

merne $0,42 \text{ m}^2$ (otvorených okien), na drevenú stoličku $0,01 \text{ m}^2$, na čalúnené kreslo $0,09$ až $0,28 \text{ m}^2$ atď.

9.8. Akustičnosť sál. Ako už vieme, sluchom možno rozoznať dva po sebe nasledujúce zvukové signály, len keď medzi nimi uplynula aspoň $0,1 \text{ s}$. Tomuto času zodpovedá vzdialenosť steny od zdroja zvuku 17 m , potrebná pre vznik (jednoslabičnej) *ozveny*. Keď však odrážajúca stena je bližšie, odrazené vlnenie pre sluch splýva s vlnením pôvodným, a zvuk sa takto len zosilňuje a predlžuje. V tom prípade hovoríme o *doznievaní zvuku*.

Koncertné, divadelné a prednáškové siene majú byť upravené tak, aby každý poslucháč zreteľne počul rečníka alebo predvádzanú hudbu. O miestnosti, ktorá týmto podmienkam vyhovuje, hovoríme, že má *dobrú akustiku*. Je zrejmé, že ozvena je pre prednáškové alebo koncertné siene neprípustná, ale krátkotrvajúce doznievanie je, naopak, výhodné. Zvuk sa ním zosilňuje a reč i hudba získavajú na výraznosti.

Všeobecné podmienky, ktoré kladieme na dobrú akustičnosť sál, sú tieto:

1. Kvalita zvuku, t. j. pomer intenzít zvukových vlnení rôznych frekvencií, má byť zachovaná.
2. Do vnútra sály nemá prenikať zvuk z vonkajška.
3. Zvuk má byť všade dostatočne silný, podľa možnosti aspoň približne rovnako silný.
4. Jednotlivé zvuky ľudskej reči a krátko trvajúce hudobné tóny nesmú splývať.

Prvá z týchto podmienok býva obyčajne automaticky splnená, lebo koeficient absorpcie zvuku na prekážkach závisí len málo od jeho kmitočtu.

Druhú podmienku splníme, keď sa — ak treba — postaráme o vhodnú zvukovú izoláciu miestnosti, a to voľbou vhodného materiálu stien, ich obkladáním izolujúcimi vrstvami, dvojitémi obločkami a dvermi a pod. Väčšie ťažkosti robí v betónových stavbách vedenie zvuku betónovými konštrukčnými stĺpmi, kovovými rúrami a komínmi na ventiláciu. Pripustnosť stien pre zvuk udáva ich *koeficient pripustnosti* p , daný podielom intenzity zvuku stenou prepusteného a na stenu dopadajúceho: $p = \frac{i}{i_0}$. Keď pripustnosti jednotlivých plôch s obsahmi S_1, S_2, \dots sú p_1, p_2, \dots , preniká do miestnosti zvukový príkon

$$i_0(p_1S_1 + p_2S_2 + \dots) = i_0P$$

kde $P = \sum p_i S_i$ je *celková pripustnosť* stien pre zvuk. Vo vnútri miestnosti ustáli sa taká intenzita zvuku, pri ktorej sa zvuková energia vnikajúca do

miestnosti rovná energii pri odrazoch na stenách pohltenej, čiže za rovnováhy je približne

$$i_0 P = i A$$

t. j.

$$i = i_0 \frac{P}{A} \quad (1)$$

Pod útlmom zvuku stenami sa rozumie podiel

$$U = \frac{i}{i_0} = \frac{P}{A} = \frac{\sum p_i S_i}{\sum a_i S_i} \quad (2)$$

Keďže intenzita zvuku súvisí s hladinou jeho intenzity podľa vzorca $i = k10^s$, $U = 10^{s-s_0}$. Útlm stien miestnosti sa preto udáva aj počtom decibelov, o ktorý je hladina intenzity zvuku vnútri miestnosti menšia než vonku. Ideálny útlm je taký, ktorý vonkajší zvuk s jeho priemernou hlasitosťou zníži pod zvukový prah. V praxi sa však pripúšťa: pre ateliéry zvukového filmu a ateliéry rozhlasové 6 až 10 decibelov, pre nemocnice 8 až 12 decibelov, pre školy, kostoly, knižnice a divadlá 10 až 20 decibelov, pre kancelárie 20 až 30 decibelov.

