

Utjecaj stanja zraka na trajnost uređaja za odsisavanje i pneumatski transport

Prof. ĐURO HAMM, dipl. ing.

Šumarski fakultet
Zagreb

UDK 621.867.8

Primljeno: 15. 9. 1981.

Prethodno priopćenje

Prihvaćeno: 16. 12. 1981.

S a ž e t a k

U ovom su članku izneseni rezultati proučavanja utjecaja hidrotermičkog stanja zraka na cijevi, ventilatore, ciklone i filtre uređaja za odsisavanje i pneumatski transport drvene blanjevine, piljevine i prašine. Na osnovu toga upozoreno je na potrebne i moguće mjere za sprečavanje štetne kondenzacije vlage zraka na stjenkama cijevi.

Izveden je kriterij graničnih parametara cijevnih vodova, a osnovni odnosi prikazani su odgovarajućim dijagramima.

Na konkretnim primjerima proračuna pokazana je primjena rezultata studije za određivanje hidrotermičkog stanja uzduž cjevovoda. Odatle proizlazi potreba konstrukcijskih i tehničkih zahvata. Upozoreno je na popratne pojave u vezi drvnih čestica u struji zraka. Dane su ideje za svrsishodne preinake postojećih uređaja te za projektiranje novih.

Postoji i realna mogućnost energetske racionalizacije u fazi pokretanja i u slučaju djelomičnog rada polivalentno izvedenih uređaja. Ovaj studijski članak preporučuje prilog projektiranju racionalnijih novih i rekonstrukcijski starih eshaustorskih i pneumatsko-transportnih uređaja.

Ključne riječi: uređaji za odsisavanje — pneumatski transport — proračun hidrotermičkog stanja cjevovoda

INFLUENCE OF A STATE OR AIR ON DURABILITY OF EXHAUSTER DEVICES AND PNEUMATIC CONVEYORS IN WOODWORKING INDUSTRY

Summary

This article contains the results of researches carried out with regard to influence of hydrothermal state of air on pipes, ventilators, fans and filters in the exhauster devices and pneumatic conveyors of wood shavings, sawdust and dust. On the basis of obtained results the attention should be paid to the necessary and possible steps to be taken in preventing the harmful condensation of moisture of the air on the pipe walls. A criterion of limit parameters of the pipelines has been established and the basic relations have been shown on the diagrams.

On concrete examples of calculations the application of the results of study have been shown for determining hydrothermal state along the pipeline, calling for necessity of constructional and technical intervention. It was pointed out at the accompanying appearance of wood particles in the stream of air. The ideas for appropriate modifications of existing devices and projecting of new ones have been given.

There exists a real possibility of energetic rationalization in the phase of putting in motion and in a case of partial operation of polyvalently made devices. This study presents a contribution to projecting more rational the new ones and reconstruction of the old exhauster devices and pneumatic conveyors.

Key words: exhauster devices — pneumatic conveyors — calculation of hydrothermal state of pipeline

(A. M.)

UVOD

U svakom postrojenju za preradu drva nalaze se uređaji za odsisivanje (tzv. ekshaustorski uređaji), a često i za pneumatski transport. Prema načinu izvedbe, tih uređaja ima više vrsta. Projektiranje uređaja postalo je uglavnom rutinski rad. Na tom području treba još mnogo toga unaprijediti radi optimalizacije rada. To je vrlo zanimljiva istraživačka tema jer predstavlja doprinos unapređivanju energetike drvne industrije.

U ovom članku obrađen je utjecaj stanja zraka u industrijskim postrojenjima i izvan njih na trajnost uređaja za odsisivanje i pneumatski transport. Trajnost tih uređaja ovisi o upotrebljenom materijalu, tehničkoj izvedbi, statičkim, dinamičkim, termičkim i hidrotermičkim utjecajima. Tehnička izvedba odnosi se na svrsishodnu konstrukciju cjevovoda i na debljinu lima pojedinih dijelova. Posebno treba naglasiti izbor debljine lima prema stupnju abrazivnosti i na ispravno brtvljenje prirubnica.

Dinamički utjecaj čine vibracije i drugi impulsi koji pri radu djeluju na uređaje. Oni mogu uzrokovati deformacije, zamor materijala i lom.

Do statičkog opterećenja (vlastita masa) dolazi pri većim razmacima konzola ili ovjesa na koje su cijevi pričvršćene, a kod vanjskog cjevovoda zbog dodatnog opterećenja (snijeg, led, vjetar). Posebno je ovdje važno statičko djelovanje vakuuma u cijevima većeg promjera.

Termički utjecaji su: dilatacija zbog povišenja ili sniženja temperature plašta cjevovoda. Tu se razlikuje jednoliko ravnomjerno grijanje plašta cijevi (iznutra ili izvana) — od slučaja insolacije i usmjerenog dozačivanja topline od nekog drugog izvora, što može izazvati deformaciju.

