

UČINKOVITO GRIJANJE VISOKOREGALNIH SKLADIŠTA DECENTRALIZIRANIM VENTILACIJSKIM JEDINICAMA

dr. sc. Evgenij P. VIŠNEVSKI
Goran BUDIMLIJA, dipl. ing.

Logistika je važan i dinamičan dio suvremenog gospodarstva koji se neprestano unaprjeđuje i osuvremenjava što znači stalno povećanje broja logističkih centara u glavnim prometnim čvorištima. Većina takvih centara izvedena je kao jednoetažna skladišta najmanje visine 10 m, s ravnim betonskim podovima te pripadajućim parkiralištima i prometnicama. U pravilu su takve zgrade opremljene sustavom klimatizacije ili prisilne ventilacije. Na žalost, projektiranju sustava ventilacije i klimatizacije takvih centara često se ne pridaje dovoljna pozornost, iako bi se odgovarajućim odabirom opreme troškovi ulaganja i pogona mogli značajno sniziti.



Ilustracija 1
Logistički centar s
visokoregalnim skladištem

SUSTAVI TOPLOZRAČNOG GRIJANJA VISOKOREGALNIH SKLADIŠTA

Učinkovitost sustava toplozračnog grijanja u visokoregalnim skladištima ponajviše ovisi o smjeru istrujavanja zraka iz difuzora i raspodjeli temperaturnih slojeva po prostoriji, što je u pravilu uvjetovano povećanjem brzine struje zraka (il. 1). Ako sustav nije učinkovit, dolazi do prevelikog

gradijenta temperature što za posljedicu ima nezadovoljavajuće uvjete u zoni boravka i povećanu potrošnju energije. [2] U svakom bi slučaju trebalo ostvariti jednoliku raspodjelu temperaturnih slojeva po visini prostorije, od poda do stropa, kako temperatura čak i u gornjim dijelovima skladišta ne bi bila previsoka (uglavnom se dopušta najviše 30 °C). Analiza različitih sustava toplozračnog grijanja pokazuje da su najučinkovitiji oni koji struju zraka usmjeravaju ravno prema dolje, u zonu boravka. [1, 2, 3]

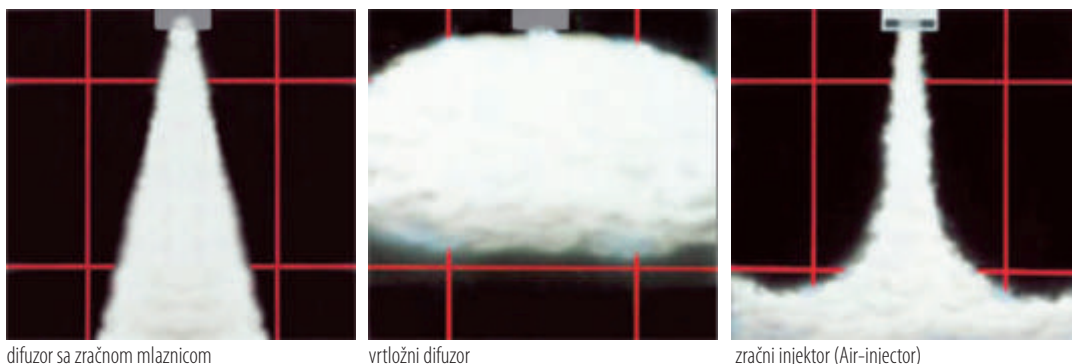
Za tu se svrhu najčešće koriste tri izvedbe zračnih difuzora (il. 2):

- difuzori sa zračnom mlaznicom
- vrtložni difuzori
- zračni injektori (eng. Air-injector).

Međutim, visokoregalna skladišta su prostori puni prepreka: pregradnih zidova, regala i polica čiji oblik i raspored određuju oblik struja zraka (il. 3).

