanjem oslobađati naslaga finih čestica koje bi ometale obrazovanje korone. I kolektorske elektrode cijevnih elektrofiltra, kad skupljaju suhi prah, potresa se time što se batičima izvana udara po njima.

Ako je prah od električki slabo vodljivog materijala, i kroz tanak sloj koji zaostaje na elektrodama

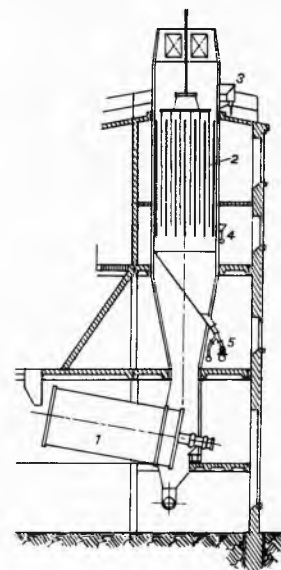


Sl. 24. Pločasti vertikalni elektrofiltra

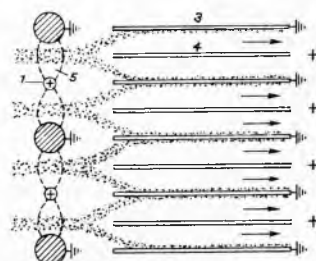
može nastati velik pad potencijala, što smanjuje napon među elektrodama a time i brzinu taloženja. U takvim slučajevima može biti potrebno plin vlažiti vodenom parom ili dodavati mu vodljive tvari, da bi se povećala vodljivost skupljenog praha.

Dva primjera primjene jednostepenih elektrofiltra prikazana su na sl. 23 i 24.

Dvostepeni elektrofiltri obično se ugrađuju izravno u uređaj za klimatizaciju zraka. Sl. 25 daje shematski prikaz principa takvog uređaja. U ionizacijskoj komori stvara se između ionizacijskih elektroda visokog napona i uzemljenih protuelektroda elektrostatičko polje 5 kojim mora da prolazi struja zapašeni plina; čestice praha u njemu se ioniziraju pa se u odvojenoj taložnoj komori



Sl. 23. Jednostepeni elektrofiltra u dimnjaku sušare mrkog uglja. 1 Cijevni sušionik, 2 elektrofiltra, 3 dovod struje, 4 uređaj za potresanje ploča, 5 izlaz praha



Sl. 25. Shema dvostepenog elektrofiltra

talože na pločaste uzemljene kolektorske elektrode 3, pod djelovanjem jednoličnog elektrostatičkog polja obrazovanog pomoću isto takvih, ali električki nabitih i od mase izoliranih protuelektroda 4. Prednost je ovakvih filtara pred Cottrellovim što je u odvojenim stepenima potreban manji napon među elektrodama (10...15 kV na ionizacijskim elektrodama, 5...8 kV na protuelektrodama kolektora) i manja snaga, a elektrode mogu biti bliže jedna drugoj. Kolektorske elektrode filtra za čišćenje zraka obično su pokrite slojem u vodi topljivog ulja koji zadržava prah, pa se periodički (u razmacima od 2...6 tjedana) peru mlazovima vode i ponovo naulje. Ima i kontinuiranih izvedaba s beskrajnim lancem kolektorskih elektroda koje automatski kruže u ciklusu taloženja i čišćenja.

U izvoru struje, koji je u principu jednak odgovarajućim uređajima jednostepenih elektrofiltara, primjenjuju se samo cijevni i silicijumski ispravljači. Ispravljena se struja još filtrira, a redovito se primjenjuju zaštitni krugovi protiv iskrenja.

Materijali za elektrofiltre. Materijal od kojeg se grade elektrofiltri zavisi od kemijskih i električkih svojstava plina koji se čisti i suspendiranog praha. Gdje god je to moguće, elektrofiltri se grade od mekog čelika, za korozivne plinove upotrebljavaju se i za ionizacijske i za kolektorske elektrode čelici otporni protiv korozije, legure nikla itd., kolektorske elektrode grade se i od ugljena. Ionizacijske elektrode dvostepenih elektrofiltara prave se od volframske žice vrlo malog promjera. Za plinove u kojima postoji tendencija preskakivanja iskre kod niskih napona, kolektorska elektroda se zna napraviti npr. od cementa armiranog vodljivim šipkama, a kad se suspendirane kapljice talože u obliku vodljivog filma, kolektorske elektrode mogu imati površine napravljene od izolatora: stakla, keramike, drva itd. Kućišta filtara prave se od čelika, eventualno otpornog prema koroziji ili podstavljenog gumom, plastičnom masom, kiselinstalnim kamenjem, ili se grade od opeka, olova, drva itd.

Primjena elektrofiltara. U USA najveći broj elektrofiltara (više od 600, oko 50% svih instaliranih uređaja) služe za čišćenje dimnih plinova iz kotlovnica s loženjem ugljenim prahom. Za tu svrhu se upotrebljavaju pločasti Cottrellovi filtri. U industriji gvožđa i čelika elektrofiltri upotrebljavaju se za fino čišćenje grotlenog plina visokih peći (mahom mokri cijevni) i plinova iz Siemens-Martinovih peći i konvertera (suhi pločasti). U industriji cementa i drugih veziva elektrofiltrima se čiste plinovi iz peći za pečenje; zbog velike vlažnosti tih plinova čišćenje objema vrstama Cottrellovih precipitatora uspješno je i pored slabe električne vodljivosti suspendiranog praha. U koksarama i plinarama iz plina se uklanjaju kapljice ulja i katrana u cijevnim precipitatorima, u rafinerijama nafte rekuperiranju se elektrofiltrima katalizatori katalitičkog krekinga. U tvornicama celuloze po sulfatnom procesu rekuperira se elektrofiltrima natrijum-sulfat iz dimnih plinova od spaljivanja crnog luga. U industriji obojenih metala elektrofiltrima se čiste plinovi i iz njih rekuperiraju metalni oksidi pri proizvodnji gline, bakra, kositra, olova, cinka, antimona, srebra, zlata itd. U proizvodnji čade (v. str. 5) elektrofiltri u većoj mjeri aglomeriraju čestice, olakšavajući tako kasnije njihovo odvajanje ciklonima i filtrima, nego što služe samome odvajanju. U kemijskoj industriji elektrofiltrima se čiste plinovi od prženja pirit, rekuperiraju se kiseline u njihovoj fabricaciji (sumporna, fosforna i dr.) i uklanjanje prah koji nastaje pri drobljenju i sušenju sirovina itd. Osim u dosad navedenim primjenama, koje obuhvaćaju valjda i 95% instaliranih uređaja, elektrostatičko uklanjanje praha primjenjuje se i u navedenim industrijama na drugim mjestima, i u drugim industrijama za čišćenje plinova i rekuperaciju materijala.

