

МЕНЕДЖМЕНТ В ИСКУССТВЕ

УДК 782:681.8

А. И. Кузнецова

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ОПЕРНЫХ ЗАЛОВ

Одним из критериев менеджмента музыкального театра, является оценка качества звучания музыки. В оперных театрах наряду с объективными параметрами существенную роль играют субъективные характеристики. В зале оперного театра необходимо обеспечивать должное качество звучания инструментальной и вокальной музыки, так же необходимо поддерживать и хорошую разборчивость.

Основой для оценки акустических свойств оперных залов являются такие объективные параметры, как время реверберации, структура резонансных частот, время и направления прихода ранних отражений и др.. С помощью методов расчета звуковых полей в помещениях, основанных на трех разных теориях — статистической, геометрической и волновой, и с помощью компьютерных программ, например таких как ODEON, EASERA, Aurora, B&K Dirac и др., удастся получить следующий комплекс объективных параметров для расчета звукового поля в помещении [1]-[5]:

- Структуру ранних и поздних отражений;
- Спектр собственных частот;
- Распределение амплитуд и фаз звукового давления;
- Коэффициент ясности C (Clarity) — отношение энергии прямого звука и ранних отражений к энергии поздних отражений;
- Временной интервал между приходом прямого звука и первого отражения ITDG (Internal Time Difference Gap);
- Время реверберации RT (Reverberation Time) — время, в течение которого уровень звукового давления падает на 60 дБ;
- Время раннего затухания EDT (Early Decay Time) — время, в течение которого уровень звукового давления падает на 10 дБ, умноженное на 6, для сравнения с временем реверберации (RT);
- Коэффициент силы звука G (Strenght) — отношение уровня звукового давления, измеренного на определенном расстоянии от источника в исследуемом помещении, к уровню звукового давления от того же источника, измеренному на расстоянии 10 м в заглушенной камере;
- Доля боковой энергии LF (Lateral Fraction) — отношение энергии, записанной двунаправленным микрофоном (характеристика направленности — восьмерка), ориентированным в направлении боковых стен к энергии, записанной ненаправленным микрофоном;

– Сила бокового звука LG (Lateral Strenght) — отношение уровня бокового звукового давления, измеренного с помощью микрофона с характеристикой направленности в виде восьмерки к уровню звукового давления от того же источника на расстоянии 10 м в заглушенной камере;

– Коэффициент внутрислуховой кросс-корреляции IACC (Inter Aural Cross Correlation) — коэффициент корреляции между звуковыми сигналами, поступающими на левое и правое ухо. Определяет степень подобия сигналов. Он характеризует степень различия звуковых сигналов на двух ушах как по времени их прихода, так и по амплитуде;

– Коэффициент времени реверберации на низких частотах (Bass RT ratio) — отношение суммы значений времени реверберации на частотах 250 Гц и 500 Гц к сумме значений времени реверберации на частотах 500 Гц и 1000 Гц;

– Ранний уровень низких частот (Early Bass Level) — отношение уровня звукового давления в первые 50 мс в частотном диапазоне 125–500 Гц, измеренное в оцениваемом зале к уровню звукового давления того же сигнала, не ограниченного по длительности, измеренному в заглушенной камере;

– Коэффициент высоких частот (Treble Ratio), определяемый как отношение энергии позднего высокочастотного звука (после 80 мс, 4 кГц) к энергии позднего среднечастотного звука (1–2 кГц);

– Коэффициент девиации уровня (Deviation of Level, DL) — степень отклонения значения уровня звукового давления на разных частотах от среднего в диапазоне 7,5 октав (63–12500 Гц).

На основании данных проведенных исследований Л. Беранеком, М. Лонгом, И. Андо, И. Анертом, В. Фурдуревым, Л. Макриненко и др. [6]–[16], можно сделать вывод, что оптимальное время реверберации для оперы меняется в пределах от 1,2 до 1,9 с. В работах Л. Беранека [6, 8]–[10] показано, что время реверберации на средних частотах для заполненного зала классической оперы составляет 1,5 с, для опер Вагнера — 1,7 с. М. Лонг [11, с. 102] считает, что время реверберации в оперном театре должно составлять от 1,2 до 1,5 с.

Анализ работы Л. Беранека [6] позволил получить таблицу (Табл. 1) основных объективных параметров исследуемых им залов оперных театров.

