

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ**  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ  
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»**

---

**Ю. А. Ковалгин, О. А. Свиньина, А. А. Фадеев**

**РАСЧЕТ  
АППАРАТНО-СТУДИЙНЫХ КОМПЛЕКСОВ  
ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ И АУДИОТЕХНИКИ**

**ЧАСТЬ 2**

***РАСЧЕТ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ***

**Учебно-методическое пособие  
по курсовому и дипломному проектированию**

**СПб ГУТ)))**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2016**

УДК 621.396.7 (077)

ББК 32.884.8я73

К56

Рецензент

кандидат технических наук, декан факультета РТС СПбГУТ, профессор

*О. В. Воробьёв*

*Рекомендовано к печати*

*редакционно-издательским советом СПбГУТ*

**Ковалгин, Ю. А.**

К56 Расчет аппаратно-студийных комплексов телерадиовещания и аудиотехники : Часть 2. Расчет систем озвучения и звукоусиления : учебно-методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию / Ю. А. Ковалгин, О. А. Свиньина, А. А. Фадеев ; СПбГУТ. – СПб., 2016. – 78 с.

Рассмотрены общие характеристики, типы и показатели качества систем озвучения и звукоусиления и предъявляемые к ним требования. Особое внимание уделено подробному изложению методики их проектирования, выбору типов и особенностям размещения громкоговорителей, расчету уровней звукового давления на озвучиваемой площади, расчету разборчивости речи, моделированию систем озвучения и звукоусиления в среде ПО Ulysses, сравнительной оценке результатов «ручного» и машинного проектирования.

Предназначено для подготовки студентов, обучающихся по направлениям 11.03.01, 11.04.01 «Радиотехника» при изучении дисциплин «Аудиотехника» и «Системы и технологии озвучения, звукоусиления, радиообслуживания»; 11.03.02, 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» при изучении дисциплин «Электроакустика и звуковое вещание» и «Системы, средства и сети цифрового радиовещания».

**УДК 621.396.7 (077)**

**ББК 32.884.8я73**

© Ковалгин Ю. А., Свиньина О. А., Фадеев А. А., 2016

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ .....	6
1.1. Виды помещений и их основные параметры .....	6
1.2. Назначение систем озвучения и звукоусиления .....	6
1.3. Требования, предъявляемые к системам озвучения и звукоусиления .....	14
1.3.1. <i>Необходимый уровень звукового давления и неравномерность                 звукового поля</i> .....	14
1.3.2. <i>Качество и отсутствие различных дефектов звучания</i> .....	16
1.3.3. <i>Слитность звучания</i> .....	18
1.4. Минимально допустимая разборчивость речи .....	18
1.4.1. <i>Субъективные методы оценки разборчивости речи</i> .....	25
1.4.2. <i>Объективные методы оценки разборчивости речи</i> .....	28
1.4.3. <i>Другие методы оценки качества речи</i> .....	39
2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ .....	40
2.1. Сосредоточенные системы .....	41
2.2. Зональные системы .....	43
2.3. Распределенные системы .....	44
3. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ .....	46
3.1. Исходные данные и задачи расчета .....	49
3.2. Акустический расчет помещения .....	49
3.3. Выбор и расчет требуемых параметров звукового поля .....	51
3.4. Расчет уровней звуковых давлений в озвучиваемой зоне .....	52
3.5. Выбор и размещение громкоговорителей .....	54
3.6. Расчет площади, занимаемой слушателями .....	55
3.7. Расчет величины подводимой мощности .....	56
3.8. Расчет уровней звукового давления прямого и диффузного звуков и неравномерности озвучения .....	57
3.9. Расчет величины акустического отношения .....	59
3.10. Проверка результатов расчетов характеристик звукового поля .....	59
3.11. Расчет разборчивости речи .....	60
3.12. Расчет импульсной характеристики помещения и аурализация отрывка звукового сигнала .....	61
4. ПРИМЕР РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ОЗВУЧЕНИЯ .....	62
4.1. Выбор и расчет требуемых параметров системы озвучения .....	62
4.2. Выбор громкоговорителей системы озвучения .....	64
4.3. Расчет величины подводимой мощности .....	65
4.4. Расчет уровней звукового давления сигналов прямого и диффузного звуков и неравномерности озвучения .....	65
4.5. Расчет величины акустического отношения .....	68
4.6. Расчет разборчивости речи .....	69
4.7. Результаты моделирования системы озвучения и анализа звукового поля в ПО Ulysses .....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	77

## ВВЕДЕНИЕ

В данном учебно-методическом пособии рассматриваются методы звукофикации помещений различного назначения (театров, кинотеатров концертных залов, типовых радио и музыкальных студий), обеспечивающие оптимальное качество звуковоспроизведения.

При составлении данного пособия преследовались следующие основные цели:

- изучить основные этапы акустического расчета системы озвучения;
- рассмотреть расчет требуемой акустической мощности громкоговорителей, уровня прямого звука и неравномерности уровней звукового давления в зоне озвучивания с учетом размещения громкоговорителей;
- рассмотреть процесс выбора системы звукоусиления и типа громкоговорителей;
- выполнить расчет разборчивости речи по параметрам %  $AL_{\text{cons}}$  и  $STI$  в соответствии с международными стандартами;
- ознакомить с процессом моделирования озвучиваемого помещения и размещения громкоговорителей в программной среде **Ulysses**;
- рассмотреть анализ характеристик звукового поля на базе программной среды **Ulysses**.

Данное пособие содержит материалы, необходимые для выполнения следующих заданий.

1. Выбор системы звукоусиления и типа громкоговорителей.
2. Расчет требуемой акустической мощности громкоговорителей, уровня прямого звука и неравномерности уровней звукового давления в зоне озвучивания с учетом размещения громкоговорителей.
3. Теоретический расчет разборчивости речи по параметрам %  $AL_{\text{cons}}$  и  $STI$  в соответствии с международными стандартами.
4. Построение модели озвучиваемого помещения и размещение в нем громкоговорителей с помощью программной среды **Ulysses**.
5. Программный расчет характеристик звукового поля помещения, анализ полученных результатов и сравнение их с результатами теоретического расчета.

В пособии также приводится перечень литературы, которая может служить вспомогательным материалом при выполнении курсового проекта. При выполнении курсового проекта рекомендуется обратиться к первой части данного учебно-методического пособия. «Расчет аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и аудиотехники: Часть 1» [1]. В нем отражены методы расчета помещений аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания на оптимальные или требуемые акустические условия. Вариант задания выбирается по двум последним цифрам номера зачетной книжки, как указано ниже.

Выбор варианта задания

№ варианта задания в табл. 1	Две последние цифры номера зачетной книжки			
	01	26	51	76
1	01	26	51	76
2	02	27	52	77
3	03	28	53	78
4	04	29	54	79
5	05	30	55	80
6	06	31	56	81
7	07	32	57	82
8	08	33	58	83
9	09	34	59	84
10	10	35	60	85
11	11	36	61	86
12	12	37	62	87
13	13	38	63	88
14	14	39	64	89
15	15	40	65	90
16	16	41	66	91
17	17	42	67	92
18	18	43	68	93
19	19	44	69	94
20	20	45	70	95
21	21	46	71	96
22	22	47	72	97
23	23	48	73	98
24	24	49	74	99
25	25	50	75	00

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ

## 1.1. Виды помещений и их основные параметры

В табл. 1 перечислены типы озвучиваемых помещений, их габариты (длина  $l \times$  ширина  $b \times$  высота  $h$ , м); количество слушателей, исполнителей и стульев для их размещения; количество дверей и окон и их габариты (ширина  $b \times$  высота  $h$ , м). В таблице также указаны специфические особенности озвучиваемых помещений: наличие подиумов, балконов, ниш; конфигурация потолков и стен; материалы, из которых изготовлены и которыми обработаны поверхности помещений. Коэффициенты звукопоглощения основных абсорбентов представлены в табл. Пб.1 прил. 6.

## 1.2. Назначение систем озвучения и звукоусиления

Системы озвучения и звукоусиления представляют собой совокупность усилительных и электроакустических устройств, предназначенных для воспроизведения звукового сигнала и обеспечивающих хорошую его слышимость на достаточно большой площади прослушивания как в закрытых помещениях, так и на открытых пространствах.

Системы озвучения применяются:

- для высококачественного воспроизведения сигналов музыки и речи;
- передачи информационных сообщений на вокзалах, в аэропортах, на стадионах, в торговых центрах и т. п.;
- воспроизведения вещательных программ на территории парков, выставок и т. п.;
- подачи команд и распоряжений на сортировочных станциях, строительных площадках и т. п.

Системы звукоусиления применяются в случаях, когда мощности первичного источника сигнала (оратора, певца, музыканта и т. п.) недостаточно для создания необходимого уровня звукового сигнала на местах, занятых слушателями.

В закрытых помещениях с нормальными акустическими условиями (отсутствие акустических дефектов помещения, невысокий уровень шума) звукоусиление, как правило, требуется при объемах помещений свыше  $2000 \text{ м}^3$  и при расстояниях до удаленных слушателей свыше 25 м. В переглушенных помещениях и при высоком уровне шумов звукоусиление может понадобиться и при меньших объемах и расстояниях.

Аудитории на открытом воздухе всегда требуют применения звукоусиления.

Таблица 1

## Варианты заданий на курсовое проектирование

№	Помещение		Количество			Двери		Окна		Акустическая обработка помещения		Прочее				
	Тип	Размер, $l \times b \times h, \text{ м}^3$	слушателей, чел.	исполнителей, чел.	Стульев, шт.	Количество, шт.	Размер, $l \times b, \text{ м}^2$	Количество, шт.	Размер, $b \times h, \text{ м}^2$	Поверхность	Материал	Элемент конструкции	Размер, $b \times h$ ( $\times l$ ), $\text{ м}^2$ ( $\text{ м}^3$ )			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
1	Лекционный зал	$12 \times 6 \times 4$	40	1	41	1	$1 \times 2,2$	4	$2,3 \times 2$	стены, высота от 0 до 1,8 м	панель (дерево, фанера)	-				
										стены, высота более 1,8 м				штукатурка гипсовая		
										пол				деревянный паркет на балках		
										потолок				известковая штукатурка		
										двери				деревянные		
										стулья				жесткие		
										окна				ординарные		
2	Драматический театр	$40 \times 35 \times 17$	1680	18	1680	2	$3,5 \times 2,6$	-	-	стены, потолок	штукатурка гипсовая по металлической обрешетке	подиум	$6 \times 1$			
										пол				линолеум		
										двери				деревянные	подъем	$30 \times 4$
										стулья				с обивкой из кожи		
3	Кинотеатр	$34 \times 21 \times 13,5$	700	0	700	2	$2,5 \times 3$	4	$1,5 \times 1$	стены, потолок	штукатурка известковая	подъем	$25 \times 4$			
										пол				деревянный паркет по бетону	экран	$11,5 \times 20$
										стулья				мягкое, обитое тканью		
										двери				деревянные	балкон	$21 \times 3 \times 1,3$
										окна				задрапированы тканью		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
4	Конференц-зал	25 × 14,5 × 7	120	1	121	3	2,6 × 2,6	5	2 × 3	стены, потолок	штукатурка по металлической обрешетке	подиум	2,5 × 1			
										пол				линолеум	подъем	20 × 1,5
										стулья				мягкое, обитое тканью	экран	4,5 × 8
										двери				деревянные		
										окна				ординарные		
5	Зал для органной музыки	37 × 23 × 14	700	31	731	4	3,5 × 2,8	2	2 × 5	стены, потолок	штукатурка гипсовая	подиум	7 × 1,5			
														1	11 × 5	пол
								стулья для слушателей	с обивкой из кожи	орган расположен на балконе; 1 органист и 30 музыкантов						
								стулья для исполнителей	полумягкие							
								двери	деревянные							
								окна	ординарные							
6	Зал заседаний	25 × 15 × 7	30	1	31	2	2,4 × 3	4	4 × 3,5	стены	штукатурка алебастровая, гладкая по деревянной обрешетке	-				
										пол				деревянный паркет по бетону		
										потолок				штукатурка по металлической сетке		
										стулья для слушателей				с обивкой из ткани		
										стулья для исполнителей				с обивкой из кожи		
										двери				деревянные		
										окна				ординарные		
7	Актовый зал для массовых мероприятий	22 × 14,5 × 8,5	100	5	100	3	1,8 × 2,5	6	4,5 × 6	стены, потолок	штукатурка известковая по обрешетке	подиум	5 × 0,5			
										пол				сосновая древесина		
										стулья				жесткие		
										окна				ординарные		



Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8	Ночной клуб	18 × 11 × 7	100	0	50	2	1,5 × 2,5	-	-	стены, потолок	штукатурка известковая	2 двер- ных про- ема без дверей	1,5 × 2,2
										пол	деревянный паркет на балках		
										20 стульев	жесткие		
										30 стульев	с обивкой из кожи	подиум	
9	Телестудия	25 × 20 × 8	30	1	32	2	1,5 × 2,2	4	2 × 2,7	стены	древесноволокнистая плитка	-	
										пол	сосновый паркет		
										потолок	штукатурка гипсовая		
										двери	деревянные		
										стулья	с обивкой из кожи		
10	Лекционный зал	26 × 15 × 7	90	1	96	1	1,8 × 2,5	6	2 × 3	стены	кирпичная кладка, окрашенная	подиум	1,5 × 0,4
										потолок	штукатурка по бетонным блокам	подъем	12 × 1
										стулья для слушателей	жесткие		
										стулья для исполнителей	полумягкие		
										двери	деревянные		
										окна	ординарные		
11	Театр оперы и балета	50 × 28 × 15	1840	8	1840	4	3,5 × 2,7	-	-	стены	бетонные, окрашенные	подиум	7 × 1
										пол	ковер, длина ворса 5/16 дюйма, на резиновой подложке	подъем	40 × 8
										потолок	гипсовая плитка в металлической решетке		
										стулья	с мягкой обивкой		
										сцена (пол, боковые стенки)	сосновая древесина		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
12	Кинотеатр	18 × 11 × 7,5	210	0	210	2	2,3 × 2,5	2	2 × 1,5	стены	кирпичная кладка, неоштукатуренная	подъем	25 × 4
										потолок	деревянные панели		
										пол	линолеум	экран	11,5 × 20
										стулья	с мягкой обивкой	балкон	21 × 3 × 1,3
										двери	деревянные		
										окна	задрапированы бархатной тканью		
13	Зал для органной музыки	30 × 17 × 8	550	25	575	4	2,6 × 3,6	2	1,5 × 4	стены, потолок	штукатурка гипсовая	подиум	6 × 1,5
										пол	линолеум	балкон	3 × 1 м (по ширине зала)
								1	6 × 3	стулья для слушателей	с обивкой из кожи	подъем	21 × 1,5
										стулья для исполнителей	полумягкие	орган расположен на балконе	
										двери	деревянные		
										окна	ординарные		
										14	Кинотеатр	28 × 18 × 11	500
потолок	тонкая акустическая плитка	экран	17 × 9										
пол	деревянный паркет												
стулья	с обивкой из ткани												
двери	деревянные												
окна	задрапированы хлопчатобумажной тканью												

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
15	Зал заседаний	13 × 8 × 5	14	1	15	1	1,5 × 2,2	4	2 × 2,5	стены, потолок	штукатурка известковая	-	
										пол	деревянный паркет по бетону		
										стулья для слушателей	с обивкой из ткани		
										стулья для исполнителей	с обивкой из кожи		
										двери	деревянные		
										окна	ординарные		
16	Концертный зал	47 × 22 × 21	1400	18	1418	2	1,6 × 2,3	-	-	стены	кирпичная кладка, окрашенная	подиум	15 × 1
										пол	линолеум	балкон	4 × 1,5 (по ширине зала)
										потолок	деревянные панели	подъем	1,5 × 29
										стулья для слушателей	с мягкой обивкой		
										двери	деревянные		
17	Музыкальная студия	6 × 3 × 3,5	7	2	7	1	1,5 × 2,2	1	2 × 3	стены, потолок	штукатурка сухая	-	
										пол	ковер, длина ворса 3 мм, на войлочной подложке по бетону		
										стулья для слушателей	с обивкой из кожи		
										двери	деревянные		
										окна	с утолщенным стеклом		
18	Концертный зал	23 × (12-17) × 8	500	13	500	2	2,7 × 2,5	-	-	стены	кирпичная кладка, неоштукатуренная	подиум	5 × 1
										пол	сосновая древесина	подъем	16 × 1
										потолок	древесно-волокнистая плитка толщиной 12 мм		
										стулья	с обивкой из ткани		
										двери	деревянные		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
19	Драматический театр	45 × (26–31) × 20	1750	15	1750	3	4 × 3	-	-	стены	бетонные, шероховатые	подиум	6,5 × 1
										пол	ковер, длина ворса 7/16 дюйма, по бетону	балкон	3 × 1,3 (по ширине зала)
										потолок	сосновая древесина	подъем	35 × 1,5
										стулья	с мягкой обивкой		
										двери	деревянные		
20	Театр оперы и балета	55 × (35–40) × 25	1950	10	1950	4	4 × 3	-	-	стены	бетонные, гладкие, неокрашенные	подиум	8 × 1
										пол	линолеум	подъем	45 × 1,5
										потолок	штукатурка гипсовая	балкон	4 × 1,5 (по ширине зала)
										стулья	с мягкой обивкой		
										двери	деревянные		
21	Аудитория	20 × 12 × 6	256	1	256	2	2 × 1,5	4	1,8 × 1,2	стены, потолок	штукатурка известковая по обрешетке	в аудитории 16 рядов по 16 мест в каждом и 2 продольных прохода шириной по 1,2 м; между первым рядом и передней стеной 4 м	
										пол	деревянный паркет на балках		
										стулья	жесткие		
										двери	деревянные		
										окна	ординарные		
22	Концертный зал	30 × 16 × 7,8	480	10	480	2	2 × 2,3	-	-	стены	древесноволокнистая плитка	подиум	16 × 1
										пол	сосновый паркет	подъем	10 × 1
										потолок	штукатурка гипсовая по обрешетке		
										стулья	с обивкой из кожи		
										двери	деревянные		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
23	Зал «Круглого стола»	20 × 20 × 8	120	1	12	общая площадь дверей	80	1	1	потолок	тонкая акустическая плитка	-	
										стены (500 м <sup>2</sup> )	древесноволокнистая плитка		
										стены (60 м <sup>2</sup> )	зеркала		
										пол (320 м <sup>2</sup> )	ковер по бетону		
										пол (80 м <sup>2</sup> ) – занят столом, покрытым скатертью; высота стола 80 см	хлопчато-бумажное полотно плотностью 500 г/см <sup>2</sup>		
										стулья	с обивкой из ткани		
										двери	деревянные		
										Зал рассчитан на 12 делегаций; 36 членов делегаций сидят в первом ряду (у края стола), другие 36 – во втором ряду; вдоль каждой из стен расположено по 9 стульев для вспомогательного персонала; в центре зала располагаются стенографистки (12 человек); в зале во время работы члены делегаций тихо переговариваются			
24	Зал ожидания аэровокзала	50 × 20 × 7,5	произвольное	0	произвольное	общая площадь дверей	100	общая площадь окон	200	стены, потолок	штукатурка гипсовая	-	
										пол	деревянный паркет по бетону		
										двери	деревянные		
										окна	ординарные		
										Одна продольная стена почти наполовину состоит из окон и стеклянных дверей общей площадью 200 м <sup>2</sup> ; на уровне второго этажа балкон по всему периметру зала			
25	Студия звукозаписи	6 × 4,5 × 3,5	1	1	2	1	1,5 × 2,2	1	2 × 1	стены, потолок	штукатурка известковая	-	
										пол	линолеум		
										стулья	с обивкой из ткани		
										двери	деревянные		

Система звукоусиления отличается от системы озвучения наличием акустической обратной связи, которая возникает благодаря тому, что микрофон, принимающий первичный звуковой сигнал для последующего усиления, находится в звуковом поле громкоговорителей, излучающих усиленный сигнал. Иными словами, находится в общем звуковом поле. Поэтому система звукоусиления является потенциально неустойчивой и при некоторых условиях может перейти в режим генерации.

### **1.3. Требования, предъявляемые к системам озвучения и звукоусиления**

В зависимости от назначения (высококачественное усиление сигналов речи и музыки, озвучение улиц, парков, площадей, усиление сигналов команд и распоряжений в условиях повышенных шумов и т. п.), системы озвучения и звукоусиления должны удовлетворять не только общим требованиям (полоса воспроизводимых звуковых частот, частотные, нелинейные искажения и т. д.), но и некоторым специальным требованиям. В частности, система озвучения и звукоусиления на озвучиваемой площади должна обеспечивать:

- необходимый уровень звукового давления при заданной неравномерности их уровней на местах прослушивания;
- естественность, отсутствие различных дефектов звучания;
- слитность звучания, отсутствие эха;
- требуемую разборчивость речи;
- отсутствие акустической обратной связи.

#### **1.3.1. *Необходимый уровень звукового давления и неравномерность звукового поля***

В системах озвучения и звукоусиления, используемых для воспроизведения речевых сигналов, главным является требование минимально допустимой разборчивости речи. Естественно, всегда необходимо стремиться обеспечить в проектируемой системе озвучения и звукоусиления возможно большую разборчивость речи, если это не приводит к существенному удорожанию и усложнению системы.

Если система звукоусиления речи работает на открытом пространстве в присутствии посторонних шумов, то уровень звукового давления, который должна создавать система обслуживания, необходимо выбрать с определенным превышением над уровнем шума, чтобы обеспечить требуемую разборчивость речи. Ориентировочно необходимый уровень звукового давления  $N_c$  при известном уровне шума  $N_{ш}$  можно определить по одной

из трех характеристик разборчивости речи – слоговой, словесной и смысловой. В табл. 2 приведены уровни шума для наиболее характерных источников. Нужно иметь ввиду, что чрезмерный уровень речевого сигнала также снижает разборчивость речи. Поэтому в установках усиления речи не следует выбирать уровень звукового давления выше 96 дБ.

Таблица 2

Значения уровня шума для различных источников

Источник шума	Уровень, дБ
Тихий парк	20
Тихая улица	30
Средний уличный шум	50–60
Шумная улица	60–70
Очень шумная улица	70–80
Гудок автомобиля на расстоянии 8 м	95–100
Трамвай на расстоянии 10–20 м	80–85
Троллейбус на расстоянии 5 м	70–80
Демонстрация с пением на расстоянии 5 м	60–73
Праздник на большой площади	74–83
Стадион, футбольный матч	75–85
Шумная аллея в парке	60–70
Тихая аллея в парке	30–40
Зал театра	45
Аудитория, зал заседаний (при проведении собраний из-за частных разговоров шум может достигать 65 дБ)	55

Высококачественные системы озвучения и звукоусиления работают, как правило, при малых уровнях шума, обычно не превышающих 40–45 дБ. В таких системах необходимый уровень звукового давления определяется из условия естественности звучания первичных источников сигнала. Поэтому при воспроизведении музыкальных программ необходимо обеспечить на местах, занятых слушателями, уровень звукового давления 90–96 дБ (такой уровень развивает симфонический оркестр в 10–12-м рядах партера), а при усилении речи – 80–86 дБ, что примерно соответствует уровню, создаваемому оратором на расстоянии 1 м.

В тех случаях, когда система озвучения должна создавать лишь «музыкальный фон» (например, в парках и в других местах массового отдыха), который не мешал бы нормальному разговору, уровень звукового давления необходимо ограничить величиной 65–70 дБ.

Допустимая неравномерность уровней прямого звука  $\Delta N$ , дБ, на озвучиваемой площади рассчитывается как разность

$$\Delta N = N_{\text{макс}} - N_{\text{мин}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{макс}}$  и  $N_{\text{мин}}$  – максимальный и минимальный уровни сигнала прямого звука, создаваемые системой обслуживания, зависящие от назначения системы озвучения и звукоусиления. В высококачественных системах неравномерность уровней звукового давления на местах расположения слушателей не должна превышать 6 дБ. В системах, предназначенных только для воспроизведения речевых сигналов, допустима неравномерность уровней звукового давления около 8 дБ. Однако необходимо стремиться к тому, чтобы сделать эту неравномерность возможно меньшей. При озвучении стадионов и спортивных площадок допускается неравномерность уровней звукового давления на местах, занятых зрителями, до 8–10 дБ.

Жестких норм на неравномерность уровней звукового давления не устанавливают в системах, предназначенных для озвучения улиц, площадей, передачи служебных команд и распоряжений.

### **1.3.2. Качество и отсутствие различных дефектов звучания**

Вторым по важности требованием к любым трактам звукопередачи, чаще всего к последнему его звену – помещению, является высокое качество звучания при отсутствии различных дефектов. К дефектам звучания можно отнести: эхо, бубнение из-за резонансов, возникающих в отдельных небольших объемах, резкое изменение времени реверберации из-за резонансов в поглощающих материалах, значительное повышение уровня звукового давления в отдельных точках помещения из-за фокусировки звуковой энергии, создаваемой вогнутыми поверхностями и другими концентраторами энергии. Все эти дефекты влияют на разборчивость речи в отдельных точках помещения и, как следствие, снижают качество звучания любых передач. Поэтому по возможности они должны быть устранены.