V. Podlesnik

Mehanički filtri za plinove

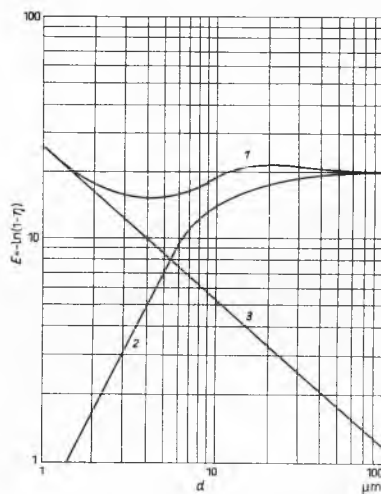
Filtri za plinove su uređaji kojima se plinovi čiste od suspendiranih onečišćenja tako da se tjeraju kroz porozan ili rupičav materijal: tkanine, pust, hasure, žičano tkivo, rupičav lim, slojeve vlaknastog ili zrnatog materijala, porozni papir; taj materijal suspendirane čestice itd. zadržava a čisti plin propušta. Djelovanje filtara nije analogno djelovanju cjedila, tj. oni ne zadržavaju samo čestice veće od otvora ili pora, nego i čestice koje su mnogo manje. Niti i vlakna filtara djeluju u stvari najviše analogno de-

flektorima u udarnim otprašivačima, s time da zbog malog promjera tih »meta« (uporedljivog sa slobodnom dužinom puta čestica) osim sile inercije u zahvaćanju čestica ima znatnu ulogu i njihovo Brownovo gibanje. Osim toga, uslijed malih dimenzija meta, ne može se zanemariti ona količina vrlo sitnih čestica koja se pri skretanju struje plina ne odvađa od nje uslijed inercije pa udara u metu, nego slijedi strujnice plina i izbjegne zahvatu, ukoliko čestice »punim pogotkom« ne udare u metu (»direct interception«). Tek kad se na filterskoj površini na opisan način obrazovao sloj taloga, on djeluje i sam kao filtar koji zadržava poput cjedila i neke manje čestice.

Stupanj dobrote filtra može se prema tome u zavisnosti od bezdimenzijskih grupa (v. str. 117) prikazati kao suma članova koji izražavaju stupanj potpunosti odvajanja difuzijom (Brownovim gibanjem) i inercijom, i jednim korekcijskim faktorom koji uzima u obzir »direktnu pogotku«:

$$E = \left[K_d (Sc Re)^y + K_i \left(\frac{Sk}{Sk+C} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{l}{d} \right).$$

K_d i K_i su koeficijenti potpunosti difuzijskog odn. inercijskog odvajanja praha, y i C su eksponent odn. konstanta koje treba odrediti eksperimentalno. Korekcijski faktor $1 - (l/d)$ kazuje da će to više čestica izbjeći direktnom pogotku što je dimenzija mete manja u odnosu na veličinu čestice. Dati oblik jednadžbe važi za sferne filterske elemente sa statistički orijentiranim vlaknima. Eksponent y je uvijek negativan, djelovanje difuzije dakle opada s porastom brzine strujanja i veličine čestica. Inercijsko djelovanje, pak, s porastom brzine strujanja i veličine čestice raste.



Sl. 26. Zavisnost stupnja otprašivanja mehaničkih filtara za prah od veličine čestica

Kako se to ispoljava u zavisnosti faktora dekontaminacije E od veličine čestica pokazuje dijagram sl. 27 u kojemu je zanemaren korekcijski faktor. U dvostruko logaritmičkom dijagramu opadanje difuzijskog djelovanja prikazano je pravcem koji se spušta slijeva gore nadesno dolje. Djelovanje inercije prikazano je linijom koja počinje kao pravac i onda skreće prema nekoj asimptotskoj vrijednosti. Faktor dekontaminacije E ispočetka, dok prevladava difuzijsko djelovanje, opada do nekog minimuma u području veličina 0,02...0,2 μm , a onda, kad pretežni utjecaj preuzima inercijsko djelovanje, opet raste i ide prema asimptotskoj vrijednosti, prolazeći eventualno kroz slabi maksimum. Filtri koji se upotrebljavaju u tehnici nikad nisu konstruirani za odvajanje čestica svih veličina obuhvaćenih dijagramom sl. 27, nego se za pojedina područja veličine čestica upotrebljavaju grupe aparata u kojima ili prevladava difuzija (čestice 1...3 μm), ili prevladava inercija (čestice 15...100 μm), ili djeluju oba mehanizma (srednje veličine čestica).

Pad pritiska kroz filtar (otpor filtra protiv strujanja plina) može se smatrati sumom laminarne i turbulentne komponente:

$$Eu = K_1/Re + K_2, \quad (19)$$

gdje su K_1 i K_2 koeficijenti pada pritiska uslijed laminarnog odn.

turbulentnog strujanja. Ti se koeficijenti mogu odrediti iz jednadžbe pravca koji se dobiva kad se kvocijent eksperimentalnih vrijednosti otpora i odgovarajuće brzine plina nanesu u pravokutnom koordinatnom sistemu kao funkcija brzine plina:

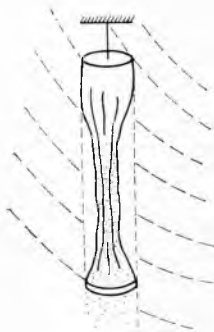
$$R/V = aV + b,$$

jer je iz teorijskih razloga $a = \frac{1}{2} K_t \rho_p$ i $b = K_1 \eta / 2 l$. Sa tako određenim koeficijentima K_1 i K_t može se s pomoću jedn. (19) izračunati pad pritiska za svaki plin na svakoj temperaturi i pod svakim pritiskom.

Među filtrima za čišćenje plinova odvojen položaj zauzimaju filtri za čišćenje zraka; oni se zbog malih koncentracija i malih dimenzija suspendiranih čestica i zbog svoje specifične namjene (najčešće kao dijelovi sistema za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju prostorija) konstruktivno bitno razlikuju od filtera upotrebljanih za čišćenje plinova u industriji, obrtu itd., koji sadrže u većoj koncentraciji čestice dospjele u njih pri mehaničkim ili kemijskim operacijama. I u ovom članku bit će u nastavku najprije riječ o industrijskim filtrima za čišćenje plinova, a onda odvojeno o filterima za čišćenje zraka.