Hidrotermički utjecaji važni su ne samo za trajnost konstrukcijskih dijelova pneumatskih uređaja nego i za samo funkcioniranje. Postepenim hlađenjem mase zraka u cijevi raste njegova relativna vlaga. Kada temperatura zraka tik uz stijenke cijevi padne na temperaturu rosišta, dolazi do kondenzacije vlage, najprije u vidu rošenja i znojenja. Ta kondenzacija uzrokom je procesa korozije dodirnih metalnih dijelova cijevi, ventilatora i ciklona, odnosno filtera, korozivnih oštećenja i često do potrebe mijenjanja dijela cijevi. Druga pojava jest da se usitnjene drvene čestice navlaže i u dodiru s vlagom na stijenama cijevi stvaraju neku drvenu kašu. Tako dolazi do postepenog začepljenja cijevi, smanjenja i postupnog prestanka funkcioniranja pneumatskog uređaja.

Za ilustraciju neka posluži slijedeći primjer iz prakse. Neka pilana je zagrijavana radiatorima i kaloriferima. Ogrjevno sredstvo bila je zasićena vodena para tlaka približno 2 bara. Radi poteškoća regulacije pri grijanju vodenom parom dolazilo je povremeno do relativno visoke temperature

zraka u dijelovima pilane. Ekshaustorski uređaj odsisavao je zagrijani zrak s vlažnom pilanskom piljevinom. Pri tome se dio vlage iz piljevine ispario na račun sniženja sadržaja topline zraka, dakle i sniženja temperature zraka. Zbog toga je relativna vlaga zraka porasla. Dio cijevi uređaja izvan zgrade, u slobodnom prostoru, i dalje se hladio. Postigavši temperaturu rosišta, dolazilo je do brzog korozivnog istrošenja lima i do začepljenja cijevi. Problem je riješen primjenom vanjskog zraka kao nosećeg medija u cijevi pneumatskog transporta.

TEORIJSKE OSNOVE

svakoj temperaturi i relativnoj vlazi zraka odgovara određena ravnotežna vlaga čestica drvne mase koja se u tom zraku nalazi. Vrijeme postizanja te ravnotežne vlage zavisi uglavnom o proporcijama drvnih čestica, te intenzitetu i načinu strujanja zraka oko njih.

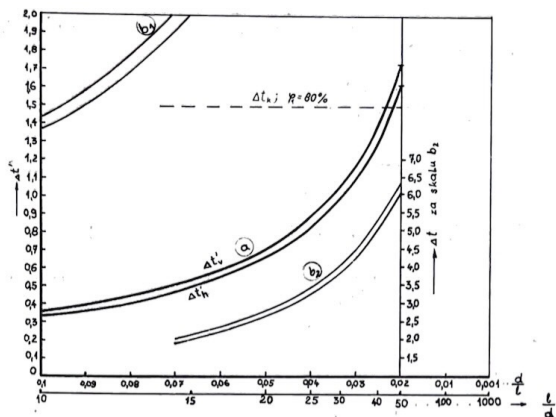
Ako je početna vlaga drvne mase veća od ravnotežne vlage, tada će dio vlage iz drva ispariti na račun sniženja sadržaja topline zraka. Time će se i temperatura zraka srazmjerno sniziti. Radi sniženja temperature, relativna vlaga u zraku bi se povećala i bez isparene vlage iz čestica drva. Ovoj vlazi pridolazi i isparena vlaga česti drvne mase, i relativna vlaga zraka će se još više povećati. Granični slučaj je početak kapljaste kondenzacije, maglica u zraku, a na stijenama lima nastaje film od kondenzata. Dijagrami 4a i 4b daju brzinu sušenja u ovisnosti o relativnim dimenzijama čestica i temperaturi zraka. Pretpostavljena je dovoljno velika masa zraka, tako da ne dolazi do naglog sniženja temperature zraka uslijed isparivanja.

Ako je vlaga čestica drvne mase manja od ravnotežne vlage, tada dolazi do ovlaživanja tih čestica u struji zraka.

Budući da čestice drvne mase imaju različite dimenzije — a njihova brzina u struji zraka također je različita — to će se različitom brzinom mijenjati njihova vlaga. Najsitnije čestice redovno će postići ravnotežnu vlagu. Što su čestice veće, promjena vlage u njima bit će sporija. Pri tome će relativna brzina zraka i sitnijih čestica biti manja, a kod krupnijih čestica veća.

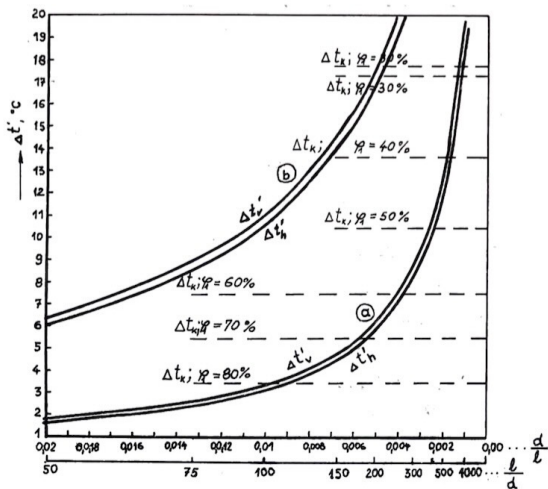
Iz navedenih vidova promjenljivih utjecaja hidrotermičkog stanja nazire se problematika kojom se bavi ovaj članak. Raščlanjivanje i rješavanje toga problema predstavlja prilog mogućnosti postizavanja duže trajnosti uređaja za odsisivanje i pneumatski transport.

