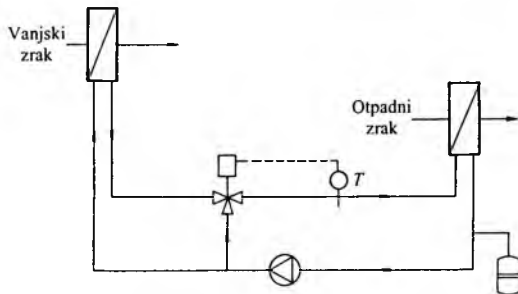


Takav se proces povrata energije ostvaruje i u uređaju s tekućom higroskopskom tvari (vođena otopina litijeva klorida), koja se pumpom kontinuirano prebacuje i prska po ispuni.

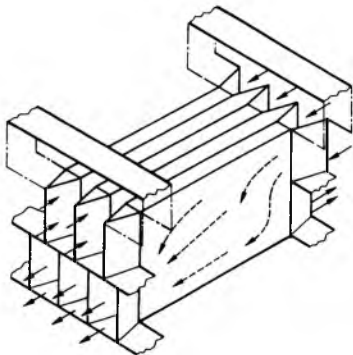
Lamelni izmjenjivač topline. Povrat energije moguće je ostvariti i postavljanjem lamelnih izmjenjivača topline u struju otpadnog i svježeg zraka, koji su međusobno povezani cirkulacijom vode ili smjese vode i nekog sredstva za sniženje leđišta (sl. 29). Takvim se uređajima s cirkulacijom vode redovito prenosi osjetna toplina. Da bi se spriječilo stvaranje inja i zaleđivanje izmjenjivača u struji otpadnog zraka u zimskim uvjetima, cirkulacijski se krug oprema troputnim ventilom, pomoću kojeg se osigurava da temperatura sredstva na ulazu u izmjenjivač s otpadnim zrakom ne padne ispod zadane vrijednosti.



Sl. 29. Povrat energije cirkulacijom vode kroz lamelne izmjenjivače, T osjetnik temperature

Izmjenjivač topline s toplinskim cijevima sastoji se od orebrenih toplinskih cijevi, koje se tako postavljaju da se svakoj jedan kraj nalazi u struji otpadnog, a drugi u struji svježeg zraka. Otpadni i svježi zrak prolaze u protustruji, svaki jednom polovicom izmjenjivača. Toplinska je cijev obično ispunjena nekim rashladnim sredstvom. U dijelu cijevi preko kojeg struji toplija struja sredstvo se isparuje, dok se u drugom dijelu, preko kojeg struji hladnija struja, ukapljuje. Unutar cijevi uspostavlja se cirkulacija pare i kapljevine faze, a time i prijelaz topline s toplije na hladniju zračnu struju.

Pločasti izmjenjivač topline sastoji se od niza paralelnih tankih ploča od aluminijskog ili čeličnog lima, polimernog materijala i dr. Ploče se postavljaju na malom razmaku ($5 \cdot 10$ mm) i tvore niz uskih kanala (sl. 30), a strujanje otpadnog i svježeg zraka može biti istosmjerno, protusmjerno ili unakrsno. Pločasti izmjenjivač topline rekuperativni je izmjenjivač i služi za prijelaz osjetne topline. U zimskim uvjetima može prelaziti i latentna toplina ako je temperatura dovoljno niska da uzrokuje rošenje na strani otpadnog zraka. Pritom, kao i pri povratu energije cirkulacijom vode, treba otkloniti mogućnost zaleđivanja izmjenjivača.



Sl. 30. Pločasti izmjenjivač topline

Poseban se način povrata energije u klimatizacijskim sustavima ostvaruje uporabom dizalice topline (v. *Rashladna tehnika*, TE 11, str. 433).

LIT.: D. J. Crome, B. M. Roberts, *Airconditioning and Ventilation of Buildings*. Pergamon Press, Oxford 1981. – Recknagel, Sprenger, Hönnmann, *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. R. Oldenbourg Verlag, München 1985. – ASHRAE Handbook; Fundamentals, HVAC Systems and Equipment, HVAC Applications. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning, Atlanta 1991–1993.

I. Galaso

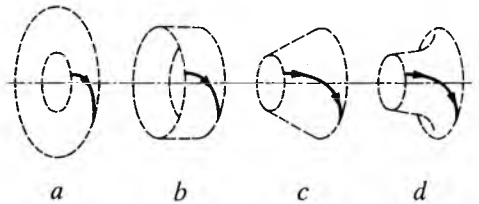
VENTILATOR, stroj za transport plinova i para s malom razlikom izlaznog i ulaznog tlaka. Mehanička energija dovedena ventilatoru predaje se plinovitom fluidu pomoću rotora (okretnog kola) s lopaticama i pretvara dijelom u *potencijalnu* (povećanje tlaka fluida), a dijelom u *kinetičku* energiju (povećanje brzine fluida). Naziv ventilator potječe od latinske riječi *ventilare*, vijati, mahati.

Ventilatori se grade za prirast tlaka od nekoliko desetaka paskala do ~ 25 kPa, no obično je gornja granica ~ 10 kPa. Dobava je plina u rasponu od 0,01 do više od $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ventilator se upotrebljava za provjetravanje prostorija i rudnika, uklanjanje praha (usisaci prašine, piljevine, strugotine itd.), odvođenje štetnih i otrovnih plinova i para, zračno grijanje i klimatizaciju, dopremu zraka za izgaranje (kotlovi), hlađenje strojeva i postrojenja, zračni (pneumatski) transport itd.

Vrste ventilatora. Prema smjeru gibanja čestica plina kroz rotor ventilatora razlikuju se *radijalni* ili *centrifugalni*, *aksijalni* ili *vijčani* i *kombinirani* ventilatori. U rotor radijalnog ventilatora čestica plina ulazi aksijalno, ali se zatim giba u ravnini okomitoj na os rotacije (sl. 1a). U aksijalnom se ventilatoru čestica giba po plaštu valjka (sl. 1b), dok u ventilatorima kombinirane konstrukcije čestica putuje po plaštu stošca (sl. 1c), odnosno tijela koje nastaje rotacijom ravninske krivulje (sl. 1d). Prema dobavnom tlaku razlikuju se niskotlačni (do 1 kPa), srednjotlačni ($1 \cdot 3$ kPa) i visokotlačni ventilatori (više od 3 kPa).

Sl. 1. Strujanje u radijalnim (a), aksijalnim (b) i kombiniranim ventilatorima (c) i (d)



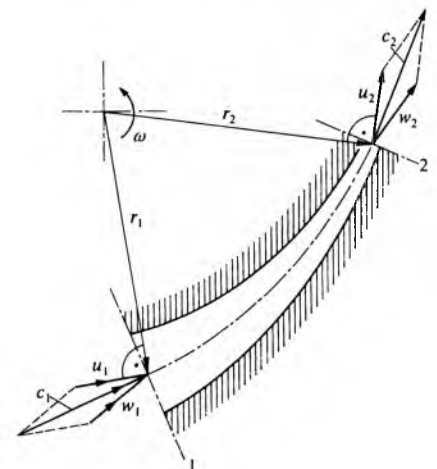
Ventilator može biti na početku, u sredini ili na kraju cjevovoda kojim se transportira plin. Ventilator koji je smješten na kraju cjevovoda tako da usisava plin iz sustava i tlačí ga u atmosferu često se naziva *ekshaustorom*.

Ventilatori se obično izrađuju od čeličnog lima, a u posebnim se okolnostima (agresivni plinovi i pare) upotrebljavaju nehrđajući čelik, aluminij, drvo, polimerni materijali i sl.

Pogon je ventilatora najčešće izravan; osovina je pogonskog stroja (obično elektromotora) čvrsto spojena s osovinom ventilatora ili se rotor ventilatora nalazi izravno na osovini pogonskog stroja. Ako takav pogon nije moguć zbog različite brzine vrtnje strojeva ili iz kojeg drugog razloga, upotrebljava se indirektni pogon remenom, zupčanicima i sl.