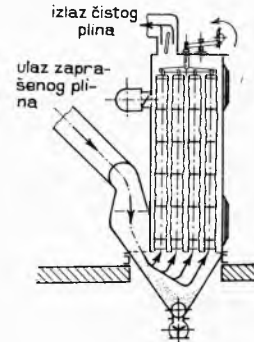
Industrijski filtri za čišćenje plinova imaju najčešće kao filtersko sredstvo tkanine ili pust u obliku vreća, cijevi ili uokvirenih ploča (vrećasti filtri, cijevni filtri, pločasti filtri). Filterске tkanine, koje se najviše upotrebljavaju kao filtersko sredstvo, prave se od pamuka, vune, stakla ili sintetičkih materijala kao što su poliamidna, poliesterska i polivinilna vlakna, već prema prirodi i temperaturi plina, krupnoći i koncentraciji praha. Pamuk se može upotrijebiti do temperature 95° C, staklo do 290° C, specijalna sintetička vlakna do 230° C. Gustoća (poroznost) filterskog sredstva karakterizira se njegovom propusnošću za plin, izraženo kao volumen čistog zraka (određenog pritiska i temperature) što ga propušta po jedinici površine uz određeni pad pritiska kroz filterski sloj. Brzina strujanja plina kroz filtersku tkaninu ograničena je na ~ 6 m/sek, jer kod većih brzina strujanja s površina tkanina može otpadati sloj praha koji djeluje kao filter, pa u čisti plin prodire sitne čestice praha. Veće se brzine strujanja mogu upotrijebiti s filtrima od pusta, jer pri filtraciji kroz njih sloj zadržanog praha nema toliku ulogu kao pri filtraciji tkaninama.

U filterskim elementima uređaja za čišćenje plina filtersko sredstvo obrazuje zidove zatvorenog prostora: vreće, cijevi, komore između uokvirenih ploča i sl. Osim po obliku, filterski se elementi mogu razlikovati po tome da li plin prolazeći kroz filtersko sredstvo iz njih izlazi, tj. taloži prah na unutarnjoj strani filterskog materijala, ili u njih ulazi, tj. taloži prah na vanjskoj strani. U prvom slučaju plin pod pritiskom naduvava filtersku površinu i širi prostor elementa, u drugom slučaju filterski materijal ima tendenciju da se uboči prema unutrašnjosti elementa, te se mora redovito poduprijeti iznutra žičanom mrežom ili sl., da se ne bi protok plina smanjio ili prekinuo. Filterski elementi su u uređaju za filtraciju skupljeni u većem broju tako da se u jedinici zapremine uređaja ili tlacnog prostora smjesti što veća filterска površina. Elementi prve od gore spomenutih vrsta spojeni su pri tom svojom



Sl. 27. Zbacivanje praha s platnenog filtra od osjetljivog materijala: labavljenjem filtra, strujom plina u suprotnom smjeru i potresanjem zvučnim valovima

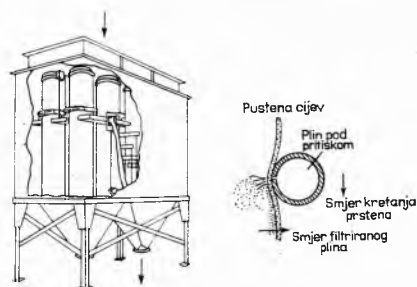
sanje; kad se prah taloži u unutrašnjosti filterskog materijala, npr. pusta, on se mora izbacivati obrnutom strujom plina, itd. Sl. 27 prikazuje, radi fiksiranja predodžaba, jedan konkretan slučaj u kojemu su upotrebljena sva tri načina zbacivanja praha s filtra. Filterски elementi s kojih se zbacuje prah redovito se isključuju iz pogona filtriranja i odvajaju od struje zapašenog plina. Budući da se u velikom postrojenju za filtraciju plina u svakom trenutku samo s jednog dijela ukupnog broja filterских elemenata zbacuje prah, a ostali filtriraju, pogon je u cjelini kvazikontinuiran. Rijetko se čišćenje filterске površine obavlja dok je filterски element u pogonu, jer je u tom slučaju teško spriječiti ponovno onečišćenje plina zbačenim prahom.



Sl. 28. Mehanički filter s platnenim cijevima i zbacivanjem praha potresanjem

Sl. 28 prikazuje jednu sekciju mehaničkog cijevnog filtra za plin. Filterски elementi su mu cijevi, redovito od pamučne tkanine (ili sintetskog vlakna ako to iziskuje povišena temperatura) ovalnog ili kružnog presjeka, promjera 10...20 cm, duljine 2,5...5 m, dolje otvorene i spojene sa zajedničkim dovodom zapašenog plina (odn. zbirnikom praha), gore zatvorene i obješene tako da se mogu povremeno potresati. Više ovakvih sekcija, svaka s većim brojem elemenata spojenih u redovima (100...200 m² filterске površine), spoje se u zajedničkoj zgradi tako da se svaka sekcija može, kad na nju dođe red (svakih 5 minuta do 8 sati), isključiti iz struje plina i potresati radi skupljanja praha. Ima uređaja u kojima je odvajanje pojedinih sekcija i periodično potresanje automatizirano.

Sl. 29 prikazuje filterско postrojenje s cijevima od pusta i uređajem za kontinuirano zbacivanje praha pomoću struje komprimiranog zraka tjeranog u smjeru protivnom smjeru filtriranog plina kroz rupice prstena koji obuhvaća cijev i stalno putuje uzduž nje gore-dolje. Bez pokretnih mehaničkih dijelova radi filter u kojemu



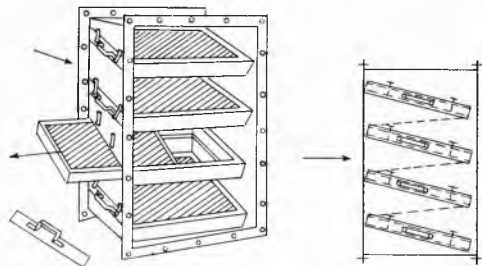
Sl. 29. Mehanički filter s pustim cijevima i zbacivanjem praha strujom plina u suprotnom smjeru. Desno detalj produhavanja zraka

se prah s vanjske strane filterских cijevi (iznutra poduprtih žičanom mrežom) zbacuje povremenim impulsima komprimiranog zraka dovedenog u sapnice nad cijevima. Impulsi komprimiranog zraka naglo izbočuju zidove cijevi prema vani i injektorskim djelovanjem potjeraju struju očišćenog plina u suprotnom smjeru kroz njih; posljedica tih dvaju djelovanja jest da sloj praha otpadne s vanjske površine cijevi u zbirnik, odakle se iznosi.