Таблица 1

Объективный параметр	Пределы варьирования значений
Временной интервал между приходом прямого звука и первого отражения (ITDG), мс	15–41
Время раннего затухания (EDT), с	1,05–1,9
Коэффициент силы звука на средних частотах (G_M), дБ	–0,3–6,0
Коэффициент силы звука на 125 Гц (G_{125}), дБ	1,3–2,9
Коэффициент ясности (C_{80}), дБ	–0,4–4,6
Бинауральный коэффициент междуушной кросс-корреляции ($1 - IACC_{E3}$)	0,39–0,72

В качестве примера можно привести объективные параметры зала оперного театра Ла Скала в Милане: время реверберации на средних частотах составляет 1,24 с, временной интервал между приходом прямого звука и первого отражения (ITDG) равен 20 мс, время раннего затухания (EDT) 1,14 с, коэффициент силы звука на 125 Гц (G_{125}) равен 1,4 дБ, коэффициент ясности (C_{80}) 3,6 дБ, бинауральный коэффициент междуушной кросс-корреляции ($1 - IACC_{E3}$) составляет 0,48.

Из этих же исследований, а также работ других авторов [11]–[17], можно получить следующие рекомендации: среднее время прибытия первых отражений находится в пределах 20–24 мс. Для обеспечения теплоты звука рекомендуется подъем частотной характеристики времени реверберации примерно на 20 % на частоте 125 Гц. Допустимое удаление зрителей от сцены до 35 м. Глубина балконов не должна превышать 3 м, для свободного попадания в подбалконное пространство прямой звуковой энергии и отражений. Объем зала, приходящийся на одно место, должен составлять 6–7 м³. Вместимость оперного зала варьируется от 1500 до 3816 мест. Объем — от 7000 до 25 000 м³.

В качестве примеров, можно привести сводную таблицу (Табл. 2.) параметров классических оперных театров:

Анализ вышеуказанных объективных параметров звукового поля в помещении показал [1, 6, 11, 13], что оно оказывает существенное влияние на изменение физических параметров звукового сигнала источника (музыкального инструмента, голоса и др.), поскольку изменяет его временные характеристики, в первую

Таблица 2

Название, местонахождение	Год постройки	Объем зала, м ³	Количество мест	Объем на одно место, м ³	Время реверберации на средних частотах, с
Театр Ла Скала, Милан	1778	11252	2289	4,9	1,24
Большой театр, Москва	1856	12000	2130	5,6	1,35
Театр Ковент-Гарден, Лондон	1858	12240	2209	5,54	1,1
Оперный театр, Одесса	1887	9000	1728	5,2	1,1
Национальная опера, Париж	1875	9960	2131	4,67	1,18
Оперный театр, Вена	1869/1959 (реконструкция)	10665	1709	6,2	1,36
Театр Колон, Буэнос-Айрес	1908	20570	2487	8,27	1,56
Метрополитен-Опера, Нью-Йорк	1883	24724	3816	6,47	1,47

очередь, процесс атаки и спада (при этом следует учесть, что во время спада, затухание происходит на собственных частотах помещения, а не инструмента). Кроме того, оно влияет на спектральные свойства источника сигнала, усиливая обертоны, совпадающие с собственными частотами помещения.

На основе полученной информации, была выполнена дифференцированная оценка субъективных характеристик акустики залов и исследована их связь с объективными параметрами [1, 6]-[9].

Результаты субъективной оценки в значительной степени зависят от слушателей: их общего и музыкального образования, социальной принадлежности, профессии, вкусов и привычек, физического и психического состояния.

Для определения субъективных акустических критериев качества звучания существует три метода оценки, основанных на суждении человека [7, с. 493]:

- Метод непосредственного прослушивания оркестра и исполнителей в испытываемых залах опытными экспертами с последующей статистической обработкой их оценок;

- Прослушивание стереофонических записей, сделанных в испытываемом зале на «искусственной голове» для последующего прослушивания через головные телефоны;

- Прослушивание в искусственно созданных условиях, например в синтезированном звуковом поле, создаваемом в заглушенной камере распределенной системой громкоговорителей.