Teorijske osnove rada ventilatora. U rotoru fluid prima energiju od rotirajućeg kanala. Apsolutna se brzina c čestice fluida sastoji od relativne brzine w i obodne brzine $u = r\omega$, gdje je r udaljenost čestice od osi rotacije, a ω brzina vrtnje kanala (sl. 2).

Sl. 2. Paralelogrami brzina na ulazu i izlazu elementarnog rotorskog kanala



Osnovna jednačba strujanja nestlačivog idealnog fluida (promjena je gustoće fluida pri strujanju kroz ventilator zanemariva) kroz rotirajući kanal glasi

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + g(z_2 - z_1), \quad (1)$$

gdje je p tlak, w relativna brzina strujanja, u obodna brzina, ρ gustoća fluida, g ubrzanje sile teže, z geodetska visina presjeka kanala, a 1 i 2 su oznake presjeka. *Specifična energija dobave*, odnosno energija po jedinici mase fluida na ulazu u rotirajući kanal, iznosi

$$e_1 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} + g z_1, \quad (2)$$

a na izlazu iz rotirajućeg kanala

$$e_2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + g z_2. \quad (3)$$

Promjena energije po jedinici mase fluida iznosi

$$\Delta e_0 = e_2 - e_1. \quad (4)$$

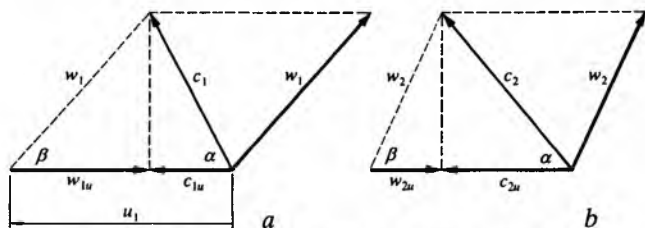
Ako se izrazi (2) i (3) uvrste u (4), dobiva se

$$\Delta e_0 = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g z_2 - g z_1, \quad (5)$$

što, kad se uvrsti u jednadžbu (1), daje

$$\Delta e_0 = \frac{1}{2} [(c_2^2 - c_1^2) + (u_2^2 - u_1^2) + (w_1^2 - w_2^2)]. \quad (6)$$

To je jedan od oblika Eulerove jednadžbe turbostrojeva, iz koje se vidi da razlika energije fluida na izlazu i ulazu ventilatora ovisi o razlici kvadrata apsolutnih, obodnih i relativnih brzina.



Sl. 3. Paralelogrami brzina na ulazu (a) i na izlazu (b) ventilatora

U jednadžbi (6) mogu se na temelju kosinusnog poučka (sl. 3) kvadrati relativnih brzina zamijeniti izrazima $w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1 c_1 \cos \alpha_1$ i $w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2u_2 c_2 \cos \alpha_2$, pa Eulerova jednadžba glasi

$$\Delta e_0 = u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1. \quad (7)$$

Ako se projekcije apsolutnih brzina na pravce obodnih brzina označe sa $c_{1u} = c_1 \cos \alpha_1$ i $c_{2u} = c_2 \cos \alpha_2$, dobiva se

$$\Delta e_0 = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}, \quad (8)$$

ili izraženo kao prirast tlaka

$$\Delta p_0 = \Delta e_0 \rho = \rho (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}). \quad (9)$$

Snaga ventilatora jednaka je umnošku specifične energije dobave Δe_0 i masenog protoka \dot{m} .

$$P_0 = \dot{m} (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}). \quad (10)$$

Specifična energija plina na izlazu ventilatora veća je od one na ulazu pa su vrijednosti Δe_0 i P_0 u jednadžbama (8) i (10) pozitivne. Iz jednadžbe (9) vidi se da će ventilator proizvesti to veći prirast tlaka što je veća gustoća fluida. U istom se ventilatoru prirasti tlaka različitih fluida odnose kao njihove gustoće:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (11)$$

Utjecaj konačnog broja lopatica i gubitci. Navedeni izrazi vrijede za idealni rotor s beskonačnim brojem lopatica kroz koji plin

struji bez gubitaka. Za stvarne se ventilatore konačan broj lopatica i gubitci moraju uzeti u obzir.

Zbog konačnog broja lopatica mijenjaju se obodne komponente apsolutnih brzina na ulazu i izlazu rotora, c_{1u} se povećava, a c_{2u} smanjuje. Teorijski će prirast tlaka u stvarnom ventilatoru, s obzirom na prirast tlaka u idealnom ventilatoru prema jednadžbi (9), biti umanjen *koeficijentom djelovanja lopatica* ε :

$$\Delta p_{\text{teor}} = \varepsilon \Delta p_0 = \varepsilon \rho (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}). \quad (12)$$

Teorijska snaga ventilatora iznosi

$$P_{\text{teor}} = \varepsilon P_0. \quad (13)$$

Hidraulična korisnost η_h obuhvaća gubitke Δp_g zbog trenja, vrtloženja i otklona mlaza pri strujanju plina kroz ventilator. Hidraulična je korisnost omjer stvarnog prirasta tlaka Δp i teorijskog prirasta tlaka Δp_{teor} :

$$\eta_h = \frac{\Delta p}{\Delta p_{\text{teor}}} = \frac{\Delta p_{\text{teor}} - \Delta p_g}{\Delta p_{\text{teor}}}. \quad (14)$$

Obujamni protok \dot{V}_0 kroz rotor veći je od protoka \dot{V} na izlazu ventilatora za iznos *propuštanja* \dot{V}_p . Gubitci protoka određuju *obujamnu korisnost* η_v :

$$\eta_v = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_0} = \frac{\dot{V}}{\dot{V} + \dot{V}_p}. \quad (15)$$

Od ukupne snage P privedene osovini ventilatora jedan se dio u obliku mehaničkih gubitaka P_m troši na svladavanje trenja u ležajima rotora. *Mehanička korisnost* određena je izrazom

$$\eta_m = \frac{P - P_m}{P}. \quad (16)$$

Ukupna (efektivna) korisnost η ventilatora jest

$$\eta = \eta_h \eta_v \eta_m, \quad (17)$$

a snaga P koju treba dovesti osovini ventilatora za prirast tlaka Δp iznosi

$$P = \frac{P_{\text{teor}}}{\eta} = \frac{\dot{V} \Delta p}{\eta_h \eta_v \eta_m}. \quad (18)$$

Zakoni sličnosti i bezdimenzijski koeficijenti. Četiri osnovna podatka na temelju kojih se konstruira ili odabire ventilator jesu: prirast tlaka Δp , protok \dot{V} , brzina vrtnje n i *gustoća* ρ fluida koji protječe ventilatorom. Te su veličine međusobno povezane bezdimenzijskim *koeficijentom brzohodnosti* σ koji glasi

$$\sigma = \frac{1}{28,5} \dot{V}^{-1/2} \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)^{3/4} n, \quad (19)$$

gdje je \dot{V} obujamni protok (m^3/s), Δp prirast tlaka (Pa), ρ gustoća fluida (kg/m^3) a n brzina vrtnje (min^{-1}). Koeficijent brzohodnosti ima isto značenje koje u ostalih hidrauličnih strojeva (turbina i pumpi) ima *specifična brzina vrtnje* ili *brzohodnost* n_q :

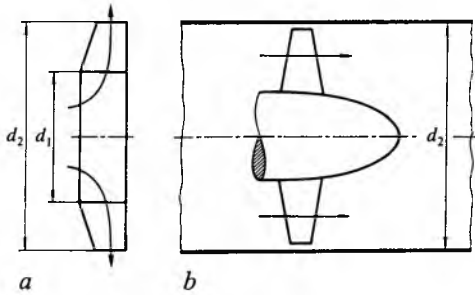
$$n_q = \frac{n \sqrt{\dot{V}}}{H^4}, \quad (20)$$

gdje je $H = e/g$ dobavna visina. Naime, n_q je brzina vrtnje geometrijski sličnog hidrauličnog stroja koji kod visinske razlike od $H = 1 \text{ m}$ stupca fluida troši ili dobavlja obujamni protok $\dot{V} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$. Ako se u (20) uvrsti $H = \Delta p / \rho g$ i usporedi s (19), dobiva se

$$n_q \approx 158 \sigma. \quad (21)$$

Koeficijentom brzohodnosti potpuno je određen najprikladniji tip ventilatora za određene namjene. Za male se brzohodnosti upotrebljavaju radijalni, a za velike aksijalni ventilatori. S povećanjem brzohodnosti smanjuje se broj lopatica i prirast tlaka, a povećava se dobavna količina.