Filtri za zrak. U industrijskim filtrima čiste se plinovi koji sadrže obično do 50 g/m³ praha, ali ponekad i do više stotina grama na kubni metar; često je taj prah dragocjen i treba ga rekuperirati. U filtrima za zrak čisti se plin koji sadrži praha manje od 10 mg/m³, često ispod 1 mg/m³, na temperaturi ispod 60° C i prah uklonjen iz zraka nije gotovo nikad potrebno izolirati. Filtri koji su pogodni za uklanjanje praha (dima, mikroorganizama itd.) iz zraka mogu se podijeliti na suhe i mokre, na filtre kojima se filterско sredstvo čisti pa ponovo upotrebljava i filtre kojima se filterско sredstvo zasićeno prahom baca i zamjenjuje novim, a filtri koji se čiste od praha mogu se čistiti ručno odn. ručnim upravljanjem ili automatski. Osim toga se filtri mogu podijeliti prema veličini čestica koje mogu uklanjati: u »grube« filtre za grubiji prah (> 10

μm), »fine« za fini prah ($1\cdots 10\ \mu\text{m}$) i »najfinije« ili bakterijske filtre za najfiniji prah ($< 1\ \mu\text{m}$).

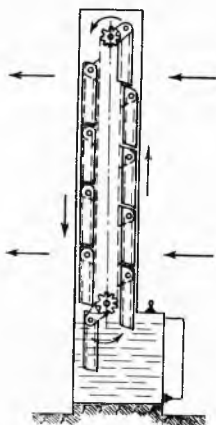
Sl. 30 prikazuje sekciju filtra za zrak s elementima koji se ručno izmjenjuju. Elementi se sastoje od pojedinih ćelija koje u metalnom okviru sadrže ploču filterarskog sredstva. U mokrim filtrima



Sl. 30. Filtar za zrak s ručnim izmjenjivanjem okvira

to je metalna mreža, profilirani ili rupičasti lim, metalna vuna, metalne strugotine, životinjske dlake, staklena vlakna, drvene strugotine itd. prevučeni slojem viskoznog mineralnog ulja; u suhim

filtrima to je runo od dugih elastičnih vlaknaca, npr. sitno nabrana staklena vlakna, sintetička vlakna ili prirodna tekstilna vlakna, i to na strani zapašenog plina grublja, na strani čišćenog plina finija. Kad je filterarsko sredstvo jeftino, zapašeni materijal baca se i zamjenjuje novim, inače se s mokrih ploča splakne ulje i zamijeni novim, a suhe se ploče čiste istresanjem, četkanjem ili pranjem; očišćeni filterarski elementi se pri narednoj zamjeni ploča opet umeću u filter. Pranje mokrih ploča automatizirano je u aparatu prema sl. 31. Suhi filteri izvode se i s filterarskim elementom u obliku trake poroznog vlaknastog materijala koje se gore s kotura odmotava, prolazi poprečno kroz struju plina i dolje se namotava. Traka se pomiče povremeno ručno ili automatski. Zapašena traka se čisti ili baca. Mokri filteri upotrebljavaju se najviše kao grubi, suhi kao grubi i fini (s grubljim ili finijim filterarskim materijalom). Kao najfiniji ili bakterijski filteri upotrebljavaju se suhi filteri s papirom ili presovanim najfinijim sintetičkim, staklenim, azbestnim i dr. vlakancima kao filterarskim materijalom. Da bi se povećala efektivna filterarska površina, taj se materijal umeću u filterarske elemente u naborima.



Sl. 31. Filtar za zrak s mehaničkim pranjem filterarskih okvira

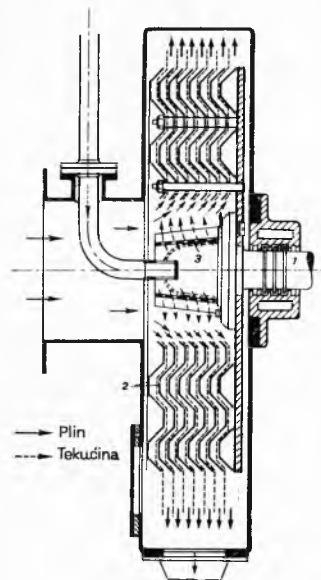
Filtari po djelovanju analogni upravo spomenutima, ali drugih, pogodnih oblika, smještaju se na ulazu zraka u motore i kompresore, također u cijevne vodove radi uklanjanja praha, kapljica ulja itd. iz plinova.

Skruberi

Skruberi su otprašivači u kojima se čestice praha uklanjaju iz plina time što djelovanjem inercijskih sila, difuzije ili punih pogodaka udaraju na površinu tekućine i na njoj se zadržavaju. Pri tom tekućina može imati neprekinutu površinu (npr. sloja koji teče niz čvrsti zid) i djelovati jednako kao deflektori u suhim inercijskim otprašivačima, tj. izravno primati i uklanjati prah, ili se prah hvata na kapljice raspršene tekućine i s njima tvori disperziju sa česticama koje su veće i teže od čestica praha te se stoga sekundarno lakše odvajaju gravitacijom ili kojim drugim od naprijed opisanih načina.

U skruberima se struja zapašenog plina dovodi u što prisniji doticaj s površinama i kapljicama tekućine. Njihova je funkcija dakle ista kao aparata za apsorpciju plinova, pa su mnogi skruberi njima analogno građeni, štaviše: isti se aparati često upotrebljavaju i za čišćenje plinova i za apsorpciju. Tako se za čišćenje plinova kao skruberi upotrebljavaju plazni tornjevi u kojima voda odozgo pada ususret uzlaznoj struji plina, kolone pune prokapsnim tijelima ili drvenim rešetkama, kolone sa sapnicama za rasprši-

vanje tekućine, praonici tipa Ströderova u kojima se tekućina raspršava centrifugalnom silom (v. *Apsorpcija plinova*, TE 1, str. 329). U nekim aparatima plin se u jakom mlazu upravlja na površinu tekućine tako da čestice inercijom prodru u nju; pri tom se često stvara nad slobodnom površinom tekućine i zastor sitnih kapljica na koje prijanjaju najfinije čestice praha. Ponekad se plin i provodi kroz tekućinu, pa se upotrebljavaju analogni aparati kao za apsorpciju plina iz unutarnje faze (v. TE 1, str. 328). U skrubere mogu se računati također udarni otprašivači u kojima se udarne površine kvase tekućinom i mehanički otprašivači u koje se osim plina uvodi i tekućina koja okvasi sve unutarnje površine i s njih splakuje prah. Dezintegratorima nazivaju se aparati u kojima se elementima koji se brzo okreću voda razdjeljuje, miješa s plinom i u tankim mlazovima centrifugalnom silom baca na niz pregrada na kojima se zadržava prah. Takvi aparati, npr. Theisenov dezintegrator (sl. 32), služe za fino mokro čišćenje grotlenog plina visokih peći. Najsitnije čestice mogu se s visokim stupnjem potpunosti ukloniti iz plina tzv. visokoenergijskim skruberima (sl. 33). Oni imaju suženje poput Venturijeve cijevi (nazivaju se stoga i Venturi-skruberi); na najužem mjestu se uprskava voda pod pritiskom ($0,3\cdots 3,5$ at natpri-