Problem se svodi na proučavanje izmjena topline i utjecaja izmjene topline zraka u cijevima i zraka u okolišu oko cijevi i drugih ploha uređaja. K tome pridolazi i izmjena topline zraka u cijevima i topline čestica koje su u tom zraku.



Slika 1. Dijagram 1.

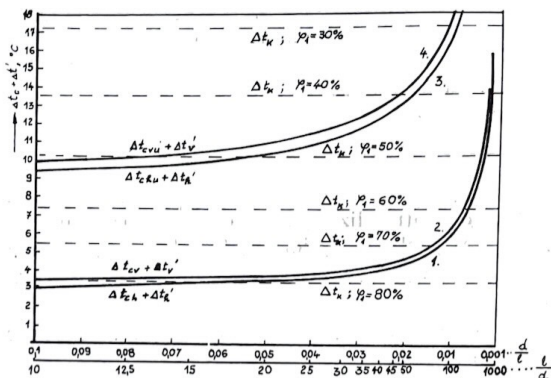
Pad temperature $\Delta t_h'$ i $\Delta t_v'$ u limenoj cijevi debljine lima 1 mm pri suhom prijelazu topline u zavisnosti d o odnosu — za područje od 0,1 do 0,02; oznake: a — brzina zraka $v = 24$ m/s; b — brzina zraka $v = 5$ m/s (maks. uzgon); $\Delta t_h'$ = pad temperature u horizontalnoj cijevi; $\Delta t_v'$ = pad temperature u vertikalnoj cijevi $^{\circ}\text{C}$.



Slika 2. Dijagram 2.

Vrijednosti analogne onima u dijagramu 1, ali za područje — od 0,02 do 0,001.

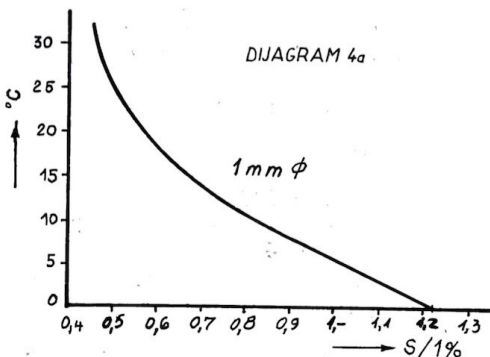
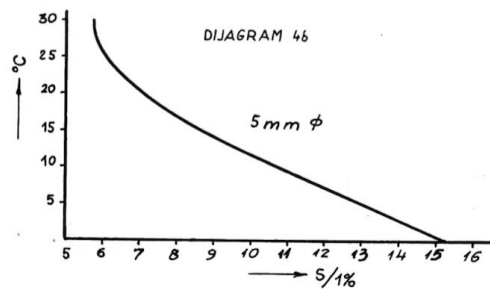
Uređaji za odsisavanje drvnih čestica, tzv. eks-haustorski uređaji, sastoje se iz limenih cijevi koje se vode dijelom unutar proizvodnih prostorija, dijelom uz vanjske strane zgrada i dijelom kroz slobodni prostor. Pogonsku opremu uređaja sa-



Slika 3. Dijagram 3.

Pad temperature na unutarnjoj plohi limene cijevi debljine lima 1 mm u $^{\circ}\text{C}$ uz različite odnose $\frac{d}{l}$. Oznake: 1 — $\Delta t_{ch} + \Delta t_v'$ horizontalna cijev, $v = 24$ m/s; 2 — $\Delta t_{cv} + \Delta t_v'$ vertikalna cijev, $v = 24$ m/s; 3 — $\Delta t_{chu} + \Delta t_h'$ horizontalna cijev, $v = 5$ m/s (maks. uzgon); 4 — $\Delta t_{cvu} + \Delta t_v'$ vertikalna cijev, $v = 5$ m/s (maks. uzgon).

Δt_k = pad temperature zraka do točke kondenzacije, ako je početna temperatura zraka $t_1 = 18^{\circ}\text{C}$ i relativna vlaga φ_1



Slika 4.

Približno vrijeme sušenja pilanske piljevine u struji zraka u zavisnosti o mjerodavnom promjeru ϕ čestice i o temperaturi t zraka ($^{\circ}\text{C}$) za postizanje razlike vlage $\Delta u = 0,01 = 1\%$. Dimenzija: $s/1\%$ vlage.

činjavaju transportni ventilator i elektromotor. Na kraju uređaja su ciklonski odvađači, filteri ili taložnici (ovi vrlo rijetko, i to obično u kombinaciji s drugim odvađačima).

Tehnički proračun

Ovaj se proračun svodi na izračunavanje izmjene topline između odsisne mase zraka koja struji kroz cijevi i topline izvan zgrade u slučaju kada je vanjska temperatura niža od one u cijevima.