Veľmi nepríjemné sú občasné silnejšie zvuky (húkanie automobilov, električky s nevhodným pohonným mechanizmom, netlmené výbušné motory, chodenie po nekrytej podlahe a i.). Tie treba odstraňovať na mieste ich možného vzniku.

Posledné dve podmienky pre akustičnosť sál, ako boli vyššie uvedené, úzko spolu súvisia a do istej miery si navzájom aj odporujú. Predstavujú akustický problém sál v užšom zmysle. Keď má byť totiž zvuk všade v sále aj ďaleko od rečníka (orchestra, megafónu) dostatočne silný, bez toho, že by bol v blízkosti rečníka príliš silný, je nevyhnutné, aby sa využil aj odraz zvuku. Nesmie sa to však stať veľmi veľakrát, lebo by to viedlo k rušivému doznievaniu. Preto je účelné, keď je za rečníkom (orchestrom) odrážajúca stena parabolickeho tvaru a keď je strop dosť vysoko nad poslucháčstvom a upravený tak, aby odrážal zvuk dolu. Pravda, podlaha už zvuk odrážať nemá (čalúnené kreslá, koberce).

Hladina hlasitosti zvuku priemerne silného, pre ľudské ucho najvhodnejšieho, je asi 60 fónov. Jeho hladina intenzity je potom približne tiež 60 decibelov. Za dobu doznievania τ v sále sa preto berie čas, za ktorý sa hlasitosť tohto zvuku zmenší na nulu. Aby sme ju našli ako funkciu vlastností sály, predstavme si priestor ohraničený plochou ľubovoľného tvaru. Pri jednom odraze, podľa vzorca 9.7.1 na str. 363

$$a = \frac{i_0 - i}{i_0}$$

poklesne intenzita zvuku na hodnotu $i = i_0(1 - a)$, pri n odrazoch teda na hodnotu $i = i_0(1 - a)^n$, alebo pokiaľ a je číslo malé, $i \doteq i_0(1 - na)$. Keď voľná dráha zvuku (dráha medzi dvoma po sebe idúcimi odrazmi) je l a jeho rýchlosť vo vzduchu v , za čas dt sa zvuk odrazí $\frac{v \cdot dt}{l}$ ráz. Po čase dt teda intenzita zvuku, ktorého pôvodná intenzita bola i , je $i + di = i \left(1 - \frac{v \cdot dt}{l} a\right)$ a jej pokles za tento čas je $-di = i \frac{v dt}{l} a$. Integrovaním rovnice

$$\frac{di}{i} = -\frac{va}{l} dt$$

dostávame:

$$i = i_0 e^{-\frac{vat}{l}} \quad (3)$$

Podľa svojej definície doba doznievania τ je čas, po uplynutí ktorého pôvodná hladina intenzity zvuku 60 decibelov klesne na nulu, teda intenzita zvuku $i_0 = k10^6$ na $i = k$. Dosadením týchto hodnôt do rovnice (3) dostávame rovnicu

$$10^{-6} = e^{-\frac{vat}{l}}$$

alebo

$$-6 = -\frac{va\tau}{l} \log e$$

z ktorej pre hľadanú dobu doznievania vychádza:

$$\tau = \frac{6l}{va \log e} \quad (4)$$

Úvaha čiste geometrická vedie k výsledku, že priemerná voľná dráha zvukovej vlny v sieni s objemom V a celkovým povrchom stien S je $l = \frac{4V}{S}$. Preto

$$\tau = \frac{24V}{va S \log e} = \frac{24V}{vA \log e} \quad (5)$$

kde $A = \Sigma a_i S_i$ je celková absorpcia stien.