Osim koeficijenta brzohodnosti i ostali su bezdimenzijski koeficijenti jednaki u sličnih ventilatora. Dva su ventilatora slična ako imaju jednake konstrukcijske kutove, ako su njihove linearne dimenzije razmjerne i ako im je omjer brzina fluida u homolognim točkama konstantan i jednak u čitavom području strujanja. Prva dva uvjeta određuju geometrijsku sličnost, dok treći određuje hidrauličnu sličnost.



Sl. 4. Presjek kroz radijalni (a) i aksijalni (b) ventilator. d_1 promjer ulaznog presjeka, d_2 promjer izlaznog presjeka

Koeficijent protoka φ omjer je karakteristične brzine fluida u' i karakteristične brzine stroja u :

$$\varphi = \frac{u'}{u}. \quad (22)$$

Karakteristična brzina fluida jest zamišljena brzina kojom bi fluid s protokom V strujao kroz izlazni presjek promjera d_2 (sl. 4) i iznosi

$$u' = \frac{\dot{V}}{\pi d_2^2 / 4}. \quad (23)$$

Karakteristična brzina stroja jest obodna brzina u_2 na istom promjeru d_2 . Koeficijent protoka iznosi

$$\varphi = \frac{\dot{V}}{\pi d_2^2 / 4 u_2}. \quad (24)$$

Koeficijent tlaka ψ omjer je ukupnog prirasta tlaka Δp i dinamičkog tlaka obodne brzine u_2 na promjeru d_2 :

$$\psi = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} u_2^2}. \quad (25)$$

Koeficijent snage λ omjer je stvarno potrebne snage $P = \Delta p \dot{V} / \eta$ i umnoška $\frac{\pi d_2^2}{4} u_2^3 \frac{\rho}{2}$, pa se dobiva

$$\lambda = \frac{\dot{V} \Delta p}{\frac{\pi d_2^2}{4} u_2^3 \frac{\rho}{2} \eta} = \frac{\varphi \psi}{\eta}. \quad (26)$$

Dimenzijskom se analizom iz izraza (19), (24) i (25) dobiva

$$\sigma = \varphi^2 \psi^{-3/4} = \frac{\sqrt{\varphi}}{\sqrt[4]{\psi^3}}. \quad (27)$$

Zakoni afiniteta pokazuju kako se mijenjaju osnovne veličine (\dot{V} , Δp , P) ventilatora kada mu se promijeni brzina vrtnje n . Ti su odnosi dani sljedećim jednažbama:

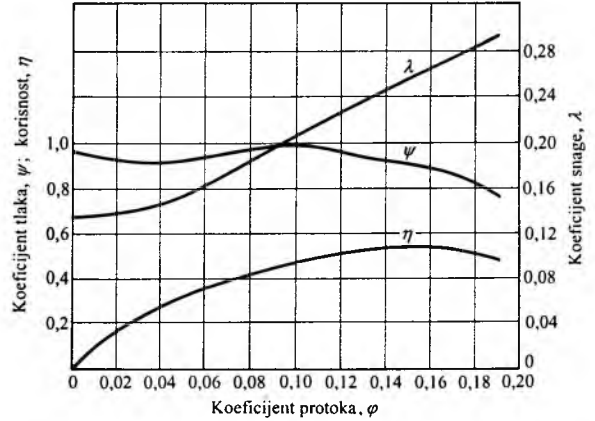
$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (28)$$

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2, \quad (29)$$

$$\frac{P_1}{P_2} \approx \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3. \quad (30)$$

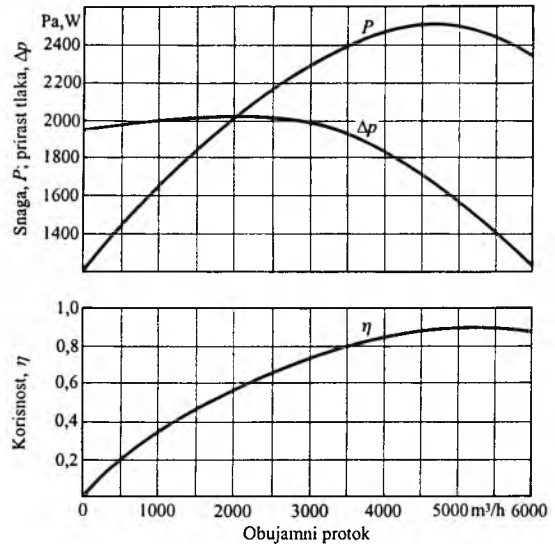
U izrazu (30) upotrijebljen je znak približne jednakosti jer ventilator pri različitoj brzini vrtnje nema istu korisnost η .

Karakteristike ventilatora jesu krivulje koje pokazuju međusobnu ovisnost pojedinih karakterističnih veličina ventilatora. Dobivaju se ispitivanjem, obično uz stalnu brzinu vrtnje, pri čemu se mijenja protok. Mjere se prirast tlaka i snaga primljena od pogonskog stroja, dok se korisnost računa prema izrazu (18). Krivulje se crtaju bilo bezdimenzijski, bilo u odabranim jedinicama.



Sl. 5. Primjer krivulja bezdimenzijskih karakteristika radijalnog ventilatora

Tri su tipične bezdimenzijske krivulje (sl. 5): za tlak $\psi = f(\varphi)$, za snagu $\lambda = f(\varphi)$ i za korisnost $\eta = f(\varphi)$. Dimenzijski je oblik tih krivulja (sl. 6): $\Delta p = f(\dot{V})$, $P = f(\dot{V})$ i $\eta = f(\dot{V})$.

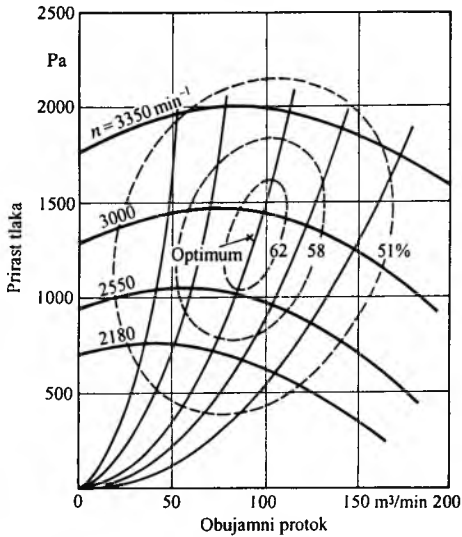


Sl. 6. Primjer krivulja dimenzijskih karakteristika radijalnog ventilatora

Ispitivanjem ventilatora pri različitim brzinama vrtnje (sl. 7) dobiva se niz krivulja $\Delta p = f(\dot{V})$. Iz zakona afiniteta slijedi odnos $\Delta p_1 / \Delta p_2 = (\dot{V}_1 / \dot{V}_2)^2$ koji prikazan grafički daje krivulju (parabolu) otpora sustava. Spajanjem točaka iste korisnosti η dobivaju se izokerde, koje se nazivaju i školjkastim krivuljama zbog nepravilna ovalna oblika.