U ovom slučaju pretpostavljene su slijedeće polazne vrijednosti:

Nutarnja temperatura zraka

$$t_1 = +18^{\circ}\text{C}$$

Vanjska temperatura zraka

$$t_2 = -25^{\circ}\text{C} \text{ (oštra kontinentalna klima)}$$

Relativna vlaga nutarnjeg zraka $\varphi_1 = 60\%$

Cijevi iz pocinčanog lima debljine 1 mm

Brzina zraka u cijevima $v = 24 \text{ m/s}$

Iz ovih pretpostavljenih vrijednosti razradom se dobiva koeficijent konvektivnog prijelaza topline (približenje po Nusselt-u i Jürgens-u).

Slobodno strujanje

Vertikalne stijenke

$$\alpha_{K1} = 2,2 \cdot \sqrt[4]{\Delta t} = 2,2 \cdot \sqrt[4]{43} = 5,634 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 6551 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Horizontalne stijenke:

a) prema dolje

$$\alpha'_{K2} = 2,8 \cdot \sqrt[4]{\Delta t} = 7,17 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 8,337 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

b) prema gore

$$\alpha''_{K2} = 1 \cdot \sqrt[4]{\Delta t} = 2,56 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 2,978 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Odatle se dobiva za:

horizontalne cijevi

$$\alpha_{Kh} = \frac{2 \cdot 5,634 + 7,17 + 2,56}{4} = 5,25 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 6,104 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

vertikalne cijevi

$$\alpha_{Kv} = 5,634 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 6,551 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

S ovim vrijednostima izračuna se izmjena topline na vanjskoj plohi cijevi koje su izvan zgrade i na slobodno prostoru.

Prinudno strujanje zraka unutar cijevi. Po Jürgensu

$$\alpha_{K3} = 6,14 \cdot v^{0,78} = 73,24 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 85,163 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Specifična provodljivost topline (prijenos kroz 1 m debeo čelični lim):

$$\lambda = 37,152 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 43,2 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Iz ovih koeficijenata prijelaza (konvekcije) i prijenosa (kondukcije) proizlazi koeficijent prolaza topline.

Za horizontalne cijevi:

$$k_h = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_1}} = \frac{1}{\frac{1}{73,24} + \frac{0,001}{37,152} + \frac{1}{5,25}} = 4,898 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 5,695 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Za vertikalne cijevi:

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{73,24} + \frac{0,001}{37,152} + \frac{1}{5,634}} = 5,23 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h} = 6,082 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

Za rješenje postavljenog zadatka važna je temperatura nutarnje plohe lima. Na njoj, naime, dolazi do štetne kondenzacije vlage.

Postavljaju se slijedeći odnosi:

Nutarnja ploha cijevi

$$A = d \cdot \pi \cdot l \dots \text{m}^2$$

Sekundarni protok zraka

$$V_s = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot v \dots \text{m}^3/\text{s}$$

gdje je:

d = nutarnji promjer cijevi, m;

l = dužina cijevi, m;

v = brzina zraka u cijevi, m/s;

ρ = gustoća zraka, kg/m³

c_p = specif. toplina zraka uz konstantni tlak, kcal/kg · °C (1 kcal = 4,1868 KJ)*
(specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku).

Maseni protok zraka $m_s = V_s \cdot \rho \dots \text{kg/s}$

Pad topline zraka u cijevi izračunava se kako slijedi:

$$q = m_s \cdot c_p \cdot \Delta t' \cdot 3600 \text{ kcal/h}$$

* U formulama koje slijede potrebno je kcal izraziti u KJ.

Druga relacija:

$$q = k \cdot A \cdot \Delta t \dots \text{kcal/h}$$

odatle

$$\Delta t' = \frac{k \cdot A \cdot \Delta t}{3600 \cdot m_s \cdot c_p} \dots \text{°C}$$

Uvrštenjem gornjih vrijednosti dobiva se izraz:

$$\Delta t' = \frac{k \cdot l \cdot \Delta T}{900 \cdot d \cdot v \cdot \rho \cdot c_p} \dots \text{°C}$$

Budući da je $\Delta t = \Delta t_0 - \Delta t' \dots \text{°C}$; ($\Delta t_0 = t_1 - t_2$) to se može gornja jednadžba preinačiti u

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{900 \cdot \frac{v \cdot \rho \cdot c_p \cdot d}{k} + 1} \dots \text{°C}$$

Uz gustoću zraka $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ i uz specifičnu toplinu zraka $c_p = 0,2414 \text{ kcal/kg} \cdot \text{°C} = 1,01 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$ slijedi temperaturna razlika

za horizontalne cijevi

$$\Delta t_h' = \frac{\Delta t_0}{1277,478 \cdot \frac{d}{l} + 1} \dots \text{°C}$$

za vertikalne cijevi

$$\Delta t_v' = \frac{\Delta t_0}{1196,384 \cdot \frac{d}{l} + 1} \dots \text{°C}$$

Za ilustraciju navodi se slijedeći primjer: horizontalna cijev: $l = 4,65 \text{ m}$; $d = 450 \text{ mm} = 0,45 \text{ m}$; $\Delta t_0 = 18 - (-25) = 43 \text{ °C}$. Uvrštenjem u izraz dobiva se

$$\Delta t_h' = \frac{43}{1277,478 \cdot \frac{0,45}{4,65} + 1} = 0,345 \text{ °C}$$

vertikalna cijev: $l = 5,5 \text{ m}$; $d = 450 \text{ mm} = 0,45 \text{ m}$; $\Delta t_0 = 43 \text{ °C}$

$$\Delta t_v' = \frac{43}{1196,384 \cdot \frac{0,45}{5,5} + 1} = 0,4348 \text{ °C}$$

