

### ЛЕКЦІЯ 3. АКУСТИКА ВІДКРИТИХ ТЕАТРІВ

При акустичному проектуванні відкритих театрів необхідно враховувати:

особливості розповсюдження звуку у різних атмосферних умовах;  
акустичні характеристики навколишньої місцевості (шумовий фон, епізодичні шуми і ін.);

універсальність призначення відкритих театрів, що використовуються для концертних, оперно-драматичних, хореографічних хорових виступів, а також для демонстрації кінофільмів і так далі.

При розповсюдженні сферичних хвиль від точкового джерела звуку різниця в рівнях звукового тиску  $\Delta L$  в точках, що знаходяться від джерела на відстані  $D_1$  і  $D_2$ , визначається за формулою

$$\Delta L = 20 \lg \frac{D_1}{D_2}. \quad (22)$$

З цієї формули можна визначити, що рівень звукового тиску зменшується на 20 дБ при кожному подесятеренні відстані або на 6 дБ — при його подвоєнні.

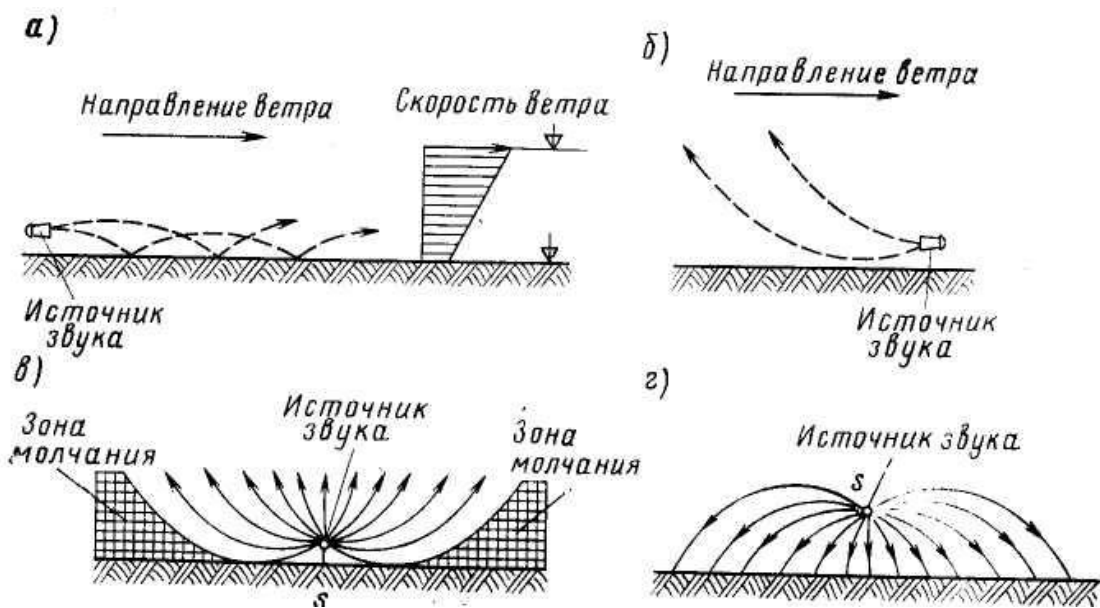
На розповсюдження звуку в атмосфері великий вплив мають напрям і швидкість вітру, а також розподіл температури повітря при віддаленні від поверхні землі. Вітер і розподіл температури повітря по висоті значно впливають на швидкість розповсюдження звуку. При збігу напрямку вітру і розповсюдження звукових хвиль результуюча швидкість дорівнює сумі швидкостей звуку і вітру; при цьому спостерігається «притиснення» звукових хвиль до землі. Навпаки, при протилежному напрямі розповсюдження звуку і вітру сумарна швидкість розповсюдження звукових хвиль дорівнює різниці швидкостей звуку і вітру; в цьому випадку спостерігається «відрив» звукових хвиль від землі. Схеми цих двох протилежних випадків приводяться на рис. 11.39. Таким чином, при виборі варіантів розташування відкритого театру щодо пануючих за літній період вітрів (сезонна роза вітрів) слід віддавати перевагу розташуванню подовжньої осі театру так, щоб напрям пануючих вітрів збігался з напрямом від сцени (або естради) до амфітеатру, а не навпаки.

