



Univerzitet u Beogradu
Mašinski fakultet

PRELAZ TOPLOTE I VLAGE SA SMRZNUTE POVRŠINE - INŽENJERSKI PRISTUP

Autori: Uroš Milovančević, Franc Kosi, Milena Stojković, Snežana Stevanović

Beograd, 4.12.2014.

Sadržaj

1. Uvodna razmatranja
2. Matematički model za proračun prelaza toplote i vlage
3. Analiza rezultata proračuna
4. Zaključak

1. Uvodna razmatranja

- Problem „kaliranja“ smrznutih proizvoda je od ključnog uticaja na uspeh dugotrajnog konzervisanja hrane smrzavanjem;
- Izgradnja velikih ledenih površina za rekreativne i sportske aktivnosti.

Kod klizalista, u ukupnom toplotnom opterećenju koje je merodavno za proračun potrebnog rashladnog učinka instalacije, konvektivno toplotno opterećenje dostiže udeo i do 30%. Kod otvorenih klizališta kada brzine strujanja vazduha duž ploče mogu biti značajne, konvektivna opterećenja mogu dobiti značajno velike vrednosti.

2. Matematički model za proračun prelaza toplote i vlage

Ukupni konvektivni fluks q , W/m² sa ledene površine, koji se konvencionalno izražavaju preko „suvog“ i „vlažnog“ toplotnog fluksa, može da se odredi pomoću poznate jednačine

$$q = q_s + q_w$$

- q_s , W/m² – “suvi” toplotni fluks (usled konvekcije),

$$q_s = \alpha_{Lm} \times (t_1 - t_g)$$

- q_w , W/m² – “vlažni” toplotni fluks (usled ishlapljivanja vlage sa granične površine leda i vazduha).

$$q_w = \sigma \times (x_{d1} - x_{dg}) \times (h_{dg} - h_{wg})$$

2. Matematički model za proračun prelaza toplote i vlage – suvi toplotni fluks

- Srednji koeficijent prelaza toplote sa ledene površine na vazduh je

$$\alpha_{Lm} = \frac{Nu_{Lm} \times \lambda_{Lm}}{L_p}$$

$$Nu_{Lm} = 0,664 \times Re_{Lm}^{\frac{1}{2}} \times Pr_{Lm}^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_{Lm} = 0,037 \times Re_{Lm}^{\frac{4}{5}} \times Pr_{Lm}^{\frac{1}{3}}$$

ako je strujanje sa $Re < 500000$

ako je strujanje sa $Re > 500000$

- *Reynolds*-ov broj za strujanje duž ravne površine određuje se na osnovu izraza

$$Re_{Lm} = \frac{w_L \times L_p}{\nu_{Lm}}$$

- Sve termofizičke veličine vazduha se računaju na srednjoj temperaturi t_{Lm} .

2. Matematički model za proračun prelaza toplote i vlage – suvi toplotni fluks

- Za proračun u literaturi se sugerije izraz

$$\alpha_{Lm} = 3,41 + 3,55 \times w_{Lm}$$

- Ovom jednčinom dobijaju se manje vrednosti u odnosu na proceduru opisanu jednačinama sa prethodnog slajda.

Primer: Ako se usvoji da je $Lp = 0,25$ m i brzina nastrojavanog vazduha od 1 m/s gornji izraz daje vrednost 6,9 W/(m²K), dok se na osnovu sistema jednačina dobija 8,8 W/(m²K) (oko 20% više).

α_{Lm} brzo raste sa opadanjem Lp , pa je svrsishodno koristiti sistem opisanih jednačina.

2. Matematički model za proračun prelaza toplote i vlage – vlažni toplotni fluks

- Vlažni toplotni fluks određuje se pomoću jednačine

$$q_w = \sigma \times (x_{d1} - x_{dg}) \times (h_{dg} - h_{wg})$$

- σ , kg/(m²s) je koeficijent ishlapljivanja po *Lewis-u*

$$\sigma = \frac{\alpha_{Lm}}{Cp_{Lm}} \times \left(\frac{D_{Lm}}{a_{Lm}} \right)^{1-n} \times \Phi_{\xi}$$

n , / je bezdimenzijska konstanta.

