

Gradbena fizika

1

PROF. DR. DENIS ARČON
FMF – UNIV. LJUBLJANA

Marec 2010

Zakaj gradbena fizika?

2

- V zgradbah preživimo do 95 % svojega časa.
- V razvitih deželah dosežajo sredstva, ki jih namenimo za zgradbe, od 7 do 10 % BDP
- Obratovalni in vzdrževalni stroški v vsej življenski dobi stavbe dosežejo ali celo presežejo stroške gradnje.
- 1/3 vse energije porabimo v stavbah.

Marec 2010

Cilji

3

- Prepoznavanje ključnih elementov, ki vplivajo na kvaliteto zgradbe
- Prepoznavanje naših človeških potreb in pričakovanj v zvezi z bivalnim okoljem
- Predlaga rešitve za kontrolo in omejevanja vpliva zunanjega okolja na samo zgradbo
- Izbira ustreznega designa in materialov za izbrano konfiguracijo zgradbe.

Marec 2010

Glavni poudarki

4

- **Toplotna izolacija stavb**
 - Zunanje okolje in človeške potrebe
 - Pretok toplote in zraka
 - Vlažnost zraka in "toplotno ugodje"
 - Pasivno gretje in hlajenje
 - Toplotna izolacija
 - Kondenzacija in vlaga v prostoru
 - Aktivno gretje
 - Toplotne bilance
- **Razsvetljava v stavbah**
 - Fizika svetlobe (fotometrija)
 - Barve, barvno udobje
 - Načrtovanje naravne razsvetljave
 - Materiali za okna
- **Zvočna izolacija**
 - Zvok
 - Zvočna izolacija
 - Akustika v sobi (dvorani)
- **Konstruktivske metode**
 - Les, jeklo, beton, ...

Marec 2010

Akustika

5

- Akustika = znanost o zvoku (zvok = valovanje v plinih, tekočinah, trdni snovi) in učinkih, ki jih imajo ta valovanja.
- Akustika:
 - Glasba
 - Zvočni zapis in reprodukcija
 - Načrtovanje koncertnih dvoran, predavalnic, ...
 - Kontrola hrupa,
 - "Bioakustika" in "psihoakustika", ...
- Akustika je v gradbeni fiziki zanimiva z dveh vidikov: zaščite pred hrupom in t.i. prostorske oziroma arhitekturne akustike (načrtovanje prostora, da dosežemo željeno akustično klimo).

Marec 2010

Fizikalne lastnosti zvoka

6

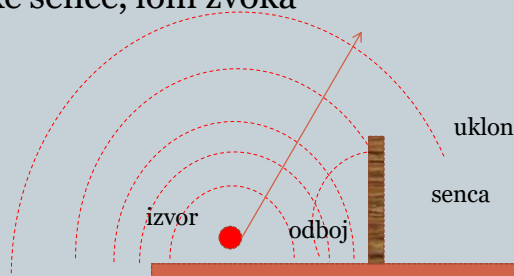
- Ena od glavnih lastnosti fluidov je njihova nezmožnost prenašanja strižnih sil. Po drugi strani pa fluidi na spremembo prostornine reagirajo s spremembo tlaka. Razliko v tlaku med trenutno vrednostjo in povprečnim tlakom slišimo kot zvok.
- Zvočno valovanje je longitudinalno valovanje. V večini primerov so odstopanja od ravnovesnih vrednosti izredno majhna. Na primer: glasnost 120 dB (to je glasnost, ki je že zelo blizu praga bolečine) ustreza relativni spremembi tlaka $\Delta p/p = 2 \times 10^{-4}$, relativni spremembi gostote $\Delta \rho/\rho = 1.4 \times 10^{-4}$, spremembi temperature zraka manj kot 0.02 K, premiku delcev (pri frekvenci 1 kHz) manj kot 8 μm .
- Hitrost zvoka v zraku pri običajnih pogojih znaša ≈ 340 m/s, valovna dolžina od 0.34 m pri 1 kHz do 0.034 m pri 10 kHz. Človek zazna frekvence med 20 Hz (17 m) do 20 kHz (17 mm). Ravno velik razpon valovnih dolžin predstavlja velik izziv v akustiki.
- Hitrost zvoka:
$$c = (1/\chi_s \rho)^{1/2} = (\kappa p / \rho)^{1/2} = (\kappa R T / M)^{1/2}$$

Marec 2010

Fizikalne lastnosti zvoka

7

- Zvočna valovnja lahko kot vsa valovanja interferirajo.
- Za zvočno valovanje velja geometrijska akustika: odboj, absorpcija valovanja, uklon v področje geometrijske sence, lom zvoka



Marec 2010

Valovna enačba

8

- (i) Ohranitev mase; (ii) Longitudinalna sila, ki nastane zaradi razlike tlakov je uravnotežena z vztrajnostjo medija; (iii) Zvok je (skoraj) adiabatni proces (ni toka toplote);

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Linearni operatorji =>
velja princip superpozicije
 $P = P_1 + P_2$
Tudi ni disperzije

- Hitrost zvoka je $c = \sqrt{1/\chi_s \rho}$
kjer je $\chi_s = 1/\gamma p_0$ adiabatna stisljivost
- Robni pogoji: običajno rečemo, da je normalna komponenta hitrosti delcev enaka 0 na trdi podlagi. Hitrost delcev pa je s tlakom povezana preko Eulerjeve enačbe gibanja

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla p = 0$$

Marec 2010

Valovna enačba

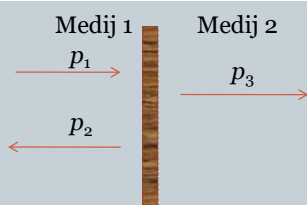
9

- Rešitev valovne enačbe za 1D primer je $p=f_1(ct-x)+f_2(ct+x)$. Prva funkcija predstavlja val, ki se razširja v smeri x s hitrostjo c , druga pa val, ki se razširja v obratni smeri.
- Poseben primer so harmonska valovanja (izvori sinusno nihajo), ki jih lahko zapišemo kot $p=p_0 \sin[(ct-x)\omega/c+\varphi]=p_0 \sin[\omega t-kx+\varphi]$.
 $k=\omega/c=2\pi/\lambda$.
 Kompleksni zapis: $p=p_0 \exp[i(\omega t-kx)]$
 Tlak in hitrost sta v tem primeru v fazi: $u_x=p/\rho c$ in razmerje med tlakom in hitrostjo je podano z ρc , ki se imenuje (akustična) impendanca medija. Za zrak pri 20 °C in tlaku 101.3 kPa je $\rho c=413 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Marec 2010

Odboj na meji med dvema sredstvoma

10



- Upoštevanje robnih pogojev (zveznost tlaka (drugače bi imeli neto silo)+ zveznost odvoda tlaka (hitrosti zračnih delcev morajo biti enake na obeh straneh) dobimo:
 $R=p_2/p_1=(\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1)/(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)$
 Zvočni val, ki vpada na mejo zrak/voda se skoraj v celoti odbije.
 Zvočni val, ki vpada na mejo voda/zrak se tudi skoraj v celoti odbije a z nasprotno fazo.