На рис. 11.40 наводиться схема, що характеризує вплив вітру на рівень звукового тиску у різних напрямках. Вектор, проведений з точки, де розташовується точкове джерело звуку, характеризує амплітуду звукової хвилі в даному напрямі при постійній заданій відстані від джерела звуку. При порівнянні довжини цих векторів можна бачити, що амплітуда коливання звукової хвилі, що розповсюджується у напрямі вітру, майже втричі більше амплітуди коливання в напрямі,

протилежному дії вітру.

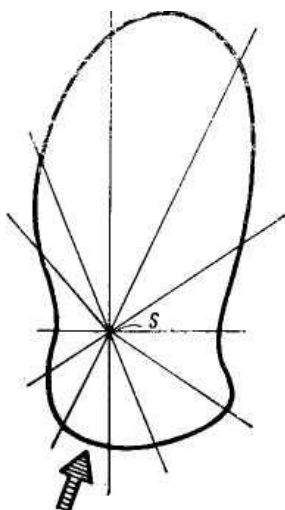
Великий вплив на розповсюдження звуку у відкритому театрі має розподіл температури повітря по висоті [6]. У випадках, що найчастіше зустрічаються, коли температура повітря з віддаленням від землі знижується, верхні звукові хвилі, що випромінюються джерелом розповсюджуються сповільнено в порівнянні з нижніми, що приводить до вигинання уверх фронту звукових хвиль.

$$c = 20\sqrt{T}$$



**Мал. 11. 39. Вплив вітру і температури на хід звукових хвиль**

*a* - напрям вітру збігається з напрямом розповсюдження звукових хвиль; вітер як би притискує їх до землі; *б* - напрям вітру протилежний розповсюдженню звукових хвиль; вітер як би відриває звукові хвилі від землі; *в* - схема викривлення ходу звукових променів від неспрямованого джерела звуку при зниженні температури повітря з віддаленням від поверхні землі; *г* - те ж, при підвищенні температури з віддаленням від поверхні землі (на певну висоту)



**Рис. 11.40. Вплив вітру на рівень звукового тиску у різних напрямках розповсюдження звуку**

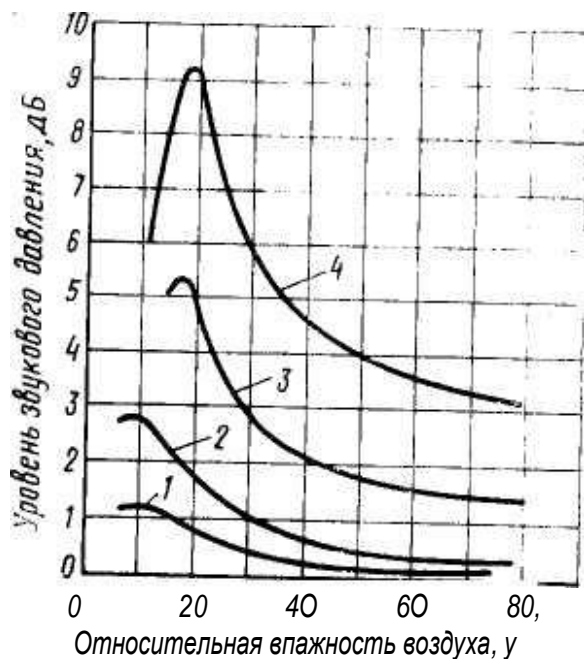


Рис. 11.41. Криві зменшення рівня звуків високої частоти залежно від відносної вологості повітря (у дБ на кожні 30 м відстані від джерела звуку)

1 - частота коливання 1500 Гц;  
 2 - те ж 3000 Гц;  
 3 - те ж, 6000 Гц;  
 4 - те ж, 10 000 Гц

Однак при розміщенні відкритих театрів в деяких долинах гір спостерігається підвищення температури повітря з віддаленням від землі. У цих випадках звукові хвилі верхнього рівня мають підвищену швидкість в порівнянні із звуковими хвилями в долинах; в результаті фронт звукових хвиль в таких місцевостях згинається у напрямку до землі. Багато разів відбиваючись від землі і верхніх теплих шарів повітря, звукова енергія збільшує звуковий тиск на території відкритого театру.