Метод непосредственного прослушивания. Этот метод даёт возможность оценить полную и реальную картину звукового поля. Однако он не позволяет быстро менять звуковые обстановки, исследовать влияние отдельных параметров и вызывает большие организационные трудности. Кроме того, при таком методе оценки сказывается ряд побочных факторов, влияющих на субъективную оценку — манера исполнения, освещение, вид интерьера, температура воздуха и т. п.

Исследования на основе метода непосредственного прослушивания были проведены М. Барроном (М. Barron) [17]. В своей работе он представил результаты, полученные после анализа оценок, выполненных группой экспертов различных музыкальных представлений в ряде исследуемых залов Великобритании, с последующим заполнением специальных вопросников. Результаты сравнивались с объективными параметрами, измеренными в этих залах (в отсутствии публики с помощью ненаправленного громкоговорителя, расположенного на сцене). Как известно, акустические свойства зала меняются при наличии большого количества публики в помещении, к тому же свойства источников звука при субъективных (оркестр и солисты) и объективных (единичный ненаправленный громкоговоритель) измерениях могли существенно различаться. Всё вышеперечисленное говорит о высокой вероятности несовпадения звукового материала в обоих процедурах измерений. Но, тем не менее, автор пришёл к заключениям, которые во многом совпали с результатами предыдущих исследований [11]. Он обнаружил, что ответы экспертов коррелируют с такими параметрами акустического качества как общий уровень звука, начальная фаза реверберационного процесса и доля звуковой энергии приходящей к слушателю с боковых направлений.

В отношении субъективных параметров эксперты разделились на две группы в определении наиболее значимых параметров: отдающие предпочтение жизненности звучания и предпочитающие интимность.

Метод бинаурального сравнения. Данный метод основан на размещении в испытываемом зале микрофонной стереосистемы типа «искусственная голова», геометрические размеры которой моделируют базовые пропорции человеческой головы. Для получения более объективных результатов, в зале должно быть размещено несколько таких систем, а запись должна производиться на ряде концертов. Полученный материал прослушивается квалифицированными экспертами через громкоговорители в заглушенной камере, с последующим ранжированием исследуемых залов.

Метод стереофонического сравнения начал развиваться в семидесятые годы в связи с совершенствованием технической возможности бинауральной стереофонии. В начале 70-х гг. К. Зибарс (K. Siebrasse), М. Шредер (M. Schroeder) и Д. Готтлоб (D. Gottlob) [1] провели в двадцати пяти залах Германии несколько таких экспериментов: через два ненаправленных громкоговорителя, в исследуемом зале, воспроизводились музыкальные отрывки, записанные в заглушенном помещении. Эти отрывки, в свою очередь, записывались с помощью микрофонной системы «искусственная голова», что позволяло сохранить пространственные признаки сигнала. После этого записи прослушивались экспертами через два громкоговорителя в заглушенном помещении, чтобы на запись не накладывались вторичные отражения. Оценка проводилась методом парного сравнения, эксперты могли отдать предпочтение одному из двух звуковых образцов, или сказать что не имеют предпочтения. Субъективные предпочтения экспертов сравнивались с различными объективными параметрами исследуемых залов. Было установлено, что особой важностью при оценке акустического пространства обладают отношение уровня звукового давления в первые 50 мс к полному звуковому давлению и степень корреляции сигналов левого и правого уха. А так же важными субъективными характеристиками являются уровень громкости, жизненность, различимость, степень различия звуковых сигналов на двух ушах, тембр.

В своей работе, Х. Уилкенс (H. Wilkens) и П. Леман (P. Lehmann) [7], так же проводивших исследования методом стереофонического сравнения, пришли к выводу что тремя наиболее важными субъективными факторами являются уровень громкости, ясность звучания и тембральные свойства.

Метод в искусственно созданных условиях. С помощью этого способа, звуковое поле синтезируется в заглушенной камере распределенной системой громкоговорителей. Этот метод позволяет легко менять параметры звукового поля: изменять уровни прямого и отраженного звуков, изменять направление прихода ранних отражений, вводить реверберацию, менять её величину и уровень, вводить частотную коррекцию в компоненты звукового поля. Недостатками способа являются трудоемкость эксперимента и упрощенность картины звукового поля из-за конечного количества источников.