Marec 2010

Gostota energijskega toka

11

- Definicija **gostote energijskega toka**:

$$j = (\text{vpadna moč na enoto površine}) = dP/dS.$$

$$j(t) = p(t)u(t) \text{ (sledi iz } P = Fu)$$

- Za enostavno harmonsko valovanje, ki se razširja v eni dimenziji z amplitudi p_0 (ravni val), dobimo v časovnem povprečju

$$j = p_0^2 / 2\rho c.$$

$$\text{glasnost zvoka } \beta = 10 \cdot \log(j/j_0) = 20 \cdot \log(p/p_0);$$

$$j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2.$$

- V okolju, kjer ni sten, ki bi odbijale zvok, je valovanje daleč stran od izvora ravni val in lahko vzamemo $j = p_0^2 / 2\rho c$ in sevano moč zvočila izračunamo z

$$P_s = \oint \left(\frac{p_0^2}{2\rho c} \right) dS$$

Marec 2010

Energija zvoka

12

- Najpomembnejša fizikalna količina, s katero opisujemo zvok, je tlak. Vendar, izvori zvoka sevajo zvok z neko močjo in zvočna polja lahko opisujemo tudi s stališča energije, saj imamo opravka s potencialno in kinetično energijo delcev.
- Tipične moči raznih izvorov zvoka:

Letalski motor reaktivnega letala	10 kW	160 dB
Simfonični orkester	1 W	120 dB
Traktor	100 mW	110 dB
Govor	10 μ W	70 dB
Šepetanje	10 nW	40 dB
Radijski studio	1 nW	30 dB
Tiktakanje ročne ure	0.1 nW	20 dB

$$\beta = 10 \log(P / P_0)$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$$

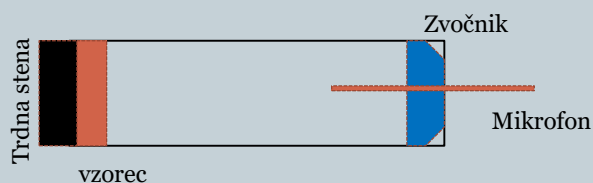
Marec 2010

Absorpcija zvoka

13

- V večini praktičnih aplikacij moramo upoštevati absorpcijo zvoka. Da bi to upoštevali, moramo upoštevati ustrezne robne pogoje na meji med dvema sredstvoma ...
- Ustrezen opis je z **absorpcijskim koeficientom α** , ki je po definiciji delež absorbirane moči glede na vpadno moč.
- Enostavna metoda za merjenje absorpcijskega koeficienta določenega materiala:

$$\alpha = \frac{j_x}{j_0} = \frac{|p_0|^2 - |p_1|^2}{|p_0|^2} = 1 - |R|^2$$



Marec 2010

Izvori zvoka

14

- Točkasti izvori (krogla z radijem a , ki na površini oscilira s hitrostjo $u \cdot \exp[i\omega t]$):

$$p = i \frac{\rho\omega Q}{4\pi r(1+ika)} \exp[i(\omega t - k(r-a))] \quad \xrightarrow{ka \ll 1} \quad \begin{aligned} p &= i \frac{\rho\omega Q}{4\pi r} \exp[i(\omega t - kr)] \\ j &\propto 1/r^2 \\ P_s &= \frac{\rho c k^2 |Q|^2}{8\pi} \end{aligned}$$

- Linijski izvori (cesta, na primer): $j \propto 1/r$
- Diskasti izvori (recimo disk, ki na eni strani zapira cilinder)
- ...

Marec 2010

Zvočni valovi v sobah

15

- Stoječa valovanja v pravokotni sobi z dimenzijami l_x , l_y , l_z :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0$$

- Ob upoštevanju robnih pogojev ($u|_{\text{steni}}=0$), dobimo

$$p = p_0 \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$k_x = \pi n_x / l_x; \quad n_x = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Frekvence nihanja so podane z

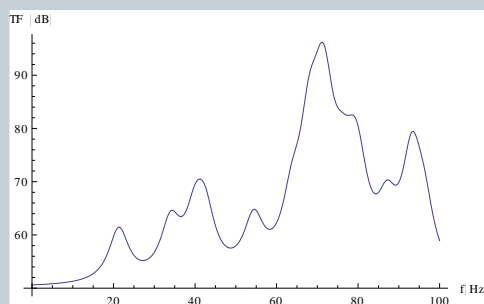
$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{ck_n}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$$

Marec 2010

Zvočni valovi v sobi

16

- Primer sobe z dimenzijami 5m x 8m x 2.5 m
- Prenosna funkcija (transfer function=TF) predstavlja frekvenčni odziv od izvora do detektorja. TF je močna funkcija frekvence z maksimumi na lastnih frekvencah sobe.



n_x	n_y	n_z	f_n (Hz)
0	1	0	21,3
1	0	0	34,0
0	0	1	68,0
1	1	0	40,1
0	1	1	71,2
1	0	1	76,0
0	2	0	42,5
1	1	1	78,9
1	2	0	54,4
2	0	0	68,0
0	2	1	80,2
2	1	0	71,2
1	2	1	87,1
2	0	1	96,2
0	0	2	136,0
0	3	0	63,8
1	3	0	72,3
0	3	1	93,2
2	3	0	93,2

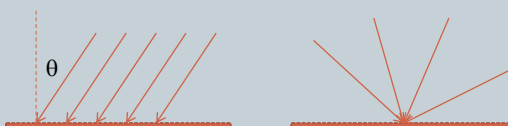
Marec 2010

Direktno in difuzno zvočno polje

17

- V odprtem prostoru imamo navadno opravka le z direktnim zvočnim poljem, ki se lahko zelo spreminja s krajem. V zaprtih prostorih pa je pomembno tudi difuzno zvočno polje, ki nastane zaradi odbojev od sten. Difuzno zvočno polje se navadno ne spreminja zelo od kraja do kraja, tako da zvočilo po vsem prostoru dušimo enako dobro (to je res le pri pravilno oblikovanih prostorih brez ovir). Pri difuznem zvočnem polju so tudi vse smeri razširjanja valovanja enako verjetne. Difuzno zvočno polje je lahko v določenih primerih celo mnogo močnejše od direktnega.
- Ravni val: $p_1^2 = j_1 \rho c$
- Difuzni zvok: valovanja prihajajo z vseh strani z j_1 . Po integraciji po celotni krogli, dobimo $p_{diff}^2 = 4\pi j_1 \rho c$. Normalna komponenta gostote energijskega toka je $j_\theta = j_1 \cos \theta$. Po integraciji po polovici krogle dobimo celotno vpadno moč na enoto površine

$$j_{vp} = \int_{\psi=2\pi} j_\theta d\psi = \frac{p_{diff}^2}{4\rho c}$$



Marec 2010

Ekvivalentna absorpcijska površina

18

- Absorpcijski koeficient α , ki je po definiciji delež absorbirane moči glede na vpadno moč.
- Produkt površine in absorpcijskega koeficienta se imenuje **ekvivalentna absorpcijska površina**:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + \dots = S \alpha_m$$

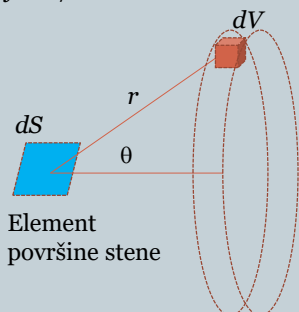
α_m je povprečni absorpcijski koeficient.