При работе системы озвучения и звукоусиления в закрытом помещении слушатель принимает как прямой сигнал, идущий непосредственно от громкоговорителя по кратчайшему пути, так и многократно отраженный от стен помещения. Значительное превышение энергии отраженных сигналов над энергией прямого звука ухудшает качество звучания сигнала. Поле отраженного звука обычно называют диффузным. Отношение плотности звуковой энергии диффузной составляющей звукового поля к плотности звуковой энергии прямого звука называют **акустическим отношением**, т. е.

$$R = \frac{\varepsilon_{\text{д}}}{\varepsilon_{\text{пр}}} = \frac{P_{\text{д}}^2}{P_{\text{пр}}^2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{\text{д}}$  и  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – энергия отраженных сигналов и прямого звука,  $P_{\text{д}}$  и  $P_{\text{пр}}$  – звуковое давление отраженного и прямого звуков соответственно.



Если перейти к уровням и обозначить через  $N_d = 20 \lg(p_d/p_0)$  абсолютный уровень звукового давления диффузного звука, а через  $N_{пр} = 20 \lg(p_{пр}/p_0)$  – абсолютный уровень звукового давления прямого звука, то разность этих уровней будет равна величине акустического отношения в дБ:

$$N_d - N_{пр} = 10 \lg R = \Delta N_R. \quad (3)$$

При этом уровень суммарной плотности звуковой энергии:

$$N_{\Sigma} = 10 \lg \frac{p_{пр}^2 + p_d^2}{p_0^2} = N_{пр} + 10 \lg(1 + R). \quad (4)$$

Акустическое отношение является одним из количественных показателей качества акустики помещения. Если оно велико, то речь становится неразборчивой, а музыка, особенно при быстром исполнении, становится размытой, нечеткой, излишне гулкой. Если акустическое отношение меньше единицы, то музыка звучит отрывисто, сухо, теряется плавность исполнения. Речь звучит также сухо и обедненно в тембральном отношении, но если акустическое отношение несколько больше 0,5, то разборчивость речи не снижается. Поэтому стремятся для речевых передач обеспечить акустическое отношение в пределах 1–4, а для музыкальных – 2–10. Заметим, что для некоторых видов исполнения (органная музыка) это отношение допускается до 16–20.

Рекомендуемые величины пределов изменения требуемого уровня и неравномерности уровней звукового давления в зоне прослушивания, а также акустического отношения, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Требуемые характеристики звукового поля

Назначение системы озвучения и звукоусиления	Требуемый уровень звукового давления $N_{тр}$ , дБ	Неравномерность уровней звукового давления прямого звука $\Delta N_{тр}$ , дБ	Акустическое отношение	
			$R_{мин}$	$R_{макс}$
Воспроизведение музыки и театральных эффектов	~100	< 6	1	8–10
Воспроизведение музыкальных программ; подусиление солистов	94–96	< 6	1	8–10
Воспроизведение развлекательных музыкальных программ (танцы); музыки и речи в шумных помещениях	94–96	< 8	1	4–6
Усиление речи при низких уровнях шумов	80–86	< 6	0,5	3–6
Усиление речи в условиях повышенных шумов	определяется допустимой разборчивостью $N_{тр} = N_{ш} + 10 \div 15$ дБ (но не более 96–100 дБ)			
Создание музыкального фона	60–70	< 8	1	8–10

### 1.3.3. Слитность звучания

Нарушение слитности звучания может произойти в том случае, если к слушателю будут приходить несколько звуковых сигналов с запаздыванием во времени друг относительно друга. Такая ситуация может возникнуть из-за отражений звуковых волн от стен зданий или от других препятствий, а также в случае применения системы озвучения, построенной по зональному принципу.

При определенных соотношениях уровней основного и запаздывающего сигналов мешающее действие эхо-сигнала может быть значительно уменьшено. Разность уровней  $\Delta N$ , дБ запаздывающего и основного сигналов, при которой эхо-сигнал не создает ощутимой помехи основному сигналу в зависимости от времени запаздывания  $\tau$ , представлена на рис. 1. В распределенных системах при той же разности уровней допускается большее время запаздывания.

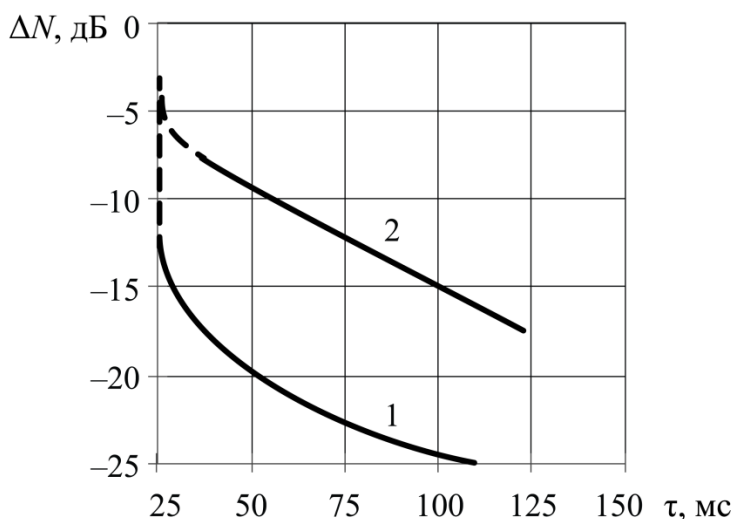


Рис. 1. Зависимость разности уровней основного и запаздывающего сигналов от необходимого времени запаздывания  $\tau$  для отдельного восприятия (кривая 1) и появления мешающего эха (кривая 2)

### 1.4. Минимально допустимая разборчивость речи

Одним из основных показателей системы передачи речевых сигналов является **минимально допустимая разборчивость речи**. Количественно разборчивость речи может быть оценена **слоговой, словесной и смысловой** разборчивостями, между которыми существует статистическая взаимосвязь.

Для передачи служебных сообщений, объявлений достаточна слоговая разборчивость, равная 50 %, в этом случае будет обеспечена словесная

разборчивость, равная 92 %, а смысловая – 96 %. При проведении митингов, собраний, передачи информационных программ требуется 100 %-ная смысловая разборчивость. Она может быть получена при слоговой и словесной разборчивостях, равных соответственно 70–80 и 98–99 %.

С разборчивостью речи связана **понятность речи**. Введено четыре градации понятности речи: отличная, хорошая, удовлетворительная и предельно допустимая. Отличная понятность имеет место, если слушатель воспринимает речь без переспросов, при хорошей понятности возникает необходимость в переспросах редко встречающихся слов. Частые переспросы являются признаком удовлетворительной понятности. Наконец, многократные переспросы одного и того же слова или фразы свидетельствуют о предельно допустимой понятности. В табл. 4 представлена связь понятности со смысловой и слоговой разборчивостью речи

Таблица 4

Связь понятности со смысловой и слоговой разборчивостью речи

Вид разборчивости, %	Понятность			
	предельно допустимая	удовлетворительная	хорошая	отличная
Слоговая	25–40	40–55	55–80	выше 80
Словесная	75–86	87–93	93–98	выше 98

Речевой сигнал имеет двойственную структуру: с одной стороны это обычный акустический сигнал, объективные акустические параметры которого вызывают определенные субъективные ощущения. Взаимодействия между ними в соответствии с общими психофизическими законами неоднозначны и нелинейны. С другой стороны, речевой сигнал имеет особую структуру, в которой закодирована семантическая (смысловая) информация. Поэтому процесс слухового восприятия речи представляет собой, прежде всего, процесс расшифровки и распознавания семантического и эмоционального содержания информации, перевода акустических признаков речевого сигнала в его фонетическое и смысловое содержание.

На протяжении уже нескольких десятилетий используются интегральные методы оценки правильной передачи смысловой информации, заключенной в речевом сигнале – это методы оценки разборчивости.

Оценка разборчивости речи необходима при разработке и использовании различных систем звукоусиления, при оценке акустического качества помещений (театральных и концертных залов, студий, кинозалов и др.), поскольку в конечном итоге качество зала определяется тем, насколько хорошо слушатели понимают смысловое содержание речи, пения и музыки. Не менее важна оценка разборчивости речи и при построении различных коммуникационных систем (радиовещательных, телефонных и др.).

Как показывает опыт работы звукорежиссеров, вопросы обеспечения хорошей разборчивости речи в различных залах, особенно в тех, где установлены системы звукоусиления, являются чрезвычайно актуальными.

В соответствии с международными стандартами, в частности ISO/TR 4870, под разборчивостью понимается «степень, с которой речь может быть понята (расшифрована) слушателями». Под этим понимается степень, с которой слушатели могут идентифицировать (понять смысл) фраз, слов, слогов и фонем. Различаются следующие виды разборчивости: фонемная, слоговая, словесная и фразовая, которые, однако, все связаны друг с другом и могут быть пересчитаны одна в другую.

При передаче речевого сигнала происходит неизбежная потеря информации. Хотя речевой сигнал обладает определенной избыточностью, различные шумы, искажения и реверберационные помехи могут привести к затруднениям при восприятии информации, что делает невозможным понимание смысла речи. Следует отметить, что «слышимость» и «разборчивость речи» понятия разные. Речь может звучать очень громко и быть прекрасно слышна, но быть при этом совершенно неразборчивой (например, в залах вокзалов, аэропортов и др.). Поэтому для оценки разборчивости речи разрабатываются специальные методы, отличные от оценок ее громкости.

**Средние интегральные характеристики речи** показаны на рис. 2. Из них видно, что основная энергия речи сосредоточена в низкочастотной и среднечастотной областях частот до 2 кГц. График распределения амплитудного состава речи показывает, что более 80 % звуков речи имеют уровень меньше 50 дБ, и легко могут маскироваться шумами. Гласные звуки имеют основную частоту фонации в пределах 80–250 Гц, и значительная часть их энергии сосредоточена в формантных областях, лежащих в пределах 450–4000 Гц. Именно по распределению формантных областей в спектре и происходит распознавание гласных звуков. Хотя гласные звуки имеют длительность 30–300 мс, и именно в них сосредоточена основная энергия речевого сигнала, наибольший вклад в разборчивость вносят согласные звуки, которые имеют значительно меньшую длительность – от 10 до 100 мс. Они ниже по уровню на 27 дБ и их спектр – особенно у шумовых (с, з) и взрывных (д, т) согласных – расположен в основном в высокочастотной области 2–10 кГц.

Ключевую роль в распознавании речи играют октавные полосы в области с средними частотами 1, 2, 4 кГц. Они содержат до 75 % речевой информации. Особо важную роль играет октавная полоса с средней частотой 2 кГц. Сигналы в области ее частот могут содержать до 33 % речевой информации.

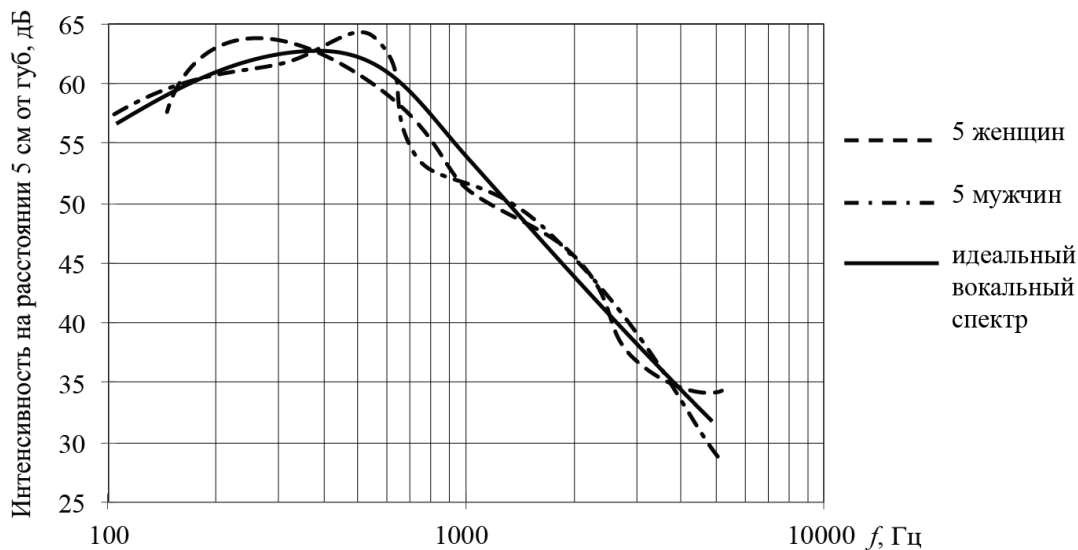


Рис. 2. Частотная зависимость спектральной плотности мощности речевого сигнала

Следует отметить, что реальные речевые источники (например, диктор) имеют характеристику направленности в пределах угла покрытия  $120^\circ$  в горизонтальной и  $90^\circ$  в вертикальной плоскостях с коэффициентом направленности  $Q = 2,5$  в области 2 кГц. Это имеет существенное значение для разборчивости.

Среди многочисленных факторов, влияющих на разборчивость речи, прежде всего можно выделить следующие.

**1. Маскирование другими звуками, в том числе шумами** в ревербирующем помещении и др. Процент потери разборчивости в этом случае зависит, прежде всего, от отношения величины полезного сигнала  $S$  к величине маскирующего шума  $N$ . Это отношение ( $S/N$ ), должно быть выше определенного значения, чтобы можно было бы понять смысловое содержание речи. Степень маскировки речи шумом зависит от отношения  $S/N$  и от спектрального состава шума. Для широкополосного шума (20–4000 Гц) зависимость процента словесной разборчивости от  $S/N$  показана на рис. 3. Из него видно, что процент словесной разборчивости будет больше 80 % только при отношении  $S/N > 12$  дБ.

Если шум узкополосный, то степень маскирования речи и потеря разборчивости зависят от частотной полосы (рис. 4). При этом более «опасными», чем высокочастотные (1800–2500 Гц) шумы являются низкочастотные шумы (135–400 Гц). Значительное воздействие на разборчивость речи оказывает шум от других голосов (шум толпы), (рис. 5). Поскольку этот шум сходен с речью по спектральному составу, то, как следует из графика, уровень словесной разборчивости резко снижается, особенно при увеличении числа мешающих голосов.

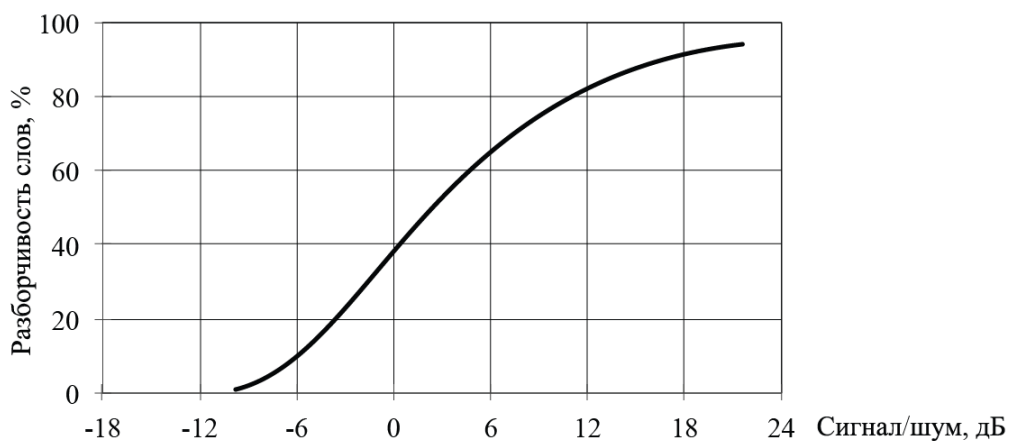


Рис. 3. Зависимость словесной разборчивости речи от отношения сигнал/шум для широкополосного маскирующего шума

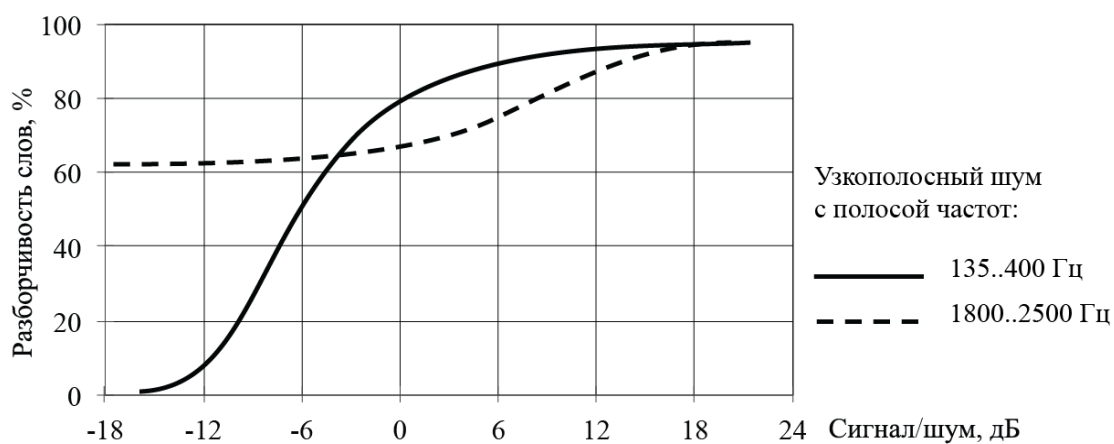


Рис. 4. Зависимость словесной разборчивости речи от отношения сигнал/шум для низкочастотного и высокочастотного узкополосного шума

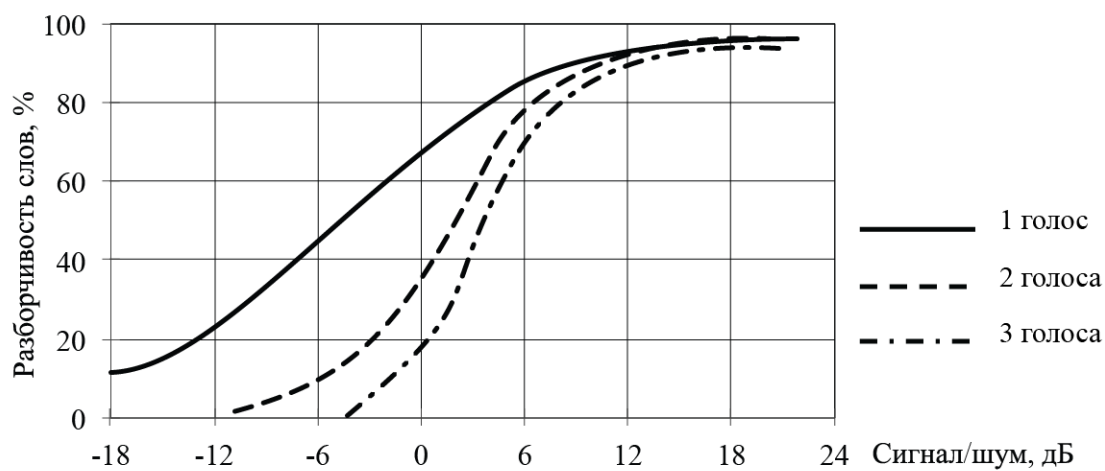


Рис. 5. Зависимость словесной разборчивости речи от отношения сигнал/шум при воздействии других голосов

Влияние шумов на разборчивость речи зависит также от направления их прихода: если направления прихода речевого сигнала и шума совпадают, то степень маскировки и, соответственно, процент потери разборчивости будет наибольшим. В этом случае затруднена работа механизма бинауральной демаскировки сигналов, особенно если формы спектров и динамика этих звуков близки. Слуховой системе трудно провести их разделение, но чем больше угловое расстояние между ними, тем выше разборчивость.

**Процесс реверберации в помещении** оказывается критическим для разборчивости речи, поскольку в туже точку, где расположен слушатель, приходят со всех сторон отраженные сигналы с похожей спектральной структурой, но с большим содержанием низкочастотных составляющих. Особенно это заметно в тех местах помещения, где расстояние дальше критического «радиуса гулкости», на котором энергия прямого сигнала равна энергии отраженных сигналов. Как известно, для каждого вида музыки и речи имеется свое оптимальное время реверберации. Примеры для некоторых видов музыки и речи в помещениях различных объемов показаны на рис. 6. Оптимальное время стандартной реверберации для речи существенно ниже, чем для музыки и находится в пределах 0,4–0,8 с.

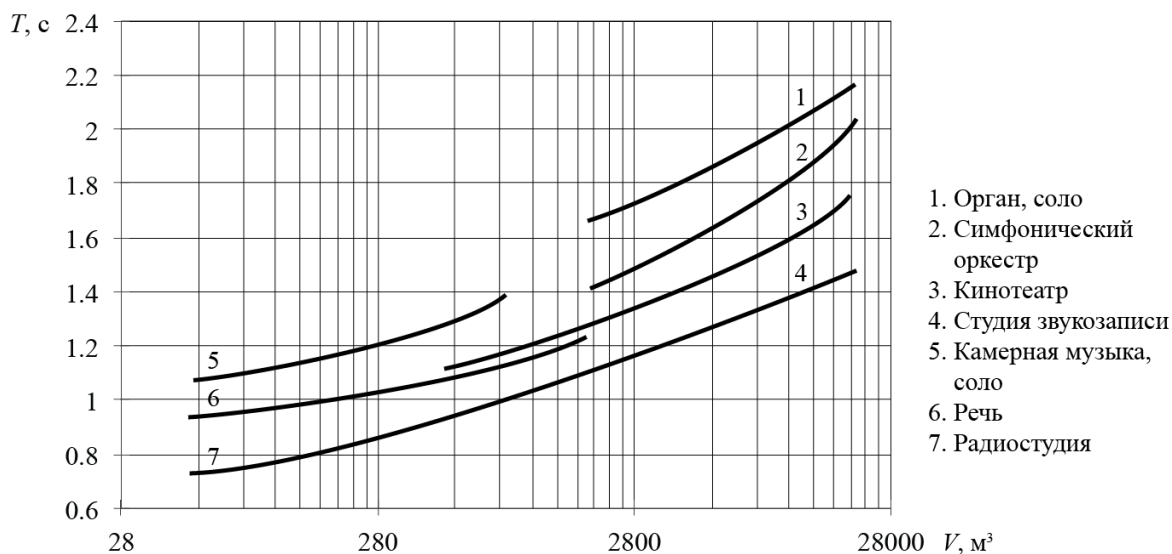


Рис. 6. Оптимальное время стандартной реверберации для помещений разного объема

Прослушивание речевых сообщений в помещениях с большой реверберацией приводит к значительной потере разборчивости (например, в залах вокзалов, соборах и других помещениях большого объема).

Существенную роль для повышения разборчивости речи играет отношение прямого звука к реверберирующему звуку на всей площади слушательских мест: чем выше уровень сигнала прямого звука по отношению к уровню реверберирующего звука, тем выше процент разборчивости.

Отсюда вытекают особые требования к выбору характеристик направленности громкоговорителей (акустических колонок) систем звукоусиления. Кроме того, следует отметить, что значительную роль играет также отношение энергии ранних отражений (прибывающих к слушателю в первые 80–100 мс), к энергии поздних отражений. Именно поэтому рекомендуется установка дополнительных отражающих экранов у трибуны оратора и у сцены драматических театров.

**2. Параметры тракта звукоусиления** такие, как частотный диапазон, форма частотной характеристики тракта, уровень нелинейных искажений, фазовые искажения и другие, имеют существенное значение для обеспечения хорошей разборчивости речи. Для высококачественной передачи речи необходимо обеспечить частотный диапазон от 80 Гц (частота фонации низких мужских голосов) до 10 кГц (спектры шумовых согласных). Разумеется, определенный процент разборчивости сохраняется и при ограничении полосы пропускания, например в полосе от 300 Гц до 3 кГц (используется в телефонной связи), хотя становятся трудно различимыми согласные звуки «т» и «д», «с» и «ф», и др.

Ниже 80 Гц амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) тракта должна быть резко ограничена для уменьшения влияния маскировки и для устранения эффекта «бубнения». В пределах указанной полосы частот АЧХ тракта звукоусиления должна быть плоской (для музыки в некоторых системах звукоусиления делается спад к высоким частотам), но для речи это уменьшает спектральный уровень согласных, который и так мал. Кроме того, должна быть малой неравномерность АЧХ последнего, поскольку значительные пики и провалы могут привести к потере наиболее ценной информации в диапазоне формантных областей гласных или в области максимальной энергии согласных звуков. Выполненные за последнее время исследования показали достаточное влияние фазовых характеристик тракта звукопередачи на разборчивость речевого сигнала, также как и на восприятие тембра. Поэтому требования к линейности фазовых характеристик тракта также являются существенными.

Различные виды нелинейных искажений при обработке сигнала в системах звукоусиления, например клиппирование, могут значительно снизить разборчивость речи (рис. 7). При этом появляются дополнительные гармоники, которые маскируют речь. Наиболее существенное влияние на разборчивость речи оказывают интермодуляционные искажения в системе, так как возникают суммарные и разностные тоны, негармонические к основному тону, что существенно маскирует речевой сигнал.