В 1995 г. Г. Сулодре (G. Soulodre) и Дж. Брэдли (J. Bradley) [1, 9] провели серию экспериментов, где экспертам предстояло оценить бинауральные звуковые

образцы, используя такие субъективные критерии как ясность, громкость, жизненность, пространственность и др. Звуковые образцы были получены методом «свертки» записей музыкальных отрывков с бинауральными импульсными характеристиками, записанными в различных, в том числе и оперных, залах Северной Америки. Звуковые образцы и импульсные характеристики были записаны одновременно, при одинаковых акустических условиях. Эксперты прослушивали пары звуковых образцов при помощи двух громкоговорителей с системой подавления перекрестных связей и механическими барьерами для отделения правого и левого громкоговорителей. Пары звуковых образцов можно было прослушивать неограниченное количество раз, при переключении между образцами изменялись акустические качества пространства, за счет выбора другой бинауральной импульсной характеристики (при этом музыкальный фрагмент не оставался). Данное исследование позволило свести к минимуму различия в условиях субъективного и объективного измерений, благодаря чему удалось зафиксировать значительное число корреляций между ними и найти новые объективные параметры, такие как: ранний уровень низких частот, коэффициент высоких частот, коэффициент силы звука.

Начиная с конца 1950-х гг. и на протяжении почти тридцати лет огромную работу по установлению оценок качества звучания музыки в оперных театрах, проделал ученый — акустик Л. Беранек (L. Beranek) [6]. Он провёл измерения объективных акустических параметров во многих десятках престижных залах мира. Для получения эстетической оценки изученных залов, были проведены многочисленные интервью с известными дирижёрами, музыкантами, музыкальными критиками. Им было предложено оценить акустические качества ряда широко известных оперных театров по пятибалльной шкале. Результаты показаны на рис. 1 [6].

На основании данных проведенных исследований, можно было составить таблицу (Табл. 3.) наиболее значимых субъективных критериев оценки акустических качеств оперных залов и их объективных коррелятов.

Интимность (Intimacy) — (присутствие, камерность, близость) определяет для слушателя кажущийся размер пространства, в котором он слушает музыку. Этот параметр определяется разницей во времени между прямым звуком и первым отраженным звуком. Также, частично определяется общей воспринимаемой громкостью звучания. Для оперных залов, разница во времени прихода прямого звука и первого отражения для слушателей, сидящих в центре зала, составляет 15–30 мс.

Ясность, различимость (Clarity, Definition) — эти параметры характеризуют степень, с которой отдельные звуки в музыкальном произведении четко разделяются друг от друга. Различимость подразделяют на «горизонтальную» и «вертикальную». Горизонтальная относится к звукам, следующим друг за другом, вертикальная — к звучащим одновременно. Коэффициент ясности C_{80} , для традиционной классической музыки лежит в пределах $C_{80} = (4 \pm 2)$ дБ (на расстоянии от источника, равном r — радиусу чуткости).

Ширина источника (ASW) и Окружение звуком (LEV) — характеризуют такой параметр как пространственность, который в свою очередь, характеризуется