Skladišni regali prilično deformiraju struju zraka pa njezin početni kružni oblik postaje izdužen uzduž prolaza između regala, odnosno 'spljošten'. To za posljedicu ima dva aerodinamička efekta: s jedne se strane zbog tih prepreka povećava domet struje zraka u jednom smjeru, a s druge se strane zbog povećanja brzine i povišenja

Ilustracija 2
 Raspodjela zraka za tri različita difuzora na otvorenom prostoru

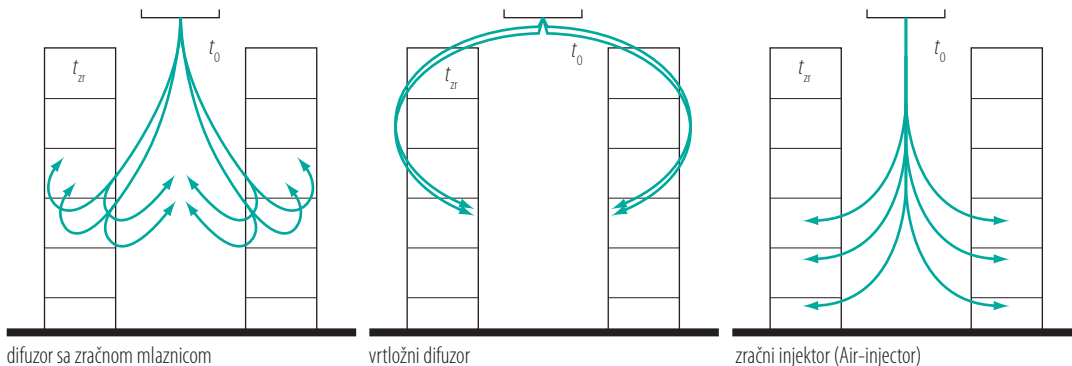


difuzor sa zračnom mlaznicom

vrtoložni difuzor

zračni injektor (Air-injektor)

Ilustracija 3
 Raspodjela zraka za tri različita difuzora u zatvorenom prostoru



difuzor sa zračnom mlaznicom

vrtoložni difuzor

zračni injektor (Air-injektor)

tlaka zraka uz regale povećava otpor struji zraka. Utjecaji tih efekata na struju zraka su različiti i ovise o izvedbi difuzora i izvedbi regala, a posebice njihovoj propusnosti za zrak.

Sile gravitacije koje nastaju zbog razlike gustoće zraka koji se ubacuje u prostoriju i zraka iz prostorije također utječu na struju zraka koji se ubacuje u prostoriju i na njegovo strujanje po prostoriji. [3] Kada se zrak ubacuje u okomitom smjeru, struja zraka se usporava ako je sila gravitacije u smjeru suprotnom od sile inercije, a ubrzava se, ako te sile djeluju u istom smjeru.

Za određivanje odnosa sila gravitacije i inercije koristi se Arhimedov broj kojim je određen karakteristični domet. Ako se pretpostavi da je struja približno izotermna, Arhimedov broj se računa jednadžbom: [2]

$$Ar_x = \beta \cdot Ar_0 \cdot \left(\frac{x}{d_0}\right)^2, \quad (1)$$

pri čemu su:

Ar_x - Arhimedov broj na udaljenosti x

β - konstanta koja ovisi o difuzoru

Ar_0 - Arhimedov broj u početnom poprečnom presjeku struje zraka (proporcionalan omjeru porasta temperature u poprečnom presjeku struje zraka i temperature zraka u prostoriji)

x - udaljenost difuzora i promatranog poprečnog presjeka struje zraka, m

d_0 - promjer difuzora, m.

U slučaju simetrične struje zraka (osim za zračne injektore), ta se jednadžba može pojednostaviti: [2]

$$Ar_x = 1,23 \cdot \left(\frac{x}{H}\right)^2, \quad (2)$$

pri čemu je:

H - geometrijski indeks struje. [4]

Iskustvo pokazuje da gradijent temperature u početnom poprečnom presjeku struje zraka zbog male indukcije iznosi najmanje 0,4 K/m. Stoga je temperatura zraka ispod stropa i u gornjoj zoni skladišta neznatno niža od temperature zraka neposredno uz difuzor.