Marec 2010

Model polnjenja sobe z zvokom

19

$$j = dE/dSdt = wc$$



$$dE = \frac{w}{4\pi r^2} 2\pi r^2 dr \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta d\theta \cdot dS$$

$$= \frac{wdSdr}{4} \Rightarrow \frac{dE}{dSdt} = \frac{wc}{4}$$

- Celotna energija zvoka v sobi je: $E = p^2 / \rho c^2 V$.

$$p = p_0 / 2^{1/2}$$

- Energija, ki se absorbira v sobi je vpadna moč na enoto površine stene pomnožena s skupno površino vseh sten in povprečnim absorpcijskim koeficientom:

$$P_{abs} = j_{vp} S \alpha_m = p^2 A / 4 \rho c.$$

- Če je P_a moč zvočila, ki proizvaja zvok v sobi, potem je energijska bilanca za sobo:

$$P_a - P_{abs} = dE/dt.$$

$$P_a - p^2 A / 4 \rho c = V / \rho c^2 d(p^2) / dt.$$

- V stacionarnem stanju je:

$$p_s^2 = 4 P_a \rho c / A.$$

Ta izraz kaže, da ima absorpcijska površina direkten vpliv na velikost zvočnega tlaka v prostoru.

Marec 2010

Odmevni čas

20

- Če izvor zvoka v sobi nenadoma izključimo, potem ko je zvočni tlak dosegel stacionarno vrednost, je $P_a = 0$ in prejšnja enačba se prepiše v

$$p^2 A / 4 \rho c + V / \rho c^2 d(p^2) / dt = 0.$$

Ta enačba ima seveda rešitev

$$p^2(t) = p_s^2 e^{-(cA/4V)t}.$$

Če bi namesto tega ob času $t=0$ zvočilo nenadoma vklopili, potem bi bila rešitev

$$p^2(t) = p_s^2 (1 - e^{-(cA/4V)t}).$$

Relaksacijski čas $\tau_E = 4V/cA$, ki je značilen čas polnjenja sobe z zvokom, zavzema vrednosti 50 ms za majhne sobice in 1 s za večje koncertne dvorane.

- **Odmevni čas** je definiran kot čas, v katerem energija zvoka v sobi upade za 60 dB = faktor 10^6 . Torej $e^{[-T/\tau_E]} = 10^{-6}$, sledi

$$T_{60} = \tau_E 6 \ln 10 = 13.8 \tau_E = 13.8 \frac{4V}{cA}$$

Sabinova formula (Wallace C. Sabine, 1896): T_{60} je obratno sorazmeren z absorpcijsko površino.

$$T_{60} = 55.3 \frac{V}{cA}$$

Problem enačbe: če gre $\alpha_m \rightarrow 1$, potem bi moral iti T_{60} proti neskončnosti.

Marec 2010

Stacionarno zvočno polje v sobi. Odmevna razdalja

21

- Odmevna soba je posebna soba z dolgim odmevnim časom in dobro difuzijo zvoka. V taki sobi je difuzijsko zvočno polje dober približek in v stacionarnem primeru smo izpeljali:

$$P_a = \frac{p_s^2 A}{4\rho c} \Rightarrow P_a = \frac{p_s^2}{4\rho c} \frac{55.3V}{cT_{60}}$$

- Direktno zvočno polje točkastega zvočila:

$$P_{dir} = j_{dir} \cdot 4\pi r^2 = \frac{P_{dir}^2}{\rho c} \cdot 4\pi r^2$$

- Kje sta direktno in difuzno zvočno polje enaka? Tam, kjer je $p_{dir}^2 = p_s^2$!

Dobimo:

$$1 = \frac{A}{16\pi r_{rev}^2} \Rightarrow r_{rev} = \sqrt{\frac{A}{16\pi}} = 0.14\sqrt{A}$$

Pri razdaljah krajših od r_{rev} dominira direktno zvočno polje, medtem ko pri razdaljah večjih od r_{rev} je difuzno zvočno polje dober približek. Če $A=200 \text{ m}^2 \Rightarrow r_{rev}=2 \text{ m}$.

Marec 2010

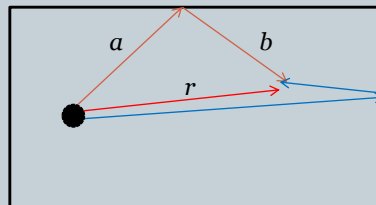
Arhitekturna akustika

22

- Difuzno zvočno polje, ki nastane z odbojem direktnega zvoka od sten prostora, je homogeno, kar naredi prostor primernejši za poslušanje govornika, glasbe, ..., saj je izvor zvoka slišati iz različnih mest enako dobro.
- Difuzijsko zvočno polje je v akustično živi sobi mnogo močnejše od direktnega, zato je tudi šibke izvire zvoka lahko dobro slišati. Obenem pa odbiti žarki pridejo do poslušalca kasneje od direktnega; temu rečemo odmev. Odmev zmanjša prepoznavnost zvoka: človeško uho signala, ki dospeta v razmiku manj kot 0.05 s, dojame kot enovit signal. Pri $c=340 \text{ m/s}$, se morata zato poti obeh žarkov razlikovati za 17 m.

Živ prostor: akustično ustrezna soba, ki zagotavlja kar največjo jakost difuznega zvočnega polja.

Gluha soba: V prostorih s stenami z veliko absorpcijo imamo le direktno zvočno polje



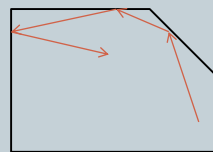
Marec 2010

Splošna odmevna formula

23

- Pri vsakem odboju se energija zvočnega polja zmanjša za faktor $(1-\alpha_m)$. Po n -odbojih, je kvadrat zvočnega tlaka:

$$p^2(t) = p_0^2 (1-\alpha_m)^n = p_0^2 e^{n \cdot \ln(1-\alpha_m)}$$



Povprečna razdalja, ki jo žarek prepotuje med dvema odbojema je l_m (povprečna prosta pot), zato je $ct = n l_m$.

$$p^2(t) = p_0^2 e^{\frac{c}{l_m} \cdot \ln(1-\alpha_m) \cdot t}$$

Reverbacijski čas (faktor 10^{-6} v energiji): $10^{-6} = e^{\frac{c}{l_m} \cdot \ln(1-\alpha_m) \cdot T_{60}} \Rightarrow T_{60} = \frac{13.8 \cdot l_m}{-c \cdot \ln(1-\alpha_m)}$

V 3D prostoru je $l_m = 4V/S$ (Kosten, 1960). Sledi Eyringova formula odmevnega časa, ki se za majhne $\alpha_m < 0.3$ poenostavi v Sabinovo formulo

$$T_{60} = \frac{55.3 \cdot V}{-c \cdot S \ln(1-\alpha_m)}$$

Sedaj ni zadreg, če $\alpha_m > 1$.