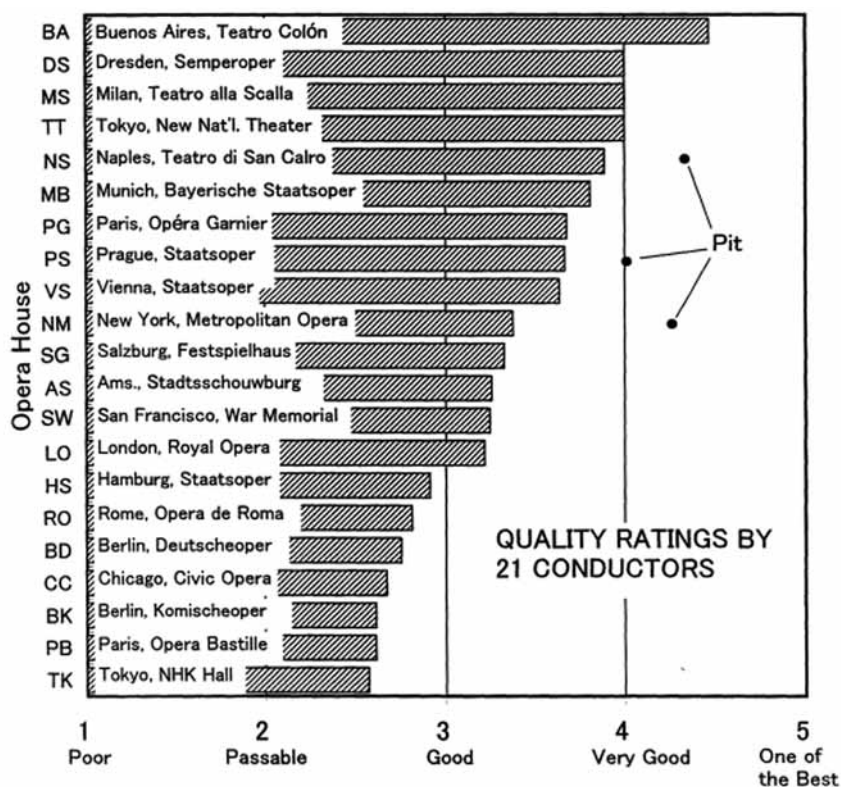


Рис. 1. Экспертная оценка качества акустических свойств оперных залов

Таблица 3

Субъективные критерии	Объективные критерии
Интимность (Intimacy)	ITDG, G_{0-inf} , G_{0-80} , C80 низкочастотная звуковая энергия, боковая звуковая энергия
Ясность, различимость (Clarity, Definition)	C80 (музыка), C50 (речь), TS
Ширина источника (ASW)	LG_{0-80} , LF_{0-80} , $IACC_{0-80}$
Окружение звуком (LEV)	$Gperc_{80-inf}$, LF_{80-inf} , $IACC_{80-inf}$
Громкость (Loudness)	G , G_{re}
Жизненность, полнота (Reverberance, Leveness, Fullness)	RT30, EDT, EDT350–380, C80 (как коррелят полноты)
Тембр (Timbre)	График значений EDT для октавных полос
Тональный баланс (Tonal balance)	DL
Высокие частоты (Treble)	TR
Теплота (Warmth)	$G_{weighted}$, Early bass level, Bass RT ratio
Текстура (Texture)	Objective texture (анализ огибающей импульсной характеристики)

ощущением окружения звуком слушателя. Первая составляющая связана с прямым источником звука и уровнем боковых отражений: чем выше уровень боковых отражений в помещении, тем больше кажущееся расширение источника. Кажущаяся ширина звукового источника связана также с уровнем громкости на низких частотах, в основном в области частот 125 и 200 Гц. Так же значительная связь ширины источника звука наблюдается с коэффициентом внутрислуховой кросс-корреляции сигнала. Для лучших по качеству звучания оперных залов мира, значение этого параметра лежит в пределах 0,3–0,6.

Окружение, обертывание звуком (LEV) связано с ощущением позднего ревербирующего звука, поступающего со всех сторон (после 80 мс). Оно определяется особенностями конструкции зала, наличия в нем рассеивающих нерегулярностей. Так же влияет расположение слушателя относительно стен и других отражателей. Наиболее хорошее месторасположение для этого параметра, является центр зала.

Громкость (Loudness) определяется субъективным ощущением плотности звуковой энергии на месте прослушивания и оценивается слушателем в соответствии с его ожиданиями.

Жизненность, полнота (Reverberance, Leveness, Fullness) — этот параметр связан с субъективной оценкой характера реверберационных процессов в помещении. Он определяется длительностью воспринимаемой реверберации. Беранек (L. Beranek) определяет его как «субъективный термин, соответствующий в основном времени реверберации на частотах 350–1400 Гц» [16]. Пространство с минимальными показателями характеризуется как «мертвое», с максимальными — «живое». Преобладание поздней звуковой энергии в концертном зале вызывает у слушателя ощущение полноты звучания. Реверберационный звук заполняет паузы между последовательно извлекаемыми нотами, отсюда и происходит термин «полнота». Оптимальное время реверберации на средних частотах для оперы, составляет 1,3–1,9 с

Тембр (Timbre) — понятие сложное и многогранное. Он зависит от структуры звука: в момент установления звучания (атаки), в стационарный период и в момент спада. Акустические свойства помещения влияют на все этапы звучания и, соответственно, на воспринимаемый тембр. Также существенно влияет на спектральный состав музыкальных и речевых сигналов структура распределения резонансных частот в помещении.

Тональный баланс (Tonal balance) — показывает сбалансированность звучания низких и высоких частот в пространстве.