Difuzori sa zračnom mlaznicom

Kada se za toplozračno grijanje skladišta koriste difuzori sa zračnom mlaznicom i kada je struja zraka kompaktna, temperatura zraka u difuzoru (t_0) smije biti svega nešto viša od temperature zraka u prostoriji (t_z) jer u protivnom može doći do pregrijavanja gornjih dijelova skladišta, što nije u skladu s propisima i što može uzrokovati oštećivanje robe. Uz to, postoje važna ograničenja kod toplozračnog grijanja kod kojeg je struja zraka slobodna i kompaktna, a trebalo bi obratiti pozornost i na vrstu robe koja se skladišti.

Vrtoložni difuzori

Kod primjene vrtoložnih difuzora, odnosno kada je struja zraka vrtoložna, problem postaje veći. Velik dio toplog zraka koji se ubacuje u

prostoriju i koji se usmjerava u zonu boravka ima malu komponentu sile inercije pa je domet struje prilično malen, mnogo manji nego kod kompaktne struje zraka. Stoga u visokoregalnim skladištima u kojima se koriste vrtložni difuzori postoji proporcionalnost temperature zraka u prostoriji i na izlazu iz difuzora, što znači da se grije tek nekoliko policama u gornjim dijelovima skladišta. Ako se prostor koji se grije želi povećati, treba povećati toplinski učin što neizbježno uzrokuje povišenje temperature ispod stropa pa dolazi do pregrijavanja na višim policama i povećane potrošnje energije zbog velikih razlika u temperaturi ispod stropa.

Ipak, treba napomenuti da je takva raspodjela zraka vrlo prikladna za hlađenje skladišta jer je gustoća zraka koji se ubacuje veća od gustoće zraka u prostoriji pa zrak koji se ubacuje pada prema podu i kroz zonu boravka struji ravnomjerno i bez pojave propuha.

Zračni injektori

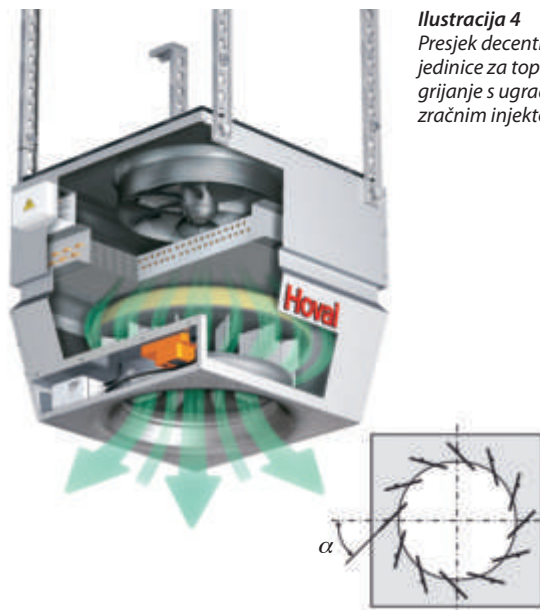
Osnovna značajka struje zraka koju uzrokuju zračni injektori je velika indukcija, što je nužno za učinkovito grijanje visokoregalnog skladišta. Pri tome se koristi decentralni sustav grijanja koji se sastoji od više ventilacijskih uređaja koji pokrivaju različite zone u zgradi. [5] Oni se postavljaju na strop i zrak u prostoriju ubacuju odozgo prema dolje (načelo 'ispiranja' zone boravka). [6, 7] Ventilacijski kanali tada nisu potrebni.

Uređaji se sastoje od dva dijela: grijaćeg elementa (s ventilatorom i izmjenjivačem topline) i zračnog injektora (il. 4). Injektor se također sastoji od dva dijela čije je djelovanje na oblik struje zraka suprotno:

- kombinacije deflektora i sapnice koja stvara struju zraka s najvećim dometom
- vrtložnog uređaja koji rotira zračnu struju čime povećava kut raspršivanja struje (indukciju).