Sl. 32. Theisenov dezintegrator. 1 Vratilo, 2 udarni limovi, 3 razdjelivač



Sl. 33. Visokoenergijski Venturi-skruber

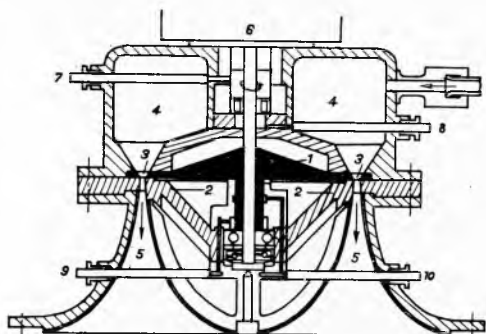
tiska), koju plin raspršuje na vanredno sitne kapljice. Pad pritiska plina u skuberu visok je, $20\cdots 500\ \text{cm H}_2\text{O}$, a tako i potrošak vode; stupanj dobrote otprašivanja proporcionalan je utrošku energije i može i za submikronske čestice biti jednak kao stupanj dobrote elektrofilara. Veće pogonske troškove u poređenju s pogonskim troškovima elektrofiltera kompenziraju manji troškovi investicije. Visokoenergijski skruberi su u posljednje vrijeme u znatnoj mjeri zamijenili elektrofiltere pri finom čišćenju grotlenog plina visokih peći.

Svaki aparat za mokro čišćenje plina raspršenom tekućinom osim dijela u kojemu se plin kontaktira s tekućinom ima dio u kojemu se kapljice tekućine koje sadrže prah odvajaju od plina. To mogu biti odvojeno postavljeni cikloni, elektrofilteri, udarni odjeljivači, itd., a mogu biti i uređaji spojeni sa samim skruberom u jedan aparat. Pri čišćenju vrućih vlažnih plinova ispred samog skruberu ima komora u kojoj se plin ohlađuje do ispod rosišta, tako da se voda kondenzira u kapljicama na česticama praha i time pridonosi njihovom uklanjanju iz plina. Primjena je skruberu u izvjesnoj mjeri ograničena teškoćama što ih pravi uklanjanje prahom zamuljene vode. To vrijedi naročito za visokoenergijske skrubere s njihovim velikim potroškom vode.

Ultrazvučni i termički precipitatori

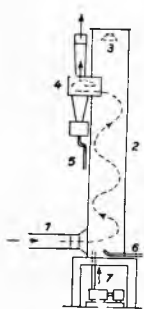
Zvučne vibracije velikog intenziteta izazivaju u dimovima i maglama sudare čestica i time njihovu flokulaciju; spajanje u veće čestice, koje se onda mogu nekim od drugih načina čišćenja plinova lakše odvojiti od plina. Ultrazvuk se proizvodi visokofrekvencij-

skim sirenama, koje se pogone elektromotorom ili turbinom na komprimirani zrak. Sl. 34 prikazuje polushematski siren s elektromotornim pogonom. U komore 4 dovodi se zrak iz kompresora



Sl. 34. Ultrazvučna sirena. 1 Rotor, 2 stator, 3 zvučni provrti, 4 komora s komprimiranim zrakom, 5 zvučne trube, 6 motor, 7, 8 i 9, 10 podmazivanje

(5...10 KS); elektromotoru (1,5 KS) se broj okretaja (max. 12 500 min⁻¹) može regulirati, tako da se frekvencija ultrazvuka može podesiti između 0,5 i 22 kHz. Snaga zvuka je 250...300 W. Veće sirene, pogonjene turbinom, mogu proizvesti snage i preko 10 kW, intenziteta do 10 W/cm², frekvencije koja se može regulirati između 1 do 200 kHz. Manjom od gore navedenih sirena može se očistiti 2000...3000 m³/h plina, većima i do 40 000 m³/h.



Sl. 35. Ultrazvučni toranj za uklanjanje kapljica sumporne kiseline iz plina. 1 Ulaz plina, 2 toranj, 3 sirena, 4 ciklon, 5 i 6 odvod kiseline, 7 kompresor za pogon sirene

Osim sirenama, ultrazvuk se može proizvesti i na druge načine. Npr., intenzivni zvučni valovi nastaju u električnim iskrištima i u električnom luku proizvedenom istosmjernom, a modularnom izmjeničnom strujom.

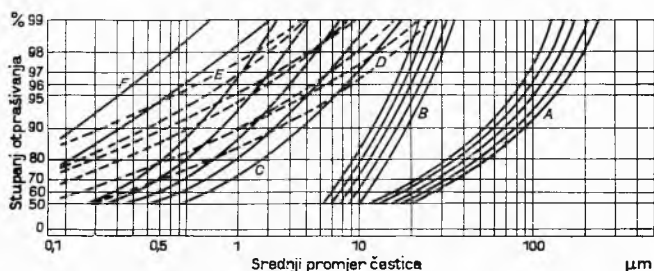
Kao primjer primjene ultrazvuka prikazan je u sl. 35 zvučni toranj za uklanjanje magle sumporne kiseline iz plina.

Ako se zapašen plin vodi malom brzinom preko zagrijane metalne mreže ili kroz nju, sudari molekula plina s česticama praha djeluju tako da se čestice praha odbijaju od grijane površine. Na osnovu te pojave može se plin očistiti od praha. U industrijskom mjerilu taj način čišćenja praha nije se uveo, ali se upotrebljava za uzimanje uzorka praha iz zapašenog plina.

Izbor aparata za čišćenje plina

Aparat za uklanjanje praha ili kapljica tekućine iz nekog plina bira se u prvom redu prema zapašenosti plina, prema srednjoj veličini čestica i njihovoj raspodjeli po veličini, i prema zahtijevanom stupnju otprašivanja, ali pored toga treba često uzeti u obzir i niz drugih, tehničkih i ekonomskih, okolnosti.