Таким образом, **на разборчивость речи в различных помещениях влияют следующие основные факторы**: отношение сигнал/шум, время стандартной реверберации, уровень прямого звука, отношение энергии



ранних и поздних отражений, частотный диапазон системы звукоусиления, формы АЧХ и ФЧХ тракта звукопередачи, характеристики направленности громкоговорителей, уровень нелинейных (особенно интермодуляционных) искажений, равномерность уровней звукового давления по всей озвучиваемой поверхности помещения.

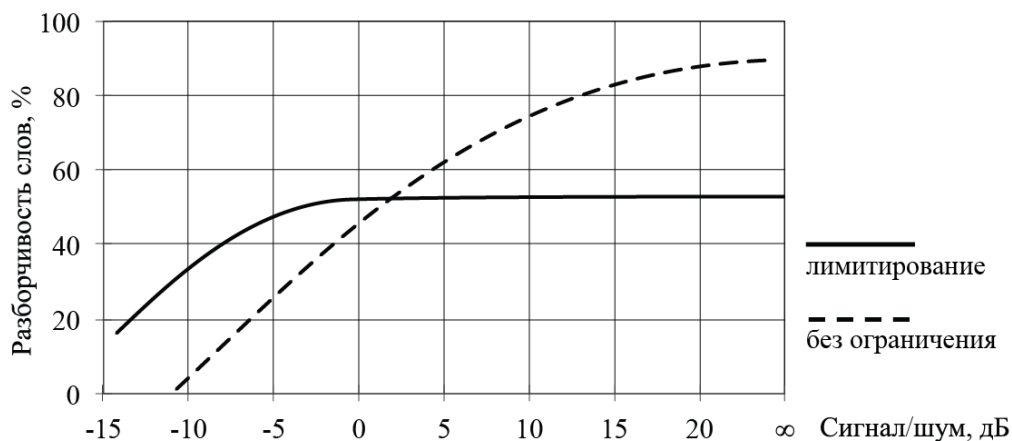


Рис. 7. Влияние клиппирования сигнала на процент словесной разборчивости речи

Для количественной оценки разборчивости речи применяются как **субъективные методы** (экспертные оценки), так и **объективные** (расчет целого ряда параметров). Хотя за последние годы введено достаточно много новых объективных критериев и созданы специальные компьютерные программы для их реализации, оценки разборчивости речи с помощью квалифицированных экспертов по-прежнему остаются наиболее достоверными, и все новые объективные критерии сравниваются с ними.

#### 1.4.1. Субъективные методы оценки разборчивости речи

Величина разборчивости (артикуляции) речи зависит от ряда факторов, основные из которых следующие:

- выбор для прослушивания элементов речи (звуки, слоги, слова, фразы), наиболее полно отражающих статистику данного языка;
- подбор состава экспертов и степень их тренированности;
- качество голоса диктора, его дикция, интонация и др.;
- требования к помещению и условиям в нем (уровню шумов и др.)
- методика проведения измерений и методы статистической обработки результатов экспертизы.

Для регламентации таких испытаний введены отечественные стандарты: ГОСТ 25902-83. «Зрительные залы. Методы определения разборчивости речи», ГОСТ 51061-97 «Параметры качества речи и методы ее измерения», международные стандарты ISO/TR 4870, IEC 268-16, ANSIS3.2, S3.5.

Стандартизованные правила, прежде всего, касаются отбора испытательного материала: специально составленных таблиц фраз, слов или слогов (так называемых артикуляционных таблиц), которые записываются или передаются диктором для оценки помещения, системы звукоусиления или других систем коммуникации. В зависимости от типа используемых при испытаниях элементов речи различается звуковая, слоговая, словесная и фразовая разборчивость. Все эти виды разборчивости при испытании одной и той же системы озвучения или звукоусиления будут выражаться разными числовыми величинами, так как процент правильных оценок для предсказуемого сообщения всегда выше, чем для непредсказуемого. Степень предсказуемости при прослушивании фразы выше, чем при слушании отдельных слов или слогов, поскольку если часть фразы не услышана, то можно догадаться по смыслу об ее содержании.

В связи с этим находятся и соотношения соответствующих видов разборчивости: фразовая – выше словесной, словесная – выше слоговой, слоговая – выше фонемной. На рис. 8, а показана зависимость фразовой разборчивости от словесной, на рис. 8, б – словесной от слоговой. Из-за наличия таких связей для оценки разборчивости можно использовать различные элементы речи, однако в отечественных стандартах чаще используется оценка слоговой разборчивости, поскольку она имеет ряд преимуществ (меньшую запоминаемость, удобство при обработке и др.).

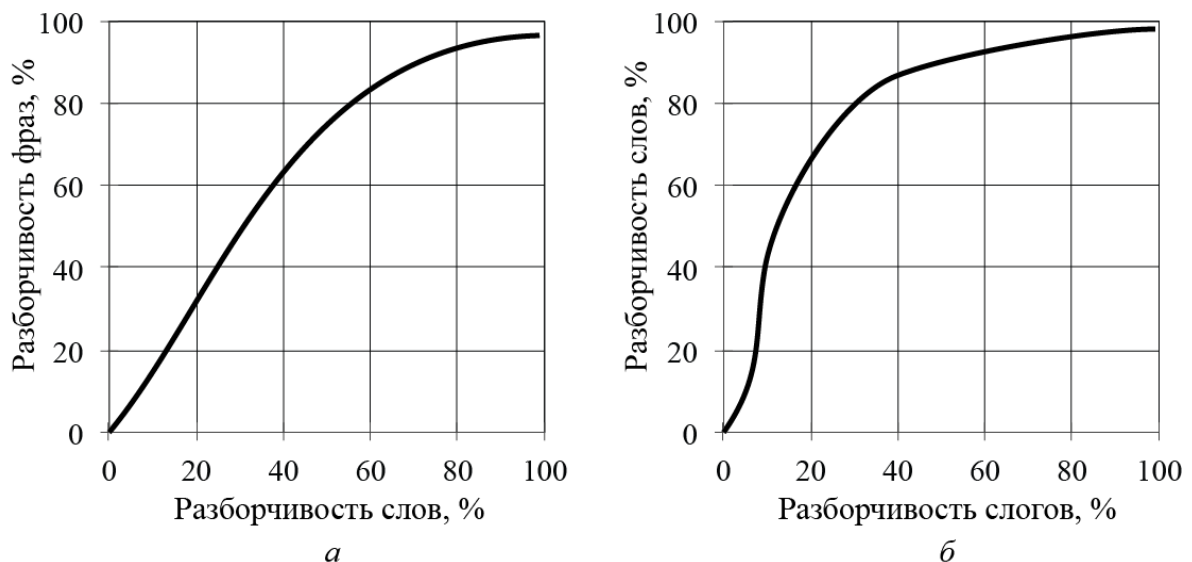


Рис. 8. Различные виды разборчивости речи:  
а) связь фразовой и словесной разборчивости; б) связь словесной и слоговой разборчивости для русской речи

При проведении таких испытаний специально подобранные дикторы (с хорошей дикцией, правильной речью, с хорошим слухом) зачитывают

в определенном ритме стандартизованные слоговые таблицы в выбранном помещении – с естественной акустикой или через звукоусилительную систему. Желательно, чтобы эксперты были не знакомы с дикторами, так как разборчивость у знакомых дикторов выше за счет запоминания экспертами их интонации, дикции и др. Количество дикторов должно быть не менее четырех, причем желательно, чтобы они имели минимальную разницу по акустическим характеристикам голосов. Для проведения испытаний группа слушателей размещается в разных местах помещения и записывает прослушиваемый текст. Выраженное в процентах отношение правильно записанных на слух фонетических элементов к общему количеству переданных и определяет процент разборчивости речи.

Для получения статистически достоверных результатов необходимо привлечение достаточно большого числа слушателей. В ГОСТ 25902-83 принята численность группы слушателей в 20 человек, позволяющая получить статистически надежные результаты. Для зала вместимостью более двух тысяч человек привлекаются две группы слушателей, а если вместимость зала более пяти тысяч человек – три группы слушателей, по 20 человек в каждой группе. Для сокращения времени испытаний в каждой группе проводится циклическая смена мест, при которой каждый слушатель с занимаемого им места переходит на место другого эксперта. Цикл заканчивается, когда все слушатели побывают на всех местах испытаний. Места, на которых определяется разборчивость, должны быть равномерно распределены по залу, а их количество должно соответствовать числу участвующих в испытаниях слушателей. Большое влияние на результаты определения разборчивости речи оказывает не только количественный состав группы слушателей, но и другие факторы: образование, профессия, социальная принадлежность, а также память и сообразительность. Все слушатели должны обладать нормальным слухом, быть носителями данного языка и должны быть знакомы со всеми тестовыми словами. Возрастной состав ограничен 35 годами. В процессе испытаний могут привлекаться как тренированная бригада экспертов, показания которой проверены на эталонной системе, так и нетренированные слушатели (при этом их количество должно быть больше).

Наряду с разборчивостью часто указываются и другие субъективные факторы, влияющие на качество восприятия речи. К ним относятся: громкость речи, эхо, порхающее эхо, нарушение локализации, тембровые искажения, повышенный уровень шума и плохие акустические условия в зоне расположения источника звука. Следует заметить, что громкость, эхо и шум являются факторами, которые непосредственно определяют разборчивость речи и косвенно оцениваются при субъективной оценке разборчивости.

В отечественных стандартах по оценке качества передачи речи по каналам связи (ГОСТ Р 50840-95 и ГОСТ 51061-97) также используется измерение слоговой разборчивости речи методом артикуляционных испытаний, и измерение фразовой разборчивости при нормальном и ускоренном темпах произнесения. При этом отбор экспертов, выбор слоговых таблиц и методы статистической оценки происходят практически по тем же правилам, только количество экспертов в группе составляет 4–5 человек. Требования к каналам связи высшего качества составляют не менее 93 % слоговой разборчивости.

В международных стандартах, в частности ANSIS3.2-89, предлагается использовать пять дикторов и пять экспертов, удовлетворяющих указанным выше требованиям, но процедура предъявления речевого материала значительно сложнее.

Таким образом, процедура организации субъективно-статистических экспертиз по оценке разборчивости речи сложна, длительна и достаточно дорогостоящая, хотя и наиболее достоверная. За последние годы большое внимание было уделено созданию объективных методов оценки разборчивости, что позволило внедрить в практику целый ряд новых достаточно эффективных компьютерных методов расчета разборчивости речи в различных условиях.

#### **1.4.2. Объективные методы оценки разборчивости речи**

В настоящее время разработано достаточно большое количество объективных методов, основные из которых это:

- AI – индекс артикуляции (Articulation Index);
- SII – индекс разборчивости речи (Speech Intelligibility Index);
- STI – индекс передачи речи (Speech Transmission Index);
- RASTI – быстрый индекс передачи речи (Rapid Speech Transmission Index);
- %  $A_{\text{cons}}$  – процент артикуляционных потерь согласных (Percentage Articulation Loss of Consonants);
- и другие (стандарты ISO/TR-4870, ANSIS3.2, S3.5; IEC 268-16 и др.).

Многолетний опыт проектирования залов различного назначения (аудиторий, кинозалов, театральных залов и др.) и результаты многочисленных исследований показали, что для хорошей разборчивости речи требуются:

- достаточно высокий уровень отношения полезного сигнала к уровню шума (для студий звукозаписи он должен соответствовать кривой NC-15) (рис. 9);

– небольшое время реверберации (в пределах до 1,1 с) и структура отражений, характеризующаяся отсутствием эха и наличием интенсивных ранних отражений при низком уровне поздних.

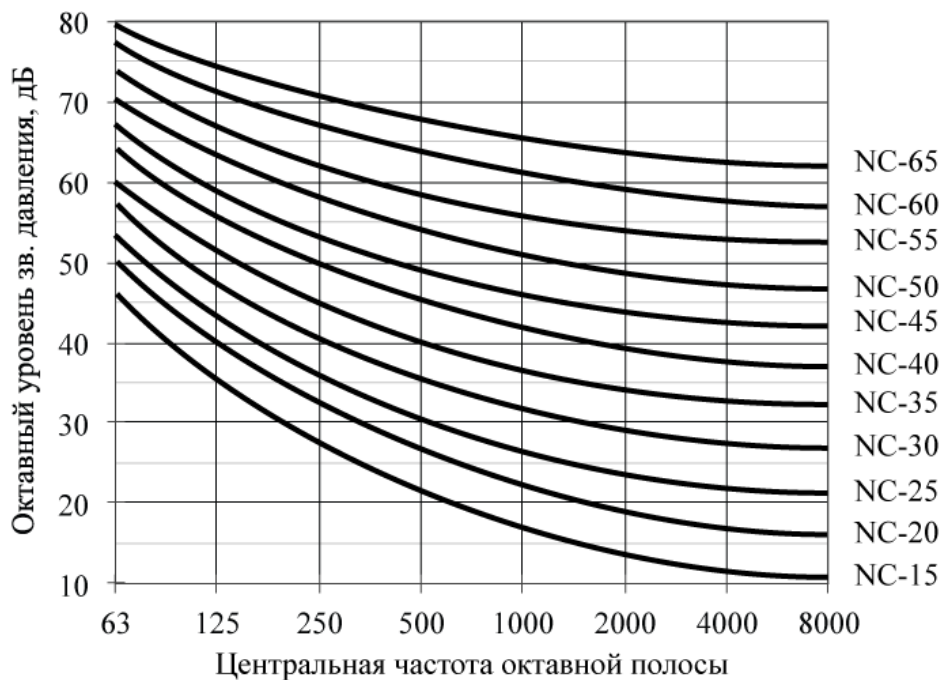


Рис. 9. Стандартизированные кривые уровня шумов в помещениях, NC

Влияние реверберационного процесса на структуру речевого сигнала можно отчетливо увидеть на примере осциллограмм, записанных в заглушенной камере и в помещении с большим значением реверберации (рис. 10).



Рис. 10. Осциллограмма  
одного и того же отрывка речевого сигнала  
в заглушенной камере (темная часть осциллограммы)  
и в помещении (более светлая часть осциллограммы)

Естественно, что при таком существенном изменении временной структуры речевого сигнала процесс его распознавания существенно ухудшается.

Существующие в настоящее время методы объективной оценки разборчивости речи в той или иной степени связаны с перечисленными акустическими характеристиками. Кроме того, на разборчивость речи влияют параметры системы звукоусиления, если она установлена в зале.

Объективные методы оценки разборчивости можно разделить на две группы. Первая аддитивная группа базируется на том предположении, что результирующая разборчивость речи определяется суммой вкладов в отдельных частотных полосах, а величина каждого вклада зависит от отношения полезного сигнала к шуму в каждой полосе.

К этой группе относятся несколько методов.

### *AI – Индекс артикуляции (Articulation Index)*

Использование индекса артикуляции для оценки разборчивости речи было предложено Г. Флетчером в лаборатории Bell Telephone Laboratories (США) в 1940 г. Идея заключается в том, что весь частотный диапазон речевого сигнала разделяется на некоторое количество частотных полос (обычно на 20), в пределах которых определяется отношение сигнала к шуму. Предполагается, что каждая частотная полоса вносит свой независимый вклад в оценку разборчивости речи. Ширина полос выбрана таким образом, чтобы вклад каждой полосы в результирующую разборчивость был одинаковым.

В каждой полосе рассчитывается отношение «сигнал/шум», взвешивается и суммируется для получения индекса артикуляции:

$$AI = \sum AI_j, \quad (11)$$

где  $AI$  – индекс артикуляции, его значение лежит в пределах  $0 < AI < 1$ ;  $AI_j$  – вклад в индекс артикуляции в  $j$ -й полосе частот лежит в пределах  $0 < AI_j < 0,05$ . Причем для отношений «сигнал/шум» больше 30 дБ значения  $AI_j$  принимается равным 0,05, а для отношения «сигнал/шум» меньше 30 дБ эти значения определяются как:  $AI_j = 0,05(S/N)_j/30$ . Отношение сигнал/шум в отдельных полосах частот определяется по пиковым значениям речевого сигнала и по эффективным величинам шума. Причем в шум включаются все мешающие передаче речи сигналы: шумовой фон помещения, реверберационная составляющая речевого сигнала и шум электроакустического тракта.

Значения  $AI$  ниже 0,3 соответствуют плохой разборчивости; от 0,3 до 0,5 – удовлетворительной; 0,5–0,7 – хорошей; выше 0,7 – очень хорошей. Соотношение между артикуляционным индексом и словесной разборчивостью для английской речи показано на рис. 11. Как следует из определения, основное влияние на величину индекса артикуляции оказывает уровень шумов в помещении.

Несмотря на простоту применения, метод расчета индекса артикуляции имеет ряд существенных недостатков: он учитывает только влияние

шума на разборчивость, и не учитывает влияния других факторов (времени стандартной реверберации, структуры отражений и др.). Поэтому он больше подходит для оценки разборчивости в системах связи, а при оценке разборчивости в помещениях с временем стандартной реверберации  $T_{рев} > 0,5$  с он дает не очень хорошее совпадение с субъективными оценками. Этот метод считается устаревшим, и в современной практике используются в основном другие критерии.

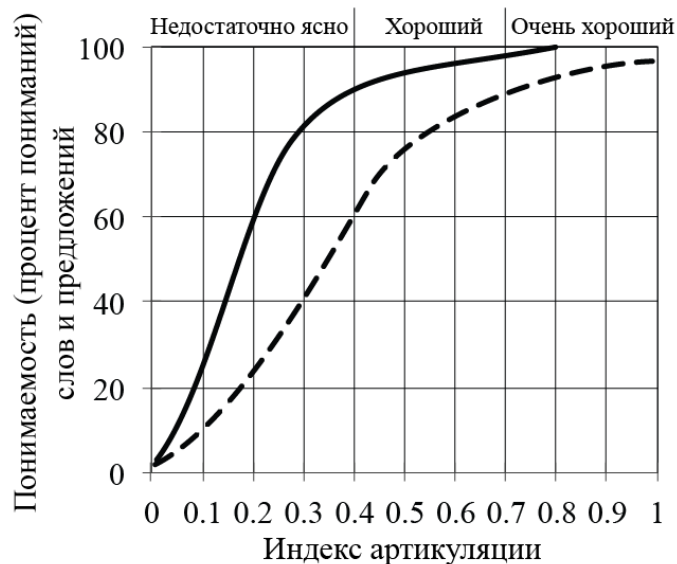


Рис. 11. Соотношение между разборчивостью речи (фразовая разборчивость – сплошная кривая, словесная разборчивость – пунктирная кривая) и индексом артикуляции AI

### *SII – индекс разборчивости речи (Speech Intelligibility Index)*

Он был предложен как дальнейшее развитие метода AI и включен в американский стандарт ANSIS3.5-1997. В стандарте предлагаются четыре измерительные процедуры, каждая использует различное число и ширину частотных полос в пределах диапазона частот 150–8500 Гц:

- критические полосы слуха (21 полоса);
- третьоктавные полосы частот (18 полос);
- равные по вкладу критические полосы слуха (17 полос);
- октавные полосы частот (6 полос).

В каждой из этих субполос вычисляется отношение «сигнал/шум» и затем рассчитывается суммарный коэффициент *SII*, названный индексом разборчивости речи. Он может изменяться в пределах от 0 до 1. Поскольку здесь используются критические полосы слуха, метод дает несколько лучшую корреляцию с субъективными экспертизами. Однако проблемы учета искажений во временной области (реверберация, эхо и др.) по-прежнему остаются.

$\% AL_{\text{cons}}$  – *процент артикуляционных потерь согласных*  
(*Percentage Articulation Loss of Consonants*)

Этот метод был разработан В. Пьютцем в 1971 г. Идея заключается в том, что для объективной оценки разборчивости речи вычисляется процент потери согласных, которые в основном и определяют смысловое содержание речи. Чем больше этот процент, тем хуже разборчивость речи в помещении. Максимально допустимое значение – 10 % (при условии, что помещение относительно свободно от маскирующего шума). Для помещений, используемых для целей обучения, и для систем оповещения он должен составлять не больше 5 %.

Первая из предложенных В. Пьютцем формул для расчета процента потери согласных  $AL_{\text{cons}}$  имела следующий вид:

$$\% AL_{\text{cons}} = \begin{cases} \frac{200 \cdot r^2 \cdot T^2}{V \cdot Q} + a, r < r_{\text{кр}}, \\ 9 \cdot T + a, r \geq r_{\text{кр}} \end{cases}, \quad (12)$$

где  $r$  – расстояние от источника звука (оратора, певца или громкоговорителя) до самого удаленного слушателя, м;

$T$  – время стандартной реверберации, с, измеренное на частоте 1,4 кГц, или усредненное по октавным полосам с центральными частотами 1 кГц и 2 кГц;

$V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>;

$Q$  – фактор направленности источника звука для расчетной точки, усредненный по октавным полосам с центральными частотами 1 кГц и 2 кГц;

$a$  – поправочный коэффициент, учитывающий опыт диктора и слушателя и их взаимную эффективность при произнесении и прослушивании речевых сигналов. Коэффициент  $a$  принимает значение от 1,5 % (в лучшем случае) до 12,5 % (для дикторов без дефектов речи и слушателей без дефектов слуха). Теоретический расчет процента артикуляционных потерь согласных считается идеальным случаем, и значение поправочного коэффициента  $a$  принимается равным нулю:  $a = 0$ ;

$r_{\text{кр}}$  – критическое расстояние, м. При удалении от источника звука на расстояние, превышающее критическое, процент артикуляционных потерь согласных принимает постоянное значение, зависящее только от времени стандартной реверберации. Критическое расстояние для исследуемого помещения можно определить в соответствии с выражением:

$$r_{\text{кр}} = 0,2 \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot V}{T}}.$$



В формуле расчета процента артикуляционных потерь (12) учитывается влияние объема помещения, расстояние до источника звука, фактор направленности источников звука, отношение прямой энергии к реверберирующей и т. д. Из нее также следует, что для достижения уровня  $\% AL_{\text{cons}} = 10 \%$  время стандартной реверберации не должно быть больше 1,1 с. Было также установлено, что повышение уровня звукового давления, создаваемого громкоговорителями, приводит к улучшению разборчивости до тех пор, пока уровень сигнала не достигает значения +25 дБ по отношению к уровню фонового шума. Дальнейшее повышение уровня звукового давления (излучаемой акустической мощности) вопреки обычным представлениям не сказывается на степени разборчивости, так как это приводит к росту уровня как прямого, так и диффузного звуков.

Метод  $AL_{\text{cons}}$  широко используется на практике, он позволяет учесть влияние реверберации на разборчивость речи и дает хорошую корреляцию в ряде случаев с субъективными оценками. Однако у этого метода есть свои недостатки: он основан на измерении в одной третьоктавной полосе, расположенной вокруг частоты 2000 Гц, поскольку здесь сосредоточена основная энергия согласных звуков. Все другие полосы частот речевого сигнала обычно не используются, что может приводить к значительным погрешностям, в частности, за счет частотной зависимости коэффициента направленности источника звука и соответствующего изменения по частотному диапазону отношения уровня прямого звука к реверберирующему. Кроме того, этот метод не учитывает целый ряд важных для разборчивости параметров: отношение «сигнал/шум», поздние отражения и эхо, форму спектра фонового шума и др.

Позднее В. Пьютцем была предложена новая методика, позволяющая учесть фоновый шум. При этом предлагается значения  $\%AL_{\text{cons}}$ , вычисленные по вышеприведенной формуле, умножить на коэффициент, учитывающий уровень шумов в помещении:

$$\%AL'_{\text{cons}} = \%AL_{\text{cons}} \cdot \left(1,071 \cdot T^{-0,0285}\right)^{25+(N_n - N_s)}, \quad (13)$$

где  $N_n$  – уровень шума в помещении, дБ;  $N_s$  – уровень речевого сигнала, дБ.

Однако проблемы, связанные с применением этого критерия (возможность эффективного применения в основном в помещениях сравнительно небольшого объема, отсутствие учета ранних отражений, эхо и др.), остаются, поэтому работы по его усовершенствованию продолжаются.

Вторая группа методов для объективной оценки разборчивости построена на оценке модуляционной передаточной функции системы. К их числу относятся методы STI, RASTI, STIPA и др.

### *STI – индекс передачи речи (Speech Transmission Index)*

Особая группа методов, позволяющая объективно оценить разборчивость речи в помещении, была разработана на основе использования так называемой модуляционной передаточной функции MTF (Modulation Transfer Function). Этот метод предполагает, что разборчивость передаваемого речевого сигнала определяется сохранением изначальных спектральных различий между речевыми звуками.

Идея методов основана на том представлении, что речевой сигнал представляет собой свертку импульсной характеристики звукового сигнала источника (для гласных звуков это импульсный сигнал с почти гармоническим спектром, для согласных это шумовой сигнал различной формы) с импульсной характеристикой голосового тракта. Речевой сигнал можно приближенно рассматривать как некоторый широкополосный сигнал (с полосой частот 125–8000 Гц), модулированный другим сигналом с низкой частотой (рис. 12). Частота модуляции определяется скоростью, с которой человек произносит форманты (скоростью артикуляции). Эксперименты показали, что частоты модуляции в обычной речи находятся в диапазоне от 0,63 до 16 Гц, причем наиболее вероятные частоты модуляции находятся в области 5–7 Гц.