Унаслідок нерівномірного поглинання повітрям звуків різної частоти виникає необхідність при акустичному проектуванні відкритих театрів передбачати архітектурно-будівельні заходи і засоби для збереження природності звучання. До них відносяться:

- форма і конструкція акустичних раковин,
- застосування резонаторів і ін.

Ці спотворення особливо відчутні в повітрі з низькою відотною вологістю. На мал. 11.41 приводяться криві загасання плоских звукових хвиль високих частот (від 1500 до 10 000 Гц) при температурі повітря 20°C залежно від відносної вологості повітря. Затухання звуку виражається в децибелах на кожних 30 м відстані від джерела звуку.

Знаючи відносну вологість повітря влітку, можна визначити зниження рівня звукового тиску в амфітеатрі залежно від заданого віддалення глядача від джерела звуку.

**Приклад.** Визначити зниження рівня звукового тиску в амфітеатрі на відстані 30 і 60 м від джерела звуку частотою 10000 Гц при відносній вологості повітря 50%.

По графіку на мал. 11.41 знаходимо, що зниження складає відповідно 4 і 8 дБ. А при відносній вологості 20% - 9 і 18 дБ («Єжик в тумане»)

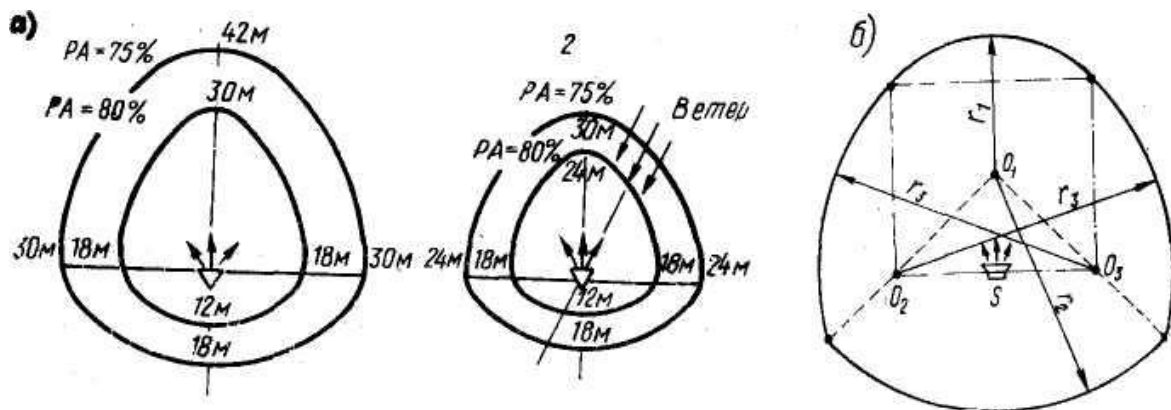
Великий вплив на якість акустики відкритих театрів роблять коливання повітря (флюктуації), що виникають унаслідок різного нагрівання сонцем поверхонь територій з неоднорідним підстильним шаром (пісок, трава, чагарник, скеля і т. п.) Ці флюктуації роблять суттєвий вплив на якість звучання, коли підстильний шар має високе альbedo.

Для врахування акустичних особливостей місця будівництва відкритого театру архітекторів необхідно перед проектуванням мати в своєму розпорядженні дані з результатами ретельного вивчення метеорологічних і акустичних характеристик місцевості. Це дозволить йому встановити важливі початкові положення:

- можливість виникнення на території театру луни від оточуючих гір, лісу, будівель і споруд;
- розрахункові рівні зовнішнього шуму: від автостради, стадіону і ін.;
- ступінь захищеності відкритого театру від вітру.

При цьому треба враховувати наступні **вимоги норм** проєктирования: рівень звукового тиску в амфітеатрі не повинен перевищувати 40 дБ, а швидкість вітру має бути не більше 4 м/с.

Граничне допустиме віддалення глядачів від джерела звуку визначається призначенням споруди. При необхідності хорошої розбірливості мови в місцях, віддалених від естради, складова артикуляція має бути не менше 75%. На рис. 11.42 приводяться криві артикуляції, отримані експериментальним шляхом, і спосіб побудови форми амфітеатру, яка забезпечує задовільну чутність звучання.