Kako se vidi iz sl. 1, područja upotrebljivosti različitih aparata za odvajanje čestica određene veličine čestica po pravilu se preklapaju. Sl. 36 prikazuje grafikon (prema Sylvanu) iz kojeg se može očitati koliki se stepen otprašivanja može očekivati pri primjeni



Sl. 36. Zavisnost stupnja otprašivanja glavnih aparata za čišćenje plina od veličine čestica praha. A cikloni malog otpora, B cikloni visokog stupnja otprašivanja, C skruberi, D filtri (čišćenje potresanjem i obratnom strujom), E elektrofiltri, F filtri (čišćenje laviranjem)

nekih važnih aparata na čišćenje plina od praha određene srednje veličine čestice. Na koji način se takav grafikon, zajedno s podacima o zapašenju plina i raspodjeli čestica praha po veličini, može upotrijebiti za izbor pogodnog aparata, prikazat će se na primjeru.

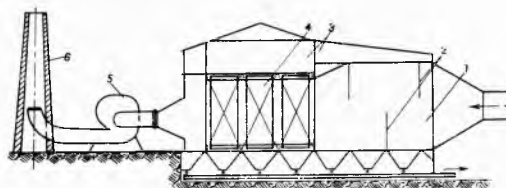
Kako da se očisti plin koji izlazi iz peći-vapnenice? Takav plin može sadržati 10...25 g/m³ (tablica 1) praha sa težinskim srednjim promjerom 2...14 μm. U nedostatku podataka pretpostavimo da sadrži 17,5 g/m³ praha srednjeg promjera 9 μm. Iz sl. 37 može se pročitati da bi ciklon s malim padom pritiska odvojio praha te veličine manje nego 50%, ciklon velikog stupnja dobrote otprašivanja, 60...80%, a skruber mehanički filter i elektrofilter više od 97%. Zapašenost plina je ponešto velika za te otprašivače najvećeg stupnja dobrote, stoga odlučujemo da ćemo plin u jednom ciklonu visokog stupnja dobrote najprije podvrgnuti pretčišćenju. Pretpostavimo srednji ukupni stupanj otprašivanja 70%, izračunava se da će pretčišćeni plin sadržati 17,5 0,30 = 5,25 g/m³ praha. Da bi se našla srednja veličina čestice tog plina, potrebno je poznavati raspodjelu čestica po veličini u prvobitnom zapašenom plinu. U nedostatku podataka o tome, može se pretpostaviti da je kolektiv čestica normalno raspodijeljen i da mu je mjera rasipanja promjera čestica oko srednje vrijednosti (standardna devijacija) sredina između najveće i najmanje koje se obično nalaze u takvih prahova. S tim pretpostavljenim podacima može se na vjerojatnosnom papiru nacrtati pravac koji prikazuje karakteristiku praha: on prolazi kroz tačku s apscisom $d = 9,0 \mu m$ i ordinatom $\eta = 50\%$, a s nagibom koji odgovara pretpostavljenoj standardnoj devijaciji. Pretpostavljajući radi jednostavnosti da će ciklon visokog stupnja dobrote otprašivanja oštro razdvojiti prah u dvije frakcije s česticama većim i manjim od graničnih, nalazi se veličina granične čestice kao apscisa tačke na karakteristici koja ima ordinatu 30%. U našem slučaju dobili bismo tako, recimo, da je $d_g = 6,0 \mu m$. Dijagram sl. 37 pokazuje da i kad bi sve čestice zaostale u plinu imale tu veličinu, ni najbolji ciklon ne bi mogao odvojiti 50% praha zaostalog nakon pretčišćenja, dok bi se skruberom, elektrofilterom ili mehaničkim filterom moglo odvojiti bar 93%. Izabere li se dobar skruber, može se očekivati stepen otprašivanja od 98%. Istim postupkom kao za čišćenje s pomoću ciklona može se približno odrediti koliko će praha i koje veličine čestice konačno ostati u očišćenom plinu. Ako postoje tačniji podaci o karakteristikama praha i aparature, mogu i račun i izborom aparata prema stupnju otprašivanja biti tačniji.

U mnogim slučajevima sam postizivi stupanj otprašivanja ni izdaleka ne dostaje za određivanje najpogodnijeg aparata. Staviše, izbor je aparata često određen tako malo samim zadatkom operacije, tj. traženim stupnjem otprašivanja, a toliko drugim okolnostima, da je moglo biti rečeno kako je izbor aparata za otprašivanje u većoj mjeri umijeće nego nauka. Plin može biti vruć, korozivan, eksplozivan, suh ili vlažan, sadržati sastojke koji u povoljnom ili nepovoljnom smislu utječu na rad elektrofiltera; čestice mogu biti tvrde i abrazivne, teško se kvasiti tekućinom, biti električki vodljive ili nevodljive; volumen i zapašenost plina mogu biti veliki ili mali, dopustive dimenzije aparata mogu biti ograničene raspoloživim prostorom, — i tako dalje. Ne manje važni su ekonomski momenti: jedni su aparati skupi u nabavci a jeftini u pogonu (npr. elektrofilteri), drugi iziskuju male troškove investicije ali trebaju mnogo snage za pogon (npr. skruberi), jedni zahtijevaju više, drugi manje materijalnih troškova i radne snage za održavanje, itd.

Tehnologija čišćenja plinova danas je toliko napredna da za svaki problem pruža tehnički povoljno rješenje, ali zbog mnoštva okolnosti koje pri izboru tehnički i ekonomski najpogodnijeg aparata treba uzeti u obzir, pronalaženje tog rješenja nije uvijek lagan zadatak. A ima i nemalo slučajeva da, i pored postojanja tehničkog rješenja, potpuno zadovoljavajući ekonomski podnošljiv način čišćenja plina nije moguće naći.