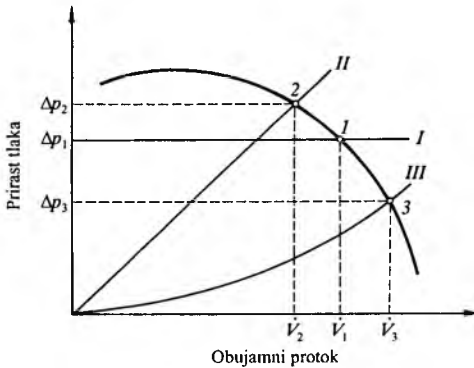
Pogonska (radna) točka ventilatora određena je presjecištem krivulje $\Delta p = f(\dot{V})$ i krivulje otpora sustava. Ventilator mora svladati cjelokupan otpor, koji se sastoji od statičkog otpora (stalni tlak u nekom prostoru, otpor pri prolasku plina kroz sloj kapljevine i sl.), otpora strujanja (otpor trenja u cjevovodu i lokalni gubitci) i izlaznoga gubitka (koji se katkad pribraja otporima strujanja), pa vrijedi

$$\Delta p = \Delta p_{st} + \Delta p_t + \sum_{n=1}^m \left(\frac{\xi_n \rho c_n^2}{2} \right) + \frac{\rho c_1^2}{2}, \quad (31)$$



Sl. 7. Dijagram izo-kerda radijalnog ventilatora

gdje je Δp_{st} statički otpor, Δp_t otpor trenja u cjevovodu, ξ koeficijent lokalnog otpora, c brzina strujanja, c_1 izlazna brzina, a ρ gustoća plina.

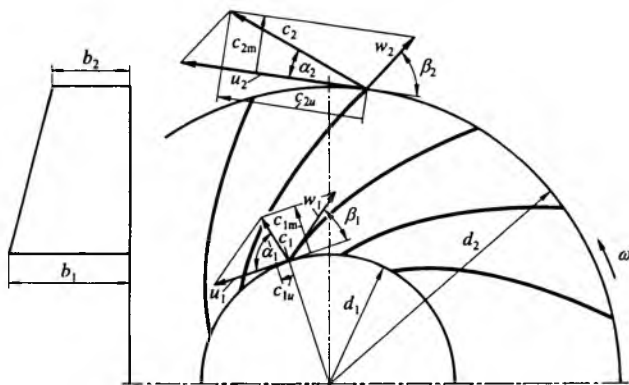


Sl. 8. Pogonske točke ventilatora pri različitim otporima. I statički otpor, II otpor trenja pri laminarnom strujanju, III otpor trenja pri turbulentnom strujanju

Statički otpor Δp_{st} ne ovisi o brzini strujanja pa je u dijagramu $\Delta p = f(V)$ prikazan paralelom s apscisom (sl. 8). Strujanje plina u cjevovodu može biti laminarno ili turbulentno. Otpor trenja pri laminarnom strujanju ovisi o brzini strujanja c i iznosi $\Delta p_{lam} = k_1 c$, gdje je k_1 konstanta cjevovoda koja ovisi o obliku i hrapavosti cjevovoda. Krivulja otpora prikazana je u dijagramu pravcem kojemu nagib ovisi o konstanti k_1 . Otpor pri turbulentnom strujanju ovisi o kvadratu brzine strujanja i iznosi $\Delta p_{turb} = k_2 c^2$, gdje je k_2 konstanta cjevovoda. Krivulja otpora pri turbulentnom strujanju jest parabola kojoj zakrivljenost ovisi o konstanti k_2 . Ukupni se otpor sustava može sastojati od jednoga ili kombinacije navedenih otpora.

Radijalni ventilatori

Eulerova jednadžba radijalnih ventilatora. Na shemi rotora radijalnog ventilatora s unatrag zakrivljenim lopaticama (sl. 9)



Sl. 9. Dijagrami brzina na ulazu i izlazu rotora radijalnog ventilatora

u crtani su dijagrami brzina na ulazu (indeks 1) i na izlazu (indeks 2) međulopatičnog kanala. Na ulazu u rotor brzina plina c_1 sastoji se od obodne brzine $u_1 = d_1 n \pi / 60$ i relativne brzine w_1 (brzine s obzirom na lopaticu). Sa c_{1m} označena je meridionalna komponenta brzine, tj. komponenta brzine u osnovnom (radijalnom) smjeru strujanja. Na izlazu lopatičnog kanala sastavljaju se obodna brzina u_2 i relativna brzina w_2 u apsolutnu brzinu c_2 s kojom fluid izlazi iz rotora. Množenjem Eulerove jednadžbe (6) s gustoćom ρ fluida dobiva se ukupni prirast tlaka Δp_0 :

$$\Delta p_0 = \Delta e_0 \rho = \frac{\rho}{2} [(u_2^2 - u_1^2) + (w_1^2 - w_2^2) + (c_2^2 - c_1^2)]. \quad (32)$$

Prvi član $\rho(u_2^2 - u_1^2)/2$ daje prirast tlaka zbog djelovanja centrifugalne sile. Na količinu fluida mase dm koja se nalazi u rotirajućem kanalu na polumjeru r (sl. 10) djeluje centrifugalna sila:

$$dF_c = dm r \omega^2 = b ds dr \rho r \omega^2, \quad (33)$$

gdje je b širina kanala (sl. 9), ρ gustoća fluida, a $\omega = \pi n / 30$ kutna brzina. Centrifugalna sila pri pomaku dr u radijalnom smjeru uzrokuje porast tlaka koji djeluje na plohu površine $b ds$:

$$dp = \rho r \omega^2 dr, \quad (34)$$

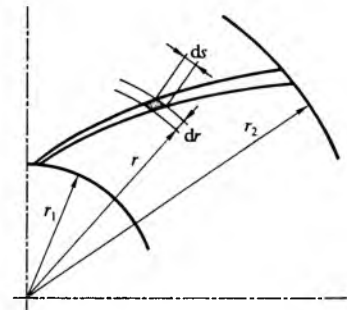
iz čega se integracijom od unutrašnjeg polumjera r_1 do vanjskog polumjera r_2 dobiva prirast tlaka:

$$\Delta p' = \int_{r_1}^{r_2} dp = \rho \omega^2 \int_{r_1}^{r_2} r dr = \rho \omega^2 \left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right) = (u_2^2 - u_1^2) \frac{\rho}{2}. \quad (35)$$

Drugi član izraza (32) pokazuje prirast tlaka u rotoru zbog smanjenja relativne brzine sa w_1 na w_2 . Kanali se obično proširuju pa se prema Bernoullijevoj jednadžbi dobiva prirast tlaka u rotoru:

$$\Delta p'' = (w_1^2 - w_2^2) \frac{\rho}{2}, \quad (36)$$

uz pretpostavku da je rotor idealan i bez gubitaka. U stvarnom je rotoru taj prirast nešto manji zbog trenja u kanalima.



Sl. 10. Djelovanje centrifugalne sile na fluid u lopatičnom kanalu

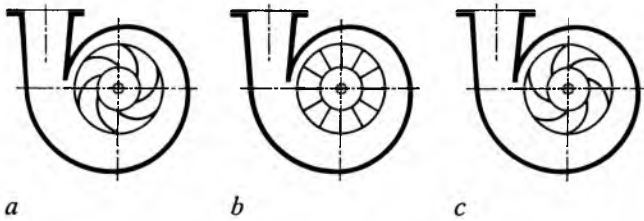
Treći član jednadžbe (32) pokazuje povećanje kinetičke energije fluida pri prolasku kroz rotor. Taj se iznos kinetičke energije može u odvodnom kanalu (statorski lopatični difuzor, spiralno kućište) pretvoriti u potencijalnu energiju smanjivanjem izlazne brzine c_2 na c_1 , čime se dobiva prirast tlaka:

$$\Delta p''' = (c_2^2 - c_1^2) \frac{\rho}{2}. \quad (37)$$

Fluid u rotor radijalnog ventilatora ulazi radijalno, što znači da je obodna komponenta apsolutne brzine $c_{1u} = 0$, pa prirast tlaka prema jednadžbi (9) iznosi

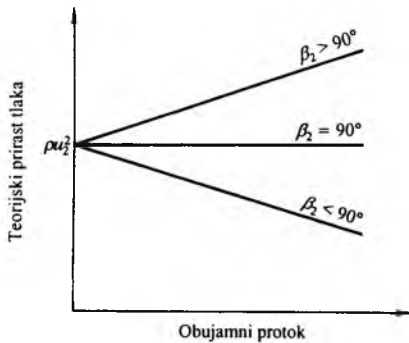
$$\Delta p_0 = \rho u_2 c_{2u}. \quad (38)$$

Vrste rotora i zakrivljenost lopatica. Iz jednadžbe (38) vidi se da prirast tlaka u ventilatoru ovisi o izlaznom promjeru rotora d_2 (jer je $u_2 = d_2 \pi n / 60$), brzini vrtnje n te o veličini i smjeru apsolutne izlazne brzine c_2 , dakle o izlaznom kutu β_2 lopatice. S ob-



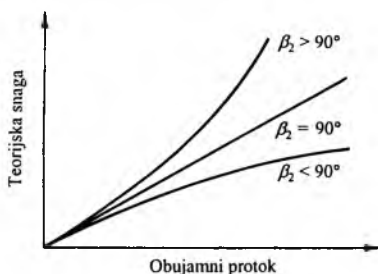
Sl. 11. Vrste rotorskih lopatica. a) lopatice zakrivljene prema naprijed, b) ravne (radijalne) lopatice, c) lopatice zakrivljene unatrag

zirom na izlazni kut β_2 razlikuju se tri vrste rotora (sl. 11): s prema naprijed zakrivljenim lopaticama ($\beta_2 > 90^\circ$), s ravnim (radijalnim) lopaticama ($\beta_2 = 90^\circ$), te s unatrag zakrivljenim lopaticama ($\beta_2 < 90^\circ$).