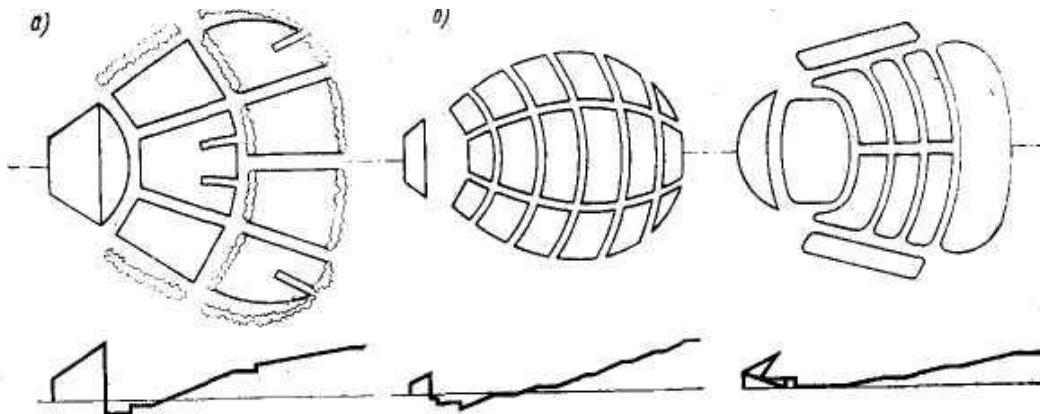


**Рис. 11.42.** Криві 75%-ої артикуляції, що забезпечує задовільну розбірливість мови за відсутності вітру

а - характер кривих рівної артикуляції; 1 - за відсутності вітру; 2 - при швидкості вітру 10 м/с; б - графічний спосіб побудови форми відкритого театру, що забезпечує задовільну чутність мови на всіх місцях

Для відкритих драматичних або естрадних театрів межа віддаленості без звукопідсилення зазвичай обмежується 30 м при місткості від 1500 до 2500 чоловік. Проте за наявності хорошої захищеності амфітеатру від шуму і вітру вказана віддаленість останнього ряду місць від естради може бути збільшена до 40 м.

Схема архітектурного вирішення відкритого драматичного або естрадного театру приведена на рис. 11.43,а. Геометричні характеристики його такі: довжина по подовжній осі 40 м; найбільша ширина 53 м; ухил місць 12—15°.



**Рис. 11.43. Схеми архітектурних вирішень відкритих театрів різного призначення**

*a* - естрадних театрів (довжина 40 м, найбільша ширина 53 м, ухил підлоги 12- 15°);  
*б, в* - для концертних виступів (симфонічні оркестри, хорові ансамблі)

Хороші приклади вирішень задач акустики відкритих театрів можна знайти при вивченні архітектурних пам'яток минулого. Ці театри відрізняються не тільки логікою просторового рішення, але і знанням законів розповсюдження звуків в атмосфері. Умови хорошої акустики — ретельний вибір місця розташування театрів з урахуванням особливостей розповсюдження звуків у атмосфері і раціонального використання відбитої звукової енергії.

Відсутність стін і стель у відкритих театрах стародавньої Греції унеможлилювала виникнення реверберації. Проте відсутність відзеркалювальних поверхонь супроводилася значним зменшенням звукового тиску в місцях розташування глядачів, віддалених від «оркестри».

Для доповнення недостатньої прямої звукової енергії використовувались відбиті звукові хвилі від підлоги «оркестри», а також від стіни сценічної будівлі (скене), а для посилення голосу акторів — маски з рупороподібним отвором рота.

Для поживлення голосу звуку і додання йому природності в грецьких театрах застосовувалися металеві судини, що

встановлювались в нішах на віднесенні від підлоги, перекинуті відкритою частиною вниз. Вони резонували звуки середньої і високої частот.

Грецькі театри розташовувалися на природних схилах горбів далеко від міського шуму. Схема цих театрів представлена на мал. 11.45. Дані про їх місткість і розміри приведені в таблиці. 11.11.