Postrojenja za čišćenje plinova

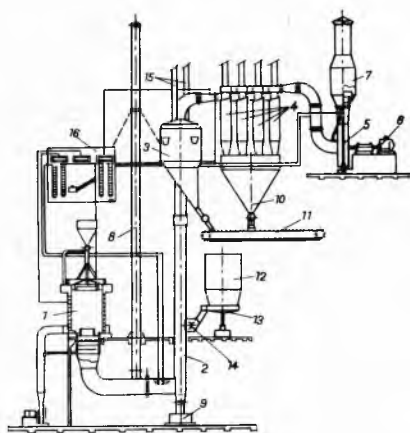
Kad u proizvodnji nastaju velike količine zapašenog plina koji treba otprašiti, aparati koji se za tu svrhu upotrebljavaju, zajedno s ventilatorima koji zapašeni plin odsisavaju s mjesta gdje nastaje,



Sl. 38. Dvostepeno postrojenje za čišćenje plina s prašnom komorom i elektrofilterom. 1 Prašna komora, 2 deflektor u prašnoj komori, 3 radni prostor nad aparaturom, 4 elektrofilter, 5 ventilator, 6 dimnjak

tvore odvojena postrojenja koja ponekad zauzimaju više prostora nego postrojenja u kojima se prah stvara. U tim se postrojenjima plin čisti u aparatima jedne vrste ili više njih, u jednom, dva ili tri stepena, u zavisnosti od koncentracije praha u plinu, od veličine i granulometrijskog sastava njegovih čestica, od vrijednosti praha i od tražene čistoće plina. Na sl. 23 bio je prikazan uređaj za jedno-

stepeno uklanjanje praha ugrađen u dimnjaku sušnice, sl. 38 prikazuje shematski postrojenje za dvostepeno otprašivanje u prašnoj komori i elektrofiltru, sl. 39 trostepeno uklanjanje praha u okviru



Sl. 40. Trostepeno postrojenje za čišćenje plina s ciklonom, multi-klonom i skruberom. 1. Ložište koje proizvodi plin za pneumatsko sušenje, 2. cijev za pneumatsko sušenje, 3. ciklon, 4. multiklon, 5. ventilator za otprašeni plin, 6. elektromotor, 7. skruber, 8. dimnjak ložišta (uključen pri stavljanju u pogon), 9. hidraulički zapor cijevi za sušenje, 10. bunker za prah, 11. transporter za suhi prah, 12. bunker za vlažni prah, 13. tanjurni dodjeljivač, 14. ubacivač, 15. sigurnosni ventili, 16. kontrolna ploča postrojenja

postrojenja za pneumatsko sušenje. Velika postrojenja za višestepeno čišćenje plinova jesu npr. postrojenja za čišćenje grotlenog plina visokih peći, generatorskog plina u mnogim industrijama, rudničkog zraka, zraka iz fabrika za mehaničko oplemenjivanje ruda, dimnih plinova mnogih industrija.

U postrojenja za otprašivanje, u širem smislu, spadaju i uređaji za hvatanje praha koji nastaje u nekim strojevima i uređajima (transporterima, drobilicama i mlinovima, miješalicama, sitima i rešetima, bunkerima, separatorima, pećima, itd.) i onečišćuje zrak u okolini tih uređaja. O tome, kao i o proračunu sistema za industrijsku ventilaciju, v. *Ventilacija*.

R. Podhorsky

LIT.: C. Loeser, Abgase, Technik ihrer Entzückung, Entstehung und Entgiftung, Berlin 1940. — L. Beremann, Der Ultraschall, Stuttgart *1949. — L. Dietrich, P. Achenbach, F. Schytil, Gasreinigung, Abscheidung fester und flüssiger Schwebestoffe, in: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Bd. I, München-Berlin 1951. — B. П. Родадин, Пылеприготовление, Москва 1953. — P. Drinker, T. Hatch, Industrial dust, New York *1954. — T. F. Hueter, R. H. Bolt, Sonics, New York 1955. — P. L. Magill, F. R. Holden, C. Ackley, Air pollution handbook, New York 1956. — H. L. Green, W. R. Lane, Particulate clouds; dusts, smokes and mists, London-Princeton 1957. — R. Meldau, Handbuch der Staubtechnik, 2 Bde, Düsseldorf 1956/58. — G. M. Gordon, I. A. Peisachov, Пылеулавливание и очистка газов, Москва 1958. — M. Della Valle, Fine particle measurement, New York *1959. — W. L. Faith, Air pollution control, New York 1959. — H. G. Zalogin, C. M. Шухер, Очистка дымовых газов, Москва 1959. — H. R. Shepherd, Aerosols, New York 1960. — G. Herdan, Small particle statistics, Amsterdam *1962. — G. H. Strom, A. C. Stern, Air pollution, vol. I, New York 1962. — R. L. Lucas, Gas-solids separation, in: J. H. Perry, Chemical engineers' handbook, New York 1963. — H. J. White, Industrial electrostatic precipitation, Reading, Mass., 1963. — K. Г. Руденко, А. В. Калмыков, Обеспыливание и пылеулавливание при обработке полезных ископаемых, Москва 1963. — N. Davies, Recent advances in aerosol research, New York 1964. — N. A. Fuchs, The mechanics of aerosols, Oxford 1964. — L. M. Roberts, A. B. Walker, Electrostatic precipitation, in: Kirk-Othmer, Encyclopedia of chemical technology, vol. 4, New York *1965. — K. T. Whitby, B. Y. H. Liu, Dust (Engineering), in: istom djelu vol. 7, 1965. — W. Strauss, Industrial gas cleaning, Oxford 1966. — S. Sykora, R. F. Logsdon, Gas cleaning, in: istom djelu, vol. 10, *1966. — K. Г. Руденко, М. М. Шемаханов, Обезвоживание и пылеулавливание на обогатительных фабриках, Москва 1967.

V. Podlesnik R. Podhorsky

ČVRSTO STANJE, agregatno stanje tvari u kojem tijela imaju stabilan oblik (u normalnim uvjetima) jer atomi u njima ostvaruju termičko gibanje titranjem oko prostorno fiksiranih ravnotežnih položaja. Sve tvari u određenim uvjetima (na određenoj temperaturi i pod određenim pritiskom) prelaze u čvrsto stanje. To se događa u trenutku kad je termička energija atoma i molekula dovoljno niska i udaljenosti među atomima dovoljno male da interakcije atoma mogu osigurati određene položaje jednih prema drugima u prostoru. Pod normalnim pritiskom, ohlađivanjem jedino helijum ne prelazi u čvrsto stanje sve do apsolutne nule temperature; za kristalizaciju helijuma na temperaturi 1,5 °K potreban je pritisak od 25 atmosfera. Stabilnost oblika tijela u čvrstom stanju ispoljava se u tome što se tijelo protivi vanjskim silama usmjerenim na mijenjanje oblika.