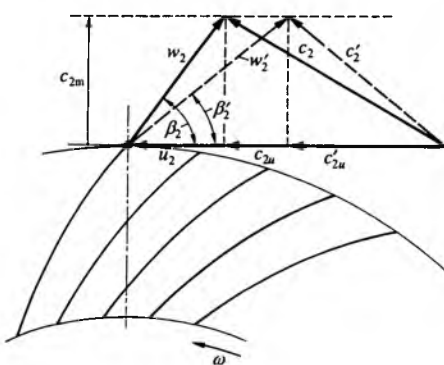
Sl. 12. Ovisnost teorijskog prirasta tlaka $\Delta p_{\text{teor}} = f(V)$ o izlaznom kutu rotorskih lopatica

U jednakim uvjetima rotor s prema naprijed zakrivljenim lopaticama daje najveći prirast tlaka, dakle najveći koeficijent tlaka ψ , ali ima najmanju hidrauličnu korisnost η_h . Rotor s unatrag zakrivljenim lopaticama ima najmanji koeficijent tlaka, no zato je hidraulična korisnost najveća. Naime, što je veća zakrivljenost lopatica prema naprijed, to je veća kinetička energija fluida na izlazu iz rotora, a njezina pretvorba u statički tlak uzrokuje velike gubitke (sl. 12 i 13).



Sl. 13. Ovisnost teorijske snage $P_{\text{teor}} = f(V)$ o izlaznom kutu rotorskih lopatica

Utjecaj konačnog broja lopatica. Eulerova jednadžba vrijedi za rotor s beskonačnim brojem lopatica i bez gubitaka. Zbog konačnog broja lopatica s konačnom debljinom u radijalnim se ventilatorima pojavljuje tzv. *zanošenje brzine* na izlazu rotora, koje je to veće što je manji broj lopatica, tj. što su lopatice više razmaknute. Naime, što je razmak lopatica veći, to je čestica fluida slabije vođena. Na česticu fluida osim centrifugalne djeluju i druge sile (centrifugalna sila zbog zakrivljenosti kanala, Coriolisova sila) kao i neki drugi faktori (npr. granični sloj uz



Sl. 14. Utjecaj konačnog broja lopatica na prirast tlaka

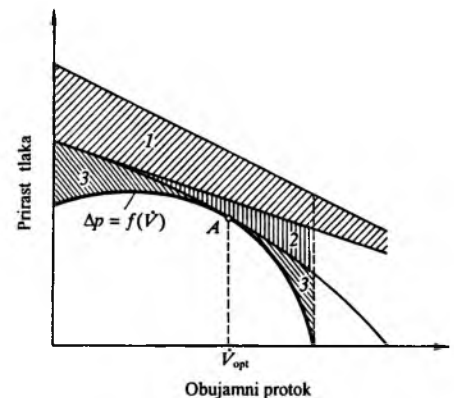
površinu lopatice), pa se smanjuju kut β_2 i brzina c_2 (sl. 14). Budući da se tada smanjuje i komponenta c_{2u} na c'_{2u} , bit će prirast tlaka

$$\Delta p_{\text{teor}} = \rho u_2 c'_{2u} \quad (39)$$

što je, prema Eulerovoj jednadžbi (38), manje od tlaka Δp_0 . Omjer tih dvaju tlakova jest *koeficijent djelovanja lopatica* ϵ , koji za radijalne ventilatore iznosi

$$\epsilon = \frac{\Delta p_{\text{teor}}}{\Delta p_0} = \frac{c'_{2u}}{c_{2u}} \quad (40)$$

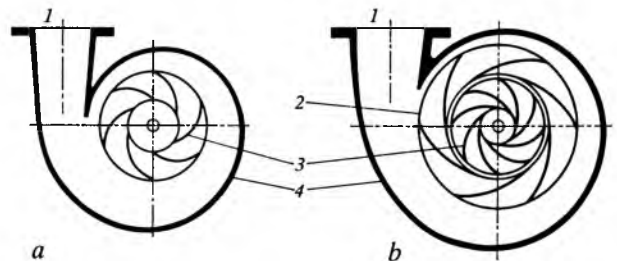
Gubitci i radne karakteristike. Osim prije spomenutih, u ventilatoru nastaju i gubitci zbog udara ulaznog mlaza fluida o lopatice. Lopatica je, naime, konstruirana za nesudarni ulaz fluida, ali samo kada ventilator radi uz protok i prirast tlaka za koji je projektiran. To je radno stanje određeno *proračunskom točkom* na karakteristici, obično onom točkom u kojoj krivulja korisnosti ima maksimum. U svim ostalim slučajevima, dakle pri većem ili manjem protoku od \dot{V}_{opt} , fluid ulazi u rotor udarno. Smanjivanjem ili povećavanjem protoka smanjuje se ili povećava apsolutna ulazna brzina c_1 pa se smjer relativne brzine w_1 više ne podudara sa smjerom ulaznog ruba lopatice. Na taj način nastaju *gubitci sudara*.



Sl. 15. Gubitci u radijalnom ventilatoru i stvarna karakteristika tlaka. 1) gubitci zbog konačnog broja lopatica, 2) gubitci zbog trenja u kanalima, 3) gubitci sudara, A) proračunska točka

Na slici 15 prikazano je kako se od teorijske karakteristike ventilatora s unatrag zakrivljenim lopaticama dobiva stvarna (pogonska) karakteristika tlaka $\Delta p = f(\dot{V})$.

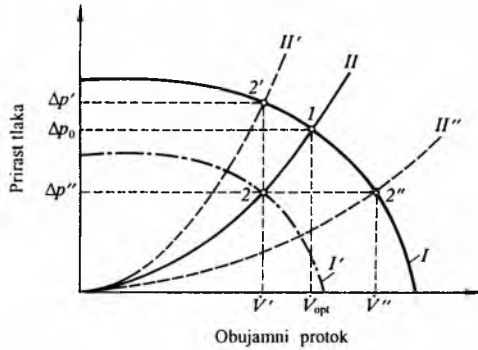
Provodno kolo služi za smanjivanje brzine mlaza fluida nakon izlaska iz rotora, tj. za pretvaranje kinetičke energije u potencijalnu (porast tlaka). Sprovodno kolo može biti samo spiralno kućište (sl. 16a) ili difuzorsko kućište s ugrađenim statorskim lopaticama (sl. 16b). Spiralno je kućište najjednostavnije provodno kolo s tek malo slabijom djelotvornošću od difuzorskih lopatica, te se stoga gotovo redovito upotrebljava. Poprečni je presjek spirale najčešće u obliku pravokutnika ili kružnice. Za veće tlakove upotrebljavaju se lijevana spiralna kućišta kružnog presjeka, dok se kućišta za manje tlakove izrađuju od lima. U ekshatastorima se provodno kolo često izostavlja.



Sl. 16. Presjek radijalnog ventilatora sa spiralnim kućištem (a) i s difuzorskim kućištem (b). 1) izlazni otvor, 2) difuzor, 3) rotor, 4) kućište

Regulacija ventilatora. Zbog različitih je razloga često tijekom rada ventilatora potrebno promijeniti protok (dobavnu količinu plina), prirast tlaka ili oboje. To se uglavnom postiže izravnom regulacijom protoka ili promjenom brzine vrtnje.