Римські театри зазвичай влаштовувалися за містом і являли собою єдину архітектурну споруду у вигляді розташованих півколом терас, органічно пов'язаних зі сценою (мал. 11.46). «Орхестра» мала форму півкола, поступово вона перетворилася на подіум заввишки 1—1,3 м, обмежений подовжньою і бічними стінами.

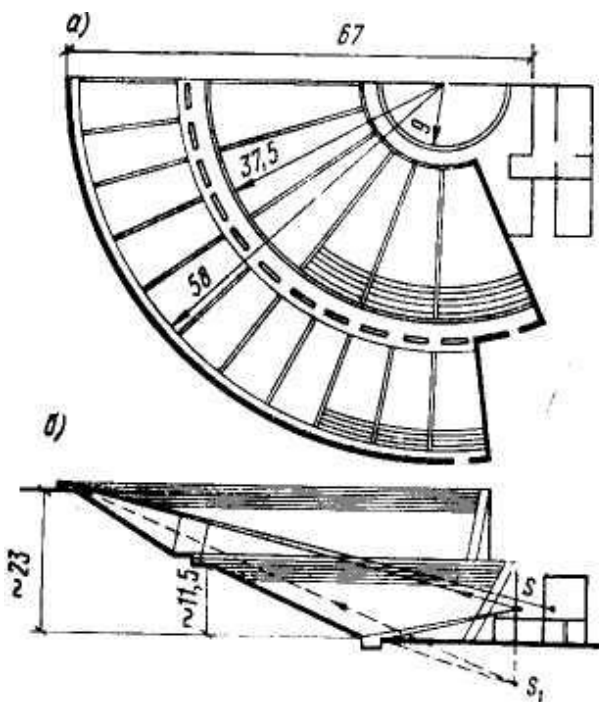


Рис. 11.45. Схема открытого театра древней Греции

а — план; б — продольный разрез

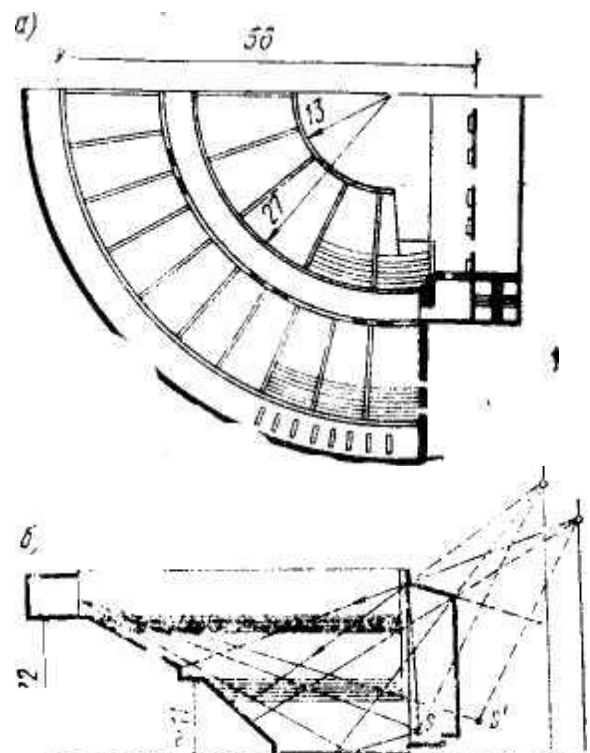


Рис. 11.46. Схема открытого театра древнего Рима

а — план; б — продольный разрез

Театри	Найбільша відстань від центру «орхестры»	Діаметр «орхестры», м	Місткість театру, чіл.	Ухил, град
Театр Діоніса (Афіни)	85	27,4	14000—17500	20
Театр в Епідавре	59	24,8	14000—17500	27
Театр в Ефесі	76	24,66	23000—28700	26

Прекрасна акустика римських театрів і одеонів створювалася завдяки

сукупності архітектурних і конструктивних засобів, до основних з них відносяться:

- надійна захищеність амфітеатру (кавеа) від зовнішнього шуму і вітру;
- напівкругла форма споруди і амфітеатру, що наближала глядачів до сцени;
- форма і глибока пластика сцени, зробленої з природного каменя великої щільності;
- крутий підйом місць, що забезпечує безперешкодне розповсюдження прямих і відбитих звуків;
- пристрій резонуючої галереї по периметру амфітеатру, що підвищує рівень звуку у видалених місцях амфітеатру.