Marec 2010

Absorpcija zvoka v zraku

24

- Seveda se zvok deloma absorbira že v zraku. j se duši z **zračnim absorpcijskim faktorjem m** , ki je močno odvisen od temperature in vlažnosti prostora.

$$p^2(t) = p_0^2 e^{\frac{c}{l_m} \cdot \ln(1-\alpha_m) \cdot t} \cdot e^{-mct} = p_0^2 e^{\frac{ct}{l_m} [\ln(1-\alpha_m) - ml_m]}$$

- Izraz za odmevni čas se sedaj nekoliko popravi v:

$$T_{60} = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot [-S \ln(1-\alpha_m) + 4mV]} \approx \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot [S\alpha_m + 4mV]} = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot A}$$

ekvivalentna absorpcijska površina: $A = S\alpha_m + 4mV = \sum_i S_i \alpha_i + 4mV$

vlažnost	1 kHz	4 kHz
40 %	0.0011	0.0072
50 %	0.0010	0.0061
60 %	0.0009	0.0056
70 %	0.0009	0.0053
80 %	0.0008	0.0051

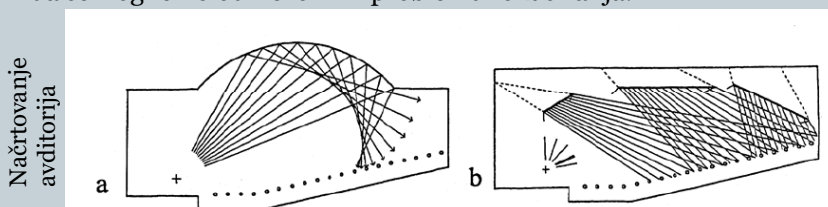
m v enotah m^{-1} .

Marec 2010

Načrtovanje akustične sobe

25

- Dimenzije sobe določajo naravne frekvence sobe. V dobro načrtovani sobi je prenosna funkcija (TF) čim bolj gladka. Iz zgleda je očitno, da se dimenzije sobe ne smejo ponavljati, da se med določenimi frekvencami ne bi pojavile prevelike vrzeli v TF.
- Kontrola odbojev: Najpomembnejša je načrtovanje prvih odbojev zato, da se izognemo odmevom in problemu fokusiranja:



Konkavno oblikovani strop lahko pripelje do fokusiranja in neenakomerno porazdeljenih zvočnih polj

Ravni reflektorji zagotavljajo enoakomerno porazdeljena zvočna polja.

Marec 2010

Izračun reverbacijskega časa

26

- V praksi se skoraj izključno uporablja Sabinov izraz za reverbacijski čas

$$T_{60} = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot A}$$

Kjer je ekvivalentna absorpcijska površina razširjena še z vplivom objektov v prostoru (n_j je število takih objektov z ustrezno absorpcijsko površino A_j):

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + \sum_j n_j A_j + 4mV$$

Marec 2010

Tipične vrednosti

27

Material	FREKVENCA [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
opeka, goli beton	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04
parket	0.16	0.14	0.11	0.08	0.08	0.07
preproga	0.03	0.04	0.06	0.10	0.20	0.35
steklo (okno)	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
zaveza spuščena do polovice, 100 mm zraka	0.10	0.25	0.55	0.65	0.70	0.70

Osebe	125	250	500	1000	2000	4000
stoječe, normalno oblečene	0.12	0.24	0.59	0.98	1.13	1.12
stoječe, oblečene v plašče (halje)	0.17	0.41	0.91	1.30	1.43	1.47
sedeči glasbeniki z instrumenti	0.60	0.95	1.06	1.08	1.08	1.08

relativna vlažnost (%)	FREKVENCA [kHz]			
	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
40	0.0011	0.0026	0.0072	0.0237
50	0.0010	0.0024	0.0061	0.0192
60	0.0009	0.0023	0.0056	0.0162
70	0.0009	0.0021	0.0053	0.0143
80	0.0008	0.0020	0.0051	0.0133

absorpcijski koeficient α

Steklo in leseni podi dobro absorbirajo nizke frekvence
Zavesa in osebe zelo absorbirajo visoke frekvence

absorpcijska površina A za ljudi ($v m^2$)

zračni absorpcijski faktor m ($v m^{-1}$) pri 20 °C

Marec 2010

Zgled izračuna reverbacijskega časa

28

- Vzemimo modelno sobo z absorpcijskimi koeficienti nakazanimi na sosednji skici.
- Parametri, ki jih potrebujemo:

$$V=1000 m^3.$$

$$S=700 m^2.$$

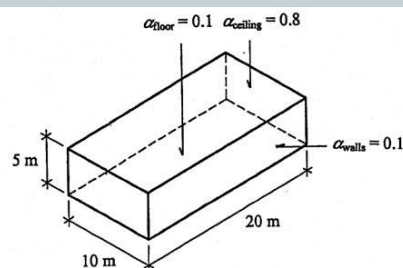
$$A=(200 \cdot 0.8 + 500 \cdot 0.1) m^2 = 210 m^2.$$

$$\text{Povprečni absorpcijski koeficient: } \alpha_m = A/S = 210/700 = 0.3.$$

Soba je prazna (ni obiskovalcev)

$$T=20 \text{ }^\circ\text{C, rel. vlažnost 50 \%} \Rightarrow m=0.002 m^{-1}.$$

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + \sum_j n_j A_j + 4mV = 210 m^2 + 4 \cdot 0.002 \cdot 1000 m^2 = 218 m^2 \Rightarrow T_{60} = \frac{55.3 \cdot V}{c \cdot A} = 0.74 s$$



Marec 2010

Optimalni odmevni čas

29

- V delavnicah z veliko hrupa želimo imeti T_{60} čim krajši.
- V učilnicah naj bi bil okoli 0.6-0.9 s in neodvisen od frekvence v območju med 100 in 4000 Hz zato, da dosežemo dobre pogoje za govor.

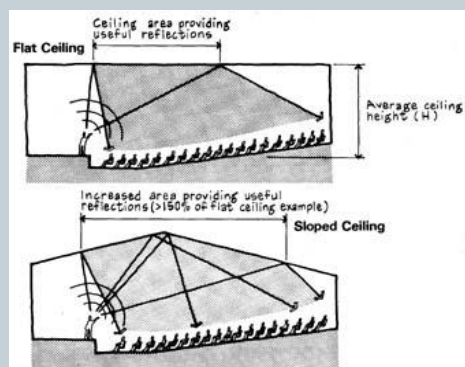
namembnost	optimalni reverbacijski čas [s]
Kinodvorana	0,4 – 1,0
Rokovski koncert	0,8 – 1,1
Učilnica	0,8 – 1,2
Gledališče	1,0 – 1,2
Opera	1,3 – 1,7
Simfonijski koncert	1,5 – 2,2

Marec 2010

Načrtovanje dvorane

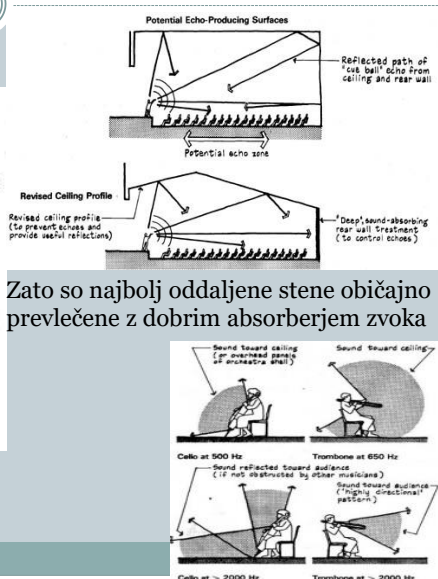
30

- Kontrola odmeva!