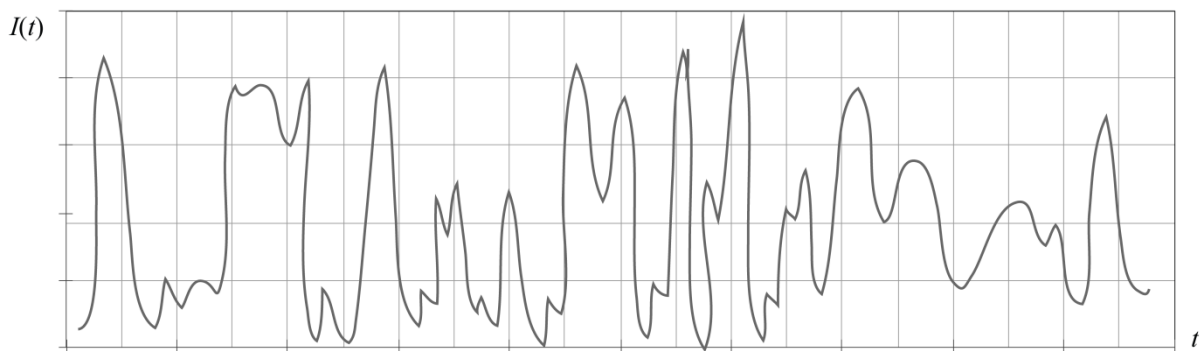


Рис. 12. Отрезок осциллограммы речевого сигнала

Уменьшение глубины модуляции делает речевой сигнал более похожим на шумовой и, следовательно, приводит к уменьшению его разборчивости. При прохождении речевого сигнала через любой тракт передачи или в помещении за счет реверберации, искажений и шумов происходит уменьшение разборчивости сигнала, что может быть оценено по степени уменьшения его глубины модуляции (по изменению формы огибающей сигнала).

Поэтому в работах Хоутгаса и Стинекена в 1971 г. был предложен следующий метод оценки разборчивости: весь речевой диапазон частот от 125 Гц до 8000 Гц разбивается на семь октавных полос. На вход испы-

туемой системы, например на акустическую систему, установленную в точке помещения, где должен находиться диктор (оратор), подается октавный шумовой сигнал с центральными частотами 125; 250; 500 Гц; 1; 2; 4 и 8 кГц, распределение интенсивности которого по октавным полосам совпадает с распределением интенсивности речевого сигнала. Сигнал этот модулируется по амплитуде гармоническим сигналом с глубиной модуляции  $m = 1$  (рис. 13):

$$I(t) = I_0(1 + \cos(2\pi f_m t)).$$

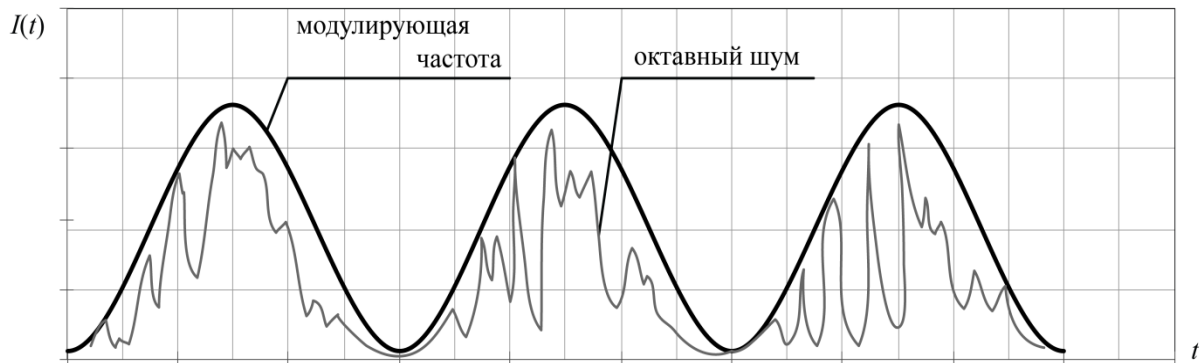


Рис. 13. Вид модулированного сигнала

При этом характеристика направленности акустической системы, через которую сигнал излучается в помещение, должна быть близка к характеристике направленности ротового отверстия. Частоты модулирующего сигнала меняются в пределах от 0,63 до 12,5 Гц с третьоктавным интервалом (всего четырнадцать частот). В точке, где должен располагаться слушатель, сигнал принимается ненаправленным микрофоном, при этом за счет шумов и процессов реверберации в помещении форма сигнала изменяется, и глубина его модуляции уменьшается.

Сигнал теперь может быть представлен в форме:

$$I(t) = I_0 \cdot (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t + \varphi)), \quad (14)$$

где  $m$  — глубина амплитудной модуляции, являющаяся функцией частоты модуляции  $f_m$  и зависящая от времени стандартной реверберации в помещении и отношения «сигнал/шум». Зависимость величины  $20\lg[m(f_m)]$  от частоты  $f_m$  называется модуляционной передаточной функцией «МПФ»;

$I_0$  — амплитудное значение сигнала;

$f_m$  — частота модулирующего сигнала;

$t$  — текущее время;

$\varphi$  — начальная фаза модулирующего сигнала.

Модуляционная передаточная функция (МПФ) при наличии процесса реверберации имеет форму низкочастотного фильтра: причем быстрые колебания больше подвержены уменьшению глубины модуляции, нежели медленные. При теоретическом представлении процесса реверберации с помощью идеальной экспоненциальной функции глубина амплитудной модуляции будет зависеть от частоты модуляции  $f_m$  и времени стандартной реверберации  $T$  и может быть рассчитана с помощью выражения:

$$m(f_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot f_m \cdot T}{13,8}\right)^2}}. \quad (15)$$

Для шумового сигнала МПФ определяется отношением сигнал-шум и не зависит от частоты модуляции. Для всех частот модуляции глубина модуляции уменьшается в соответствии с выражением

$$m = \frac{1}{1 + 10^{\left(\frac{-SNR}{10}\right)}}, \quad (16)$$

где  $SNR$  – отношение сигнал-шум, выраженное в дБ.

Кроме того, МПФ может быть рассчитана через импульсную характеристику канала передачи по методу Шрёдера. Значение МПФ в  $k$ -й октавной полосе для частоты модуляции  $f_m$  рассчитывается в соответствии с выражением

$$m_k(f_m) = \frac{\left| \int_0^{\infty} h_k(t) \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f_m \cdot t} dt \right|}{\int_0^{\infty} h_k^2(t) dt} \cdot \frac{1}{1 + 10^{\left(\frac{-SNR_k}{10}\right)}}, \quad (17)$$

где  $h_k(t)$  – импульсная характеристика сигнала в  $k$ -й октавной полосе;  $SNR_k$  – отношение сигнал/шум в  $k$ -й октавной полосе частот, дБ.

В предлагаемом методе измерения проводятся для 98 точек для семи октавных полос подаваемого шума средние частоты которых: 125; 250; 500 Гц; 1,2; 4 и 8 кГц и 14 значений частот модуляции: 0,63; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5 Гц. Полученная матрица из 98 точек используется для расчета STI (Speech Transmission Index) путем взвешивания среднего значения  $m(f_m)$  в каждой полосе частот в соответствии с их общим вкладом в разборчивость. Пределы изменения STI для обеспечения хорошей разборчивости составляют 0,6...1,0.

Прогнозирование значения индекса передачи речи может быть выполнено с помощью расчета матрицы значений МПФ по методу Шрёдера и выполнения всех дальнейших этапов расчета индекса *STI*.

Алгоритм теоретического расчета индекса передачи речи в соответствии с международным стандартом ИЕС 268-16 приведен в прил. 1.

Метод оценки разборчивости речи с помощью индекса передачи речи *STI* предполагает проведение измерений в широком диапазоне частот и поэтому учитывает частотную зависимость времени реверберации, неравномерность АЧХ и другие частотно-зависимые эффекты, что в результате дает достаточно хорошую корреляцию с субъективными оценками.

Для того чтобы была возможность сравнить результаты оценок разборчивости, полученных различными методами, была разработана общая шкала разборчивости CIS (стандарт ИЕС 60849), позволяющая пересчитывать значения разборчивости, полученной разными методами (как субъективными, так и объективными) одна в другую. Например, значение *STI*, равное 0,7, соответствует значению %  $AL_{\text{cons}}$ , равному 3,8 %, что соответствует 94 % слоговой разборчивости и обеспечивает хорошую разборчивость в помещении.

Связь между значениями %  $AL_{\text{cons}}$  и *STI* определяется выражениями:

$$\% AL_{\text{cons}} = 170,5405 \cdot e^{-5,419 \cdot STI} \quad (18)$$

$$STI = 1 - 0,46 \cdot \lg(\% AL_{\text{cons}}) \quad (19)$$

Следует отметить, что данные выражения получены эмпирическим путем и не являются достаточно достоверными для использования их в качестве основного расчета того или иного параметра как функции другого. Выражения (18) и (19) следует применять только для сравнения результатов теоретического расчета и измерений параметров %  $AL_{\text{cons}}$  и *STI*.

Допустимые пределы значений параметров %  $AL_{\text{cons}}$  и *STI*, обеспечивающие заданное качество воспроизведения речи, а также их связь со слоговой, словесной разборчивостью и разборчивостью предложений приведены в табл. 5.

Таблица 5

Допустимые значения оценок разборчивости речи

Оценка разборчивости	<i>STI</i>	% $AL_{\text{cons}}$	Слоговая разборчивость, %	Словесная разборчивость, %	Разборчивость предложений, %
Неприемлемая	0–0,3	33–100	0–34	0–67	0–89
Плохая	0,3–0,45	15–33	34–48	67–78	89–92
Посредственная	0,45–0,6	7–15	48–67	78–87	92–95
Хорошая	0,6–0,75	3–7	67–90	87–94	95–96
Отличная	0,75–1,0	0–3	90–96	94–96	96–100

### *Методы оценки разборчивости RASTI, STIPA, STITEL*

Поскольку расчет разборчивости речи методом STI представляет собой довольно трудоемкую процедуру, фирмой Brüel & Kjær был разработан альтернативный упрощенный метод **RASTI** – быстрый индекс передачи речи (Rapid Speech Transmission Index). Он предусматривает измерения только в двух октавных полосах со средними частотами:

500 Гц при частотах модуляции 1,02; 2,03; 4,07; 8,14 Гц;

2000 Гц при частотах модуляции 0,73; 1,45; 2,90; 5,81; 11,63 Гц.

Дальше, как и в предыдущем случае, рассчитывается усредненное значение модуляционной передаточной функции в полосах частот, строится матрица и с ее помощью определяется нормализованный индекс RASTI.

Для реализации этого метода фирмой Brüel & Kjær были разработаны соответствующая аппаратура (B&K 3361 RASTI Meter) и программное обеспечение. Поэтому эта методика принята практически во всех европейских стандартах. Однако, так как измерения проводятся только в двух октавных полосах, то они дают несколько завышенные значения, поскольку не учитывают неравномерность АЧХ и ФЧХ в системе звукопередачи. С целью еще большего ускорения процедуры измерений фирма предложила метод, при котором сигналы предъявляются одновременно в двух октавных полосах со всеми модулирующими сигналами одновременно.

Измерения производятся в непрерывном режиме и позволяют производить параллельный анализ одновременно в двух октавных полосах. Для анализа требуется интервал времени не менее 8 с. Хорошая разборчивость речи обеспечивается, если значения RASTI в разных точках помещения будут не ниже 0,6. Для полноты оценки измерения проводятся в разных точках помещения и строятся кривые его распределения.

Следует отметить, что, строго говоря, методы оценки разборчивости с помощью модуляционных передаточных функций применимы только к линейным системам. Большинство же реальных систем нелинейны, особенно если речь идет об оценке разборчивости в системах коммуникаций (в телефонных каналах, например). Воздушное пространство в помещении можно считать линейной средой, но надо строго контролировать линейность измерительной аппаратуры.

**STIPA** (Speech Transmission Index for Public Address Systems) – модификация метода STI для систем звукоусиления, позволяющая учитывать не только реверберацию, но и нелинейные искажения звукового сигнала при его передаче. Испытательный сигнал упрощен в том смысле, что в каждой из семи октавных полос используют только две частоты модуляции. В остальных отношениях метод STIPA идентичен методу STI.

В методе **STITEL** (Speech Transmission Index for Telecommunication Systems), разработанном для телекоммуникационных систем, применяется

только одна частота модуляции в каждой из семи октавных полос. Несущий шум для каждой октавной полосы имеет ширину спектра 1/2 октавы, во избежание влияния на смежные полосы. Метод STITEL не позволяет учитывать реверберационную помеху и нелинейные искажения.

### **1.4.3. Другие методы оценки качества речи**

К другим известным методам оценки качества речи можно отнести методы, разработанные для сетей сотовой связи. К ним относятся:

**PESQ** – оценка воспринимаемого качества речи (Perceptual Evaluation of Speech Quality);

**POLQA** – оценка воспринимаемого слышимого качества речи (Perceptual Objective Listening Quality Assessment);

**SQI** – индекс качества речи (Speech Quality Index);

**MOS** – средняя оценка разборчивости речи (Mean Opinion Score).

В данных методах, например, в методе SQI (Speech Quality Index) учитывается: процент ошибочных бит (BER), процент неправильно декодированных фреймов (FER), используемый речевой кодек, активация опции прерывистой передачи (DTX – Discontinuous Transmission) и хэндоверы. При осуществлении хэндоверов качество речи ухудшается, так как часть речевых кадров теряется. Иначе говоря, здесь речь идет об учете специфических видов искажений, возникающих на пути передачи речи от одного абонента к другому.

В основу данных методов оценки разборчивости речи, применяемых в системах мобильной связи, положена рекомендация ITU-TR.862 [5]. Она содержит подробное описание алгоритма оценки качества речи, прошедшей обработку в речевых кодеках с компрессией цифровых данных, учитывает влияние возникающих при компрессии речи искажений на его воспринимаемое качество. Ее развитием является рекомендация ITU-TR.863 [6].

Более подробное описание данных методов оценки качества речи приведено в документе «Сети сотовой связи. Методика проведения оценочных испытаний и нормы на показатели качества услуг связи стандарта GSM/GPRS/EDGE/UMTS».

В системах озвучения и звукоусиления данные методы оценки качества речевого сигнала не применяются и по этой причине в данном пособии не рассматриваются.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ

В зависимости от расположения громкоговорителей по отношению к озвучиваемой площади системы озвучения и звукоусиления подразделяются на **сосредоточенные, зональные и распределенные**.

**Сосредоточенные системы** характеризуются тем, что все громкоговорители располагаются в одном месте (либо на небольшом расстоянии друг от друга) вблизи первичных источников звука (например, на портале сцены либо у сцены на боковых стенах помещения). Здесь и ниже не рассматриваются звуковые системы, обеспечивающие правильную локализацию кажущихся источников звука, а также системы пространственного звучания, например, системы фирмы Dolby. Применяются сосредоточенные системы как в закрытых помещениях, так и на открытых пространствах при звукоусилении речевых и музыкальных сигналов. Эти системы достаточно просты и экономичны, однако с их помощью трудно обеспечить равномерное звуковое поле на озвучиваемой площади, когда размеры последней велики.

**Зональные системы** – это такие системы, в которых озвучиваемая площадь разбивается на ряд зон и в каждой зоне звуковое поле создается отдельным громкоговорителем (или группой громкоговорителей), закрепленным за данной зоной. Эти системы применяются для озвучения улиц, парков, производственных помещений и территорий, и позволяют озвучивать сколь угодно большие пространства. В зональной системе слушатель всегда локализует звук в месте установки громкоговорителя данной зоны, и поэтому эти системы непригодны для стереофонического звукоусиления. Однако зональные системы могут применяться с сосредоточенной системой при организации высококачественного звукоусиления. Например, в залах сложной формы места слушателей, расположенные под балконами, оказываются в ряде случаев экранированными от поля громкоговорителей сосредоточенной системы. Для озвучивания этих мест применяется зональная система.

**Распределенные системы** характеризуются тем, что в них используется большое число громкоговорителей, равномерно распределенных относительно озвучиваемой площади. Особенность этих систем состоит в том, что к слушателю звук приходит от нескольких громкоговорителей с примерно одинаковым уровнем. Применяются одномерные и двумерные распределенные системы. Одномерные системы представляют собой цепочку громкоговорителей, расположенных вдоль озвучиваемой площади, например подвешенных на специальных мачтах, которые располагаются по периметру озвучиваемой открытой площади или расположенных на боковых



стенах озвучиваемого помещения. Примером двумерной распределенной системы является так называемая потолочная система, когда громкоговорители равномерно располагаются на потолке помещения.

## 2.1. Сосредоточенные системы

Сосредоточенными (или централизованными) называются системы озвучения и звукоусиления, в которых звук к слушателям приходит как бы из одной точки. Такие системы обеспечивают хорошее совпадение зрительного и слухового образов.

В закрытых помещениях чаще всего применяются следующие варианты сосредоточенных систем.

**Портальная система** с верхним размещением громкоговорителей (рис. 14, а) применяется в средних по размерам залах, когда над сценическим проемом имеется достаточно большой портал или когда над авансценой есть козырек, позволяющий установить направленные излучатели в нишах.

Портальная система с боковым размещением громкоговорителей (рис. 14, б) применяется в средних по размерам залах, когда на портале имеются достаточно широкие поверхности по бокам сценического проема. Такая система удобна для озвучения залов с крутым амфитеатром и с балконами. В этом случае можно на разной высоте обслуживать соответствующие места, занятые слушателями. В случае сильно вынесенной вперед авансцены или открытой эстрады, когда основные микрофоны приходится выдвигать в зал за линию портала, такую систему применять нежелательно из-за возможности самовозбуждения.

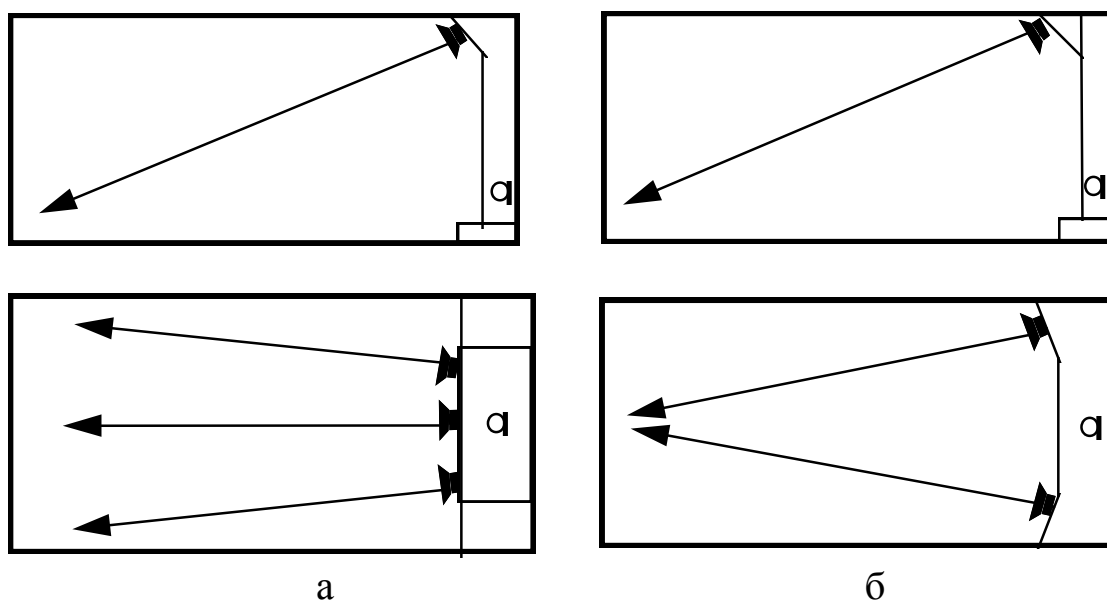


Рис. 14. Размещение громкоговорителей:  
а) на центральном портале; б) по бокам портала

Система с размещением направленных излучателей **на боковых стенах** (рис. 15, а) применяется в тех случаях, когда сценический проем не имеет портала или используется открытая эстрада. Громкоговорители выносятся в зал на уровень авансцены или дальше и устанавливаются на кронштейнах или в специальных нишах так, чтобы их основное излучение было направлено в зал. Если по бокам сцены или эстрады имеются специальные отражатели в виде скошенных стен, то громкоговорители могут быть установлены в них в специальных нишах.

Система с **центральным размещением** излучателей (рис. 15, б) применяется в том случае, когда слушатели не занимают фиксированных положений (танцевальные, выставочные залы и т. п.), или когда слушатели сидят вокруг центральной части помещения (цирк).

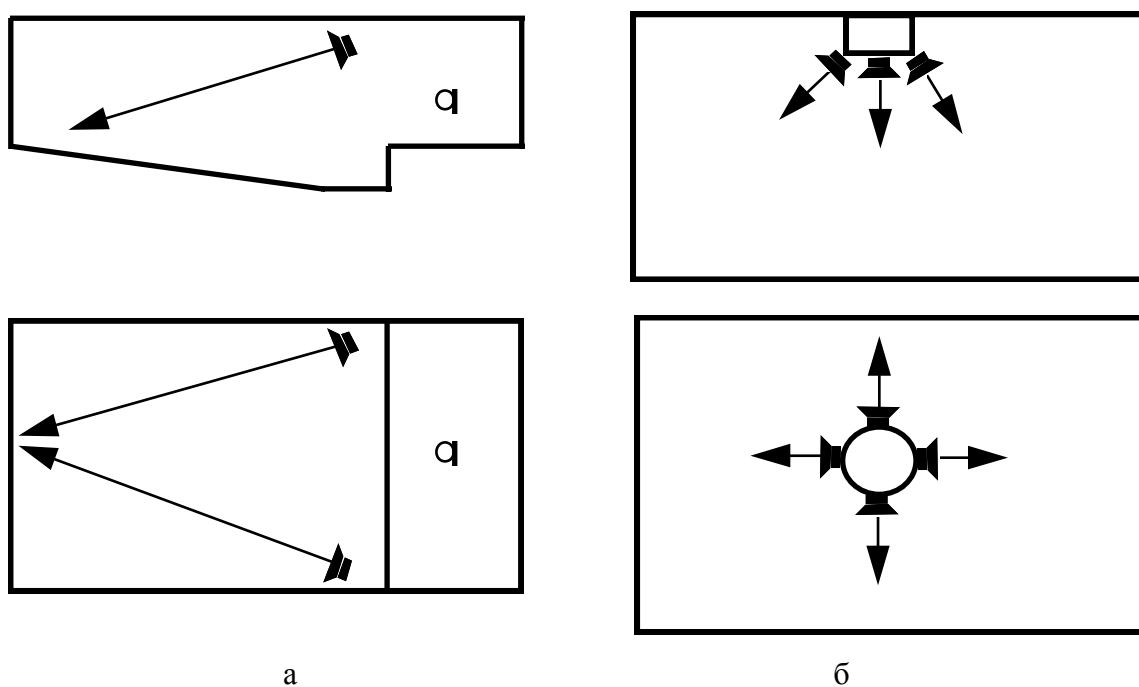


Рис. 15. Размещение громкоговорителей:  
а) на стенах; б) в центре помещения (система озвучения)

В установках озвучения и звукоусиления на открытом воздухе также возможны различные варианты сосредоточенных систем. При звукоусилении можно использовать те же варианты, что и в закрытых помещениях. Для летних театров и эстрад с раковиной или по бокам ее (на специальных мачтах) таким образом, чтобы микрофоны были экранированы от прямого звука громкоговорителей.

При озвучении больших территорий мощные громкоговорители иногда размещают на высоких мачтах и башнях (например, на железнодорожных сортировочных станциях и т. п.).

## 2.2. Зональные системы

Зональными (рассредоточенными или децентрализованными) называются системы, в которых озвучиваемая поверхность разбивается на ряд зон. В каждой из зон звуковое поле создается отдельным источником (или группой источников) звука. Эти системы могут применяться только там, где не требуется строгого совмещения зрительного образа со слуховым. Зональные системы применяются в тех случаях, когда сосредоточенная система не может обеспечить требуемого уровня звукового давления и однородности уровней звукового давления на площади, занятой слушателями. Такие системы применяются в залах больших размеров (рис. 16, а) и в помещениях сложной формы (рис. 16, б).