Za kontrolu proračuna može se postaviti npr. za spomenutu horizontalnu cijev:

— sa strane promjene topline zraka:

$$q = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot v \cdot 3600 \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t' = \frac{0,45^2 \cdot \pi}{4} \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1,2 \cdot 0,2414 \cdot 0,345 = 1373,3 \text{ kcal/h} = 5750 \text{ kJ/h} = 1,597 \text{ kW}$$

— sa strane izmjene topline na nutarnjoj stijenci cijevi:

$$q = d \pi l k \Delta = d \pi l k (\Delta t_0 - \Delta t') = 0,45 \cdot \pi \cdot 4,65 \cdot 4,898 \cdot (43 - 0,345) = 1373,42 \text{ kcal/h} = 5750 \text{ kJ/h} = 1,597 \text{ kW}$$

Kontrola je u redu, a razlika računa je zanemarljiva.

PAD TEMPERATURE ZRAKA U CIJEVIMA KADA SE ON GIBA SAMO USLIJED TERMIČKOG UZGONA, BEZ POMOĆI VENTILATORA.

Termički uzgon nastaje ako u cijevnom sistemu postoji visinska razlika. Da bi uslijed toga došlo do strujanja zraka, mora izlazni kraj cijevi biti najviši. Brzina zraka uslijed uzgona u vertikalnim cijevima zavisi u tom slučaju o temperaturi zraka u cijevi, o temperaturi zraka izvan cijevi, o visini cijevi i o atmosferskom tlaku.

U slučaju ekshausterskih uređaja, ta brzina zraka može iznositi najviše 5 do 6 m/s.

Koeficijent konvektivnog prijelaza topline

$$\alpha_v \cong 5 + 3,4 \cdot v = 5 + 3,4 \cdot 5 = 22 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{h} = 25,58 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Koeficijenti prijelaza topline za horizontalne cijevi:

$$k_h = \frac{1}{\frac{1}{22} + \frac{0,001}{37,152} + \frac{1}{5,25}} = 4,128 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{h} = 4,928 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

za vertikalne cijevi:

$$k_v = \frac{1}{\frac{1}{22} + \frac{0,001}{37,152} + \frac{1}{5,634}} = 4,485 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{h} = 5,215 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Uz raniju pretpostavku $v = 5 \text{ m/s}$; $\Delta t_0 = 43 \text{ }^\circ\text{C}$ može se postaviti izraz za pad temperature zraka u cijevima.

Za horizontalne cijevi

$$\Delta t_h = \frac{\Delta t_0}{900 \cdot \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{k} \cdot \frac{d}{l} + 1} = \frac{43}{307,588 \cdot \frac{d}{l} + 1} \dots \text{ }^\circ\text{C}$$

Za vertikalne cijevi

$$\Delta t_v = \frac{\Delta t_0}{900 \cdot \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{k_v} \cdot \frac{d}{l} + 1} = \frac{43}{290,649 \cdot \frac{d}{l} + 1} \dots \text{ }^\circ\text{C}$$

Primjer:

treba pronaći $\Sigma \Delta t' = \Delta t_h' + \Delta t_v'$ za vanjske cijevi u slobodnom prostoru, isključivo uslijed termičkog uzgona zraka:

$$d = 0,45 \text{ m}; t_1 = 18^\circ\text{C}; t_2 = -25^\circ\text{C} \quad \Delta t_0 = 43^\circ\text{C}; \\ l_h = 8 \text{ m}; l_v = 15 \text{ m}.$$

$$\Delta t_h' = \frac{43}{307,588 \cdot \frac{0,45}{8} + 1} = 2,349 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_v' = \frac{43 - 2,349}{290,649 \cdot \frac{0,45}{15} + 1} = 4,18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Sigma \Delta t' = 6,531 \text{ }^\circ\text{C}$$

Prema tome će temperatura zraka na izlazu iz vertikalne cijevi iznositi $t = 18 - 6,531 = 11,469 \text{ }^\circ\text{C}$. Sada treba odrediti promjenu relativne vlage zraka uz stijenke cijevi.

Iz h-w dijagrama može se odrediti da će uz tu temperaturu zraka doći do kondenzacije (rošenja), ako pri početnoj temperaturi zraka od 18°C u prostoriji — iz koje zrak izlazi — početna relativna vlaga bude $\varphi \geq 65\%$.

Ovo je veoma važan kriterij na osnovi kojega se može ocijeniti da li će doći do korozionog djelovanja u cijevima i ciklonima, a donekle i u ventilatorima.