Zračni injektori rade prema sljedećem načelu: zrak nastrojava na deflektor u obliku okrugle ploče i potom na lopatice vrtložnog uređaja te se preko izlazne sapnice ubacuje u prostoriju. Deflektor ima važnu ulogu jer ostvaruje podtlak u korijenu struje zraka što je preduvjet velike indukcije, a time se omogućava stvaranje duge, kompaktne struje zraka u njezinom početnom poprečnom presjeku. U tom slučaju kut raspršivanja iznosi gotovo 0° (za razliku od 11° , koliko iznosi kod kompaktne struje zraka).

Lopatice oblikuju struju zraka ovisno o kutu istrujavanja (α), no u početnom poprečnom presjeku zbog podtlaka to uistinu nema učinka. Što je zrak udaljeniji od sapnice, to je manji utjecaj zone podtlaka tako da struja zraka zbog



Ilustracija 4
Presjek decentralizirane jedinice za toplazračno grijanje s ugrađenim zračnim injektorom

indukcije dijeli okolni zrak u prostoriji. Oblik struje zraka je poput obrnute gljive s tankim stručkom i golemim klobukom. Time se može dosegnuti velika površina na većoj udaljenosti od sapnice.

Velika indukcija uzrokuje uvlačenje zraka s gornjih policama u struju zraka. Zbog toga temperatura u sapnici može biti viša bez opasnosti od pregrijavanja u području gornjih policama ($t_{zr} \ll t_0$). Također se može koristiti uređaj s većim učinkom, odnosno s višom temperaturom. U smjeru prema dolje struja zraka koji se ubacuje hladi se indukcijom s okolnim zrakom u prostoriji čime se u zoni boravka postižu potrebne vrijednosti temperature.

Jednadžba za određivanje Arhimedovog broja za zračne injektore na otvorenom prostoru dobivena je eksperimentalno:

$$Ar_{g0} = 2,66 \cdot \left(\frac{d_0}{H_{EQ}} \right)^2 = 2,66 \cdot \left(\frac{d_0}{H_h - 1,5} \right)^2, \quad (3)$$

pri čemu su:

Ar_{g0} - Arhimedov broj zračnog injektora

H_{EQ} - ekvivalentna geometrijska značajka turbulentnog strujanja

H_h - visina skladišta, m.

Ako se usporede jednadžbe (2) i (3), jasno se vidi da indukcija udvostručuje domet struje zraka.

Namještanje struje zraka se temelji na efektu potiskivanja i ostvaruje se rotacijom lopatica: ovisno o kutu namještanja mijenja se udaljenost na kojoj je dijeljenje veće od stlačivanja. Pri kutu $\alpha = 0^\circ$, postiže se najveća duljina kompaktne struje zraka, a pri kutu $0^\circ < \alpha < 50^\circ$, udaljenost se smanjuje. Granična vrijednost kuta od 50° se postiže

Ilustracija 5
 Raspodjela zraka primjenom zračnih injektora u visokoregalnom skladištu



ako se vodoravna struja zraka širi uzduž stropa (vrtložna struja), što je savršeno u slučaju hlađenja.

Zračni injektori za visokoregalna skladišta također omogućavaju:

- jednolično grijanje u zoni boravka koje se može namještati, bez opasnosti od pregrijavanja u gornjem dijelu skladišta
- najmanje temperaturno raslojavanje i male gubitke kroz strop
- savršenu raspodjelu zraka i temperature zahvaljujući vrtložnoj struji u slučaju hlađenja.

OPTIMALNO RJEŠENJE

Nakon što je utvrđeno da su zračni injektori najbolje rješenje za sustave

toplozračnog grijanja u visokoregalnim skladištima, treba pojasniti kako se određuju veličine, broj i raspored uređaja.

Velicina i broj uređaja

Najmanji broj potrebnih uređaja izračunava se jednačbama:

- prema kriteriju pokrivanja cijele površine S:

$$n_s = \frac{S}{s} \quad (4)$$

- prema kriteriju grijanja cijelim toplinskim učinkom Q:

$$n_q = \frac{Q}{q} \quad (5)$$

pri čemu su:

- s - pokrivena površina poda po uređaju, m²
- q = κ · V · (t₀ - t_{zr}) - toplinski učin po uređaju, kW.
- κ - koeficijent koji ovisi o konstrukciji izvora topline
- V - dobavna količina zraka, m³/h
- t₀ - temperatura zraka koji se ubacuje u prostoriju, °C
- t_{zr} - temperatura zraka u prostoriji, °C.