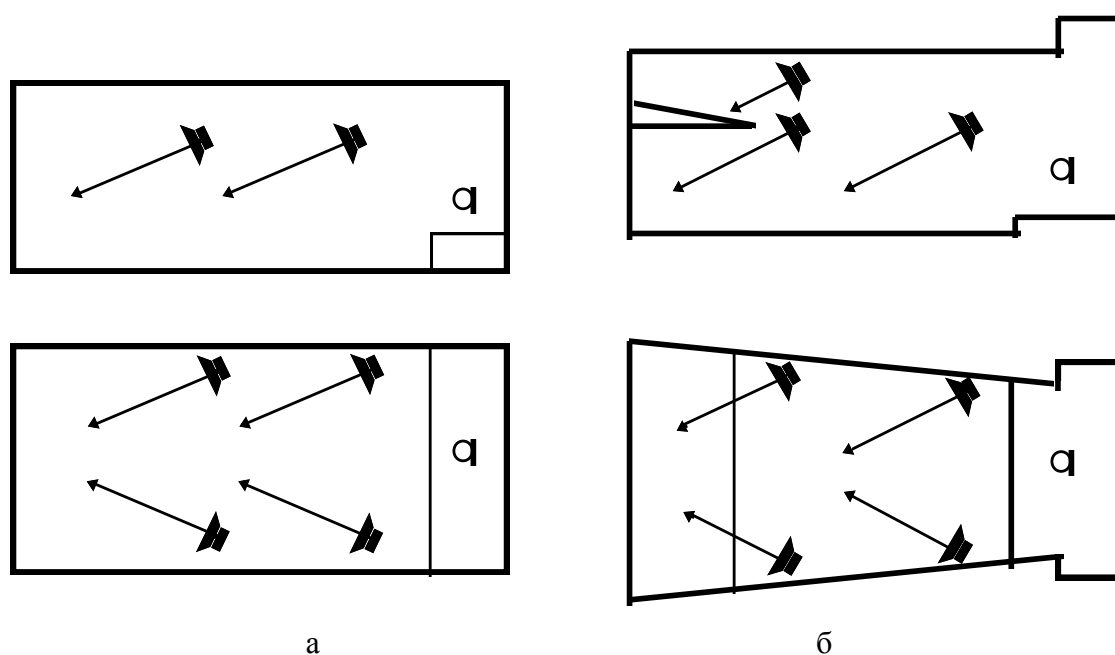


Рис. 16. Варианты зональных систем:  
а) размещение громкоговорителей на стенах; б) размещение громкоговорителей на стенах с дополнительными излучателями для озвучения балконов

При использовании зональной системы для установок звукоусиления в вытянутых и больших помещениях необходимо включить линию задержки, которая обеспечивает синхронность звука, приходящего к слушателю от первичного источника и от громкоговорителей, обслуживающих данную зону. Особенно широко применяются зональные системы для озвучения улиц, парков, а также в установках озвучения производственных помещений и территорий.

### 2.3. Распределенные системы

Распределенными называются системы, в которых звук к слушателю приходит от нескольких или многих громкоговорителей с примерно одинаковым уровнем. Особенно часто такие системы применяются для воспроизведения и усиления речи. На рис. 17. изображены основные варианты распределенных систем.

**Линейные системы** (рис. 17, а) применяются для озвучения и звукоусиления в помещениях вытянутой формы малой высоты (коридоры, платформы станций метро и др.). В помещениях с повышенной гулкостью применяются линейные цепочки из направленных излучателей (например, из звуковых колонок).

Для больших фойе и других аналогичных помещений иногда применяют системы в виде одной или нескольких цепочек направленных высококачественных громкоговорителей.

**Потолочные системы** (рис. 17, б) применяются в двух случаях. В случае относительно узких помещений (расчетная высота больше  $1/2$  ширины помещения) с высокими потолками (высота не менее 4 м) применяется одна или две цепочки из направленных громкоговорителей, укрепленных на потолке.

В помещениях с относительно низким потолком применяются системы с равномерным распределением излучателей по всему потолку. Последние могут использоваться как в установках озвучения, так и в установках звукоусиления, но в этом случае необходимо выключить громкоговорители, расположенные вблизи от микрофона.

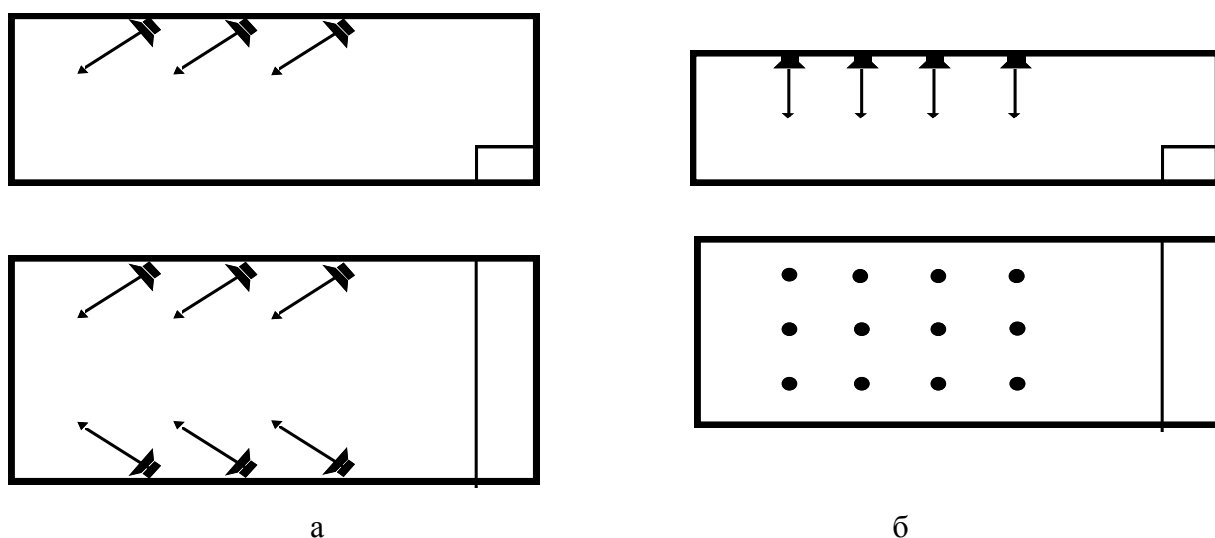


Рис. 17. Варианты распределенных систем:  
а) две цепочки на стенах; б) потолочная система

Распределенные системы озвучения на открытом пространстве применяются в основном в виде линейных систем в виде сетки из радиальных громкоговорителей, покрывающей большие площади, например в тех случаях, когда нельзя устанавливать громкоговорители на большой высоте.

Линейные и потолочные системы создают звуковое поле, в котором направление на кажущийся источник звука не совпадает с направлением на видимый первичный источник. При этом происходит так называемый разрыв зрительного и слухового образов. Для борьбы с этим дефектом иногда применяют включение громкоговорителей через линию задержки.

Распределенные системы широко применяются при усилении речи и в амбиофонических системах звукоусиления. В последнее время при усилении речи в залах больших размеров широко применяется распределенная система кресельных громкоговорителей; используемые в такой системе громкоговорители небольшой мощности (около 0,5 Вт) монтируются в спинках кресел. В случае применения кресельной системы звук приходит к слушателям с примерно одинаковой интенсивностью с разных сторон. Благодаря этому слуховой образ не привязывается к определенному направлению, и так как слушатель видит первичный источник звука, то он непроизвольно привязывает к нему и слуховой образ.

Основными достоинствами такой системы, оправдывающими ее применение в больших аудиториях (несмотря на относительно высокую стоимость оборудования и монтажа), являются: хорошая однородность поля уровней, высокая разборчивость речи и небольшая глубина акустической обратной связи.

В реальных установках озвучения и звукоусиления часто применяется сочетание нескольких систем. Так, например, при сосредоточенной системе озвучения зрительных залов иногда необходимо дополнительное озвучение подбалконных пространств, боковых лож и т. п. Это озвучение выполняется с помощью зональной или распределенной системы с маломощными громкоговорителями. Целесообразность применения той или другой комбинированной системы определяется в каждом конкретном случае в соответствии с назначением установки и акустическими особенностями помещения.

### 3. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ

Как уже указывалось, основной характеристикой систем звукоусиления и озвучения в случае передачи речи является обеспечиваемая ими понятность речи. Все остальные показатели, а именно: время стандартной реверберации, акустическое отношение, неравномерность озвучения, неравномерность частотной характеристики тракта являются показателями комфорта. Если понятность речи ниже требуемой, то бессмысленно говорить об оптимуме по реверберации или акустическому отношению. Если же понятность речи удовлетворяет заданным требованиям, то для комфорта необходимо обеспечить оптимальные значения времени стандартной реверберации, акустического отношения и др. При хорошей понятности речи в большинстве случаев эти показатели находятся вблизи оптимума.

Следует также иметь в виду экономические показатели и возможность технической реализации соответствующих параметров аппаратуры, а также удобства обслуживания и требования техники безопасности. Известно, что понятность речи оценивается с помощью разборчивости речи, а разборчивость речи определяется превышением спектральных уровней речи над спектральными уровнями помех и шумов. Спектральные уровни помех определяются временем реверберации и акустическим отношением, а спектральные уровни речи – данными громкоговорящей системы.

Для музыкальных передач существенное значение имеет качество звучания. Если оно низкое, то звукоусиление может только ухудшить впечатление слушателей, и лучше обойтись без звукоусиления. Звукоусилительная аппаратура должна создавать требуемые уровни звучания на всех местах слушателей, однако часто это невозможно осуществить, так как появляется обратная акустическая связь, которая ограничивает уровни звукового поля. Величина акустического отношения в основном определяется размерами помещения, средним коэффициентом поглощения и расстоянием от громкоговорителей, и только для направленных излучателей она еще зависит от коэффициентов направленности последних. Следовательно, если время реверберации уже выбрано, нельзя задаваться величиной акустического отношения, а его следует рассчитывать. Поскольку разборчивость речи и качество звучания музыкальных передач в значительной мере определяются акустическим отношением, то необходимо вести расчеты для максимального значения акустического отношения, т. е. для наихудших (обычно самых удаленных) точек помещения. Для всех других точек помещения разборчивость речи и качество звучания музыкальных передач будут почти те же самые или выше, так как акустическое отношение в них будет меньше. Иногда необходимо знать и минимальное значение акустического отношения, так как оно соответствует максимальному значению

разборчивости речи в рассматриваемом помещении. Минимальное акустическое отношение будет в точках с максимальным уровнем прямого звука, поэтому оно может быть определено из неравномерности уровней звукового давления прямого звука  $\Delta N = 10 \lg(R_{\text{макс}}/R_{\text{мин}})$ . Определять среднее значение акустического отношения не требуется, так как оно получается для точек помещения, находящихся где-то между точками максимума и минимума уровня прямого звука.

Если при расчете системы озвучения из-за большой величины акустического отношения получатся: низкая разборчивость речи и качество звучания музыкальных передач, то следует принять меры к уменьшению величины акустического отношения. Чаще для этого используют системы озвучения, громкоговорители которых располагаются близко к слушателю. Снижению акустического отношения в распределенной системе способствует переход к направленным громкоговорителям, а в сосредоточенной – увеличение коэффициента осевой концентрации. Уменьшение акустического отношения также получают и при увеличении среднего значения коэффициента поглощения. В табл. 3 приведены ориентировочные значения акустического отношения, при которых в типовых помещениях получают хорошую разборчивость речи и качество звучания музыкальных передач.

Индекс усиления тракта  $Q_{\text{Мс}}$  должен рассчитываться на получение как можно более высокой разборчивости речи. Рекомендуемые в табл. 6 величины  $Q_{\text{Мс}}$  для систем звукоусиления речи пригодны только для типовых помещений с низким уровнем акустических шумов, а в более сложных случаях они могут считаться ориентировочными.

Таблица 6

Рекомендуемые величины  $Q_{\text{Мс}}$  для систем звукоусиления

Назначение установки	Рекомендуемый индекс усиления тракта $Q_{\text{Мс}}$ , дБ
Усиление речи	-10 ÷ -14
Усиление оркестров, хоров, ансамблей	-12
Подусиление солистов при удаленном микрофоне	-10
Подусиление солистов при близко размещенном микрофоне	-16

В табл. 3 приведены оптимальные значения уровней звукового давления для музыкальных передач. Для речевых передач уровни звукового давления в конечном счете определяются из расчета разборчивости речи. Конечно, ею можно приближенно задаться и уточнить после расчета разборчивости. Неравномерность озвучения, т. е. неравномерность звукового давления сигнала прямого звука определяется при расчете системы озвучения. При этом нельзя допускать превышения норм по неравномерности

озвучения, более того, следует стремиться по возможности к снижению этой неравномерности. Неравномерность частотной характеристики тракта определяется после выбора аппаратуры звукоусиления. При этом следует стремиться к возможно большей равномерности частотной характеристики всего передаваемого диапазона частот.

На практике при проектировании системы озвучения или звукоусиления известны лишь: назначение данной системы; назначение помещения (аудитория, зал заседаний, конференц-зал, театр, торговое помещение, аппаратный зал, цех завода, вокзал и т. п.); геометрические данные помещения (планы и разрезы помещения с указанием местонахождения слушателей, оратора, лектора и т. п.); типы звукопоглощающих материалов; количество слушателей. Поэтому при расчетах следует исходить только из этих данных.

Прежде чем приступить к проектированию системы озвучения или звукоусиления, необходимо определить общий уровень и форму спектра акустических шумов в помещении. Для ряда типовых помещений эти данные известны. Так, например, для театров расчетный уровень шумов не превосходит 45 дБ, для аудиторий и залов заседаний 55 дБ, в помещениях для проведения собраний 65 дБ. Форма спектра во всех этих случаях имеет характер, близкий к форме речевого. Для производственных помещений со станочным оборудованием уровень должен быть задан или измерен, так как его диапазон очень широк. Форма спектра этих шумов тоже может изменяться в широких пределах, но в большинстве случаев спектр производственных шумов ближе к равномерному, чем речевой шум. Если помещение значительно отличается от указанных выше и нет возможности воспользоваться известными данными, то остается только одно: измерить общий уровень акустических шумов в заданном помещении и провести их спектральный анализ.

Итак, при проектировании системы озвучения и звукоусиления выбору подлежат: время стандартной реверберации; тип системы озвучения, расположение, количество и тип громкоговорителей; тип, количество и расположение микрофонов; звукоусилительное оборудование. Звукоусилительная аппаратура используется не только для усиления акустических сигналов (речь, музыка и т. д.), но и для усиления записанных ранее сигналов, а также для приема сигналов с трансляционных линий и от радиоприемников.

Рассчитывают следующие характеристики:

- геометрические данные системы озвучения;
- средний коэффициент звукопоглощения;
- неравномерность звукового давления в пределах озвучиваемой зоны;
- уровни звукового давления в наиболее характерных точках помещения (и обязательно в удаленных точках);



- величины акустического отношения для точек минимального и максимального уровня звукового давления прямого звука;
- предельный, рациональный и фактический индексы тракта (для системы звукоусиления);
- разборчивость речи для удаленной точки (а иногда и для точки с максимальным уровнем звукового давления прямого звука);
- неравномерность частотной характеристики тракта звукопередачи;
- уровень сигнала прямого звука с учетом частотной характеристики тракта.

### 3.1. Исходные данные и задачи расчета

При расчете систем озвучения и звукоусиления известными, как правило, являются:

- назначение системы;
- назначение помещения (аудитория, зал заседаний, конференц-зал, зал театра, цех завода, вокзал и т. п.);
- геометрические размеры помещения;
- акустические характеристики помещения;
- количество слушателей, исполнителей, стульев для их размещения.

Расчет систем озвучения и звукоусиления обычно состоит из следующих этапов:

- расчет времени стандартной реверберации и среднего коэффициента звукопоглощения (рассматривается, в [1]);
- выбор и расчет требуемых параметров звукового поля;
- выбор системы озвучения и типов излучателей;
- расчет звукового поля с учетом размещения громкоговорителей;
- расчет разборчивости речи.

### 3.2. Акустический расчет помещения

В соответствии с методикой, изложенной в [1], выполните акустический расчет озвучиваемого помещения. В результате расчета необходимо получить значения следующих параметров:

- частотную зависимость времени стандартной реверберации  $T$ , с;
- частотную зависимость среднего коэффициента звукопоглощения в помещении  $\alpha_{\text{ср}}$ .

Для выполнения дальнейших расчетов также требуется знать уровень акустического шума в помещении. Рассчитать уровень акустического шума

можно в соответствии с методикой, изложенной в [1], или, в случае упрощенного расчета, можно воспользоваться приведенными в табл. 7 допустимыми значениями уровня звукового давления шума в помещениях различного назначения.

Таблица 7

Допустимые уровни звукового давления, эквивалентные уровни шума  
в помещениях различного назначения

№	Назначение помещений	Уровни звукового давления $N_{\text{доп}}$ , дБ, в октавных полосах частот с центральными частотами $F_{\text{ц}}$ , Гц						Эквивалентный уровень звука $N_{\text{экв}}$ , дБА
		125	250	500	1000	2000	4000	
1	Павильоны синхронной съемки. Ателье перезаписи	35	30	25	20	20	20	25
2	Ателье для записи музыки	32	25	22	20	20	20	28
3	Тон-ателье для записи речи и шумов	30	20	17	16	15	15	25
4	Тон-ателье перезаписи	35	30	25	22	20	20	30
5	Кинотеатры: одноканальное воспроизведение	52	45	39	35	32	30	35
6	Кинотеатры: многоканальное воспроизведение	48	41	35	32	30	28	30
7	Кинотеатры с оборудованием Dolby	44	35	29	25	22	20	30
8	Комнаты (залы) прослушивания	35	28	22	15	10	8	15
9	Просмотровые залы, видеозалы	40	33	26	22	19	17	20
10	Киноконцертные залы, залы многоцелевого назначения	48	40	34	30	27	25	35
11	Радиовещательные студии	20	15	12	12	12	11	15
12	Классные помещения, учебные ка- бинеты, аудитории учебных заве- дений, конференц-залы, читальные залы библиотек, зрительные залы клубов, залы судебных заседаний, культовые здания, зрительные залы клубов с обычным оборудованием	52	45	39	35	32	30	40
13	Залы кафе, ресторанов	66	59	54	50	47	45	55
14	Фойе театров и концертных залов	57	49	44	40	37	35	45
15	Зрительные залы театров и концертных залов	44	35	29	25	22	20	30
16	Многоцелевые залы	48	40	34	30	27	25	35
17	Торговые залы магазинов, пассажи́рские залы вокзалов и аэровокзалов	70	63	58	55	52	50	60

### 3.3. Выбор и расчет требуемых параметров звукового поля

Исходя из назначения системы озвучения или звукоусиления (табл. 3), выберите значения следующих параметров:

– требуемый уровень звукового давления  $N_{\text{тр}}$ , дБ, создаваемый всеми громкоговорителями системы озвучения;

– допустимую неравномерность уровней звукового давления сигналов прямого звука на озвучиваемой поверхности  $\Delta N_{\text{тр}}$ , дБ;

– допустимые пределы изменения акустического отношения  $R_{\text{мин}}$ ,  $R_{\text{макс}}$  и среднее значение акустического отношения  $R_{\text{ср}}$ ; при этом его значения чаще всего лежат в пределах 2÷4. Меньшие значения следует выбирать для воспроизведения речи, большие – для музыки.

Правильность выбора значения  $R_{\text{ср}}$  проверьте путем определения значений  $R_{\text{мин}}$  и  $R_{\text{макс}}$ , соответствующих выбранным значениям  $R_{\text{ср}}$  и  $\Delta N_{\text{тр}}$ , по формулам:

$$R_{\text{мин}} = R_{\text{ср}} \cdot 10^{-0,05 \cdot \Delta N}; \quad (20)$$

$$R_{\text{макс}} = R_{\text{ср}} \cdot 10^{0,05 \cdot \Delta N}. \quad (21)$$

Полученные величины должны лежать в пределах, указанных в табл. 3; в противном случае необходимо изменить величину  $R_{\text{ср}}$ .

Далее рассчитайте остальные требуемые параметры звукового поля:

– средний уровень звукового давления сигнала прямого звука, создаваемого всеми громкоговорителями системы, дБ:

$$N_{\text{пр.ср}}^{\text{тр}} = N_{\text{тр}} - 10 \cdot \lg(1 + R_{\text{ср}}); \quad (22)$$

– минимальный и максимальный допустимые уровни звукового давления прямого звука, создаваемого всеми громкоговорителями системы, дБ:

$$N_{\text{пр.мин}}^{\text{тр}} = N_{\text{пр.ср}}^{\text{тр}} - 0,5 \cdot \Delta N_{\text{тр}}; \quad (23)$$

$$N_{\text{пр.макс}}^{\text{тр}} = N_{\text{пр.ср}}^{\text{тр}} + 0,5 \cdot \Delta N_{\text{тр}}; \quad (24)$$

– уровень звукового давления сигнала диффузного звука, создаваемого всеми громкоговорителями системы, дБ:

$$N_{\text{д}}^{\text{тр}} = N_{\text{тр}} - 10 \cdot \lg\left(\frac{1 + R_{\text{ср}}}{R_{\text{ср}}}\right). \quad (25)$$

Если система озвучения содержит два или более громкоговорителей, необходимо учитывать, что требуемая величина звукового давления  $N_{\text{тр}}$  определяется суммой звуковых давлений, создаваемых всеми громкоговорителями системы. Для упрощения расчетов предположим, что система озвучения состоит из одинаковых громкоговорителей, создающих одинаковые звуковые давления, т. е.

$$p_{\text{тр}1} \equiv p_{\text{тр}2} \equiv \dots \equiv p_{\text{тр}n}.$$

Тогда  $N_{\text{тр}}$  можно представить в виде:

$$\begin{aligned} N_{\text{тр}} &= 10 \cdot \lg \left( \frac{p_{\text{тр}1}^2 + p_{\text{тр}2}^2 + \dots + p_{\text{тр}n}^2}{p_0^2} \right) = 10 \cdot \lg \left( \frac{n \cdot p_{\text{тр}1}^2}{p_0^2} \right) = \\ &= 10 \cdot \lg \left( \frac{p_{\text{тр}1}^2}{p_0^2} \right) + 10 \cdot \lg n = N_{\text{тр}1} + 10 \cdot \lg n, \end{aligned} \quad (26)$$

где  $N_{\text{тр}1}$  – требуемый уровень звукового давления, создаваемый каждым из громкоговорителей;  $n$  – количество громкоговорителей. В данном случае источники звука считаются некогерентными.

Расчет требуемого уровня звукового давления, создаваемого одним громкоговорителем, выполните в соответствии с выражением:

$$N_{\text{тр}1} = N_{\text{тр}} - 10 \cdot \lg n. \quad (27)$$

Далее, исходя из величины требуемого уровня звукового давления, излучаемого каждым громкоговорителем, по формуле (25) определите уровень звукового давления диффузного звука  $N_{\text{дл}}^{\text{тр}}$ , создаваемого каждым громкоговорителем.

Для определения величины мощности, подводимой к каждому громкоговорителю, необходимой для создания полученного уровня звукового давления диффузного звука, следует подробно рассмотреть процесс распространения звука в помещении.

### 3.4. Расчет уровней звуковых давлений в озвучиваемой зоне

Для одиночного ненаправленного громкоговорителя звуковое давление и уровень звукового давления в любой точке на расстоянии  $r$  от него связаны со звуковым давлением  $p_1$  и уровнем  $N_1$ , развиваемыми им на акустической оси на расстоянии 1 м, следующими зависимостями:

$$p_{\text{пр}} = \frac{p_1}{r} \quad (28)$$

$$N_{\text{пр}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{p_1}{p_0 \cdot r} \right) = N_1 - 20 \lg r. \quad (29)$$

При озвучении помещения одним направленным громкоговорителем звуковое давление на расстоянии  $r$  под углом  $\theta$  к акустической оси громкоговорителя будет:

$$p_{\text{пр}} = \frac{p_1 \cdot D(\theta)}{r}, \quad (30)$$

где  $D(\theta) = p(\theta)/p(0)$  – диаграмма направленности громкоговорителя. Тогда уровень звукового давления определяется как:

$$N_{\text{пр}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{p_{\text{пр}}}{p_0} \right) = N_1 - 20 \lg \left( \frac{r}{D(\theta)} \right). \quad (31)$$

Минимальное значение этого уровня будет в самой удаленной от громкоговорителя точке помещения, т. е. на расстоянии от громкоговорителя до самого удаленного слушателя  $r_{\text{макс}}$ , как правило, приблизительно равно длине помещения  $l$ :

$$N_{\text{пр мин}} = N_1 - 20 \lg \left( \frac{r_{\text{макс}}}{D(\theta)} \right) \approx N_1 - 20 \lg \left( \frac{l}{D(\theta)} \right). \quad (32)$$

Как уже упоминалось ранее, звуковое поле в помещении складывается из двух составляющих: составляющей прямого звука и диффузной составляющей. В ближней зоне, прилегающей к источнику звука в помещении, реверберационный процесс оказывает мало влияния на слуховое восприятие, и преобладает составляющая прямого звука. Однако вдали от источника, кроме случаев, когда стены помещения имеют коэффициент звукопоглощения близкий к единице, звуковое поле будет определяться в основном отраженным или, иначе говоря, диффузным звуком.