Dijagram 1 daje vrijednosti $\Delta t' = f\left(\frac{d}{l}\right)$ za

$$t_0 = -25^\circ\text{C}, t_1 = 18^\circ\text{C}, v = 24 \text{ m/s}$$

VRIJEDNOSTI ZA POJEDINE TOČKE DIJAGRAMA 1 I 2
SUHI PRIJELAZ TOPLINE. a) $v = 24 \text{ m/s}$; b) 5 m/s (uzgon)

Tabela I

	$\frac{d}{l}$	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
a)	$\Delta t_h', \text{ }^\circ\text{C}$	0,334	0,371	0,417	0,476	0,554	0,663	0,825
	$\Delta t_v', \text{ }^\circ\text{C}$	0,356	0,396	0,445	0,507	0,591	0,707	0,88
b)	$\Delta t_h', \text{ }^\circ\text{C}$	1,354	1,499	1,679	1,908	2,21	2,625	3,232
	$\Delta t_v', \text{ }^\circ\text{C}$	1,4302	1,583	1,773	2,014	2,332	2,768	3,406
	$\frac{d}{l}$	0,03	0,02	0,01	0,009	0,008	0,007	0,006
a)	$\Delta t_h', \text{ }^\circ\text{C}$	1,093	1,62	3,122	3,44	3,833	4,325	4,963
	$\Delta t_v', \text{ }^\circ\text{C}$	1,166	1,725	3,317	3,654	4,068	4,587	5,258
b)	$\Delta t_h', \text{ }^\circ\text{C}$	4,204	6,013	10,55	11,411	12,425	13,367	15,111
	$\Delta t_v', \text{ }^\circ\text{C}$	4,424	6,311	11,007	11,892	12,932	14,170	15,671
	$\frac{d}{l}$	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001		
a)	$\Delta t_h', \text{ }^\circ\text{C}$	5,82	7,04	8,90	12,096	18,88		
	$\Delta t_v', \text{ }^\circ\text{C}$	6,159	7,432	9,37	12,674	19,578		
b)	$\Delta t_h', \text{ }^\circ\text{C}$	16,943	19,279	22,364	(26,622)	(32,885)		
	$\Delta t_v', \text{ }^\circ\text{C}$	17,528	19,884	(22,97)	(27,193)	(33,314)		

TEMPERATURA NUTARNJE PLOHE
LIMENE CIJEVI (DIJAGRAM 3).

Razlika temperature struje zraka i temperature plohe cijevi na istom presjeku:

$$\Delta t_c = \frac{c}{\alpha} \cdot \frac{\Delta t_0}{\frac{c}{k} + \frac{l}{d}} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tu označuju:

$$c = 900 \cdot v \cdot \rho \cdot c_p$$

α = koef. konvektivnog prijelaza topline, kcal/m² · °C · h

k = koef. prolaza topline, kcal/m² · °C · h

1. Horizontalna cijev (tabela II). Pogonski slučaj:

$$\Delta t_0 = 18 - (-25) = 43^\circ\text{C}; v = 24 \text{ m/s};$$

$$c = 6257,088 \text{ x}$$

$$\alpha = 73,24 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ h} = 306,64 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ h};$$

$$k = 4,898 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ h} = 20,51 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ h}$$

$$\Delta t_{ch} = \frac{3673,6044}{1277,478 + \frac{1}{d}} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vrijednosti funkcije $\Delta t_{ch} = f \cdot \left(\frac{d}{1}\right)$;

c, α, k su konstante. Osim Δt_{ch} iskazan je i skupni pad temp. računato od temperature prostorije;
 $\Delta t_{hc} + \Delta t_h = \Sigma \Delta t.$ (Tab. II)

2. Vertikalna cijev. (Tabela III). Analogni podaci kao u 1., samo se mijenja $k = 5,23 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{ h} = 6,081 \text{ W/m}^2 \cdot \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_{cv} = \frac{3673,6044}{1196,3839 + \frac{1}{d}} \dots \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vrijednosti funkcije $\Delta t_{cv} = f \left(\frac{d}{1}\right)$; c, α, k su

konstante date ranije. Iskazana je i vrijednost $\Delta t_{vc} + \Delta t_v' = \Sigma \Delta t.$

Tabela II

$\frac{d}{1} =$	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
Δt_{ch}	2,853	2,8508	2,8478	2,8439	2,8368	2,8313	2,8205
$\Delta t_{ch} + \Delta t'_h =$	3,187	3,2218	3,2648	3,320	3,3926	3,4943	3,6455
$\frac{d}{1} =$	0,03	0,02	0,01	0,009	0,008	0,007	0,006
Δt_{ch}	2,8025	2,7674	2,6669	2,6456	2,6194	2,5864	2,5438
$\Delta t_{ch} + \Delta t'_h =$	3,8955	4,3874	5,7889	6,0856	6,4524	6,9114	7,5068
$\frac{d}{1} =$	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001		
Δt_{ch}	2,4864	2,405	2,2806	2,0668	1,613		
$\Delta t_{ch} + \Delta t'_h =$	8,3064	9,445	11,1806	14,1628	20,493		