Высокие частоты (Treble, Brilliance) В работе Беранека [17] brilliance определяется как чистый, звонкий звук, богатый гармониками. Бриллиантовый звук имеет выраженные, медленно затухающие высокие частоты. Высокий регистр связывают с поздней высокочастотной звуковой энергией. Наибольшей корреляцией с этим критерием обладает объективный параметр коэффициент высоких частот (Treble Ratio, TR), определяемый как отношение энергии позднего (после 80 мс) высокочастотного звука (4 кГц) к энергии позднего среднечастотного звука (1–2 кГц).

Теплота (Warmth) зависит от отношения времени реверберации на низких частотах к времени реверберации на средних. Время реверберации на низких частотах должно быть равно или больше (примерно на 20 %) времени реверберации на средних частотах. Теплота субъективно определяется как звучность басов по сравнению со звучностью средних частот.

Текстура (Texture) Этот параметр связан с субъективными ощущениями, которые определяются структурой первых дискретных отражений, разницей во времени между приходом прямого звука и первого отражения (а также между приходом второго и третьего отражения и т. д.) и соотношением амплитуд между этими отражениями.

Хорошая текстура требует большого числа ранних отражений, расположенных на временной шкале упорядоченно, но не абсолютно точно относительно друг друга, без доминирования какого-либо отдельного отражения над другими.

Таким образом, за последнее время были проведены комплексные работы, основанные на представленных в данной статье методах оценки акустических качеств оперных залов, которые позволяют получить совокупность объективных параметров и, связанных с ними субъективных критериев, с помощью которых можно достаточно полно оценить акустическое качество звучания.

В настоящее время проводятся исследования акустических свойств оперных театров Санкт-Петербурга на предмет соответствия полученных результатов вышеуказанным параметрам. Эти исследования будут чрезвычайно ценны для решения соответствующих вопросов менеджмента музыкального театра, для сохранения залов, при возможной реставрации, для проектирования новых оперных залов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рустамов А. Р. Звуковой образ пространства в структуре художественного языка звукорежиссуры: дис. канд. искусств. СПб., 2013. 195 с.
2. Acoustics Simulation Software of Odeon // Odeon Room Acoustics Software. URL: <http://www.odeon.dk/content/acoustics-simulation-software> (дата обращения: 17.02.2016).
3. Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis // EASERA Universal Measuring Platform. URL: <http://easera.afmg.eu/index.php/es-software-en.html> (дата обращения: 17.02.2016).
4. Aurora for Adobe Audition // Aurora Plug-ins. URL: http://www.aurora-plugins.it/Aurora_XP/index.htm (дата обращения: 17.02.2016).
5. Building acoustics // Brüel & Kjær. URL: <http://www.bksv.com/Products/analysis-software/acoustics/building-acoustics> (дата обращения: 17.02.2016).
6. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture. N. Y.: Springer, 2004. 661 с.
7. Алдошина И. А., Притмс Р. Музыкальная акустика. Учебник. СПб.: Композитор. Санкт-Петербург, 2006. 720 с.
8. Beranek L., Hidaka T. Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americans // J. Acoust. Soc. Am. 2000. № 107 (1). 16 с.
9. Beranek L. Concert Hall Acoustic // J. Acoust. Soc. Am. 1992. № 56 (7/8). 13 с.

10. *Beranek L.* Music, Acoustics and Architecture. N. Y.: Acoustical Society of America, 1996. 491 с.
11. *Long M.* Architectural acoustics. UK.: Elsevier, 2006. 844 с.
12. *Ando Y.* Concert hall acoustics. Berlin: Springer. 1985. 154 с.
13. *Ando Y.* Opera House Acoustics Based on Subjective Preference Theory. Tokyo.: Springer. 2015. 179 с.
14. *Ahnert W., Steffen F.* Sound reinforcement engineering; fundamentals and practice. London.: E & FN Spon. 1999. 412 с.
15. *Макриненко Л. И.* Акустика помещений общественных зданий. М.: Стройиздат. 1986. 173 с.
16. *Фурдеев В. В.* Акустические основы вещания. М.: Связиздат. 1960. 103 с.
17. *Barron M.* Auditorium Acoustics and Architectural Design. London.: Chapman & Hall. 1993. 489 с.