Poti morajo biti krajše od 17 m (0.05 s!!)

Marec 2010



Zato so najbolj oddaljene stene običajno prevlečene z dobrim absorberjem zvoka

Elementi za nadzor akustike prostora

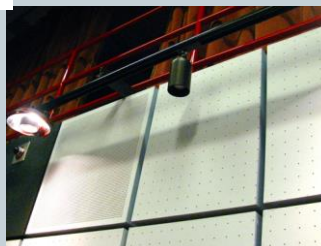
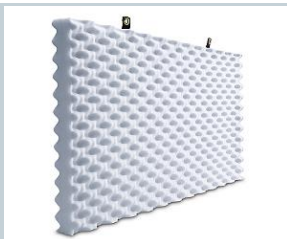
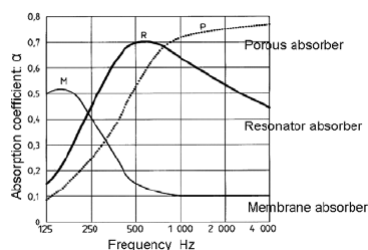
31

- T_{60} je najpomembnejši paramater, ki določa akustiko prostora.
- Zato, da bi dobili dobro frekvenčno uravnotežen T_{60} , moramo spretno mešati različne materiale pri opremljanju prostora.
- **Reflektorji**: površine z veliko odbojnostjo in velikostjo glede na valovno dolžino. Učinek reflektorjev je najbolj očiten pri eliptični razporeditvi, saj delujejo kot "zvočna leča". Pravilo za akustične dvorane je, da reflektorji ne smejo biti konkavne oblike.
- **Difuzorji**: reflektorji posebne vrste in se uporabljajo za doseganje čim bolj enakomernega zvočnega polja. Tipično so cilindrične, škatlaste, žagaste oblike.
- **Absorberji**: porozni, resonančni, membranski

Marec 2010

Absorberji

32

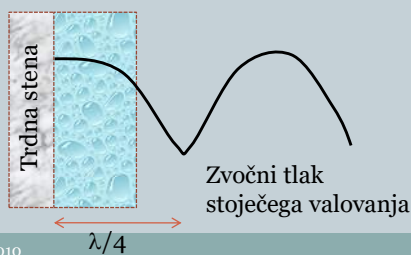


Marec 2010

Porozni absorberji

33

- Porozni absorberji so razne zavese, preproge, oblazinjeno pohištvo ter posebni absorpcijski produkti za spuščene strope.
- Običajno so učinkoviti pri višjih frekvencah (nad 500 Hz), z debelino absorpcijska sposobnost narašča a se lahko kmalu nasiti.
- Učinek lahko povečamo tako, da odmaknemo oblogo od stene kar izboljša absorpcijo pri nižjih frekvencah.
- Za porozne absorberje je značilno, da lahko zrak potuje skozi porozne strukture. Pri tem zaradi viskoznih učinkov pride do dušenja.



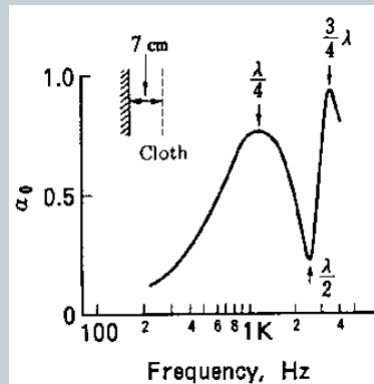
Marec 2010

Pride do stoječega valovanja; Hitrost molekul plina je velika takrat, ko je tlak minimalen (pri odboju na togi steni). Če je porozni absorber debel vsaj $\lambda/4$, potem bodo imeli delci zraka v absorberju zaradi stoječega valovanja vglavnem $W_k \Rightarrow$ zaradi viskoznosti bo absorpcija učinkovita

Porozni absorberji

34

- Da bi privarčevali pri materialu lahko porozni absorber odmaknemo od stene. V tem primeru je idealno, če se absorber nahaja točno na razdalji $\lambda/4$. Če bi se nahajal na razdalji $\lambda/2$, potem bi bila tam hitrost zračnih delcev enaka nič in viskoznost ne bi delovala za nas!



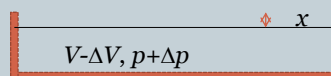
Marec 2010

Membranski absorberji

35

- Membranski absorber je sestavljen iz neporoznega panela, ki je odmaknjen od toge stene; vmes je zrak. Zvočni val povzroči gibanje panela (membrane), ki potem stiska zrak. Energija vpadnega zvočnega valovanja se porablja kot toplota v ujetem zraku.

Membrana z maso m in površino S



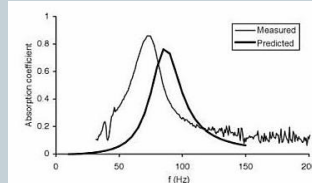
$$m\ddot{x} = \Delta p S \quad ; m = \rho_m S$$

$$\frac{\Delta p}{p} = -\gamma \frac{\Delta V}{V} = -\gamma \frac{Sx}{Sh}$$

$$\ddot{x} = -\frac{\gamma p}{\rho_m h} x \Rightarrow$$

$$c = \sqrt{\gamma p / \rho}$$

$$v_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho_m h}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_m h}}$$



Measured and predicted normal incidence absorption coefficient for a commercial membrane absorber (Modex™).

Marec 2010

Resonatorski absorberji

36

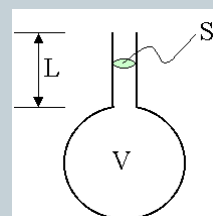
- Votlinski resonator (Helmholtz): niha masa zraka v grlu: $m = \rho SL$.

Taki resonatorji niso ravno učinkoviti, saj so omejeni na ostro lastno frekvenco.

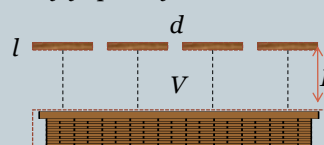
- Perforirane panelne plošče: Tak sistem lahko obravnavamo kot sistem velikega števila resonatorjev.