Izravna regulacija protoka jednostavna je jer se regulacijski uređaj sastoji samo od zasuna ili ventila, ali nije ekonomična. To se vidi iz dijagrama na slici 17, gdje je krivulja *I* karakteristika tlaka $\Delta p = f(V)$ ventilatora za određenu brzinu vrtnje *n*, dok je krivulja *II* karakteristika priključnog otpora (npr. cjevovoda). Ventilator je projektiran da radi u točki *I*, sjecištu krivulja *I* i *II*, dobavljajući količinu V_{opt} , uz prirast tlaka Δp_0 . Ako treba smanjiti protok na V' , tada se ili prigušuje mlaz fluida ili se višak fluida ispušta u okoliš.

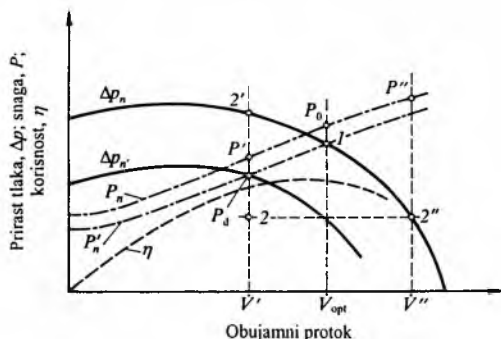


Sl. 17. Regulacija radnog ventila prigušivanjem, ispuštanjem suviška dobave ili promjenom brzine vrtnje rotora

Prigušivanje se obavlja tako da se pritvori zasun smješten u tlačnom (rjeđe u usisnom) vodu ventilatora. Tako se povećava priključni otpor sve dok ne poraste toliko da presjecište nove krivulje otpora *II'* s karakteristikom ventilatora *I* ne padne u točku *2'*, koja odgovara protoku V' , gdje ventilator radi s prirastom tlaka $\Delta p'$.

Isto se postiže ako se iz tlačnog voda ispušta suvišak dobave fluida u okoliš ili se dio dobave vraća na usisnu stranu ventilatora. Otvaranjem ispusta smanjuje se otpor priključen na ventilator, sve dok presjecište nove karakteristike *II''* s karakteristikom ventilatora *I* ne bude u točki *2''*. Ventilator doduše dobavlja količinu V'' uz prirast tlaka $\Delta p''$, no u cjevovod ulazi samo količina V' , koja odgovara točki 2 na karakteristici cjevovoda pri tlaku $\Delta p'$. Takvom se regulacijom troši suvišna snaga jer se umjesto potrebne količine V' dobavlja količina V'' .

Regulacija promjenom brzine vrtnje rotora mnogo je ekonomičnija. Dobava V' postiže se smanjenjem brzine vrtnje na n' , tako da nova karakteristika ventilatora *I'* prolazi točkom 2 na karakteristici otpora *II*. Takva je regulacija vrlo ekonomična jer se dobavlja samo potrebna količina V' uz potreban prirast tlaka $\Delta p'$. Međutim, ekonomičnost cijelog sustava ovisi o mogućnosti regulacije brzine vrtnje pogonskog stroja. Regulacija je najekonomičnija kad se brzina vrtnje pogonskog stroja može mijenjati bez gubitaka. Za pogon ventilatora većinom se upotrebljava elektromotor trofazne struje, no najdjelotvornija regulacija promjenom brzine vrtnje bila je ranije dosta složena (npr. regulacijski transformator, uklapanje otpora u rotorski strujni krug, kolektorski motor i sl.). Danas je regulacija vrlo jednostavna: tiristorski se mijenja frekvencija električne struje, a time i brzina vrtnje.



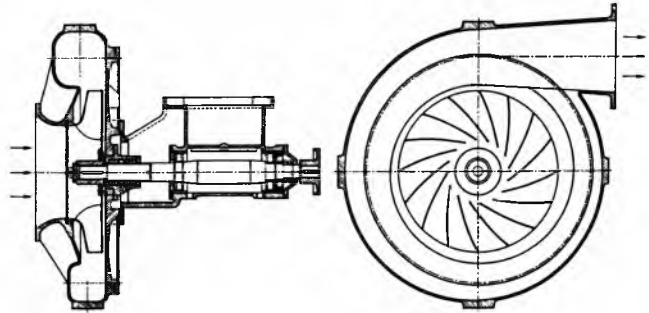
Sl. 18. Usporedba različitih vrsta regulacije ventila

Ekonomičnost pojedinih vrsta regulacije vidi se iz dijagrama u kojem su uz krivulju korisnosti η ucrtane i krivulje $\Delta p = f(V)$ i

$P = f(V)$ za brzine vrtnje n i n' (sl. 18). Ako se prigušivanjem smanji protok V_{opt} na protok V' , smanjit će se i snaga potrebna za pogon ventilatora sa P_0 na P' . Smanji li se protok ispuštanjem viška dobave, potrebna će se snaga povećati na P'' . I konačno, smanji li se protok smanjivanjem brzine vrtnje sa n na n' , za pogon će biti potrebna snaga P_d . Vidi se da regulacija ispuštanjem suviška dobave nije prikladna za radijalne ventilatore, dok se za manje snage može primijeniti regulacija prigušivanjem.

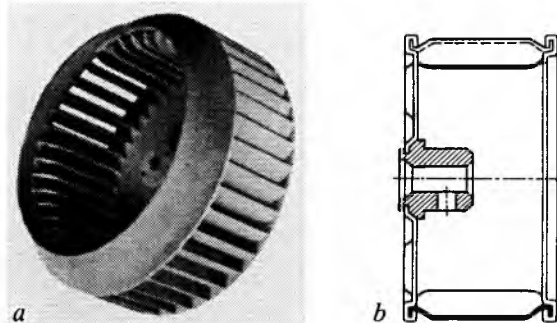
Osim tih vrsta regulacije ima i drugih, npr. regulacija pomoću okretnih privodnih lopatica, koja se rijetko upotrebljava i to samo za veće jedinice.

Izvedbe radijalnog ventilatora. Na slici 19 prikazan je presjek srednjotlačnog radijalnog ventilatora s kućištem od lijevanog željeza.



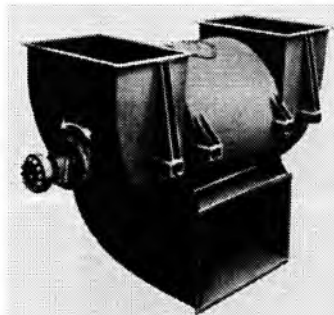
Sl. 19. Presjek srednjotlačnog radijalnog ventilatora

Niskotlačni radijalni ventilator za mali protok ima tzv. *impulzni rotor* (rotor *Sirocco*) s velikim brojem vrlo kratkih, prema naprijed zakrivljenih lopatica (sl. 20). Prednosti su takva rotora miran hod i razmjerno velik protok, a nedostatak mu je dosta mala korisnost (50%).

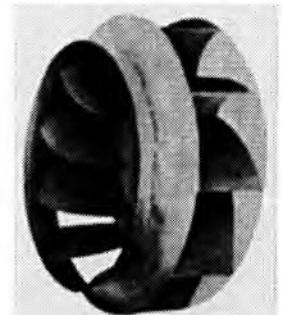


Sl. 20. Ventilator s rotorom tipa Sirocco. a pogled, b radijalni presjek

Za veći se protok često upotrebljava *udvojeni radijalni ventilator* (sl. 21), koji na zajedničkoj osovini ima dvostruki rotor. Svaki rotor ima poseban usisni vod, a tlačni (izlazni) vod je zajednički.