Tabela III

$\frac{d}{1} =$	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04
Δt_{cv}	3,045	3,0423	3,0388	3,0344	3,0284	3,0201	3,0077
$\Delta t_{cv} + \Delta t_v' =$	3,401	3,4383	3,4838	3,5414	3,6194	3,7271	3,8877
$\frac{d}{1} =$	0,03	0,02	0,01	0,009	0,008	0,007	0,006
Δt_{cv}	2,9874	2,9474	2,8337	2,8097	2,7801	2,7430	2,6951
$\Delta t_{cv} + \Delta t_v' =$	4,1534	4,6724	6,1507	6,4637	6,8481	7,2200	7,9531
	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001		
	2,6308	2,5390	2,4015	2,1656	1,6726		
	8,7898	9,9719	11,7715	14,8396	21,2506		

3. Horizontalna cijev; strujanje uslijed toplinskog uzgona.

$\Delta t_0 = 43^\circ\text{C}$; $v \leq 5 \text{ m/s}$, $c = 1303,56$; $\alpha = 22 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h} = 25,58 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
 $k_v = 4,238 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h} = 4,928 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

$$\Delta t_{\text{chu}} = \frac{2547,8673}{307,5855 + \frac{d}{l}} \dots ^\circ\text{C}$$

Tabela $\Delta t_{\text{chu}} = f(\frac{d}{l})$; c , α , k_h su konstan. vri-

jednosti (tab. IV)

4. Vertikalna cijev; toplinski uzgon.

$k = 4,485 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}$ ostale konstante kao u 3 — vidi tab. V.

$$\Delta t_{\text{cvu}} = \frac{2547,8673}{290,6488 + \frac{d}{l}} \dots ^\circ\text{C}$$

Tabela $\Delta t_{\text{cvu}} = f(\frac{d}{l})$

$\frac{d}{l} =$	0,1	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03
Δt_{cvu}	8,0225	7,9946	7,9599	7,9157	7,8575	7,7776	7,6607	7,4735
$\Delta t_{\text{cvu}} + \Delta t_v'$	9,3765	9,4936	9,6389	9,8236	10,0676	10,4026	10,8927	11,6775
$\frac{d}{l} =$	0,02	0,01	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	
Δt_{cvu}	7,1251	6,2511	6,0852	5,8898				
$\Delta t_{\text{cvu}} + \Delta t_v'$	13,1381	16,801	17,4962	18,3148				

Tabela IV

Tabela V

TOČKA KONDENZACIJE. KRITIČNA DUŽINA CIJEVI (TABELA VI)

Granični odnos $\frac{d}{l}$ za točku kondenzacije vla-ge na nutarnjoj plohi cijevi, ako je temperatura u prostoriji $t_1 = 18^\circ\text{C}$, vanjska temp. $t_0 = -25^\circ\text{C}$ i različite relativne vlage zraka (pri toj temperaturi). — vidi Tab. VI

Pr i m j e r: uz $t_1 = 18^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$, $t_0 = -25^\circ\text{C}$ kolika je maks. dužina l cijevi promjera 300ϕ do točke rošenja?

Uz normalni rad ekshaustorskog uređaja za ho-
 rizontalnu cijev $l_h = \frac{300}{0,0051} = 58824 \text{ mm} = 58,824 \text{ m}$;
 za vertikalnu cijev $l_v = \frac{300}{0,0057} = 52632 \text{ mm} =$

$= 52,632 \text{ mm}$. Za slučaj samo termičkog uzgona (dakle bez rada ventilatora) $l_h < 3000 \text{ mm}$; $l_v < 3000 \text{ mm} = 3 \text{ m}$. Dakle, praktički će doći neposredno po izlasku zraka u limenoj cijevi izvan zgrade do početka rošenja.

Tabela VI

$\varphi_1 =$	30%	40%	50%	60%	70%	80%
$t_2, ^\circ\text{C}$	0,4	4,—	7,4	9,8	12,3	14,6
max. ($\Delta t_e + \Delta t'$); $^\circ\text{C}$	17,6	14,0	10,6	8,2	5,7	3,4
$\frac{d}{l}$; h24	(0,0011)	(0,002)	0,0028	0,0051	0,0051	0,052
$\frac{d}{l}$; v24	(0,0011)	(0,002)	0,0038	0,0057	0,0117	0,08
$\frac{d}{l}$; h5	(0,009)	0,017	0,045	> 0,1	> 0,1	> 0,1
$\frac{d}{l}$; v5	0,015	0,028	0,094	> 0,1	> 0,1	> 0,1

Oznake u tabeli VI:

t_2 = temperatura kondenzacije vlage (rošćenje stijene)

$\frac{d}{l}$ = odnos veličina cijevi $\frac{d}{l}$ za slučaj strujanja u horizontalnom i vertikalnom smjeru; za brzinu zraka 24 m/s (h_{24} ; v_{24}) i za slučaj uzgona, $v \cong 5$ m/s ($h_5 \cdot v_5$)

Vrijednosti t_2 dobivene su iz h-w dijagrama.

Na osnovi određene granične dužine cijevi treba odabrati materijal za cijevi ili na drugi način spriječiti stvaranje kondenzata. Ovdje treba napomenuti da, osim ovih gubitaka topline, dolazi do slijedećih hidrotérmičkih pojava:

— U slučaju vlažne piljevine (pilana itd.), do izvjesnog sušenja čestica piljevine tokom prolaza u struji zraka kroz cijevi. Time se još dodatno snižuje temperatura zraka i znatno povećava vlaga u njemu. Uslijed toga se još više smanjuje kritična dužina cijevi.