2. Matematički model za proračun prelaza toplote i vlage – vlažni toplotni fluks

- Članom Φ_ξ uzima se u obzir “položaj” procesa izdvajanja inja u odnosu na graničnu krivu vlažnog vazduha

$$\Phi_\xi = \frac{\ln(\xi)}{\xi - 1} \quad \xi = \frac{0,622 + x_{dg}}{0,622 + x_1}$$

- D_{Lm} , m²/s je koeficijent difuzije pare kroz vazduh. Postoji nekoliko modela za proračun koeficijenta difuzije vodene pare u suvom vazduhu. U ovom radu je izračunat pomoću empirijske relacije

$$D_{Lm} = 10^{-6} \times \left(\frac{0,926}{p} \right)^{\frac{1}{4}} \times \left(\frac{T_{1m}^{2.5}}{T_{1m} + 245} \right)^{\frac{1}{4}}$$

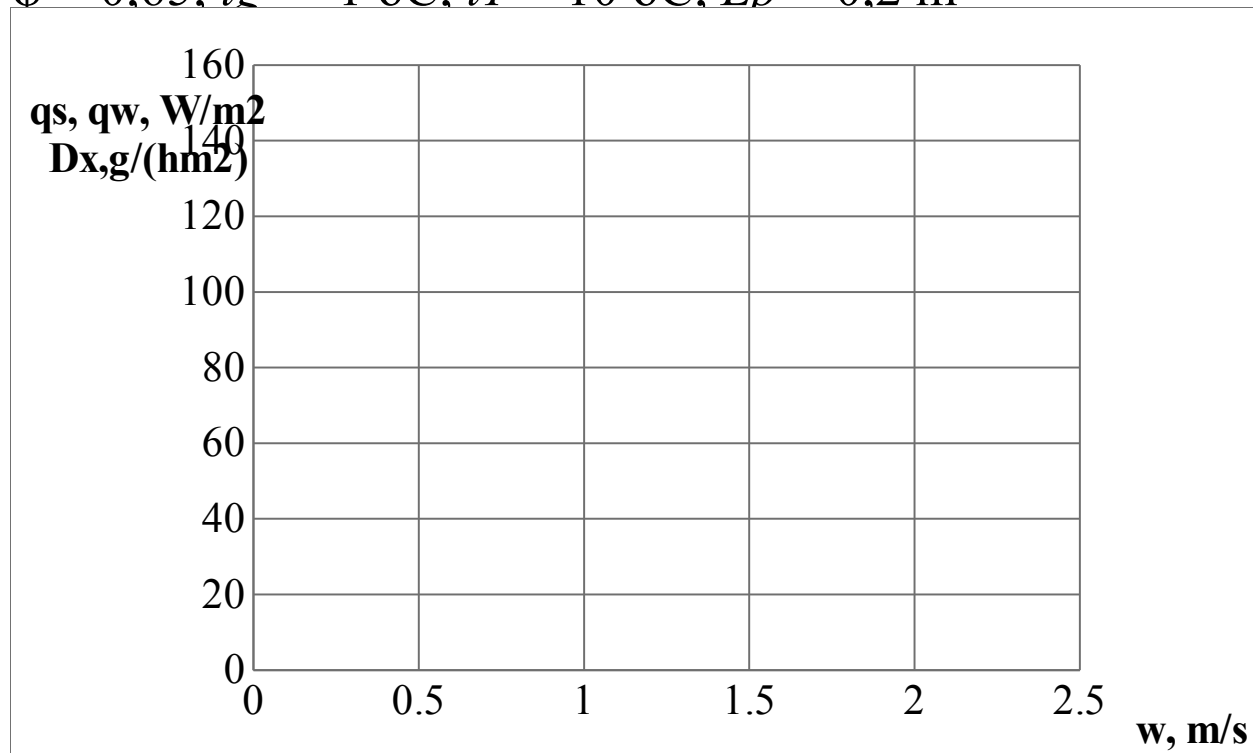
3. Rezultati proračuna

Parametarska analiza toplotnih optećenja ravne ledene ploče sprovedena je primenom opisane procedure za vrednosti parametara tipičnih za sportska i rekreativna klizališta:

- temperatura neporemećene struje vazduha iznad ploče: $t_l = 10^{\circ}\text{C}$;
- relativna vlažnost neporemećene struje vazduha iznad ploče: $\varphi = 0,50$ do $0,95$;
- brzina neporemećene struje vazduha iznad ploče: $w = 0,5$ do $2,5$ m/s;
- temperatura površine leda: $t_g = 0$ do -7°C .