Sl. 21. Udvojeni radijalni ventilator

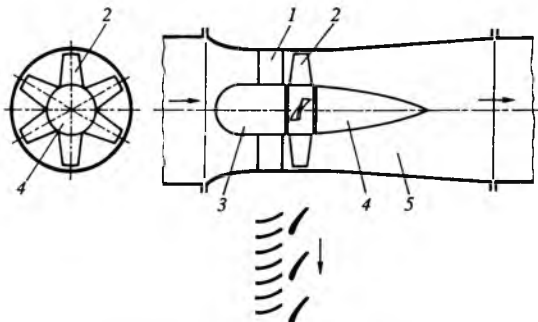


Sl. 22. Rotor radijalno-aksijalnog ventilatora s prostorno zakrivljenim lopaticama

Kombinirani *radijalno-aksijalni ventilatori* čine prijelaz prema aksijalnim ventilatorima. Karakteristika su im prostorno zakrivljene lopatice rotora (sl. 22).

Aksijalni ventilatori

Aksijalni se ventilator sastoji od statora, rotora, stožastog nastavka glavine i difuzora (sl. 23). Osnovni je dio rotor, dok ostali dijelovi služe za poboljšanje korisnosti pa se katkad, radi jednostavnije konstrukcije, mogu i izostaviti. Lopatice rotora oblikovane su tako da sve čestice fluida imaju isti prirast energije.



Sl. 23. Aksijalni ventilator. 1 stator, 2 rotor, 3 glavina, 4 stožasti nastavak glavine, 5 difuzor

Eulerova jednadžba aksijalnih ventilatora. Čestica fluida na ulazu u rotor aksijalnog ventilatora ima apsolutnu brzinu c_1 , koja se sastoji od obodne brzine u_1 i relativne brzine w_1 (sl. 24). Relativna brzina w_1 mijenja se u lopatičnom kanalu u w_2 i s obodnom brzinom u_2 daje apsolutnu izlaznu brzinu c_2 . Budući da čestice fluida struje samo u aksijalnom smjeru, bit će obodne brzine čestice na ulazu i izlazu rotora jednake, $u_1 = u_2 = u$, tako da Eulerova jednadžba (9) dobiva oblik

$$\Delta p_0 = \rho u (c_{2u} - c_{1u}). \quad (41)$$

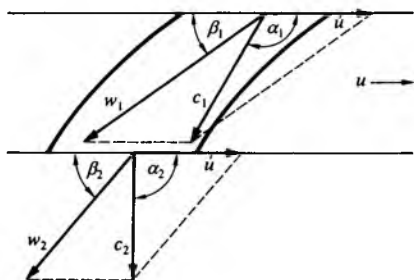
Označi li se otklon brzine sa $\Delta c_u = c_{2u} - c_{1u}$, Eulerova jednadžba za aksijalne ventilatore glasi

$$\Delta p_0 = \rho u \Delta c_u. \quad (42)$$

I drugi je oblik Eulerove jednadžbe, izraz (32), za aksijalne ventilatore izmijenjen. Budući da je $u_1 = u_2 = u$, dobiva se

$$\Delta p_0 = \frac{\rho}{2} [(w_1^2 - w_2^2) + (c_2^2 - c_1^2)]. \quad (43)$$

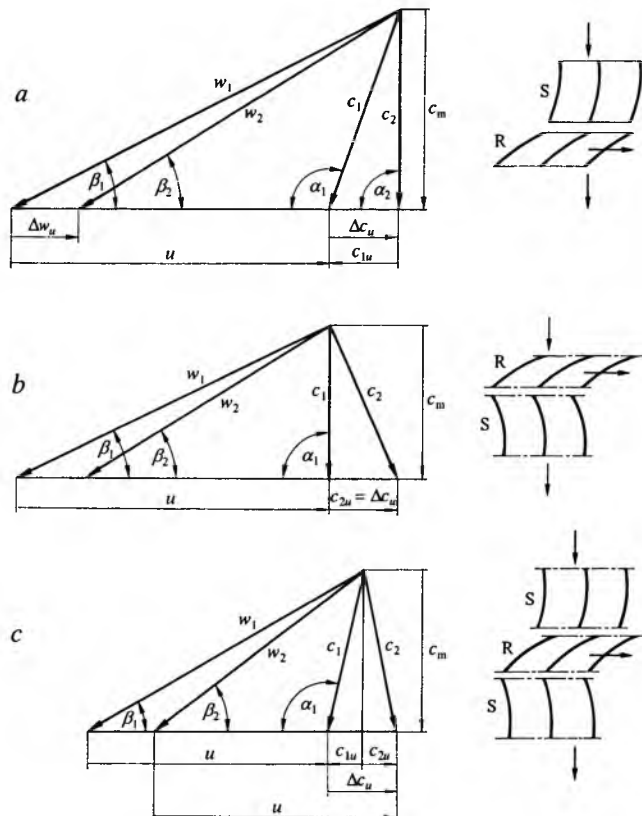
Iz jednadžbe (43) vidi se da u aksijalnim ventilatorima nema prirasta tlaka zbog djelovanja centrifugalne sile. Zato se aksijalni ventilatori upotrebljavaju kada je potreban manji prirast tlaka i veći protok.



Sl. 24. Dijagram brzina fluida pri prolasku kroz rotirajući niz lopatica

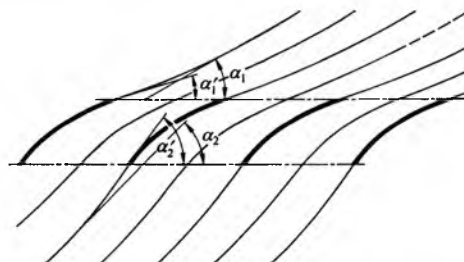
Manji ventilatori (katkad i veći) nemaju stator, tj. nepokretan niz lopatica, pa zbog tangencijalne komponente apsolutne izlazne brzine nastaju gubici i smanjuje se korisnost. Korisnost ventilatora povećava se ugradnjom niza statorskih lopatica bilo ispred, iza ili s obje strane rotora. Struja fluida zakreće se tako da izlazna brzina ima samo aksijalnu komponentu (sl. 25).

Utjecaj konačnog broja lopatica i gubitci. U stvarnom je aksijalnom ventilatoru s konačnim brojem lopatica čestica koja je udaljenija od površine lopatice lošije vođena i djeluje na susjedne čestice koje su bliže lopatici. Zbog toga se strujnice savijaju pred ulazom u rotor i na izlazu iz njega. Dakle, nastaje slično zanošenje mlaza kao u radijalnih ventilatora, samo što se to u aksijal-



Sl. 25. Raspored statorskog (S) i rotorskog (R) niza lopatica s dijagramom brzina. a stator ispred rotora, b stator iza rotora, c rotor između dvaju statora

nim ventilatorima zbiva i na ulazu i na izlazu rotora (sl. 26). To znači, ako su kutovi lopatica na ulazu i na izlazu α_1 i α_2 , mlaz će se otkloniti za kut koji je manji od razlike kutova α_1 i α_2 . Dakle, da bi otklon bio $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, moraju se lopatice izraditi s većim otklonom, tako da bude $\alpha'_1 < \alpha_1$ i $\alpha'_2 > \alpha_2$.



Sl. 26. Otkloni strujnica na ulazu i izlazu rotora aksijalnog ventilatora

Gubici aksijalnog ventilatora jednaki su gubiticima radijalnog ventilatora, pa za prirast tlaka Δp vrijedi izraz

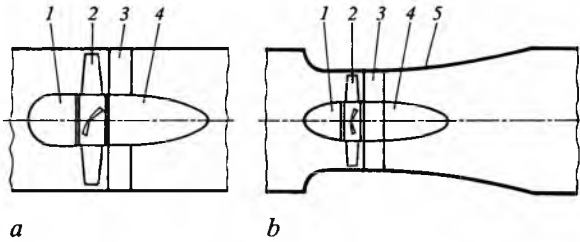
$$\Delta p = \eta_h \rho u \Delta c_u, \quad (44)$$

dok se potrebna snaga pri protoku \dot{V} računa prema izrazu (18).

Optimalna se korisnost η postiže kada svaka čestica fluida prima od lopatica jednaku količinu energije. Lopatice stoga moraju biti izrađene tako da daju različiti otklon brzina Δc_u , već prema polumjeru r na kojem čestica struji kroz rotor.