— U slučaju suhe piljevine (iz finalne proizvodnje) nema takvog utjecaja. Suha piljevine donosi sobom i izvjesnu količinu topline, a, osim toga, u određenim slučajevima — sitne čestice, prah — može se čak smanjiti sadržaj vlage u zraku, uslijed upijanja vlage od strane drvene mase.

— Važno je da vlažnost sitnih čestica (veličine ispod 300 μ m) ne padne ispod nekih 14%. To je, naime, granična vrijednost za mogućnost eksplozije, ako u 1 m³ zraka ima više od 12 grama čestica.

U svrhu toplinsko-energetske racionalizacije izvode se ponegdje ekshaustorski uređaji sa selektivnim dodavanjem vanjskog zraka u sabirne odsisne cijevi. U tom slučaju treba u proračunu uzeti u obzir toplinski utjecaj usisnog vanjskog zraka. Tu dolazi do sniženja temperature i do povećanja relativne vlage smjese zraka, pa se kritična dužina cijevi još više smanjuje.

Ovdje treba naročito ukazati na pogonski slučaj kada odsisavanje zraka ne radi, a vanjska temperatura je znatno niža od temp. zraka u prostoriji, što je redoviti slučaj u zimi. Kao što je već pokazano (dijagram 3), kritična dužina cijevi tu je znatno manja, pa kod oštrije zime već nakon nekoliko metara izvan prostorije dolazi do rošenja i iza toga do početne kondenzacije vlage u cijevi. Radi brzine strujanja zraka u cijevi neće odmah doći do kondenzacije u vidu filma po stijenama cijevi, nego će se ona očitovati u vidu sve gušće magle. Do stvaranja vodenog filma doći će, dakle, na nešto većoj udaljenosti od one teoretski kritične, a naročito u ciklonskim odvajajima, filterima i taložnicima.

Da bi se toj štetnoj pojavi kondenzacije izbjeglo, potrebno je u vanpogonskom slučaju posve spriječiti strujanje zraka u cijevi. To se može ostvariti tako da se ili svi zasuni na odsisnim cijevima zatvore, ili — a to je pogonski i organizacijski sigurnije — da se načini glavni zasun na kraju glavne odsisne cijevi (pred ventilatorom) i da se on u spomenutom slučaju zatvori.

Korist ugradnje glavnog zasuna jest i u tome što se pomoću njega pri pokretanju ventilatora može u izvjesnoj mjeri smanjiti udarno opterećenje elektromotora. Ventilator u slučaju posve zatvorenog zasuna (dobava $Q = 0$) troši, pri punoj brzini vrtnje, nešto iznad 50% snage potrebne za puni pogon. Sa spomenutom mjerom postiže se, dakle, i izvjesno smanjenje vršnog opterećenja. S tim se postiže i povećanje energetske racionalizacije i ekonomičnosti pogona.

Budući da su ekshaustorski uređaji relativno veliki potrošači električne energije, neophodno je potrebno posvetiti odgovarajuću pažnju pri izboru elektromotora za pogon transportnih ventilatora. Naročito je to važno u slučaju izvedbe tzv. polivalentnog usisnog dijela uređaja, tj. u alternativnom slučaju više paralelnih glavnih usisnih cijevi i u slučaju tzv. »luster« — usisnog cijevnog sistema. Elektromotori koji u tom slučaju dolaze u obzir jesu — osim malobrojnih iznimaka — trofazni asinhroni indukcioni kavezni motori. Oni imaju spoj namotaja statora u Δ , a pokreću se sklopkom zvijezda/trokut. Ti elektromotori pri malom opterećenju rade u spoju s većim stepenom korisnosti η i s većim faktorom snage ϕ . U navedenom slučaju moguća je, dakle, znatna ušteda električne energije. U nekim slučajevima može doći u obzir i izbor dvobrzinskog elektromotora u svrhu stupnjevite regulacije brzine vrtnje.

U današnje vrijeme se i u industrijski razvijenim zemljama Evrope počela zimi primjenjivati rekuperacija topline izlaznog toplog zraka iz industrijskih prostorija radi predgrijavanja ulaznog svježeg zraka. I kod ovih rekuperativnih izmjenjivača topline, valja imati u vidu hidrotérmička stanja zraka na ulazu i izlazu, bez obzira radi li se o konvektivnom ili regenerativnom izmjenjivaču.

LITERATURA

- [1] BOŠNJAKOVIC, F.: Nauka o toplini. II dio. Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [2] NESTERENKO, A. V.: Osnovi termodinamičkih račeta ventilaciji i kondiciranja vazduha, »Visšaja škola«, Moskva, 1962.
- [3] ARHANGELSKIJ, V. D.: Apparati dlja suški sipučeí drevesin, »Lesnaja promišlennost«, Moskva, 1970.
- [4] EGIDZAROV, A. G.: Izgotovlenie i montaž sistem promišlennoi ventilacii, »Visšaja škola«, Moskva, 1965.
- [5] SEBENJI, F.; HAKL, L.: Korozija metala u teoriji i praksi, Tehnička knjiga, Beograd, 1980.