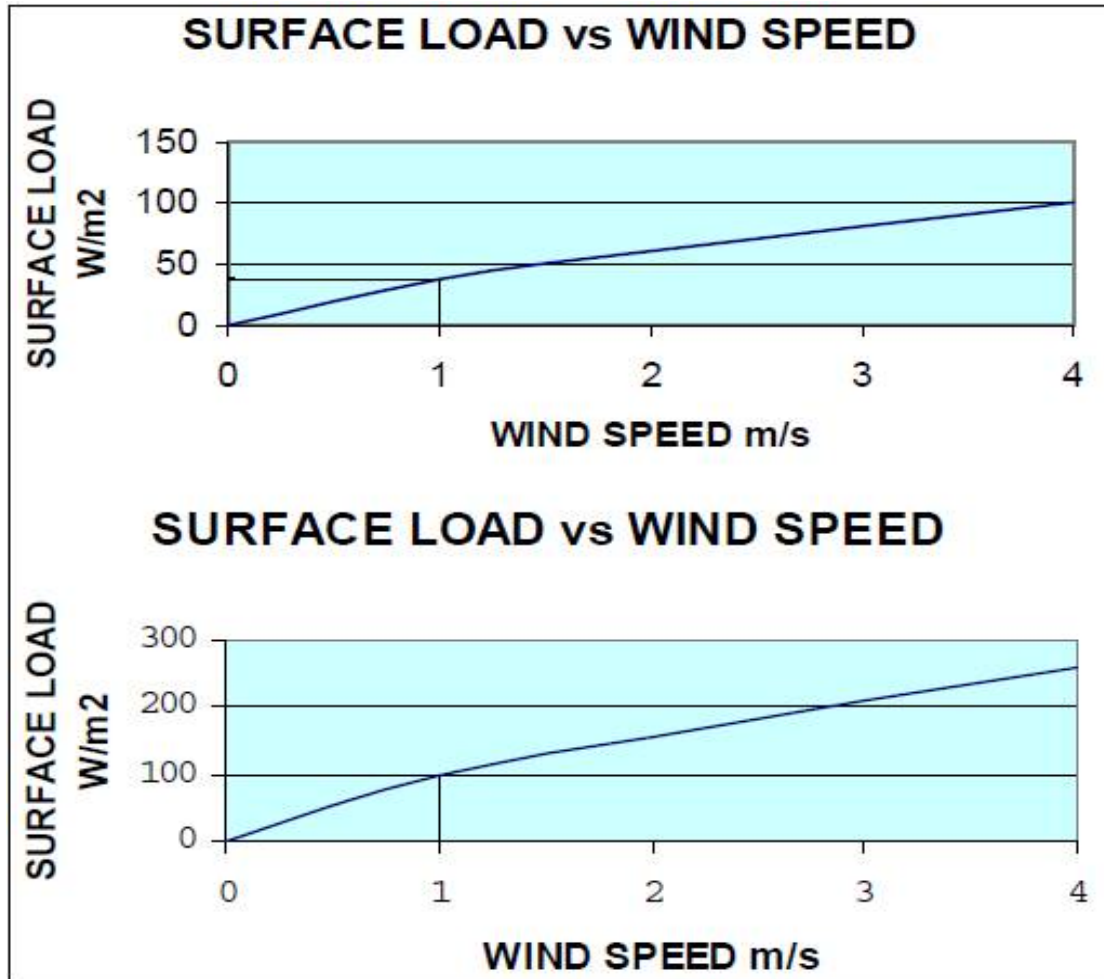
3. Rezultati proračuna

- U posmatranom opsegu brzina vazduha, koeficijent prelaza toplote kretao se u opsegu od 6,2 W/(m²K) do 13,9 W/(m²K), dok je sa Dx , g/(h kg) označena brzina taloženja vlage na ledenoj ploči
- Za $\phi = 0,65$, $t_g = -1$ oC, $t_l = 10$ oC, $L_p = 0,2$ m