P =perforacija
 l =debelina panelne plošče

$$v_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l + 0.8d)}}$$



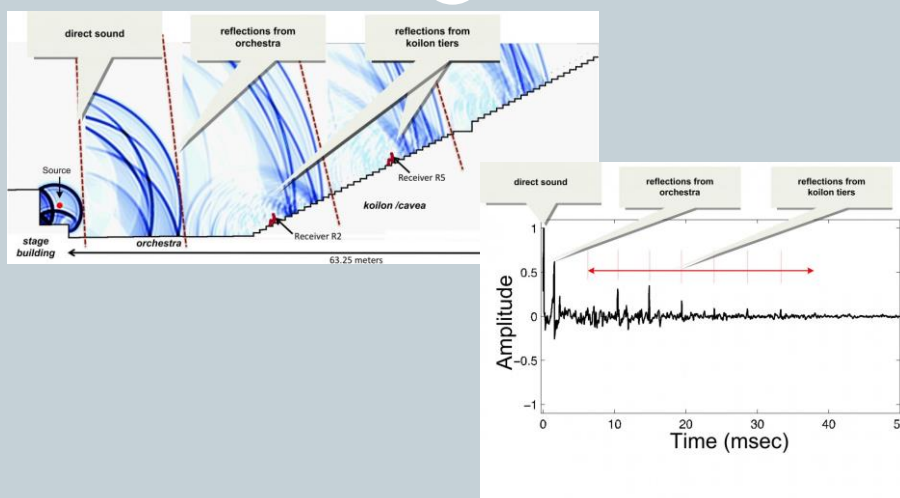
(delujejo pri višjih frekvencah)



Marec 2010

Antična gledališča

37



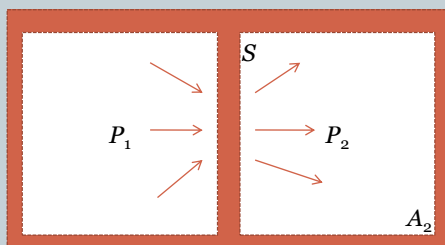
Marec 2010

Zvočna izolacija sob

38

- Definicije:

- Zvočni transmissijski koeficient: $\tau = P_2/P_1$ = razmerje med prenešeno moč v drugo sobo in vpadno močjo.
- Transmissijske izgube, $R = 10 \cdot \log(P_1/P_2) = -10 \cdot \log(\tau)$ [dB]



$$\left. \begin{aligned} P_1 &= j_{vp} S = \frac{p_1^2 S}{4\rho c} \\ p_2^2 &= \frac{4P_2}{A_2} \rho c \end{aligned} \right\} R = 10 \log \frac{p_1^2 S}{P_2^2 A_2}$$

Marec 2010

Upoštevanje odprtin in različnih elementov

39

- Vmesna stena je sestavljena iz različnih elementov z različnimi izolacijskimi lastnostmi (na primer zid z vrati). Za vsak element poznamo njegovo površino S_i in transmijski koeficient τ_i .

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \sum_i j_{vp} S_i = j_{vp} S \\ P_2 &= \sum_i \tau_i j_{vp} S_i \\ \tau_{res} &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{S} \sum_i \tau_i S_i \end{aligned} \right\} R = -10 \log \tau_{res} = -10 \log \left[\frac{1}{S} \sum_i 10^{-0.1R_i} S_i \right]$$

- Odprtino v zidu lahko obravnavamo kot poseben element z $\tau=1$. Če je površina odprtine S_{ap} zelo majhna, potem lahko zgornji izraz poenostavimo v

$$R = -10 \log \tau_{res} = -10 \log \left[\frac{1}{S} (10^{-0.1R_i} S_i + S_{ap}) \right] \approx -10 \log \left[10^{-0.1R_i} + \frac{S_{ap}}{S} \right]$$

Marec 2010

Zgled: prenos zvoka skozi homogen zid

40

- Zid: debelina h , gostota ρ_z , in hitrost zvoka c_z .

$$\left. \begin{aligned} p_i + p_r &= p_1 + p_4 \\ p_i &= p_2 + p_3 \\ u_i - u_r &= u_1 - u_4 \\ u_i &= u_2 - u_3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow p_i = \frac{Z_0}{Z_z} (p_2 - p_3) \& p_i - p_r = \frac{Z_0}{Z_z} (p_1 - p_4)$$

Robni pogoji za zveznost tlaka in hitrosti delcev

Če v materialu ni absorpcije, moramo upoštevati samo faze:

$$p_2 = p_1 e^{-ik_z h}$$

$$p_4 = p_3 e^{-ik_z h}$$

Dobimo:

$$R = 10 \log \left[\cos^2(k_z h) + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_0}{Z_z} + \frac{Z_z}{Z_0} \right)^2 \sin^2(k_z h) \right]$$

Marec 2010

Zgled: prenos zvoka skozi homogen zid

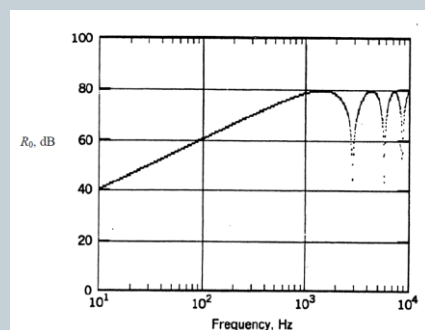
41

- Tanek zid: $Z_z \gg Z_0$ in $k_z h \ll 1$:

$$R = 10 \log \left[1 + \left(\frac{Z_z}{2Z_0} \right)^2 \sin^2(k_z h) \right] \approx 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega \rho_z h}{2\rho c} \right)^2 \right]$$

- Debel zid: $Z_z \gg Z_0$ in $k_z h \gg 1$:

$$R \approx 10 \log \left[\left(\frac{Z_z}{2Z_0} \right)^2 \right] \approx 20 \log \left[\left(\frac{\rho_z c_z}{2\rho c} \right) \right]$$



Obstaja torej zgornja limita za R pri enostavnih zidovih

Normalni vpad na 600 mm betonski zid

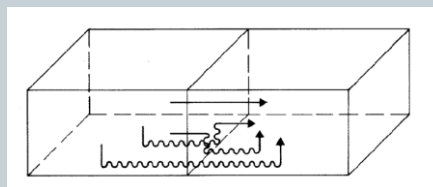
Marec 2010

Prenos zvoka preko skupnih elementov

42

- Zvok se zelo dobro prenaša preko skupnih elementov (kot so na primer skupne plošče)
- Navidezne transmisijske izgube, $R' = 10 \cdot \log(P_1 / (P_2 + P_3))$

$$R = -10 \log \tau_{\text{res}} = -10 \log \left[10^{-0.1R_1} + \sum_i 10^{-0.1R_{F,i}} \right]$$



- R_F = flanking transmission loss

Marec 2010

Toplotna izolacija stavb

43

- Temperatura bivalnih prostorov je eden bistvenih elementov udobja.
- Stopnje toplotne zaščite:
 - Minimalna toplotna zaščita – izolacijska sposobnost vsakega posameznega gradbenega elementa zadošča predpisanim standardom.
 - Povečana toplotna zaščita – toplotne izgube celotne zgradbe ne presegajo dane največje vrednosti; slabšo izolacijsko sposobnost enega elementa kompenzira boljša izolacijska sposobnost drugega.
 - Popolna toplotna zaščita – temperatura notranjih sten in stropov ni za več kot 3 K nižja od temperature prostora.