Najveća visina sapnice za istrujavanje računa se jednačbom:

$$H_{max} = \mu \cdot V \cdot \sqrt{\frac{t_{zr}}{d_0^3 \cdot (t_0 - t_{zr})}} \quad (6)$$

pri čemu su:

H_{max} - najveća visina sapnice, m

μ - koeficijent koji ovisi o konstrukciji izvora topline.

Na osnovi jednačbi (4), (5) i (6) može se zaključiti da je s ekonomskog gledišta najpovoljnije odabrati što veći izvor topline. Tome u prilog ide i činjenica da u visokoregalnim skladištima nema ograničenja brzine strujanja zraka (pojava propuha). No, ako se zahtijeva veća udobnost, preporučuje se ugradnja više manjih uređaja.

Raspored jedinica

Potreba za grijanjem u skladištu može biti prilično neravnomjerna. Zbog toga se uređaji trebaju rasporediti u različite zone skladišta ili drugim riješenjima stvoriti smislene 'regulacijske zone'.

Police utječu na raspodjelu zraka. Uzduž prolaza dolazi do 'uzdužnog spljoštenja' struje zraka što uzrokuje veće pokrivanje površine poda. Unatoč tome, uređaji se ne moraju postaviti baš iznad svakog prolaza jer se jednom sapnicom može pokriti više njih. Pretpostavka za to je slobodan prostor između polica, što je ionako uobičajeno jer se police rijetko pune do kraja kako bi se roba lakše mogla dosegnuti. Prema tome, dovoljno je ugraditi uređaj u svaki treći prolaz, čak i na većem razmaku (il. 5).

Takva razmišljanja koja su poduprta stručnom literaturom i iskustvom pokazuju da decentralizirani uređaji za toplozračno grijanje sa zračnim injektorima predstavljaju optimalan sustav grijanja visokoregalnih skladišta. Takvi sustavi imaju sljedeće prednosti:

- jednolik raspored temperaturnih slojeva zbog optimalne raspodjele zraka (okomiti gradijent temperature iznosi 0,1 - 0,15 K/m, čime se ostvaruje učinkovita uporaba energije za grijanje u zoni boravka i smanjuju gubici energije kroz strop)
- najmanji broj uređaja čime se snižavaju troškovi investicije zahvaljujući mogućnosti pokrivanja veće površine jednim uređajem
- nema potrebe za dobavnim i odsisnim kanalima za zrak
- decentralizirani sustav omogućava veliku pogonsku sigurnost i omogućava proširivanje postojeće instalacije.

Praktično iskustvo sa zračnim injektorima potvrđuje veliku učinkovitost u radu pa se takvo rješenje može preporučiti za sustave toplozračnog grijanja suvremenih logističkih centara. [5, 7] ■

Literatura

1. I. A. AGAFONOVA, A. S. STRONGIN i E. O. SHILKROT: 'Heating and Ventilation of Modern Warehouse Complexes', AVOK, br. 6, 2004.
2. M. I. GRIMITLIN: 'Distribution of Air Indoors', St. Peterburg, Rusija, 1994.
3. L. J. BALADINA: 'Features of Distribution of Warm Air Indoors with Air Heating Systems', C.O.K., br. 1, 2007.
4. I. A. SHEPELEV: 'Aerodynamics of Air Streams Indoors', Strojizdat, Moskva, Rusija, 1978.
5. E. P. VISHNEVSKIJ: 'Experience of Ventilation of Objects of the Industry and Social Appointment with Use of the decentralized Units of Manufacturer by HOVAL', AVOK, br. 5, 1999.
6. M. I. GRIMITLIN: 'Energetically Effective Ventilation of Industrial Buildings', Technologies of Safety and Engineering Systems, br. 6, 2005.
7. L. J. BALADINA i E. P. VISHNEVSKIJ: 'Ventilation of Large Industrial and Public Constructions with Use of the Twirled Streams', Works of VII. Congress AVOK, 2000.