Slika 1. Uticaj brzine strujanja na fluks vlage i toplote

3. Rezultati proračuna



Uticaj brzine strujanja vazduha na vlažni toplotni fluks

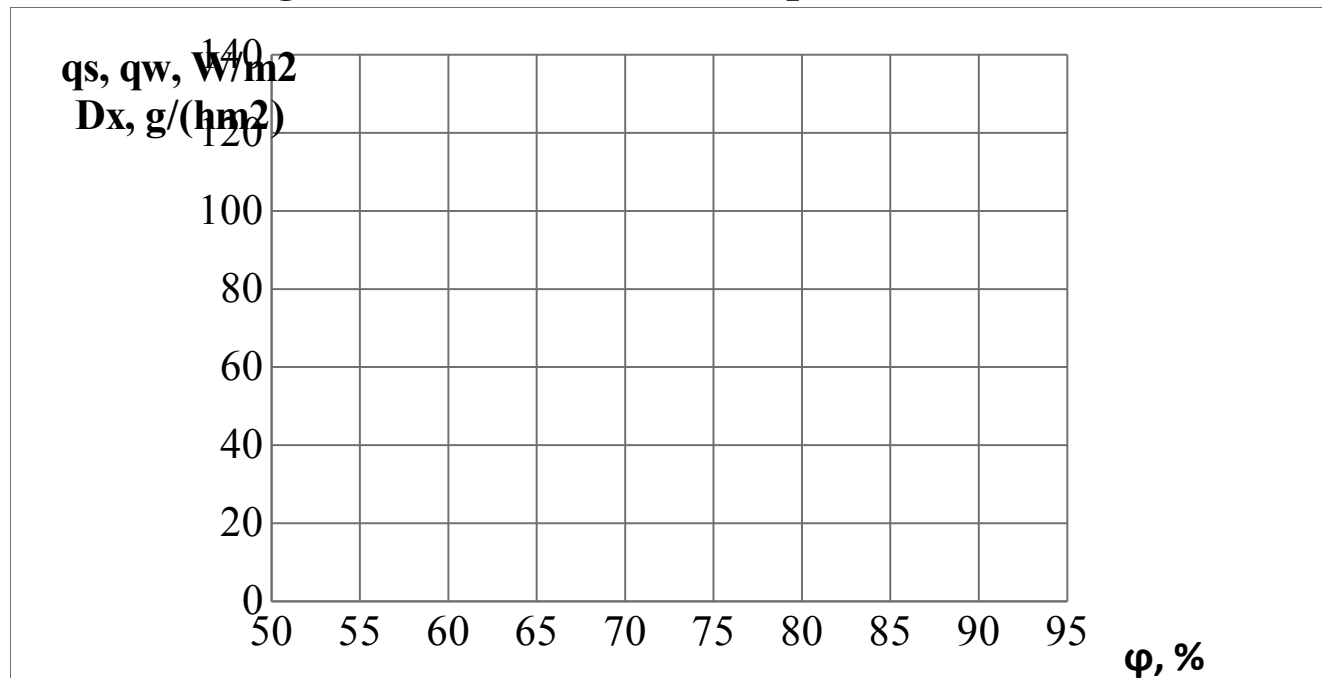
Uticaj brzine strujanja vazduha na suvi toplotni fluks