Marec 2010

Energijska bilanca

44

$$C\dot{T} = P_{prev.} + P_{prezr.} + P_{sev.izg.} + P_{pas.sol.viri} + P_{int.viri}$$

$$C_{efekt}\dot{T} = (\Xi_{efekt} + \Phi_{efekt} C_{p,trak} + \tilde{\Lambda}_{efekt}^{sev}) \Delta T + S_{efekt,pros.} j + P_{int.viri}$$

topl.kapaciteta

$$C_{efekt} = \left(\sum m_i \cdot c_i \right)$$

spec.izg.zaradi prevaj.

$$\Xi_{efekt} = \sum \Lambda_i \cdot S_i$$

spec.izg. zaradi prezr.

$$\Phi_{efekt} C_{p,trak} = \sum \eta_{rek,i} \Phi_{m,i} C_{p,trak}$$

sevalne izgube

$$P_{sev.izg.} = \sigma S_{sev.izg.} (T_z + \partial T_{prest.zr.})^4 - T_z^4 \cong 4\sigma S_{sev.izg.} \partial T_{prest.zr.} T_z^3 = \tilde{\Lambda}_{efekt}^{sev} \Delta T$$

spec.sevalne izgube

$$\tilde{\Lambda}_{efekt}^{sev} = 4\sigma S_{sev.izg.} \left(\frac{\Lambda_{prest.zr.}^{-1}}{\Lambda_{prest.zr.}^{-1} + \Lambda_{gradb.sklop}^{-1}} \right) T_z^3$$

efektivna prozorna površ.

$$S_{efekt,pros.} = \sum f_j \alpha_j \begin{cases} \tilde{S}_j \cdot \tilde{J}_j / j; & > 0 \\ 0 & ; < 0 \end{cases}$$

Marec 2010

Ocene posameznih parametrov

(45)

- K masi prispevajo: toplotni ovoj (delno), notranjost, oprema
- Masa: med 10 in 50 ton (odvisno od načina gradnje)
- Specifična kapaciteta je pod 1 kJ/kgK (beton, les, izolatorji, tkanine)
- **C ~ 3..10 kWh/K**

izgube zaradi	prevajanja skozi stene	prevajanja skozi okna	prezračevanja	sevanja	SKUPAJ
Klasična hiša	100 W/K	45 W/K	100 W/K	65 W/K	310 W/K
Pasivna hiša	25 W/K	12 W/K	15 W/K	17 W/K	69 W/K

Toplotni dobitki

- dnevni vnos energije za potrebe bazalnega metabolizma 1800 kcal ali 2.1 kWh pomeni povprečno moč **88 W**, ki se obvezno sprosti v objekt kot toplota
- dnevni vnos energije v objekt izvira še iz neidelanega izkoristka strojev (predvsem hladilnik in elektronika), povprečna moč je okrog **100 W**

Marec 2010

Toplotni stik skozi gradbeni element

(46)

- Gostota toplotnega toka, j

Toplotna prevodnost, λ

Debelina zidu, d

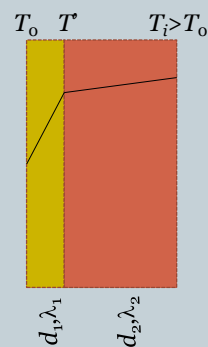
Koeficient toplotnega upora: $\Lambda = \lambda/d$

Sestavljeni gradbeni elementi: $j_1 = j_2$

$$j_1 = \frac{T' - T_o}{1/\Lambda_1} = j_2 = \frac{T_i - T'}{1/\Lambda_2} \Rightarrow T' = \frac{T_i/\Lambda_1 + T_o/\Lambda_2}{1/\Lambda_1 + 1/\Lambda_2}$$

$$\Rightarrow j = \frac{T_i - T_o}{1/\Lambda_1 + 1/\Lambda_2}$$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2}$$



Marec 2010

Toplotni tok skozi gradbeni element

47

- Poleg gradbenega elementa na izolacijsko sposobnost vpliva tudi mejna plast zraka, ki se ne giblje in zato deluje kot dodatna "zračna blazina". Mejni plasti prav tako pripišemo toplotno upornost α , ki je odvisna od debeline plasti, orientacije stene (horizontalno/vertikalno) in smeri toplotnega toka. **Skupni toplotni upor** zidu in mejne plasti je

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_o} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_i}$$

- Toplotni tok znaša: $P_Q = jS = Sk(T_i - T_o)$
- Zgradbo tvori več zidov, oken, tla in streha, zato izračunamo povprečno k vrednost

$$\bar{k} = \frac{k_1 S_1 + k_2 S_2 + \dots + k_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

Marec 2010

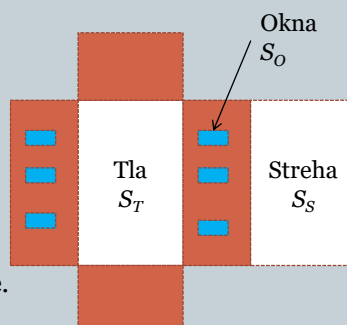
Toplotni tok skozi gradbeni element

48

- Nadalje upoštevamo, da so toplotne izgube skozi streho zaradi obsevanja manjše; enako velja za dele stavbe, ki so v stiku s tlemi, ki imajo navadno višjo T od ozračja, ali pa s pomožnimi prostori (klet, skladišča, ...). To se upošteva z empiričnimi faktorji in v zgornji enačbi člen, ki ustreza strehi utežimo s faktorjem 0.8, člen, ki sutreza tlem pa z 0.5.

$$\bar{k} = \frac{0.5k_T S_T + 0.8k_S S_S + \dots + k_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

- Na toplotne izgube vpliva tudi oblika stavbe, vendar je ta povezava manj raziskana. V splošnem velja, da so toplotne izgube večje pri bolj razčlenjenih stavbah, torej takoh z večjim razmerjem površina fasade/prostornina stavbe.



Marec 2010

Toplotni tok skozi gradbeni element

49

material	λ [W/m K]		$1/\alpha$ [m ² K/ W]
Beton, $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$	2.03		
Lahki beton, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$	0.35		
Steklena volna, $\rho=100 \text{ kg/m}^3$	0.041	zrak	Vertikalna; mirujoč; 1cm 0.14 2cm 0.16 5cm 0.18 10cm 0.17 15cm 0.16
Stiropor	0.041		
Les, hrast (vdolž vlaken)	0.41		
Les, hrast (prečno na vlakna)	0.23		
Opeka, $\rho=1880 \text{ kg/m}^3$	0.79		
Steklo	0.81		Horizontalna; mirujoč; 1cm 0.14
Zrak	0.026		
Ksenon	0.0054		
Kripton	0.009		

Marec 2010

Pomen temperature notranjih površin

50

- Človeško telo do ~90 % oddane toplote izseva, zato je zelo pomembno, da niso notranje površine stavb prehladne. Če so, se telo prehitro hladi, kar vodi do neudobja kljub dovolj visoki temperaturi ambientnega zraka. Fiziološko optimalno bi bilo, ko bi bila temperatura sten enaka temperaturi zraka, a to zaradi mejne plasti zraka ni mogoče (razen če stene dodatno ogrevamo). Temperaturo stene lahko izračunamo tako, kot smo to storili zgoraj in dobimo

$$T_{is} = T_i - \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{T_i - T_o}{1/\alpha_o + 1/\Lambda + 1/\alpha_i}$$

- Razlika med T_{is} in T_i je lahko znatna.