Суммарный (полный) уровень звукового давления в помещении  $N_{\text{п}}$  можно рассматривать как совокупность уровней звуковых давлений прямого и диффузного звуков. Для помещений прямоугольной формы, один из линейных размеров которых превышает два других не более чем в пять раз, полный уровень звукового давления, создаваемый  $i$ -м громкоговорителем, рассчитывается в соответствии с формулой Хопкинса – Страйкера:

$$N_{\text{п}i} = N_1 + 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi \cdot r_i^2} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} \cdot S} \right), \quad (33)$$

где  $\alpha_{\text{ср}}$  – средний коэффициент звукопоглощения в помещении;

$S$  – совокупная площадь поверхностей помещения;

$Q$  – индекс направленности громкоговорителя.

На основании выражения (33) можно показать, что уровень звукового давления прямого звука  $N_{\text{пр } i}$ , создаваемый  $i$ -м громкоговорителем в помещении, будет равен:

$$N_{\text{пр } i} = N_1 - \left| 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi \cdot r^2} \right) \right|. \quad (34)$$

Уровень звукового давления диффузного звука  $N_{\text{ди } i}$ , создаваемый  $i$ -м громкоговорителем в помещении, будет равен:

$$N_{\text{ди } i} = N_1 + 10 \lg \left( \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} \cdot S} \right). \quad (35)$$

Из выражения (35) можно сделать вывод, что диффузная составляющая уровня звукового давления в помещении не зависит от расстояния между громкоговорителем и слушателем, а зависит лишь от звукопоглощающих свойств поверхностей помещения и от мощности, подводимой к каждому громкоговорителю.

### 3.5. Выбор и размещение громкоговорителей

Озвучение помещений целесообразно осуществлять громкоговорителями (акустическими системами, звуковыми колонками) тех производителей, которые предоставляют их технические характеристики для моделирования систем озвучения в ПО Ulysses.

Информация о работе с базами громкоговорителей в программе Ulysses приведена в прил. 3 части 3 данного пособия.

При выборе громкоговорителей следует обратить внимание на такие их технические характеристики, как диаграммы направленности, максимальные подводимые мощности, габариты, а также способы их установки в помещениях.

Самостоятельно определите количество громкоговорителей, необходимое для озвучения вашего помещения, тип громкоговорителей и места их расположения.

Места расположения громкоговорителей удобно указать в системе координат XYZ, которую следует ввести в помещение.

### 3.6. Расчет площади, занимаемой слушателями

Исходя из указанного в табл. 1 количества слушателей, присутствующих в озвучиваемом помещении, рассчитайте величину площади пола, занимаемой ими. При расчете величины занимаемой слушателями площади воспользуйтесь нормированными показателями площади на одно место, приведенными в табл. 8.

Таблица 8

Расчетные показатели площади на одно место для помещений различного назначения

№	Назначение помещения	Расчетный показатель площади на одно место, м <sup>2</sup>	
1	Конференц-зал	В залах до 150 мест:	
		с пюпитрами у кресел	1,25
		без пюпитров	1,1
		В залах на 150 мест и более:	
		с пюпитрами у кресел	1,1
	без пюпитров	1,0	
2	Актовый зал	В школах, образовательных учреждениях начального и среднего профессионального образования	0,65
		В высших учебных заведениях	0,8
3	Зрительные залы	Кинотеатры круглогодичного действия	1,0
		Кинотеатры сезонного действия	0,9
		Клубы	0,65
		Театры, концертные и универсальные залы	0,7
		Малые, камерные театры	0,9
4	Лекционные аудитории с количеством мест	от 12 до 15	2,5
		25	2,2
		30	1,8
		В образовательных учреждениях начального и среднего профессионального образования:	
		от 50 до 150	1,2
		В высших учебных заведениях и учебных комбинатах:	
		от 50 до 75	1,5
		от 76 до 100	1,3
		от 101 до 150	1,2
		от 151 до 350	1,1
	351 и более	1,0	

После расчета величины занимаемой слушателями площади, определите расположение зрительских мест в озвучиваемом помещении. Для удобного задания границ месторасположения зрительских мест воспользуйтесь ранее введенной системой координат XYZ.

### 3.7. Расчет величины подводимой мощности

Величина мощности, подводимая к каждому громкоговорителю, для создания требуемого уровня звукового давления диффузного звука  $N_{д1}^{тр}$ , определяется уровнями звукового давления  $N_1$ , развиваемыми громкоговорителями на акустической оси на расстоянии 1 м.

Рассчитайте требуемый уровень звукового давления диффузного звука  $N_{д1}^{тр}$  по формуле (25), подставив в нее значение  $N_{тр1}$ .

Подставив полученное значение  $N_{д1}^{тр}$  в выражение (35), рассчитайте необходимое значение звукового давления  $p_1^{тр}$  и уровень звукового давления  $N_1^{тр}$ , развиваемых громкоговорителем на рабочей оси на расстоянии 1 м при подведении к нему требуемой мощности  $W_э^{тр}$ .

$$N_1^{тр} = N_{д1}^{тр} + 10 \lg \left( \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{ср})}{\alpha_{ср} \cdot S} \right), \quad (36)$$

$$p_1^{тр} = p_0 \cdot 10^{\frac{N_1^{тр}}{20}}. \quad (37)$$

Зная из паспортных данных громкоговорителя значение уровня прямого звука, развиваемого им на рабочей оси на расстоянии 1 м при подведении мощности в 1 Вт, рассчитайте величину подводимой мощности  $W_э^{тр}$ , необходимую для создания требуемого уровня прямого звука в соответствии с выражением:

$$W_э^{тр} = \frac{(p_1^{тр})^2 \cdot l_1^2 \cdot W_{ст}}{p_{ст}^2 \cdot l_{ст}^2}, \quad (38)$$

где  $p_1^{тр}$  – звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на расстоянии  $l_1 = 1$  м на акустической оси при подведении к нему мощности  $W_э^{тр}$ ;

$p_{ст}$  – звуковое давление, развиваемое громкоговорителем на расстоянии  $l_{ст} = 1$  м на акустической оси при подведении к нему мощности  $W_{ст} = 1$  Вт,

$$p_{ст} = p_0 \cdot 10^{\frac{N_{ст}}{20}};$$

$N_{ст}$  – уровень звукового давления, развиваемый громкоговорителем на расстоянии 1 м на акустической оси при подведении мощности в 1 Вт.

В настройках параметров громкоговорителя в ПО Ulysses регулировка мощности, подводимой к громкоговорителю, осуществляется по логарифмической шкале с шагом в 1 дБ. Поэтому после расчета точного значе-



ния требуемой подводимой мощности  $W_3^{\text{TP}}$  необходимо определить ближайшее целое большее значение уровня подводимой мощности  $N_{W_3^{\text{TP}}}$  в дБ, соответствующее делениям шкалы регулятора мощности ПО Ulysses. Использование в теоретическом расчете величин, точно соответствующих значениям, устанавливаемым при практическом моделировании, позволит повысить корреляцию между получаемыми результатами.

Уровень подводимой мощности в дБ рассчитайте по формуле:

$$N_{W_3^{\text{TP}}} = 10 \cdot \lg \left( \frac{W_3^{\text{TP}}}{W_{\text{макс}}} \right), \quad (39)$$

где  $W_{\text{макс}}$  – максимальная подводимая мощность громкоговорителя, Вт.

После округления уровня мощности  $N_{W_3^{\text{TP}}}$  до целого числа  $N_{W_3}$ , дБ, рассчитайте скорректированную мощность  $W_3$ , подводимую к громкоговорителю:

$$W_3 = W_{\text{макс}} \cdot 10^{\frac{N_{W_3}}{10}}. \quad (40)$$

Рассчитайте уточненные значения звукового давления  $p_1$  и уровня  $N_1$  по формулам:

$$p_1 = \frac{P_{\text{ст}}}{\frac{l_1}{l_{\text{ст}}} \cdot \sqrt{\frac{W_{\text{ст}}}{W_3}}}, \quad (41)$$

$$N_1 = 20 \cdot \lg \left( \frac{p_1}{p_0} \right). \quad (42)$$

### 3.8. Расчет уровней звукового давления прямого и диффузного звуков и неравномерности озвучения

Уровни звукового давления сигнала прямого звука  $N_{\text{пр}i}$ , создаваемые каждым из громкоговорителей, рассчитайте для всех контрольных точек прослушивания на основании скорректированного значения уровня звукового давления  $N_1$  в соответствии с выражением (34).

Расстояние  $r_i$  от  $i$ -го громкоговорителя до  $j$ -й контрольной точки прослушивания удобно определять с помощью выражения:

$$r_{ij} = \sqrt{r_{xij}^2 + r_{yij}^2 + r_{zij}^2}, \quad (43)$$

где  $i$  – номер громкоговорителя,  $j$  – номер контрольной точки,  $r_{xij}$ ,  $r_{yij}$ ,  $r_{zij}$  – расстояния от  $i$ -го громкоговорителя до  $j$ -й контрольной точки прослушивания в направлении осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно.

При выполнении расчета обратите внимание на то, что под озвучиваемой зоной подразумевают поверхность, расположенную на уровне голов слушателей. Для сидящих слушателей эта поверхность находится на высоте 1,2 м, для стоящих – 1,4 м. Высоту подвеса громкоговорителей выбирайте исходя из размеров помещения, характеристик направленности громкоговорителя в вертикальной плоскости, расположения по высоте озвучиваемой поверхности.

Уровень звукового давления прямого звука, создаваемый всеми громкоговорителями системы в  $j$ -й контрольной точке прослушивания, рассчитайте в соответствии с выражением:

$$N_{\text{пр}j} = 10 \cdot \lg \left( 10^{\frac{N_{\text{пр}1}}{10}} + 10^{\frac{N_{\text{пр}2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{N_{\text{пр}n}}{10}} \right). \quad (44)$$

Рассчитайте значение неравномерности звукового давления сигнала прямого звука  $\Delta N_{\text{пр}}$  на озвучиваемой площади в соответствии с выражением:

$$\Delta N_{\text{пр}} = \max_j (N_{\text{пр}\Sigma j}) - \min_j (N_{\text{пр}\Sigma j}), \quad (45)$$

где  $j = 1, 2 \dots 9$  – номер контрольной точки.

При наличии в помещении  $n$  громкоговорителей, создающих одинаковые уровни звукового давления, суммарный уровень рассчитайте в соответствии с выражением:

$$N_{\text{д}} = N_{\text{д}1} + 10 \cdot \lg n, \quad (46)$$

где  $N_{\text{д}1}$  – уровень звукового давления сигнала диффузного звука, создаваемый в помещении одним громкоговорителем.

Полный уровень звукового давления в помещении, включающий в себя результат воздействия как прямого, так и отраженного звуков, создаваемых всеми громкоговорителями системы озвучения, рассчитывается в соответствии с выражением:

$$N_{\text{п}j} = 10 \cdot \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{\frac{N_{\text{п}ij}}{10}} \right), \quad (47)$$

где  $i$  – номер громкоговорителя,  $n$  – количество громкоговорителей в системе,  $j$  – номер контрольной точки.

### 3.9. Расчет величины акустического отношения

После определения уровней звукового давления составляющих прямого и диффузного звуков в контрольной точке, можно перейти к расчету акустического отношения. Как было рассмотрено ранее, акустическое отношение представляет из себя отношение плотности звуковой энергии диффузного и прямого звуков в помещении.

Значение акустического отношения  $\Delta N_R$  в дБ в  $j$ -й контрольной точке рассчитывается как разность уровней звукового давления соответствующих составляющих звукового поля:

$$\Delta N_R = N_d - N_{пр. j}, \quad (48)$$

где  $N_{пр. j}$  – уровень звукового давления прямого звука в  $j$ -ой контрольной точке.

Значение акустического отношения  $R$  рассчитайте на основании полученного значения  $\Delta N_R$  в соответствии с выражением:

$$R = 10^{\frac{\Delta N_R}{10}}. \quad (49)$$

### 3.10. Проверка результатов расчетов характеристик звукового поля

После выполнения расчетов параметров звукового поля, а именно: уровня звукового давления сигнала прямого звука; неравномерности звукового давления сигнала прямого звука на озвучиваемой поверхности; уровня звукового давления диффузного звука; акустического отношения, убедитесь, что полученные результаты соответствуют требуемым.

В случае несоответствия какого-либо из параметров указанным требованиям, следует подобрать отдельные элементы системы озвучения с другими характеристиками, например: громкоговорители с другими диаграммами направленности; другими величинами, подводимой к ним мощности; или следует изменить акустические характеристики озвучиваемого помещения, (например, средний коэффициент звукопоглощения за счет применения других звукопоглощающих материалов).

Расчет считается выполненным верно, если отклонения средних уровней звукового давления прямого и диффузного звуков не превышают 3 дБ, а значения неравномерности уровней звуковых давлений прямого звука и акустического отношения не выходят за установленные пределы.

### 3.11. Расчет разборчивости речи

В рамках курсового проекта разборчивость речи рассчитывается с помощью двух объективных методов расчета:

- %  $Al_{\text{cons}}$  – процент артикуляционных потерь согласных (Percentage Articulation Loss of Consonants);

- $STI$  – индекс передачи речи (Speech Transmission Index).

1. Рассчитайте значения параметра %  $Al_{\text{cons}}$  по формуле (12) для всех контрольных точек помещения. Обратите внимание на то, что:

- процент артикуляционных потерь согласных во всех контрольных точках, необходимо оценить отдельно для каждого громкоговорителя, а затем усреднить результаты, полученные для каждой контрольной точки;

- при расчете %  $Al_{\text{cons}}$  используются значения времени стандартной реверберации  $T$  и индекса направленности источника звука  $Q$ , усредненные по октавным полосам с центральными частотами 1 кГц и 2 кГц;

- поправочный коэффициент  $a$  принимается равным нулю:  $a = 0$ .

2. В соответствии с методикой, изложенной в прил. 1, рассчитайте значение индекса передачи речи  $STI$  для всех контрольных точек помещения. Обратите внимание на то, что:

- расстояние  $r$  оценивается от источника звука (ближайшего громкоговорителя) до контрольной точки;

- для расчета индекса передачи речи используется частотная зависимость времени стандартной реверберации, полученная в результате теоретического расчета;

- величина отношения сигнал-шум  $SNR_k$  в октавной полосе  $k$  для каждой контрольной точки рассчитывается как разность уровня полного звукового давления и уровня звукового давления шума в октавной полосе  $k$ . В случае, если расчет уровня звукового давления  $N_k$  проводился во всем диапазоне частот, а не для каждой из октавных полос в отдельности, уровень звукового давления во всех октавных полосах принимается одинаковым. Уровень шума в озвучиваемом помещении указан в варианте задания на выполнение курсового проекта либо может быть рассчитан в соответствии с методикой, изложенной в Части 1 данного учебного пособия [1].

- при расчете интенсивности звука  $I_k$  в октавной полосе  $k$ , в случае, если расчет уровня звукового давления  $N_k$  проводился по всему диапазону частот, а не для каждой из октавных полос в отдельности, уровень звукового давления, а следовательно, и величина интенсивности звука во всех октавных полосах принимаются одинаковыми;

- при расчете индекса передачи речи  $STI$  учитываются различия в разборчивости, возникающие при прослушивании мужской и женской речи.

Для этого вводятся весовые коэффициенты  $\alpha_k$  и  $\beta_k$ , различающиеся для мужского и женского голосов. В рамках курсового проекта выполните расчет только для мужского голоса.

3. После выполнения расчета оценок разборчивости речи с помощью методов %  $Al_{\text{cons}}$  и  $STI$ , сравните полученные результаты с помощью выражений (18) и (19) (подразд. 1.3.2). Сделайте выводы об эффективности использования каждого из рассмотренных методов для предсказания оценки разборчивости речи при выполнении акустического расчета помещения.

### **3.12. Расчет импульсной характеристики помещения и аурализация отрывка звукового сигнала**

В соответствии с методикой, изложенной в подразд. 5.4 прил. 5 части 3 данного пособия, рассчитайте структуру отражений в помещении (импульсную характеристику помещения). Проанализируйте полученную временную структуру отражений и сравните полученное на основании расчета значение времени стандартной реверберации со значениями, полученными с помощью других методов.

Выполните аурализацию отрывка звукового сигнала в смоделированном помещении в соответствии с методикой, изложенной в подразд. 5.4 прил. 5 данного пособия. При выборе исходного звукового материала обратите внимание на назначение озвучиваемого помещения.

Проведите субъективную оценку качества озвучения в исследуемом помещении по результатам аурализации.

Сделайте выводы о правильности выполненных расчетов для озвучиваемого помещения.

## 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ОЗВУЧЕНИЯ

В настоящем разделе приведен пример выполнения теоретического расчета системы озвучения помещения, рассмотренного в части 1 методических указаний [1] а также компьютерного моделирования системы озвучения с последующим анализом полученных в ПО Ulysses результатов.

### 4.1. Выбор и расчет требуемых параметров системы озвучения

Предположим, что необходимо произвести расчет системы озвучения для помещения, имеющего линейные размеры: длину  $l = 15$  м, ширину  $b = 10$  м, высоту  $h = 6$  м.

Введем систему координат XYZ таким образом, чтобы начало координат ( $x = 0$  м;  $y = 0$  м;  $z = 0$  м) совпадало с одной из вершин параллелепипеда, образующего помещение. Чертеж исследуемого помещения, смоделированного в ПО Ulysses, с указанием осей координат представлен на рис. 18.

Объем помещения и площадь поверхностей стен, пола и потолка составляют:

$$V = l \cdot b \cdot h = 15 \cdot 10 \cdot 6 = 900 \text{ м}^3$$

и 
$$S = 2 \cdot (lb + lh + bh) = 2 \cdot (15 \cdot 10 + 15 \cdot 6 + 10 \cdot 6) = 600 \text{ м}^2.$$

Зона прослушивания, в которой размещаются 75 слушателей, представляет собой прямоугольник с вершинами в точках с координатами:

$$x = 14,5 \text{ м}, \quad y = 1 \text{ м}, \quad z = 1,2 \text{ м};$$

$$x = 14,5 \text{ м}, \quad y = 9 \text{ м}, \quad z = 1,2 \text{ м};$$

$$x = 8 \text{ м}, \quad y = 1 \text{ м}, \quad z = 1,2 \text{ м};$$

$$x = 8 \text{ м}, \quad y = 9 \text{ м}, \quad z = 1,2 \text{ м}.$$

На рис. 18 зона прослушивания изображена в виде серого прямоугольника на плоскости XOY.

В соответствии с расчетом, приведенным в [1], средний коэффициент звукопоглощения в помещении составляет  $\alpha_{\text{ср}} = 0,35$ ; среднее время стандартной реверберации в помещении:  $T_{\text{ср}} = 0,47$  с.

Предположим, что в рассматриваемом помещении необходимо обеспечить следующие параметры звукового поля:

– требуемый уровень звукового давления  $N_{\text{тр}} = 100$  дБ;

– допустимая неравномерность уровней звукового давления прямого звука  $\Delta N_{\text{тр}} < 6$  дБ;

– допустимые пределы изменения акустического отношения  $R_{\text{мин}} = 1$ ,  $R_{\text{макс}} = 8$ , среднее значение акустического отношения  $R_{\text{ср}} = 4$ .

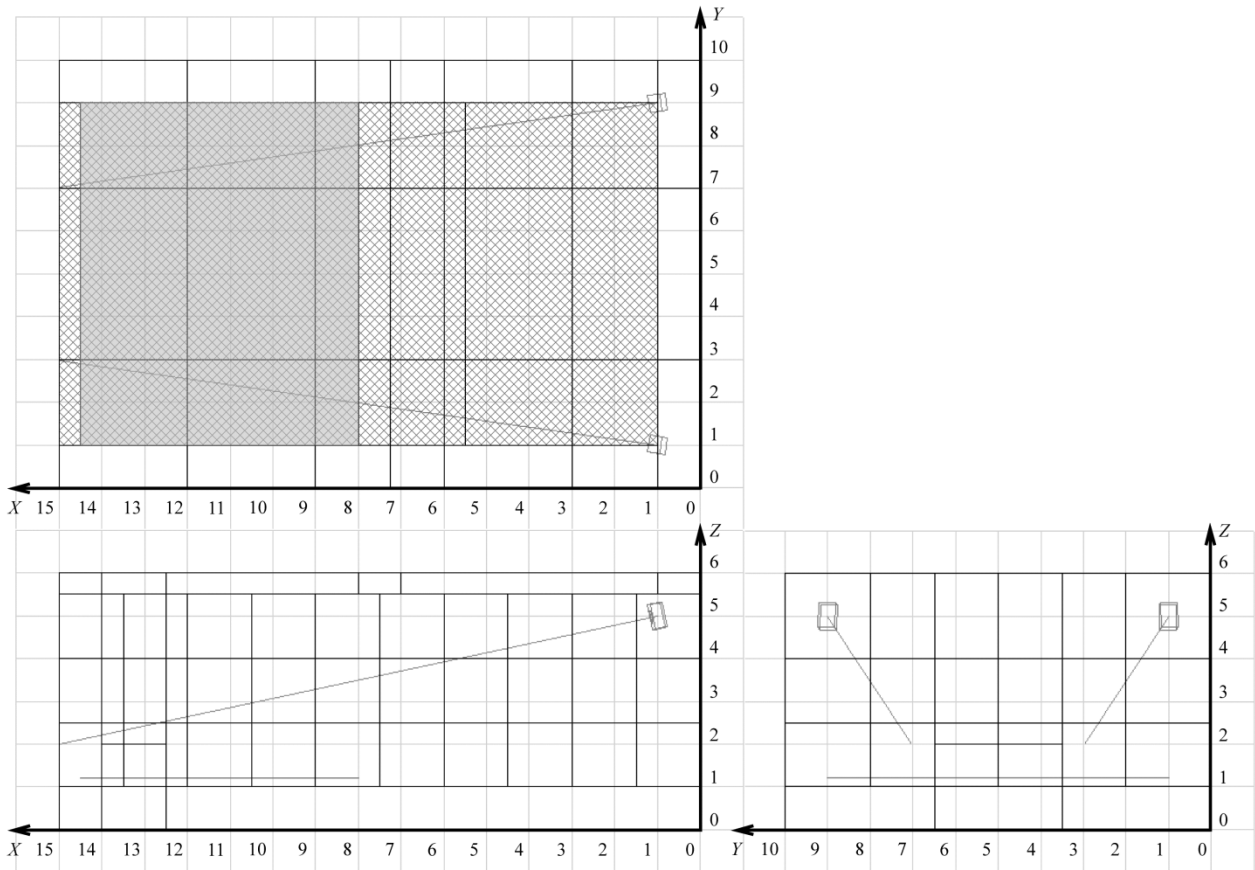


Рис. 18. Чертеж озвучиваемого помещения  
в проекциях на плоскостях XOY, X0Z Y0Z

Проверим правильность выбора среднего значения акустического отношения  $R_{\text{ср}}$ :

$$R_{\text{мин}} = R_{\text{ср}} \cdot 10^{-0,05 \cdot \Delta N} = 2,$$

$$R_{\text{макс}} = R_{\text{ср}} \cdot 10^{0,05 \cdot \Delta N} = 7,98.$$

Полученные величины лежат в пределах, указанных в табл. 3, следовательно, величина  $R_{\text{ср}}$  выбрана верно.

Рассчитаем остальные требуемые параметры звукового поля, создаваемого всеми громкоговорителями системы:

- средний уровень звукового давления сигнала прямого звука

$$N_{\text{пр.ср}}^{\text{тр}} = N_{\text{тр}} - 10 \cdot \lg(1 + R_{\text{ср}}) = 93,01 \text{ дБ};$$

- минимальный и максимальный допустимые уровни звукового давления сигнала прямого звука:

$$N_{\text{пр.мин}}^{\text{тр}} = N_{\text{пр.ср}}^{\text{тр}} - 0,5 \cdot \Delta N_{\text{тр}} = 90,01 \text{ дБ},$$

$$N_{\text{пр.макс}}^{\text{тр}} = N_{\text{пр.ср}}^{\text{тр}} + 0,5 \cdot \Delta N_{\text{тр}} = 96,01 \text{ дБ};$$

– уровень звукового давления сигнала диффузного звука

$$N_{\text{д}}^{\text{тр}} = N_{\text{тр}} - 10 \cdot \lg \left( \frac{1 + R_{\text{ср}}}{R_{\text{ср}}} \right) = 99,03 \text{ дБ.}$$

Для упрощения расчетов установим, что система озвучения состоит из одинаковых громкоговорителей, создающих одинаковые звуковые давления. Требуемый уровень звукового давления от одного громкоговорителя определим в соответствии с выражением:

$$N_{\text{тр1}} = N_{\text{тр}} - 10 \cdot \lg n = 96,99 \text{ дБ.}$$

## 4.2. Выбор громкоговорителей системы озвучения

Для реализации системы озвучения выберем два громкоговорителя Community VERI1296. Диаграммы направленности и другие технические характеристики громкоговорителя VERI1296 приведены в прил. 3.

Для дальнейших расчетов необходимо знать следующие параметры громкоговорителя:

– индекс направленности  $Q$ , усредненный для всего диапазона излучаемых частот:  $Q = 10,39$ ;

– уровень звукового давления, развиваемый громкоговорителем на акустической оси расстоянии 1 м при подведении мощности в 1 Вт, усредненный для всего диапазона излучаемых частот:  $N_{\text{ст}} = 97,57$  дБ;

– максимальная подводимая мощность, усредненная для всего диапазона излучаемых частот:  $W_{\text{макс}} = 200$  Вт.