Про високу акустичну якість відкритих театрів свідчать результати багатьох натурних досліджень з визначення розбірливості мови в деяких з добре збережених до цих пір театрах (театр в Оранжі і ін.). Ці дослідження дозволили встановити, що за відсутності глядачів в умовах тиші складова артикуляція в найбільш віддалених від сцени місцях складала від 78 до 88%, що свідчить про хорошу розбірливість мови. Цьому багато в чому сприяє крутий амфітеатр, що піднімається під кутами від 22 до 26°, який забезпечує хорошу видимість сцени і враховує вільне сходження звукових хвиль у відкритому просторі театру. Деякі дані про відкриті римські театри, приведені в таблиці. 11.12.

**ТАБЛИЦЯ П.12**  
**Характеристика деяких римських театрів**

Театри	Розміри сцени, м			Діаметр кавеа, м	Вместі- мость, чіл.
	довжина	глибина	ширина		
Театр Марцелія в Римі	60	81	–	128	13000
Театр в Оранжі	61,1	9,3	26	103	7800
Театр в Аспенде	46,7	4,1	22	101	6600

У сучасних відкритих спорудах, призначених для виступів симфонічних оркестрів, ансамблів і обладнаних акустичними раковинами і системами звукопідсилення (рис. 43,б,в), допускається віддаленість глядачів від естради, вказана в таблиці. 11.10.

### Віддаленість місць глядачів від естради

Театри	Місткість, чіл.	Гранична віддаленість, м	
		по осі раковини	з боків раковини
«Голлівудська чаша» в США	22 500	165	$2 \cdot 75 = 150$
Театр масової пісні в Таліні	–	160	$2 \cdot 80 = 160$
Зелений театр в Центральному ордені Леніна парку культури і відпочинку ім. М. Горького в Москві	13 000	103	$2 \cdot 35 = 70$

Важливими елементами відкритих театрів є акустичні раковини і екрани, вони дозволяють створити рівномірне звукове поле і підвищити рівень звукового тиску в найбільш віддалених від сцени місцях, а також забезпечити можливість виконавцям (оркестрантам, хористам і ін.) на естраді добре чути один одного, що дуже важливе для синхронізації і балансування виконання. Останнє набуває особливого значення для відкритих театрів з естрадою, розрахованою на виступ великих хорів. Подібні відкриті споруди набули поширення в Естонії, Латвії і Литві. Габарити екранів-відбивачів задовольняють двом умовам: довжина падаючої на них звукової хвилі має бути значно менше в порівнянні з лінійними розмірами екранів; величину екрану необхідно пов'язувати з розмірами площі, зайнятої джерелами звуку.

Велике значення має конструктивне вирішення раковин і екранів, які повинні мати:

- високий коефіцієнт звуковідбиття лицьовального матеріалу на будь-якій частоті звуку і при будь-якому куті падіння;

- достатню просторову жорсткістю каркаса або форми;

- низьку власну частоту коливання, яка залежить від маси конструкції, способу кріплення і жорсткості елементів;

- конструкція не повинна збуджуватися від дії вітру або могутніх джерел звуку.

Найбільший інтерес являють раковини конічної і сферичної форм. Раковини у вигляді зрізаного конуса складаються з вертикальної стіни, стелі і бічних стін, що відбивають звук, напрям яких зазвичай визначається формою амфітеатру (мал. 11.44). Раковини подібного вигляду, оброблені з внутрішньої сторони глибоким рельєфом, сприяють створенню в амфітеатрі рівномірного звукового поля і вільні від дефектів утворення зон концентрації звуку (фокусів). При великих розмірах стін для посилення спрямованого звучання доцільно надавати стінам глибоко пластичний профіль (пилкоподібний і ін.).