3. Rezultati proračuna



3. Rezultati proračuna

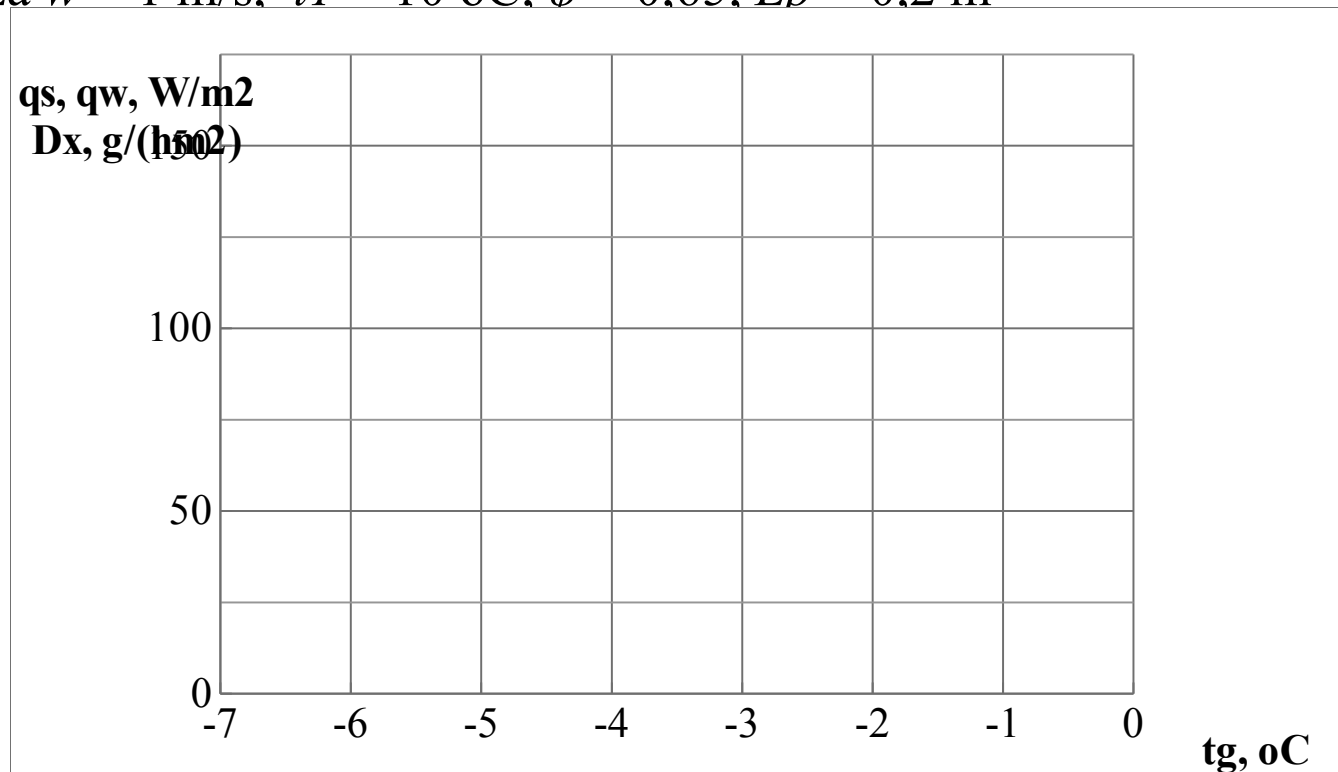
- Za zvanična sportska takmičenja na ledu maksimalna dozvoljena relativna vlažnost vazduha u dvorani je 70%. Sa dijagrama na slici 2 se vidi da pri promeni relativne vlažnosti nastrujavajućeg vazduha od „projektnih“ 65% do 95%, „vlažni“ toplotni fluks raste za oko 63%.
- Za $w = 1 \text{ m/s}$, $t_g = -1 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_l = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $L_p = 0,2 \text{ m}$



Slika 2. Uticaj relativne vlažnosti nastrujavajućeg vazduha na fluks vlage i toplote