Громкоговорители расположим в точках помещения с координатами (рис. 18):

$$x = 1 \text{ м, } y = 1 \text{ м, } z = 5 \text{ м;}$$

$$x = 1 \text{ м, } y = 9 \text{ м, } z = 5 \text{ м.}$$

Акустические оси громкоговорителей направлены соответственно в точки с координатами:

$$x = 15 \text{ м, } y = 3 \text{ м, } z = 2 \text{ м;}$$

$$x = 15 \text{ м, } y = 7 \text{ м, } z = 2 \text{ м.}$$

Заметим, что при больших размерах базы фронтальных громкоговорителей обычно нужен дополнительный громкоговоритель в центре, что обеспечивает более правильную локализацию источников звука.



### 4.3. Расчет величины подводимой мощности

На основании значения уровня  $N_{\text{тр1}}$  рассчитаем требуемый уровень звукового давления диффузного звука:  $N_{\text{д1}}^{\text{TP}} = 96,02$  дБ.

Используя выражения (36), (37), (38), рассчитаем необходимое значение звукового давления  $p_1^{\text{TP}}$ , уровня  $N_1^{\text{TP}}$ , развиваемых громкоговорителем на расстоянии 1 м при подведении к нему требуемой мощности  $W_3^{\text{TP}}$ :

$$\begin{aligned} N_1^{\text{TP}} &= 115 \text{ дБ,} \\ p_1^{\text{TP}} &= 11,25 \text{ Па,} \\ W_3^{\text{TP}} &= 55,36 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Уровень подводимой мощности в дБ составит  $N_{W_3}^{\text{TP}} = -5,58$  дБ. Округлим его в большую сторону до целого числа дБ:  $N_{W_3} = -6$  дБ. Тогда скорректированная мощность, подводимая к громкоговорителю, будет равна:  $W_3 = 50,24$  Вт.

Скорректированные значения звукового давления  $p_1$  и уровня  $N_1$  на расстоянии 1 м на акустической оси громкоговорителя будут равны:

$$\begin{aligned} p_1 &= 10,72 \text{ Па,} \\ N_1 &= 114,58 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

### 4.4. Расчет уровней звукового давления сигналов прямого и диффузного звуков и неравномерности озвучения

Уровень звукового давления сигнала прямого звука  $N_{\text{пр}}$ , создаваемый всеми громкоговорителями системы, рассчитаем для всей озвучиваемой площади помещения в соответствии с выражением:

$$N_{\text{пр}}(r_x, r_y) = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{N_1 - 10 \lg \left( \frac{Q}{4\pi \cdot (r_{xi}^2 + r_{yi}^2 + r_{zi}^2)} \right)}{10}}, \quad (50)$$

где  $i$  – номер громкоговорителя;  $n = 2$  – количество громкоговорителей;  $r_{xi} = 0 \dots 14$  м,  $r_{yi} = 0 \dots 8$  м – расстояния от  $i$ -го громкоговорителя до расчетной точки плоскости прослушивания в направлении осей  $X$ ,  $Y$  соответственно;  $r_{zi} = 3,8$  м – расстояние от  $i$ -го громкоговорителя до расчетной точки плоскости прослушивания в направлении оси  $Z$  (расстояние  $r_{zi}$  остается постоянным для всех точек плоскости прослушивания в связи с фиксированной

высотой подвеса громкоговорителей, равной 5 м, и фиксированной высотой расположения плоскости прослушивания, равной 1,2 м);  $Q_i$  – индекс направленности  $i$ -го громкоговорителя.

Уровень звукового давления сигнала диффузного звука  $N_d$ , создаваемый всеми громкоговорителями, рассчитаем в соответствии с выражением:

$$N_d = N_1 + 10 \lg \left( \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{cp})}{\alpha_{cp} \cdot S} \right) + 10 \cdot \lg n. \quad (51)$$

Результаты расчета уровней звукового давления прямого  $N_{пр}$  и диффузного  $N_d$  звуков представлены графически на рис. 19. Здесь горизонтальная плоскость показывает значения уровней звукового давления сигнала диффузного звука в зоне прослушивания, а вторая поверхность показывает изменение уровней звукового давления сигнала прямого звука в зоне озвучения. По вертикали отложены значения уровней звуковых давлений в дБ, по горизонтали – размеры зоны прослушивания в м, для которой выполнен расчет.

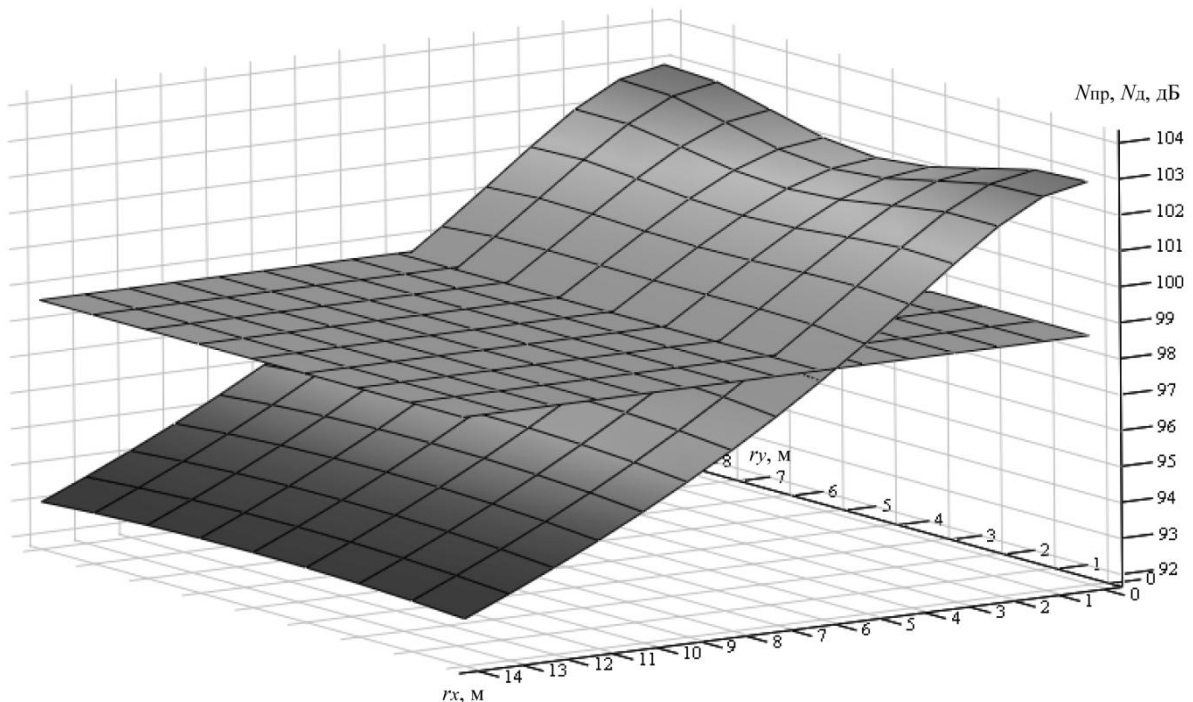


Рис. 19. Результаты расчета уровней звукового давления прямого  $N_{пр}$  и диффузного  $N_d$  звуков

Следует отметить, что по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  отложены относительные расстояния  $r_{xi}$ ,  $r_{yi}$ ,  $r_{zi}$  между громкоговорителями и расчетными точками плоскости прослушивания. Для наглядного представления распределения энергии

звукового поля в помещении расчет произведен для всей площади помещения, лежащей перед громкоговорителями, в абсолютной системе координат, представляющей собой прямоугольник с вершинами в точках:

$$x = 15 \text{ м}, y = 1 \text{ м}, z = 1,2 \text{ м};$$

$$x = 15 \text{ м}, y = 9 \text{ м}, z = 1,2 \text{ м};$$

$$x = 1 \text{ м}, y = 1 \text{ м}, z = 1,2 \text{ м};$$

$$x = 1 \text{ м}, y = 9 \text{ м}, z = 1,2 \text{ м};$$

на рис. 18 указанный прямоугольник длиной 14 м и шириной 8 м отмечен штриховкой.

Уровень звукового давления сигнала диффузного звука является постоянным для всех точек плоскости прослушивания и составляет  $N_{\text{д}} = 98,61$  дБ.

Средний уровень звукового давления прямого звука в зоне прослушивания ( $r_{xi} = 8 \dots 14,5$  м,  $r_{yi} = 0 \dots 8$  м) составляет  $N_{\text{пр.ср}} = 94,22$  дБ.

Средний уровень звукового давления прямого звука в зоне прослушивания составляет  $N_{\text{пр.мин}} = 92,99$  дБ. Максимальный уровень звукового давления прямого звука в зоне прослушивания составляет  $N_{\text{пр.макс}} = 97,01$  дБ.

Неравномерность звукового давления сигнала прямого звука  $\Delta N_{\text{пр}}$  в зоне прослушивания составляет  $\Delta N_{\text{пр}} = 4,02$  дБ.

Полный уровень звукового давления  $N_{\text{п}}$ , создаваемый всеми громкоговорителями системы, рассчитаем в соответствии с выражением:

$$N_{\text{п}}(r_x, r_y) = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{N_1 - 10 \lg \left( \frac{Q_i}{4\pi \cdot (r_{xi}^2 + r_{yi}^2 + r_{zi}^2)} + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} \cdot S} \right)}{10}}, \quad (52)$$

где  $i$  – номер громкоговорителя;  $n = 2$  – количество громкоговорителей;  $r_{xi} = 0 \dots 14$  м,  $r_{yi} = 0 \dots 8$  м,  $r_{zi} = 3,8$  м;  $Q_i$  – индекс направленности  $i$ -го громкоговорителя.

Результаты расчета полного уровня звукового давления  $N_{\text{п}}$  представлены графически на рис. 20. Поверхность, показывает суммарные значения уровней звукового давления сигналов прямого и диффузного звуков.

Средний уровень звукового давления сигнала прямого звука в зоне прослушивания составляет  $N_{\text{п.ср}} = 100,41$  дБ.

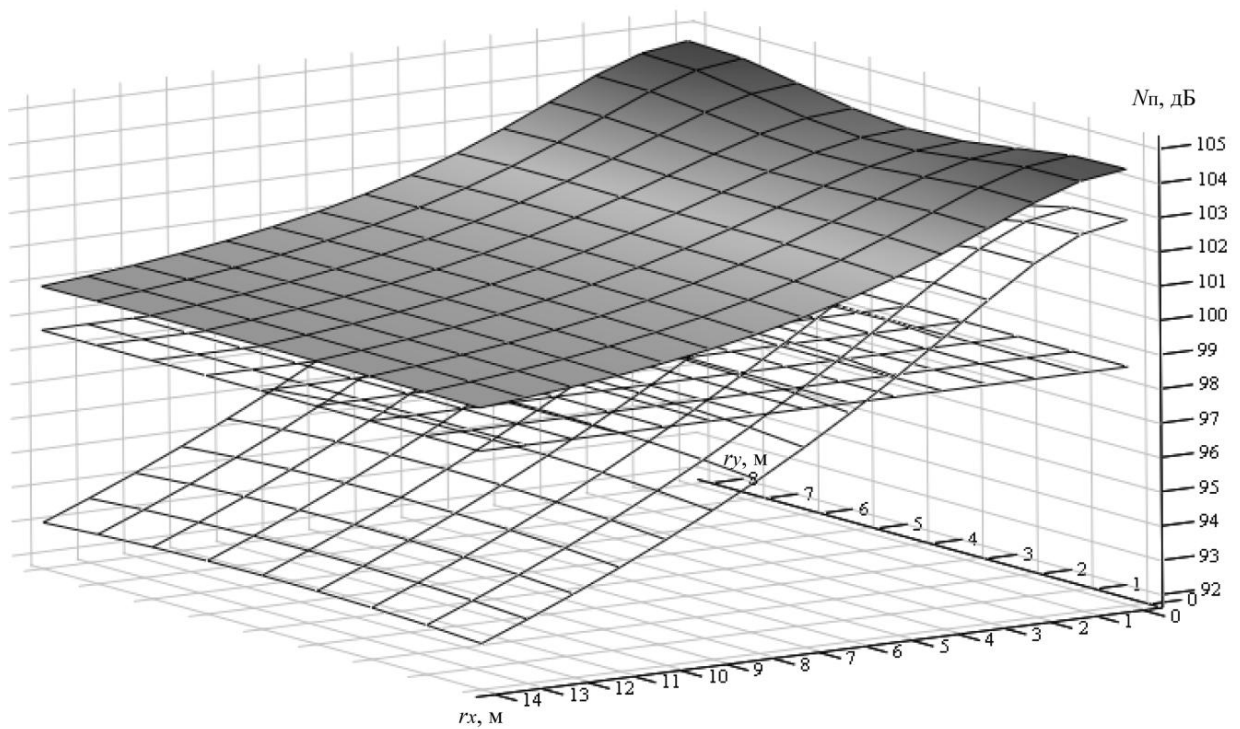


Рис. 20. Результаты расчета полного уровня звукового поля  $N_{\Pi}$

#### 4.5. Расчет величины акустического отношения

Значение акустического отношения  $\Delta N_R$  в дБ для всей плоскости прослушивания рассчитаем как разность уровней звукового давления диффузной и прямой составляющих звукового поля, создаваемого всеми громкоговорителями системы:

$$\Delta N_R(r_{xi}, r_{yi}) = N_{\text{д}} - N_{\text{пр}}(r_{xi}, r_{yi}), \quad (51)$$

где  $N_{\text{пр}}(r_{xi}, r_{yi})$  – уровень прямого звука в расчетной точке с координатами  $r_{xi} = 0 \dots 14$  м,  $r_{yi} = 0 \dots 8$  м.

Результаты расчета величины акустического отношения  $\Delta N_R$  в дБ представлены графически на рис. 21.

Среднее значение акустического отношения  $\Delta N_R$  в дБ в зоне прослушивания составляет  $\Delta N_{R\text{ср}} = 3,69$  дБ.

Абсолютное значение акустического отношения  $R$  в зоне прослушивания составляет  $R_{\text{ср}} = 2,34$ .

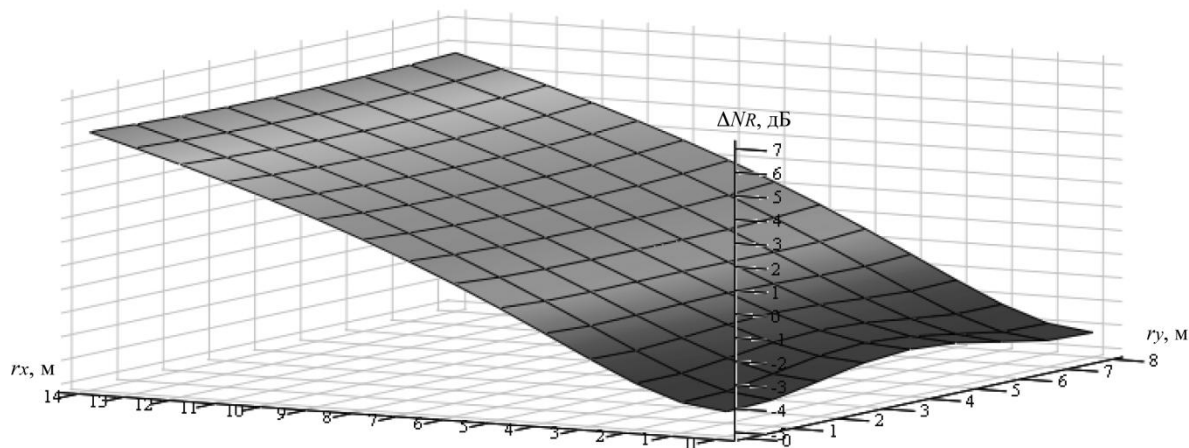


Рис. 21. Результаты расчета акустического отношения  $\Delta N_R$

#### 4.6. Расчет разборчивости речи

В соответствии с методикой, изложенной в подразд. 1.3.2, определим критическое расстояние для определения выражения расчета процента артикуляционных потерь согласных. В озвучиваемом помещении при использовании громкоговорителей Community VERI1296 критическое расстояние составит  $r_{кр} = 30,2$  м. Так как линейные размеры помещения не превышают 15 м, значения параметра  $\% AL_{cons}$  в исследуемом помещении рассчитаем в соответствии с выражением:

$$\% AL_{cons} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{200 \cdot (r_{xi}^2 + r_{yi}^2 + r_{zi}^2) \cdot T^2}{V \cdot Q_i},$$

где  $i$  – номер громкоговорителя;  $n = 2$  – количество громкоговорителей;  $r_{xi} = 0 \dots 14$  м,  $r_{yi} = 0 \dots 8$  м,  $r_{zi} = 3,8$  м;  $Q_i$  – индекс направленности  $i$ -го громкоговорителя.

Результаты расчета значений процента артикуляционных потерь согласных в зоне прослушивания  $\% AL_{cons}$  представлены графически на рис. 22.

Среднее значение процента артикуляционных потерь согласных в зоне прослушивания составляет  $\% AL_{cons\ ср} = 0,71$  %.

В соответствии с методикой, изложенной в прил. 1, рассчитаем значение индекса передачи речи в помещении. Результаты расчета индекса передачи речи  $STI$  представлены графически на рис. 23.

Среднее значение индекса передачи речи в зоне прослушивания составляет  $STI_{ср} = 0,75$ .

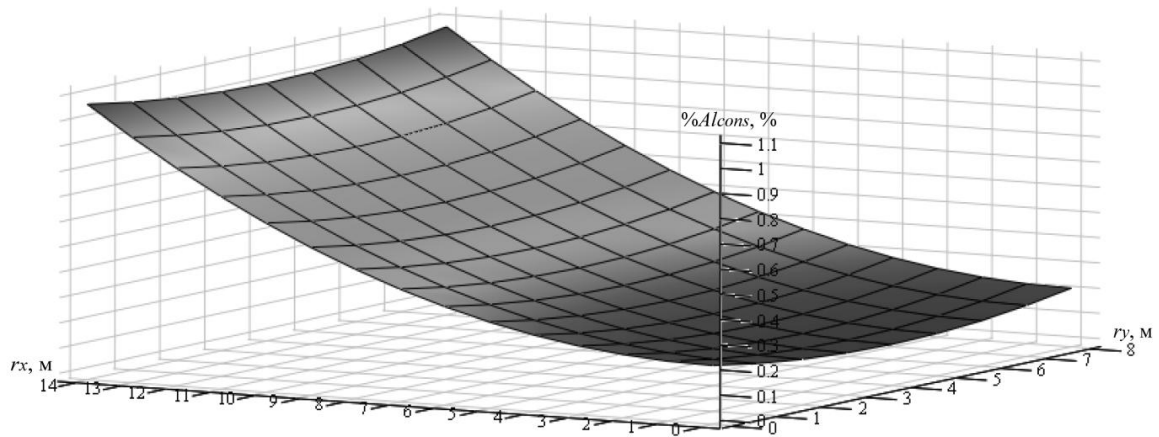


Рис. 22. Результаты расчета процента артикуляционных потерь согласных  $\% AL_{\text{cons}}$

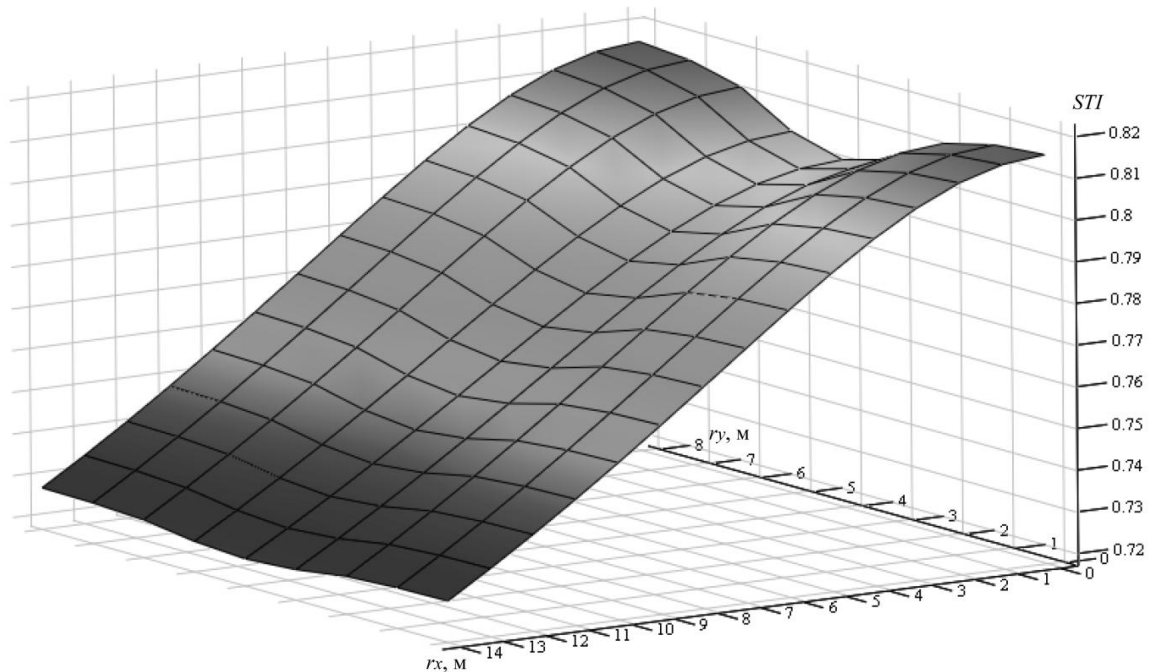


Рис. 23. Результаты расчета индекса передачи речи  $STI$

#### 4.7. Результаты моделирования системы озвучения и анализа звукового поля в ПО Ulysses

В соответствии с методикой, изложенной в части 1 данного учебного пособия [1], с помощью ПО **Ulysses** была построена трехмерная модель озвучиваемого помещения, в которой показана зона прослушивания и размещены два громкоговорителя Community VERI1296 в точках с координатами, указанными в подразд. 4.1–4.2 (информация о размещении громкоговорителей и зоны прослушивания в трехмерной модели приведена в прил. 3 и 4 части 3 данного пособия). На рис. 24 представлена трехмерная проекция смоделированного помещения.

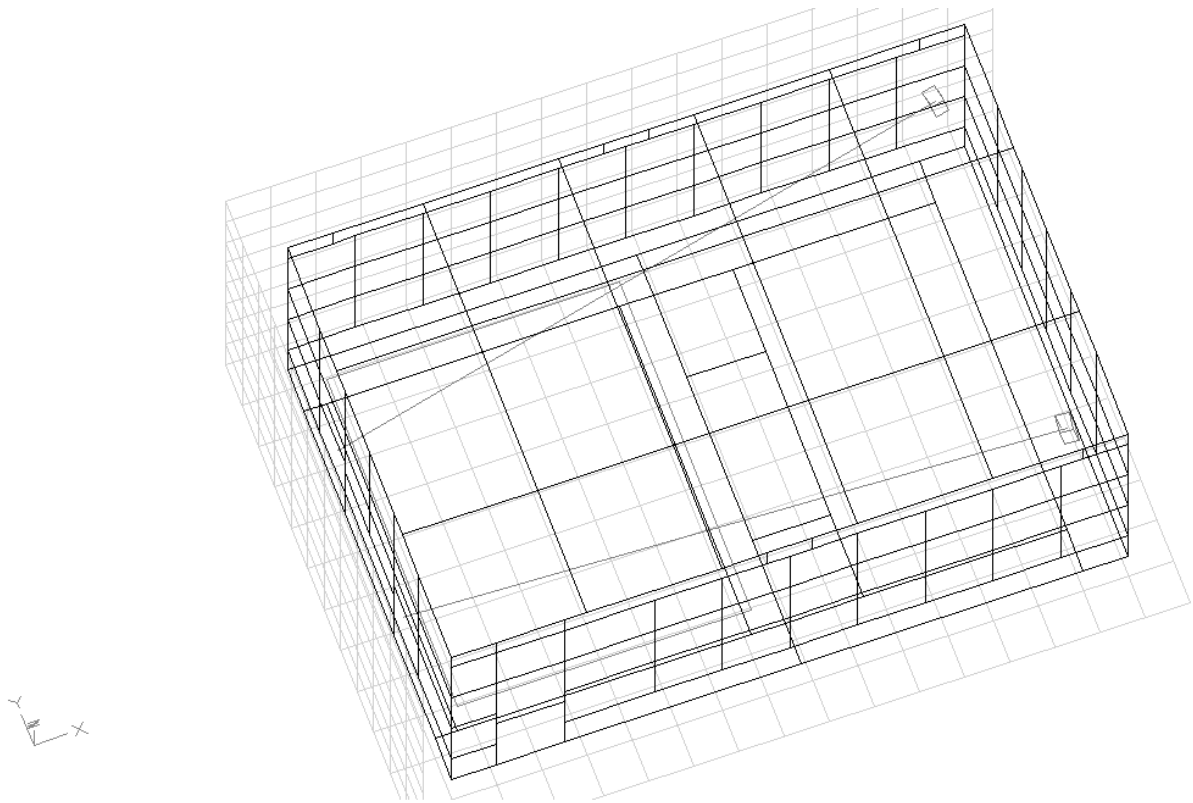
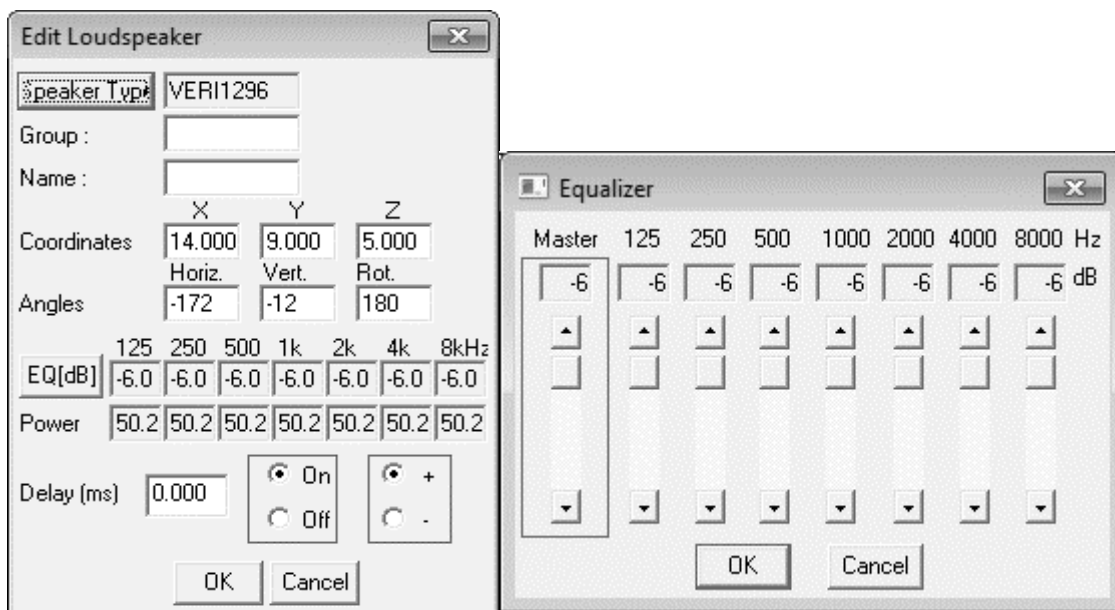


Рис. 24. Модель озвучиваемого помещения, построенная с помощью ПО Ulysses

Величина подводимой к громкоговорителям мощности, рассчитанная в подразд. 4.3, вводится в программу с помощью панелей, представленных на рис. 25, а и б.