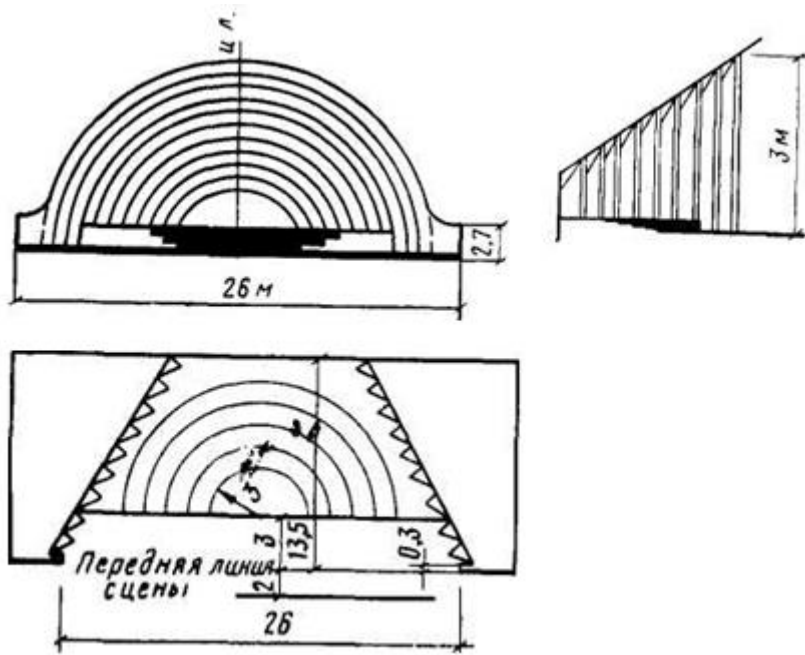
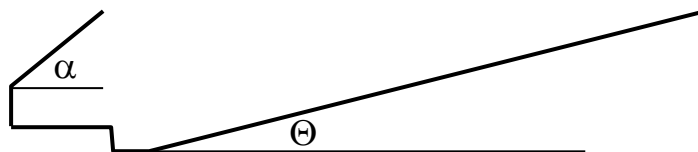


Рис. 11.44. Раковина відкритого театру «Голлівудська чаша»

Стелю раковини розташовують під кутами, які сприяють відбиванню звукової енергії в напрямі, паралельному профілю підлоги амфітеатру. У загальному випадку нахил стелі до горизонту, що оцінюється кутом  $\alpha$ , визначається з виразу

$$\alpha = 45 + \Theta/2$$

де  $\Theta^\circ$  — кут нахилу підлоги амфітеатру.



При ускладненому профілі раковина має вид ряду окремих «коробок» без дна і кришок, що розширюються до амфітеатру бічними стінками. Число «коробок» залежить від глибини сцени, а кут розташування їх в просторі визначається розмірами амфітеатру і профілем підлоги. При виборі і розташуванні «коробок» доцільно їх нахил вибирати так, щоб «коробки», розташовані в передній частині раковини, відбивали звукові хвилі до глядачів, а «коробки», прилеглі до задньої стіни раковини, — до виконавців.

З сучасних відкритих театрів великої місткості найбільший інтерес представляють «Голлівудська чаша» в США і Співецькі трибуни в Таліні і Вільнюсі.

«Голлівудська чаша» призначена для симфонічних концертів. Театр розташований в долині, надійно захищений від вітру горами. В результаті теплової дії нагрітих сонцем гір повітря долини має інверсійний розподіл температури.

План і розріз театру приведені на мал. 11.47. Кут нахилу амфітеатру  $12^\circ$ . Великі розміри амфітеатру місткістю до 22 500 чоловік визначили відстань від авансцени до останнього ряду місць, у 165 м. Природна бухта, зайнята під амфітеатр, була поглиблена і спланована економічно на основі балансу земляних робіт. «Чаша» театру надійно захищена штучними насипами від транспортного і міського шуму.

Акустична раковина завдяки вибраній формі і глибокої пластичній обробці стелі і стін забезпечує спрямованість звукових хвиль у всі ділянки величезного амфітеатру. Формою раковина нагадує гігантський рупор. Уклон стелі був вибраний згідно співвідношенню

$$\alpha = 45 + \Theta/2, \text{ де } \Theta = 12^\circ, \text{ отже, } \alpha = 51^\circ.$$

Цей кут прийнятий і для бічних відзеркалювальних поверхонь раковини, що є зрізаним прямим конусом із зовнішнім радіусом, рівним 13,7 м. Складена з дев'яти «коробок» раковина відбиває падаючі звукові хвилі не тільки до глядачів, але і до виконавців. Результати акустичних вимірювань і, зокрема, вимірювань складової артикуляції в амфітеатрі свідчать об природності звучання і задовільній розбірливості звуків.