Pojam agregatnog stanja tvari nije precizno definiran. Tekuće i čvrsto stanje razlikuju se od plinovitog po tome što tvari u tim stanjima imaju formirane površine i ograničavaju se na vlastite volumene, bez obzira na volumen posuda u kojima se nalaze; čvrsto stanje razlikuje se od tekućeg po tome što oblik površine čvrstih tijela nije podložan utjecaju gravitacije i ne oblikuje se po obliku posude kao u slučaju tekućine, a to odgovara prostorno fiksiranim položajima atoma u čvrstom stanju. Ova stara podjela na plinovito, tekuće i čvrsto stanje učinjena je u prvom redu sa ciljem da se tvari razvrstaju u klase s jednakim fizičkim svojstvima. Pokazalo se, međutim, da prelaze među ovako definiranim agregatnim stanjima ne prate nužno promjene fizičkih svojstava. S diskontinuitetima fizičkih svojstava počeo se povezivati pojam faznih prelaza, gdje se pod fazom razumijeva svaki homogeni, fizički razlučiv (tj. koji ima definirane granice) dio nekog sistema. Pod utjecajem rezultata hidrodinamike i aerodinamike, koji su pokazali da se mehanička svojstva tekućina i plinova mogu formalno opisivati istim jednadžbama, dugo vremena prevladavalo je uvjerenje da je tekuće agregatno stanje bliže plinovitom nego čvrstom. Ispitivanja čitavog niza fizičkih svojstava pokazala su, međutim, da između čvrstih tijela i tekućina ne postoje razlike ni oštre granice. S jedne strane, čvrsta tijela pod visokim pritiscima i velikim naprezanjima pokazuju efekt tečenja poput tekućina; s druge strane, tekućine prilikom titranja na visokim frekvencijama podliježu elastičnim deformacijama poput tipičnih čvrstih tijela. Kod stakala se pri postepenom povišenju temperature može pratiti kontinuirani prelaz od mehaničkih svojstava tipičnog čvrstog tijela do mehaničkih svojstava tekućine. Prilikom taljenja čvrsta tijela povećavaju svoj volumen za ne više od 10%, a latentna toplota taljenja mnogo je manja od latentne topline isparavanja, što govori o tome da isparavanje predstavlja dublju promjenu u odnosu među česticama nego taljenje i da u čvrstim tijelima i tekućinama djeluju slične kohezivne sile. Zbog sličnosti mnogih njihovih svojstava, tekuće i čvrsto agregatno stanje često se promatraju zajedno pod nazivom *kondenzirano stanje* nasuprot plinovitom. U kondenziranom stanju razmaci među susjednim atomima su veličine nekoliko desetinki nanometra, tj. tekućine i čvrsta tijela sadrže 10^{24} – 10^{25} atoma u kubnom centimetru. Plin na sobnoj temperaturi i pod pritiskom od jedne atmosfere ima gustoću $\sim 2,7 \cdot 10^{19}$ molekula u kubnom centimetru, a to znači da je srednja udaljenost između molekula u tom plinu približno 3 nm. Mnogo bitnije nego razlikovanje agregatnih stanja pokazuje se da je razlikovanje sredenih i nesredjenih struktura.

Sredene i nesredene strukture. S obzirom na prostorni raspored ravnotežnih položaja atoma, čvrsto stanje može biti sredeno (kristalizirano) i nesredeno (amorfno). U kristalima su atomi i na velikim udaljenostima raspoređeni u pravilnu trodimenzijsku strukturu koja se može shvatiti kao periodsko ponavljanje jednog istog strukturnog motiva (*daleki poredak*). U amornim tijelima postoji sredenost atoma do na udaljenosti reda veličine srednjih međuatomskih razmaka (*bliski poredak*), a sa stanovništva velikih atomskih razmaka atomi su haotički raspoređeni. Sistem atoma ima najnižu energiju kad su atomi pravilno raspoređeni u kristalnoj rešetki, pa se s termodinamičkog stanovišta amorfno tijelo uvijek nalazi u nekom neravnotežnom, metastabilnom stanju i treba da s vremenom kristalizira. U običnim uvjetima vrijeme prelaska u stabilno stanje može biti tako veliko da se neravnotežni karakter amornog tijela praktički ne ispoljava.

U plinovitom stanju vjerojatnost da će se neka čestica naći u nekoj tački prostora ne zavisi od položaja ostalih čestica, jer su čestice plina toliko udaljene jedna od druge da interakcije među njima ne mogu uzrokovati neki definirani prostorni odnos tih čestica. Dakle u plinovitom stanju uopće nema korelacije u rasporedu atoma i to je slučaj potpuno nesredene strukture. U kondenziranom stanju interakcije među atomima i molekulama uzrokuju strukturiranje. U tekućinama i amornim čvrstim tijelima postoji samo bliski poredak u malim grupama atoma i u odnosu na položaj jedne takve grupe atoma položaj je svih ostalih grupa (koje su udaljene više od desetak međuatomskih razmaka) potpuno nedefiniran. O položaju daljih atoma u amornom tijelu, u odnosu na jedan uočeni atom, mogu se davati samo statističke izjave na osnovu korelacijske funkcije za međusobni položaj atoma. Stakla su tipične amorfne tvari. Potpuno sredeno stanje tvari predstavljaju kristali, jer u njima postoji korelacija među položajima po vrijednosti udaljenosti atoma. Daleki poredak atoma u kristalu narušava se defektima kristalne rešetke. U realnim kristalima srednja udaljenost među defektima iznosi $0,1 \cdot 10^{-6}$ m, a to je približno hiljadu međuatomskih razmaka. Neke tvari mogu u određenom, karakterističnom za svaku od njih, temperaturnom intervalu biti u stanju tzv. tekućih kristala, koje je međustanje između kristala i tekućine: u tvari koja je po viskoznosti i mehaničkim svojstvima tekućina postoje mala kristalna područja. Na nižim temperaturama tekući kristali prelaze u čvrsto kristalizirano stanje, a na višim temperaturama u običnu tekućinu.

Kristali i amorfna tijela mogu biti sastavljeni od istih strukturnih jedinica i razlikovati se samo po daljini poretka. Npr. kristal kvarca i kremeno staklo imaju istu osnovnu jedinicu, koja se sastoji od atoma silicijuma tetraedarski okruženog atomima kisika. Na sl. 1 je odgovarajuća dvodimenzijska ilustracija tog slučaja. Mnoge čvrste tvari, npr. organski polimeri, predstavljaju djelomično sredene strukture u tom smislu što unutar velikih strukturnih jedinica postoji daleki poredak, dok je odnos tih strukturnih jedinica jedne prema drugoj nedefiniran; takva čvrsta tijela možemo smatrati djelomično kristaliziranim.

Talište kristala predstavlja diskontinuitet između sredenog i nesredenog stanja tvari. Upravo zato amorfne tvari nemaju tačno definirane temperature taljenja: kad temperatura stakla raste, ono postepeno omeškava, postaje plastično i zatim tekuće. Taljenje stakla nije promjena u sredenosti stanja, nego progresivno smanjivanje viskoznosti s porastom temperature. I djelomično kristalizirani polimeri nemaju oštro definirano talište jer