Zgled: Navpičen opečnat zid, debeline 10 cm, $\lambda_{opeka}=0.5 \text{ W/mK}$, $d_{zraka}=1 \text{ cm}$, $1/\alpha_o=1/\alpha_i=0.14 \text{ m}^2\text{K/W}$. $T_i=20 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_o=0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dobimo: $T_{is}=14.2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Marec 2010

Vodna para

51

- Parni tlak v notranjosti zgradb je navadno večji (pozimi!) kot zunaj in zato para difundira skozi zidove. Če pride pri tem do kondenzacije, postanejo zidovi vlažni, kar vpliva na toplotno izolativnost, strukturno trdnost, ...
- Do kondenzacije lahko pride tudi na notranjih stenah in sicer na toplotnih mostovih (slabše izolirani deli stene).
- Rosa nima le škodljivega vpliva na gradbene elemente, pač pa preko plesni tudi direktno vpliva na kakovost bivalnih prostorov.

Marec 2010

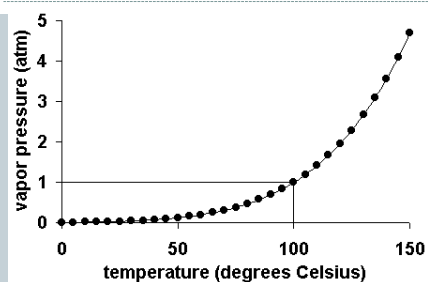
Kondenzacija

52

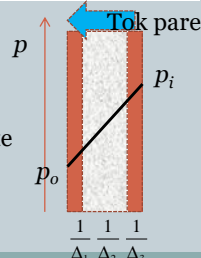
- Za razumevanje pojava kondenzacije pare (=rosa) je ključna temperaturna odvisnost nasičenega parnega tlaka, ki je približno parabolna.
- Gostota toka pare skozi gradbeni element je sorazmerna z razliko delnih tlakov na obeh straneh zidu:

$$j_p = \left(\frac{1}{\Delta}\right)^{-1} (p_i - p_o) \quad \frac{1}{\Delta} \left[\frac{\text{m}^2 \text{hPa}}{\text{kg}} \right]$$

Tu je $(1/\Delta)$ upor prepustnosti pare p_i, p_o sta tlaka na notranji in zunanji strani stene



Sestavljen zid:
Profil parnega tlaka ocenimo s $1/\Delta$ -p diagramom. Nagib te krivulje je gostota toka pare skozi gradbeni element.

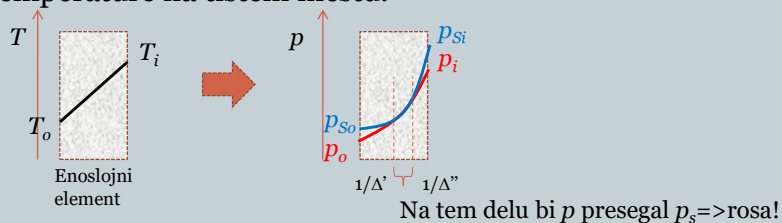


Marec 2010

Rosa

53

- Rosa nastane, če parni tlak na nekem delu gradbenega elementa preseže nasičeni parni tlak, ki je seveda odvisen od temperature na tistem mestu.



Količina pare, ki se v površinski enoti zidu kondenzira v časovni enoti, je

$$\frac{p_i - p_{s''}}{1/\Delta''} - \frac{p_{s'} - p_o}{1/\Delta'}$$

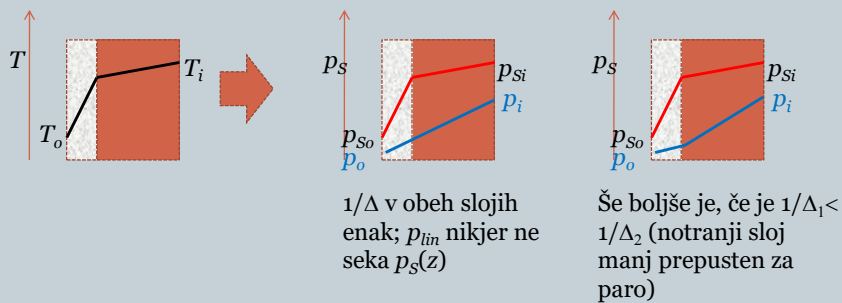
V enoslojnih elementih se vlaga kondenzira v širokem območju. Analiza večslojnih elementov je podobna; v tem primeru pride do rose na mejnih površinah

Marec 2010

Preprečevanje tvorbe rose

54

- V večslojnih gradbenih elementih roso preprečujemo tako, da toplotni upor narašča od znotraj navzven, upor prepustnosti pa v isti smeri pada.

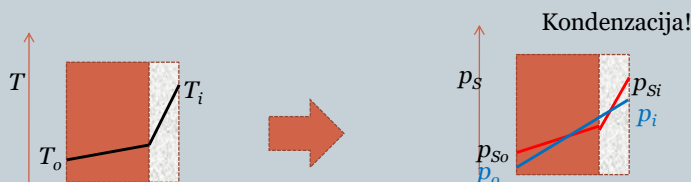


Marec 2010

Preprečevanje tvorbe rose

55

- S stališča toplotne izolacije je vseeno, če zamenjamo vrstni red posameznih elementov. Vendar pa sta temperaturni in p_s profil v zidu drugačna!



Toplotno izolacijo moramo torej vedno izvesti na zunanji strani; če jo položimo na notranji, pa vsekakor uporabimo materiale, ki so nepropustni za paro. Enako škodljivo kot toplotna izolacija na notranji steni je premaz zunanje strani s snovjo, ki je nepropustna za paro (na primer, če bi želeli doseči večjo odpornost na dež in bi zato steno prebarvali z vodoodporno barvo (ki je pogosto nepropustna za paro)). To vodi do tvorbe rose neposredno pod tem slojem!

Marec 2010

Rosa na notranjih površinah

56

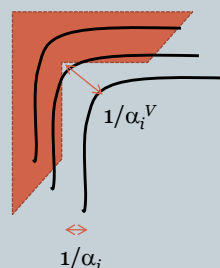
- Zaradi mejne plasti zraka je notranja površina stene hladnejša od ambientalnega zraka. Spomnimo se na temperaturo stene:

$$T_{is} = T_i - \frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{T_i - T_o}{1/\alpha_o + 1/\Lambda + 1/\alpha_i}$$

- V vogalih pa so razmere še nekoliko drugačne, kar se odraža na posebne T-profilu:
- Navadno vzamemo, da je toplotni upor v vogalih 3x večji kot na ravni steni.

Zato je T v vogalu še nižja:

$$T_{is}^v = T_i - \frac{3}{\alpha_i} \cdot \frac{T_i - T_o}{1/\alpha_o + 1/\Lambda + 3/\alpha_i}$$



Marec 2010

Rosa na notranjih površinah

57

- Ker pa je upor prepustnosti pare v mejni plasti $1/\beta$ tipično mnogo manjši od upora prepustnosti pare $1/\Delta$ zidu, je razlika tokov pare na steno in v steno zelo velika (to pa je kar količina kondenzirane pare).
- Podobno pride do kondenzacije pare tudi:
 - Za omarami, ki so preblizu steni, kar moti kroženje zraka, zaradi česar se poveča debelina mejne plasti zraka, ki torej boljše izolira; Rezultat je nižja temperatura stene. (podobno je tudi za zavesami)
 - Na toplotnih mostovih (to je slabše izoliranih gradbenih elementih, kot so betonske preklade).

Marec 2010