а)

б)

Рис. 25. Ввод параметров громкоговорителя Community VERI1296:  
а) окно выбора громкоговорителя; б) окно выбора АЧХ громкоговорителя

Анализ параметров звукового поля в смоделированном помещении был выполнен в соответствии с методикой, приведенной в прил. 5.

Графические результаты компьютерных расчетов приведены на рис. 26–30.

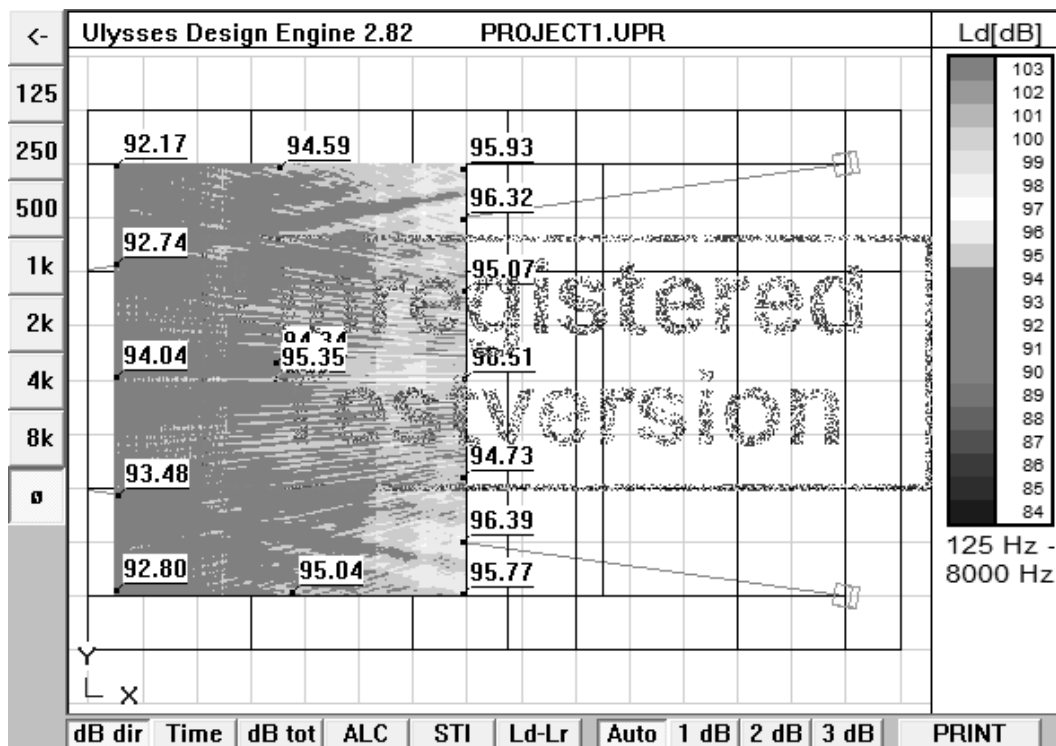


Рис. 26. Результаты расчета уровней звукового давления сигнала прямого звука  $N_{пр}$

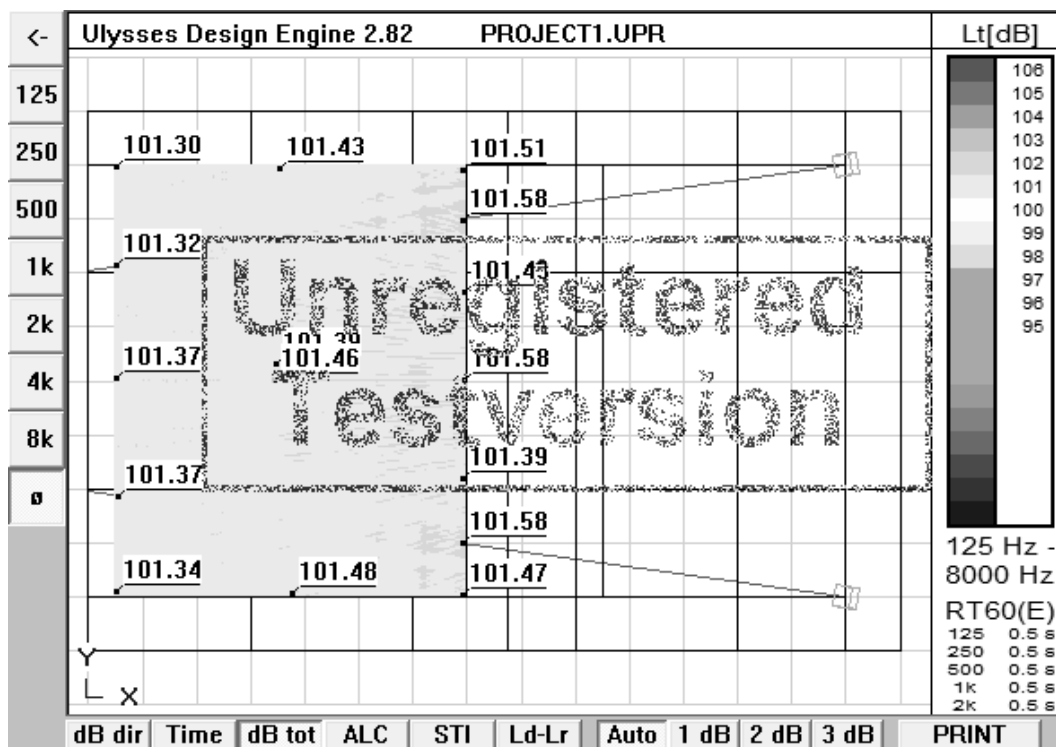


Рис. 27. Результаты расчета полного уровня звукового давления  $N_{п}$



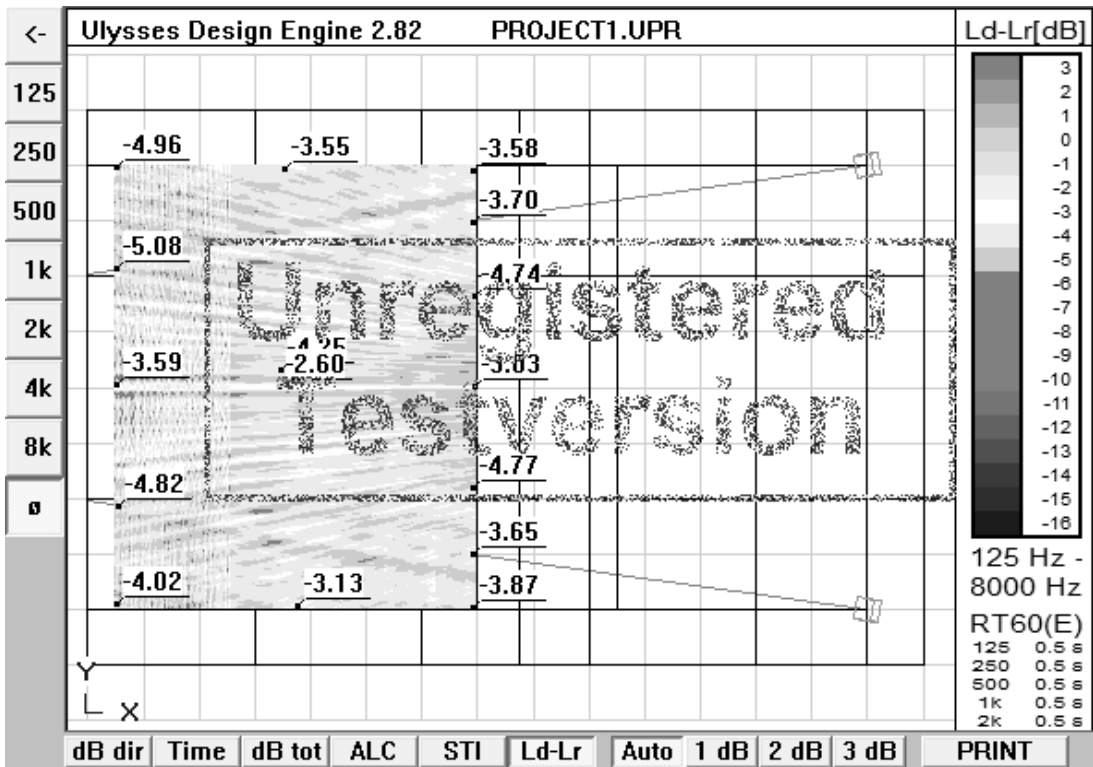


Рис. 28. Результаты расчета значений акустического отношения  $\Delta N_R$  в дБ

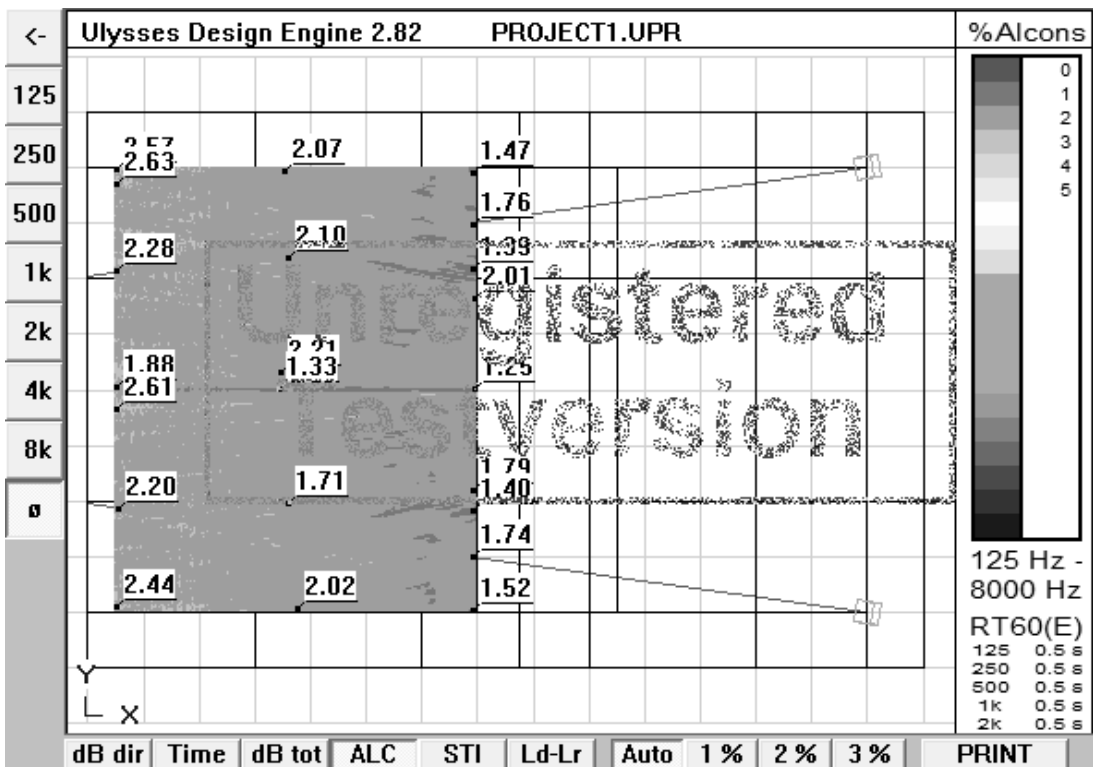


Рис. 29. Результаты расчета процента артикуляционных потерь согласных  $\% Al_{cons}$

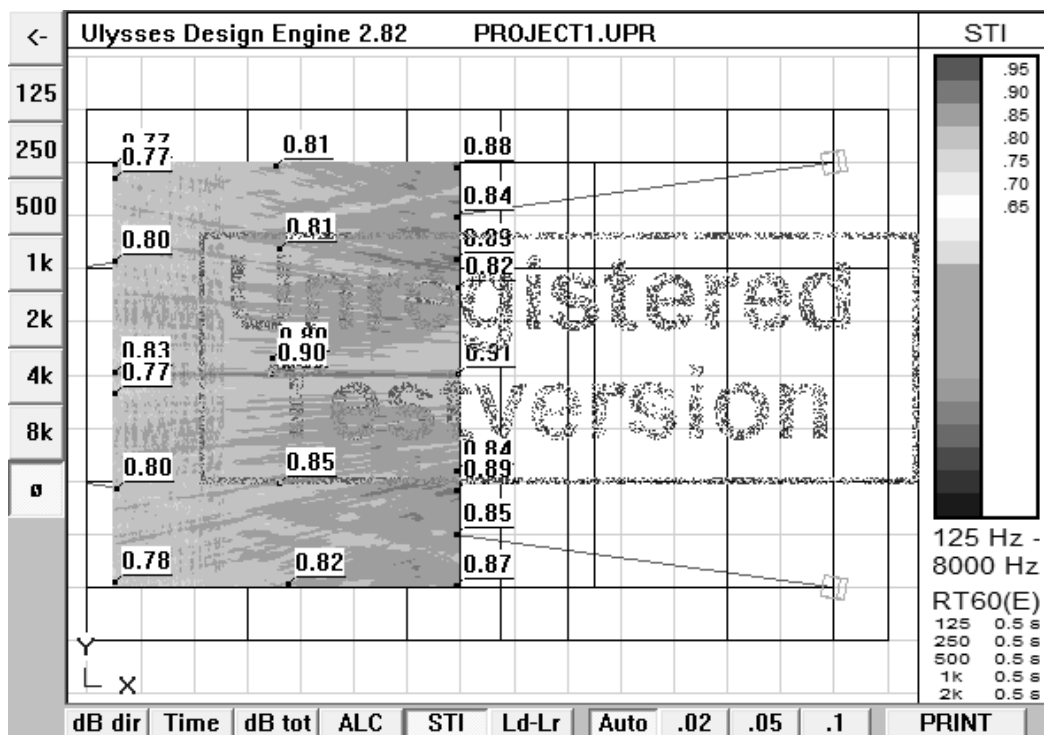


Рис. 30. Результаты расчета индекса передачи речи  $STI$

Для объективного контроля параметров звукового поля, а также для сравнения результатов компьютерного расчета с результатами теоретического расчета, по всей площади зоны прослушивания были выбраны 16 контрольных точек. Результаты компьютерного расчета параметров звукового поля в указанных контрольных точках приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты компьютерного расчета параметров звукового поля в зоне прослушивания

№ контрольной точки	$N_{пр}$ , дБ	$N_{п}$ , дБ	$\Delta N_R$ , дБ	$N_{д}$ , дБ	$\%Al_{cons}$ , %	$STI$
1	92,17	101,30	4,96	97,13	2,57	0,77
2	92,74	101,32	5,08	97,82	2,28	0,80
3	94,04	101,37	3,59	97,63	1,88	0,83
4	93,48	101,37	4,82	98,30	2,20	0,80
5	92,80	101,34	4,02	96,82	2,44	0,78
6	94,59	101,43	3,55	98,14	2,07	0,81
7	94,34	101,39	4,25	98,59	2,21	0,89
8	95,35	101,46	2,60	97,95	1,33	0,90
9	95,04	101,48	3,13	98,17	2,02	0,82
10	95,93	101,51	3,58	99,51	1,47	0,88
11	96,32	101,58	3,70	100,02	1,76	0,84
12	95,07	101,43	4,74	99,81	2,01	0,82
13	96,51	101,58	3,03	99,54	1,25	0,91
14	94,73	101,39	4,77	99,50	1,79	0,84
15	96,39	101,58	3,65	100,04	1,74	0,85
16	95,77	101,47	3,87	99,64	1,52	0,87

Следует отметить, что в ПО Ulysses в качестве акустического отношения рассчитывается разность уровней звукового давления сигналов прямого и диффузного звуков  $N_{\text{пр}} - N_{\text{д}}$ , в связи с чем значения этого параметра, выводимые на экран в результате расчетов в ПО Ulysses, являются отрицательными.

Значение уровня звукового давления диффузного звука рассчитано на основании суммирования значений уровня звукового давления прямого звука и акустического отношения в дБ:

$$N_{\text{д}} = N_{\text{пр}} + \Delta N_{\text{R}}. \quad (52)$$

Усредненные по всем контрольным точкам значения уровней звукового давления сигналов прямого, диффузного, полного звуков и акустического отношения в дБ, оценки разборчивости речи, полученные в результате компьютерного расчета, а также рассчитанные на их основании другие параметры звукового поля приведены в табл. 10. Для удобного сравнения результаты теоретического расчета также сведены в табл. 10.

Таблица 10

Результаты сравнения теоретического и компьютерного расчетов параметров звукового поля в зоне прослушивания

Наименование параметра	Результат теоретического расчета	Результат компьютерного расчета	Абсолютная величина отклонения
$N_{\text{пр.ср}}$ , дБ	94,22	94,70	0,48
$N_{\text{пр.мин}}$ , дБ	92,99	92,17	0,82
$N_{\text{пр.макс}}$ , дБ	97,01	96,51	0,5
$\Delta N_{\text{пр}}$ , дБ	4,02	4,34	0,32
$N_{\text{д.ср}}$ , дБ	98,61	98,66	0,05
$N_{\text{п.ср}}$ , дБ	100,41	101,44	1,03
$\Delta N_{\text{Rср}}$ , дБ	3,69	3,96	0,27
$R_{\text{ср}}$	2,34	2,49	0,15
$\%Al_{\text{cons ср}}$	1,06	1,91	0,85
$STI_{\text{ср}}$	0,75	0,84	0,09

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Курсовой проект должен содержать следующие разделы.

1. Задание на проектирование в соответствии с данными табл. 1.
2. Расчет частотной характеристики времени стандартной реверберации и среднего коэффициента звукопоглощения в помещении.
3. Перечень примененных специальных звукопоглощающих материалов с указанием их номеров, наименования и коэффициентов звукопоглощения.
4. Чертеж исследуемого помещения в трех проекциях с указанием мест размещения громкоговорителей и зон прослушивания.
5. Теоретический расчет параметров звукового поля в исследуемом помещении и результаты сравнения полученных значений с требуемыми значениями параметров звукового поля.
6. Теоретический расчет оценки разборчивости речи по методам  $\% AL_{cons}$  и  $STI$  в озвучиваемом помещении.
7. Результаты сравнения полученных с помощью различных методов оценок разборчивости речи.

После построения модели помещения в ПО Ulysses и размещения в ней всех выбранных по результатам акустического расчета звукопоглощающих материалов и громкоговорителей, в соответствующих разделах курсового проекта следует привести:

- а) аксонометрическую проекцию и проекции на плоскости  $XOY$ ,  $XOZ$  и  $YOZ$  построенной модели помещения;
- б) результат анализа частотной характеристики времени стандартной реверберации в построенной модели помещения и сравнение его с результатами теоретического расчета;
- в) результат анализа зависимости частотной характеристики времени стандартной реверберации от заполненности помещения исполнителями и/или слушателями;
- г) результат компьютерного расчета параметров звукового поля и сравнение его с результатами теоретического расчета;
- д) результат компьютерного расчета разборчивости речи и сравнение его с результатами теоретического расчета;
- е) результат расчета импульсной характеристики помещения и выводы по результатам расчета;
- ж) выводы по результатам выполнения аурализации отрывка звукового сигнала в исследуемом помещении.

Для наглядности рекомендуется результаты расчетов и сравнительного анализа сводить в таблицы, а также представлять графически.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалгин, Ю. А. Расчет аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и аудиотехники : Часть 1. Расчет акустического оформления студий : методические указания по курсовому проектированию / Ю. А. Ковалгин, О. А. Свинына, А. А. Фадеев; СПб ГУТ. – СПб., 2013. – 80 с.
2. Электроакустика и звуковое вещание : учеб. пособие для вузов / И. А. Алдошина, Э. И. Вологдин, А. П. Ефимов, Г. П. Катунин, Л. Н. Кацнельсон, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев ; под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.; ил.
3. Акустика : учебник для вузов / Ш. Я. Вахитов, Ю. А. Ковалгин, А. А. Фадеев, Ю. П. Щевьев ; под ред. Ю. А. Ковалгина. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 660 с.
4. IEC 60268-16 //Sound system equipment, Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. – Fourth edition, 2011.
5. ITU-T R. P. 862 //Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. – 2001.
6. ITU-T R. P. 863 //Perceptual objective listening quality assessment //Int Telecom Union. – 2011.
7. Сапожков, М. А. Звукофикация помещений / М. А. Сапожков. – М. : Связь, 1979. – 143 с.
8. Акустика : справочник / под ред. М. А. Сапожкова. – М. : Радио и связь, 1989.
9. Захарин, В. М. Проектирование систем озвучения и звукоусиления : учеб. пособие / В. М. Захарин. – Одесса, 1977. – 67 с.
10. Катунин, Г. П. Акустический расчет помещений : учеб. пособие / Г. П. Катунин, О. А. Лапаев. – Новосибирск : СибГАТИ, 1996. – 85 с.
11. Hansen, C. H. Fundamentals of acoustics, Article, American Journal of Physics – AMER J PHYS. 01/1951; 19.
12. Hopkins, H. F. “A proposed loudness-efficiency rating for loudspeakers and the determination of system power requirements for enclosures,” / H. F. Hopkins and N. R. Stryker // Proceedings of the I.R.E., Chicago, 315-335 (March 1948).
13. Van der Werff, J., de Leeuw, D. What You Specify Is What You Get (Parts 1 & 2). Preprint, Audio Engineering Society 114th Convention, Amsterdam, 2003.
14. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003. – М. : ЦПП, 2011.
15. СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 31-06-2009. – М. : Аналитик, 2012.
16. [Электронный ресурс]. – <http://www.ifbcon.de/software/ulysses/e.php>
17. [Электронный ресурс]. – <https://www.virtualbox.org>

**Ковалгин Юрий Алексеевич  
Свиньина Ольга Андреевна  
Фадеев Александр Альфонсович**

**РАСЧЕТ  
АППАРАТНО-СТУДИЙНЫХ КОМПЛЕКСОВ ТЕЛЕРАДИО-  
ВЕЩАНИЯ И АУДИОТЕХНИКИ.**

**ЧАСТЬ 2**

**РАСЧЕТ СИСТЕМ ОЗВУЧЕНИЯ И ЗВУКОУСИЛЕНИЯ**

**Учебно-методическое пособие  
по курсовому и дипломному проектированию**

*Редактор С. Д. Щербакова*

*Компьютерная верстка Н. А. Ефремовой*

План издания 2015 г., п. 15 а

Подписано к печати 04.03.2016

Объем 5,0 усл.-печ. л. Тираж 15 экз. Заказ 645

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ

191186 СПб., наб. р. Мойки, 61

Отпечатано в СПбГУТ