Zo skúsenosti sa vie, že najvýhodnejšia doba doznievania pre prednáškové siene je 0,8 až 1,0 s, pre koncertné sály 1,0 až 1,5 s. Vzorec (5) udáva po-

tom pri danom objeme sály potrebnú zvukovú absorpciu stien. Pravda — ako vyplýva z predchádzajúceho — je samozrejmé, že v blízkom okolí rečníka (zdroja zvuku) majú byť steny zvuk pomerne dobre odrážajúce a na odľahlom konci sály steny zvuk podstatne viac pohlcujúce. Na odľahlom konci sály sú nebezpečné najmä zaoblené steny, ktoré koncentrujú zvuk do jedného miesta a vedľa nechávajú priestory zvukom nepresýtené.

9.9. Vznik a zloženie ľudského hlasu. Ľudský hlas vzniká podobným spôsobom ako zvuk v píšťale jazýčkovej. V hrtane sú dve pružné blany, nazývané *hlasivky*, ktoré sú pri hovorení a spievaní napnuté, takže potom je medzi nimi úzka *hlasová štrbina*. Prúdom vzduchu z pľúc sa hlasivky rozkmitajú, čím vo vzduchu na druhej strane hlasiviek vzniká pravidelné kolísanie tlaku, ktoré sa šíri cez ústa do okolia ako zvukové vlnenie nazývané ľudským hlasom.

Výška hlasu závisí od dĺžky hlasiviek (u mužov asi 18 mm, u žien asi 12 mm), a od ich napätia, ktoré sa pôsobením príslušného svalstva v istých hraniciach môže meniť. Tieto hranice určujú výškový rozsah ľudského hlasu, ktorý sa rovná asi dvom oktávam, ale u rôznych osôb v rôznych polohách. Bas má tónový rozsah $F — e^1$, tenor $c — a^1$, alt $f — e^2$ a soprán $c^1 — a^2$.

Rôzne zafarbenie ľudského hlasu, podľa ktorého rozoznávame najmä samohlásky, vzniká rezonanciou dutiny hrtanovej, ústnej a nosnej. Ich značný útlm na mäkkých stenách spôsobuje, že tieto dutiny sú schopné zosilňovať široký obor tónov okolo ich vlastných tónov, tzv. *formantov*. Vlastný tón nepremennej dutiny hrtanovej je tzv. *vedľajší formant* s frekvenciou asi 400 Hz (tón g^1). *Hlavný formant*, vlastný tón ústnej dutiny, sa môže meniť polohou jazyka, zubov a perí v širokom rozsahu asi od 175 Hz (f) do 3 700 Hz (b^4). Dutina nosná má len menší vplyv, ktorý sa prejavuje napríklad pri nádche. V zložitom zvuku, ktorý vzniká pri hlasivkách, zosilňujú sa v spomenutých rezonančných dutinách hlavne frekvencie v okolí formantov. Keďže hlavný formant je meniteľný, môže sa tým meniť aj zloženie ľudského hlasu, čím práve vznikajú rôzne samohlásky. Najnižší je formant samohlásky u , asi 175 Hz (tón f). Pri obyčajnej reči je v tejto samohláske len základný tón. Tým je vysvetlené, že zvuk napríklad ladičky, v ktorom je prakticky tiež len základný tón, budí dojem samohlásky u . Formanty ostatných samohlások sú postupne vyššie, pre o asi 400 Hz (g^1), pre a 800 Hz (g^2), pre e 2 300 Hz (d^4) a pre i 3 700 Hz (b^4). Grafický záznam kolísania tlaku vzduchu pri vyslovovaní jednotlivých samohlások je reprodukován na *obr. 9.10*. Vidíme na ňom zreteľne, že pri súvisle a obvyklým spôsobom hovorenej reči všetky samohlásky sú zvuky s rovnakou základnou frekvenciou, ku ktorej sa pridávajú formanty — najvyšší pri vyslovovaní samohlásky i . Pri hovore šeptom sú hlasivky popustené.