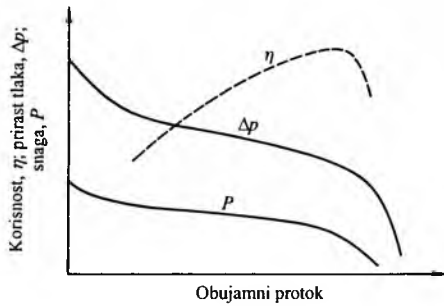
S povećavanjem obodne brzine mora se Δc_u smanjivati, i to od korijena prema vrhu lopatice, što znači da će lopatica biti prostorno zakrivljena.

Provodno kolo, kao i u radijalnim ventilatorima, nije prijeko potrebno. Sastoji se od statora s nepomičnim nizom lopatica i od difuzora. Difuzor se oblikuje tako da se iza glavine postavi stožasti nastavak (sl. 27a). Najčešće je priključna cijev ventilatora u obliku stošca, pa se dobiva dvostruki difuzor (sl. 27b). Difuzor se primjenjuje samo za ventilatore s većim prirastom tlaka i velikim promjerom glavine.



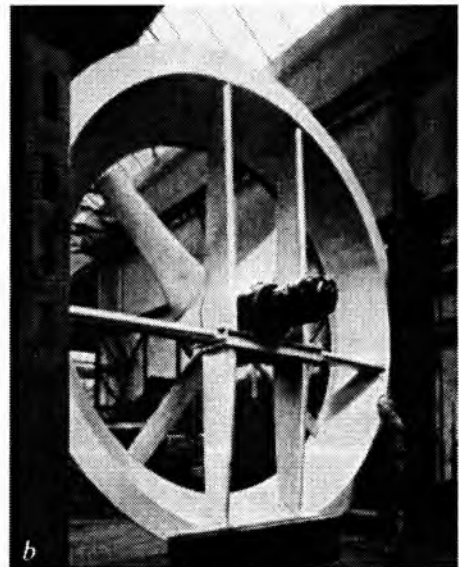
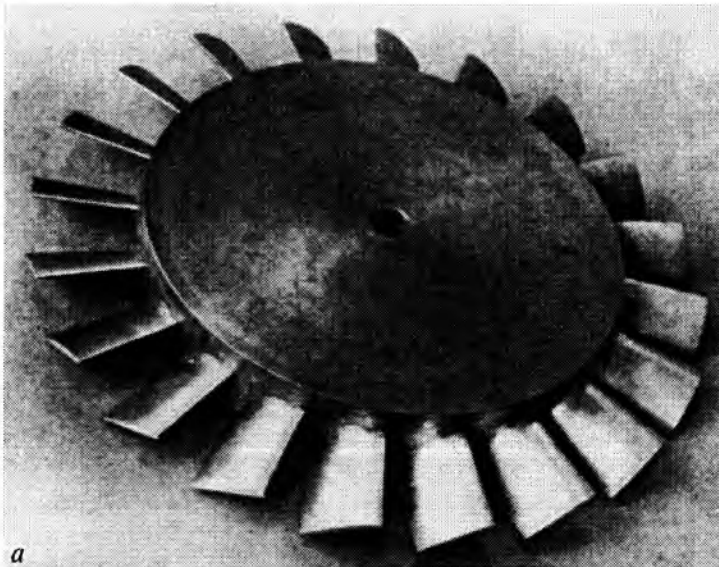
Sl. 27. Difuzor aksijalnog ventilatora sa stožastim nastavkom glavine (a) i s cijevi u obliku stošca (b). 1 glavina, 2 rotor, 3 stator, 4 stožasti nastavak glavine, 5 priključna cijev

Karakteristike i regulacija. Karakteristike tlaka $\Delta p = f(\dot{V})$, snage $P = f(\dot{V})$ i korisnosti $\eta = f(\dot{V})$ aksijalnog ventilatora prikazane su na slici 28. Karakteristika snage raste sa smanjivanjem protoka pa je regulacija prigušivanjem neekonomična. Donekle dolazi u obzir regulacija ispuštanjem, jer se tada radna točka ventilatora pomiče u područje manje snage. I za aksijalne je ventilatore najekonomičnija regulacija promjenom brzine vrtnje rotora, jer se radna točka spušta na nižu krivulju snage. Osim navedenih, za veće se jedinice upotrebljavaju i druge vrste regulacija, kao npr. posebne zakretne privodne lopatice, zakretne lopatice rotora itd.



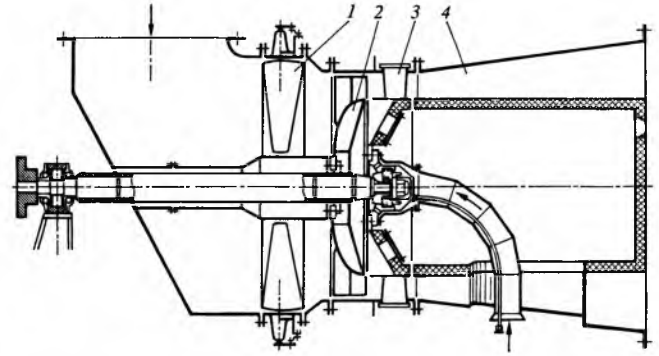
Sl. 28. Karakteristike aksijalnog ventilatora

Izvedbe aksijalnog ventilatora. Mali niskotlačni aksijalni ventilator ima samo rotor, izravno spojen na osovinu elektromotora. Visokotlačni aksijalni ventilator ima rotor s većim brojem kratkih lopatica (sl. 29 a), dok rotor niskotlačnog aksijalnog ventilatora velikog protoka ima mali broj dugih lopatica (sl. 29 b).



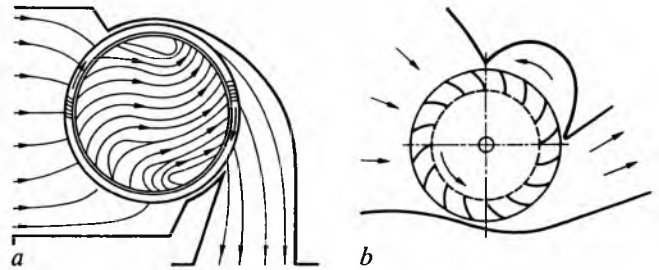
Sl. 29. Rotor aksijalnog ventilatora. a visokotlačni ventilator s malim protokom, b niskotlačni ventilator s velikim protokom ($60 \text{ m}^3/\text{s}$)

Posebna je vrsta *akcijski aksijalni ventilator*. To je ventilator u kojem se meridionalna brzina fluida u rotoru povećava zbog smanjenja protočnog presjeka. Tako se postižu mnogo veće razlike tlakova, ali i veće izlazne brzine pa je potreban dobar difuzor (sl. 30).



Sl. 30. Akcijski aksijalni ventilator. 1 regulacijske privodne lopatice, 2 rotor, 3 stator, 4 difuzor

Protočni ventilator jest radijalni ventilator tipa Sirocco kojim fluid protječe radijalno i tako dotiče lopatice dva puta. To je prvo bilo postignuto vanjskim i unutrašnjim vođenjem fluida (sl. 31 a).



Sl. 31. Strujanje fluida kroz protočni ventilator. a s unutrašnjim vođenjem fluida, b s vanjskim plaštem (bez unutrašnjih stijenki)

Međutim, složeno unutrašnje vođenje bacilo je tu izvedbu u zaborav. Tek su prije 40 godina postignuti jednaki rezultati samo s vanjskim vođenjem (sl. 31 b), što je potaknulo neslučenu masovnu proizvodnju tih ventilatora. Protočni se ventilatori upotrebljavaju uglavnom u ogrjevnim i klimatizacijskim instalacijama, npr. u malim i akumulacijskim električnim pećima i sl. Dimenzije su ventilatora malene (promjer do $\sim 300 \text{ mm}$) pa su i tlakovi razmjerno maleni (nekoliko stotina paskala). Dobava se može povećati produljivanjem rotora u aksijalnom smjeru. Zbog bešumna rada i lake ugradnje zanemaruje se njihova mala korisnost (do 55%).

LIT.: A. J. Stepanoff, Turboblwers. John Wiley and Sons, New York 1955. – D. Thin, Les ventilateurs et leurs applications. Eyrolles, Paris 1956. – B. Eck, Ventilatoren. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York ³1972.