Унікальними в архітектурному і акустичному аспектах є Співецькі трибуни у Вільнюсі, Ризі і Таліні. Основа величезного амфітеатру — співецька трибуна — є гігантською акустичною раковиною, що покоїться на залізобетонній конструкції. Розміри трибуни в плані  $75 \times 35$  м. На ній можна розмістити хор до 10000 чоловік. Конструкція раковини складається з двох арок. Одна з них (мал. II.48,6) — залізобетонна з невеликим кутом нахилу — спирається на стійки; інша служить опорою для металевих тросів і тонкої оболонки, розташованої під кутом  $58^\circ$  до горизонту. Натягнута сітка тросів в двох напрямках утворює поверхню, подібну до гіперболічного параболоїда. По тросах укладено покриття з двошарових дерев'яних щитів.

Форма раковини, великі габарити відбивного екрану, опуклого всередину естради з резонуючою поверхнею стелі, як показали вимірювання, забезпечують хорошу якість звучання і задовільну чутність в самих видалених місцях поля-амфітеатру. Акустичні якості цієї унікальної і оригінальної споруди були заздалегідь досліджені за допомогою методу моделювання.

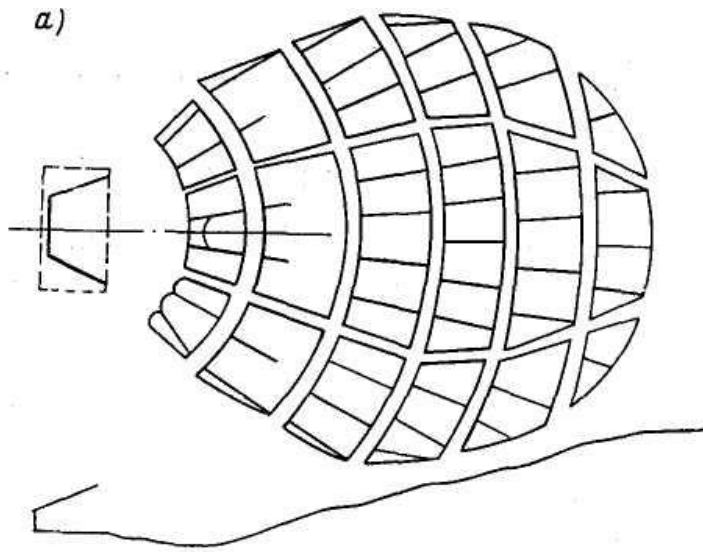


Рис. 11.47. Открытый театр «Голливудская чаша» (США)  
*a* — план и продольный разрез;  
*б* — акустическая раковина (план, разрез и фасад)

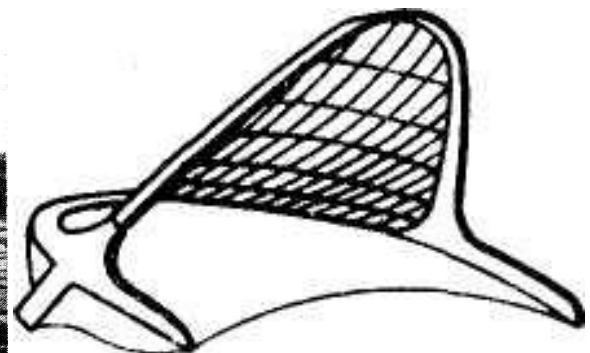
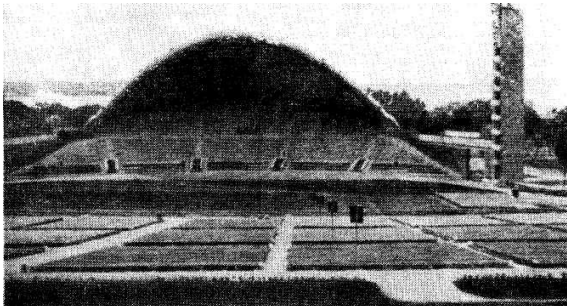


Рис. 11.48. Певческие трибуны в Вильнюсе и Таллине

*a* — общий вид акустической раковины; *б* — архитектурно-конструктивное решение раковины