3. Rezultati proračuna

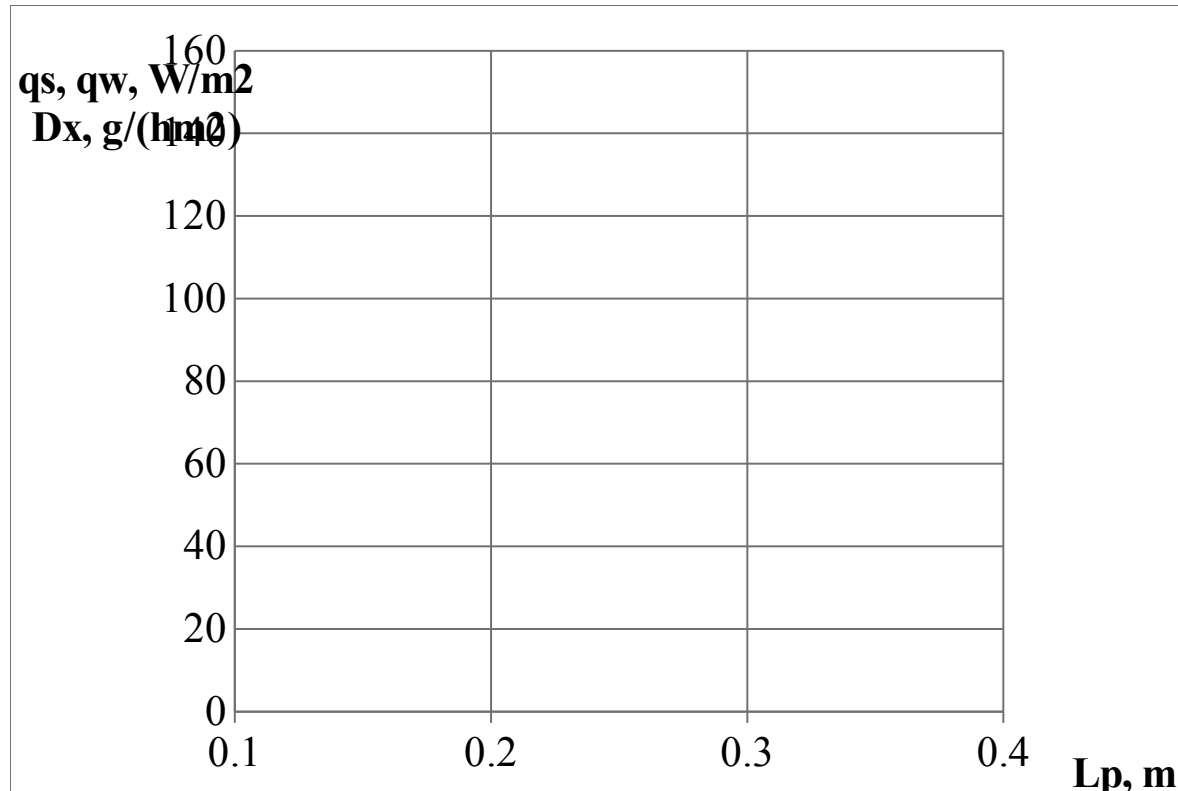
- Za rekreativno klizanje najpogodniji je suv led temperature 0°C (na površini) ili malo niže. Za hokejaške utakmice -5°C , a za takmičenja u umetničkom ili brzom klizanju -4°C
- Za $w = 1 \text{ m/s}$, $t_l = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 0.65$, $L_p = 0.2 \text{ m}$



Slika 3. Uticaj temperature površine leda na fluks vlage i toplote

3. Rezultati proračuna

- Zavisnost toplotnih i fluksa vlage od dužine L_p , pokazuje da je uticaj brzine formiranja graničnog sloja znatan.
- Za $\varphi = 0,65$, $t_g = -1$ oC, $t_s = 10$ oC, $w = 1$ m/s



Slika 4. Uticaj „karakteristične“ dužine na fluks vlage i toplote

4. Zaključak

- Koeficijent ishlapljivanja po *Lewis*-u je oko 1,1 što je za oko 10% veća vrednost od one koja se uobičajeno usvaja u proračunima (pri turbulentnom strujanju). To znači da je pravac stvarne promene stanja vazduha pri ohlađivanju i smrzavanju vlage u izvesnoj meri strmiji („pripadajuća“ promena vlažnosti vazduha je nešto manja).
- Unapređenje efikasnosti rada rashladnih instalacija podrazumeva mere za ograničavanje brzine strujanja vazduha preko površine.
- Efikasna ventilacija objekta, posebno u periodima visokih spoljnih temperatura vazduha, utiče pozitivno na smanjenje konventivnih toplotnih opterećenja.
- Održavanje relativne vlažnosti vazduha na što nižem nivou (ne više od 70%), pri čemu odvlaživanje vazduha odvija u posebnim uređajima za sušenje, pre smrzavanja viška vlage na ledenoj poršini.
- Temperatura površine leda ni u kom slučaju ne bi trebalo da bude niža od minimalno potrebne za određenu namenu, pošto svako povećanje debljine leda dovodi do smanjenja energetske efikasnosti rada rashladne instalacije.

HVALA NA PAŽNJI!