

АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ / ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND STRUCTURES. CREATIVE CONCEPTS OF  
ARCHITECTURAL ACTIVITY

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2>

АРХИТЕКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОЙ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Научная статья

Исаков Ю.И.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000 -0002- 3312-7329;

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова, Новосибирск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (isakoustik[at]gmail.com)

**Аннотация**

Обсуждается подход к архитектурному проектированию зрительных залов. Предлагается использовать Acoustic Performance-Based Design (APBD) архитектурное проектирование, основанное на *акустической производительности*. *Акустическая производительность* оценивается по комплексу перцептивных параметров звукового поля аудитории (зрительного пространства). Процесс восприятия звука представлен в виде системы доменов: физического, сенсорно-перцептивного и когнитивно-аффективного. Особенность подхода состоит в том, что аффективные значения перцептивных параметров звукового поля аудитории контролируются, начиная с этапа концепции зрительного зала. Архитектурное проектирование зрительных залов на основе *акустической производительности* можно считать новой парадигмой, позволяющей избежать строительства зрительных залов с акустическими ошибками.

**Ключевые слова:** архитектурное проектирование, акустическая производительность, зрительный зал, звуковое поле, перцептивные параметры.

ARCHITECTURAL DESIGN OF AUDITORIUMS BASED ON ACOUSTIC PERFORMANCE

Research article

Isakov Y.I.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000 -0002- 3312-7329;

<sup>1</sup>Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts named after A.D. Kryachkova, Novosibirsk, Russian Federation

\* Corresponding author (isakoustik[at]gmail.com)

**Abstract**

An approach to the architectural design of auditoriums is discussed. It is proposed to use Acoustic Performance-Based Design (APBD) architectural design based on *acoustic performance*. *Acoustic performance* is evaluated by a set of perceptual parameters of the sound field of the auditorium (visual space). The process of sound perception is represented as a system of domains: physical, sensory-perceptual and cognitive-affective. The specificity of the approach is that the affective values of the perceptual parameters of the sound field of the audience are controlled starting from the stage of the auditorium concept. Architectural design of auditoriums based on *acoustic performance* can be regarded as a new paradigm to avoid building auditoriums with acoustic errors.

**Keywords:** architectural design, acoustic performance, auditorium, sound field, perceptual parameters.

**Введение**

Один из современных подходов к архитектурному проектированию – это Performance-Based Design (PBD), проектирование, основанное на производительности. В [1] Х. Ши анализирует как лучше интерпретировать термин «Performance»: «производительность», «эффективность», «исполнение», «характеристики» и т.д. и выбирает именно «производительность». Он же выделяет три категории производительности: производительность структуры, производительность физической среды, эти категории могут быть определены количественно и третья производительность – это эстетические и культурные факторы, которые не подлежат количественной оценке. Концепция PBD появилась в 1970-х годах и стала наиболее привлекательна для архитекторов в наши дни благодаря техническому прогрессу в компьютерном моделировании и в частности, развитию компьютерного параметрического моделирования. PBD знаменует собой сдвиг парадигмы от традиционного «создания формы» к подходу «нахождения формы». К характеристикам физической среды относятся акустические характеристики зрительного зала, следовательно, Acoustic Performance-Based Design (APBD) архитектурное проектирование, основанное на акустической производительности [2] является наиболее перспективным подходом к архитектурному проектированию зрительного зала. Примерами такого подхода к проектированию могут выступать знаменитые филармонии, построенные в XXI веке: Парижская филармония и Эльбская.

**Филармония Парижа, Франция**

Архитектура: Ateliers Jean Nouvel, Brigitte Metra Associes. Акустика: Marshall Day Acoustics, Nagata Acoustics, Studio DAP, Kahle Acoustics, Altia Acoustique, Jean-Paul Lamoureux and ASC. Париж, Франция, 2015год [2]. Количество

мест: 2400; Объем помещения: 37 700 м<sup>3</sup>. Время реверберации (октавный диапазон 500 Гц). Зал без зрителей и музыкантов: 3,1 секунды. Занятый зал: 2,6 секунды [3].

Сэр Гарольд Маршалл сказал в интервью: «Звук – это часть пространства, которое создает архитектор. Серьезная ошибка думать, что звук – это то, что можно исправить после события, потому что форма помещения и звук должны быть одним и тем же в восприятии публики и особенно в восприятии музыкантов» [4]. Он выделяет пять основных характеристик зрительного зала для симфонической музыки: музыкальная динамика, ясность звучания, реверберация, ощущение «окутанности» звуком и условия для ансамблевой игры музыкантов [4]. Первая особенность этого зала – это двойная оболочка. Внутренняя для создания ранних отражений на зрительских местах и на сцене, внешняя для удлинения реверберационного процесса, вторая особенность – это «летающие» балконы для создания охвата зрителей звуком со всех сторон (рис.1). Третья особенность – это улучшенная звукоизоляция, в зале очень тихо, что позволяет играть пиано – пианиссимо. Проектирование зрительного зала включало как масштабные модели, так и параметрическое моделирование и акустическое моделирование с помощью программ Grasshopper, Maya, Odeon [2]. Процесс оптимизации геометрии акустических «облаков» был осуществлен с помощью параметрического моделирования. Критериями для оптимизации являлись времена задержек и соотношение энергий прямого и отраженного звука на зрительских местах. Затем с помощью акустического моделирования в программе Odeon оценены результаты оптимизации. Такое моделирование показало, что процесс оптимизации приводит к значительному повышению акустической производительности без ущерба для архитектурной концепции [2].

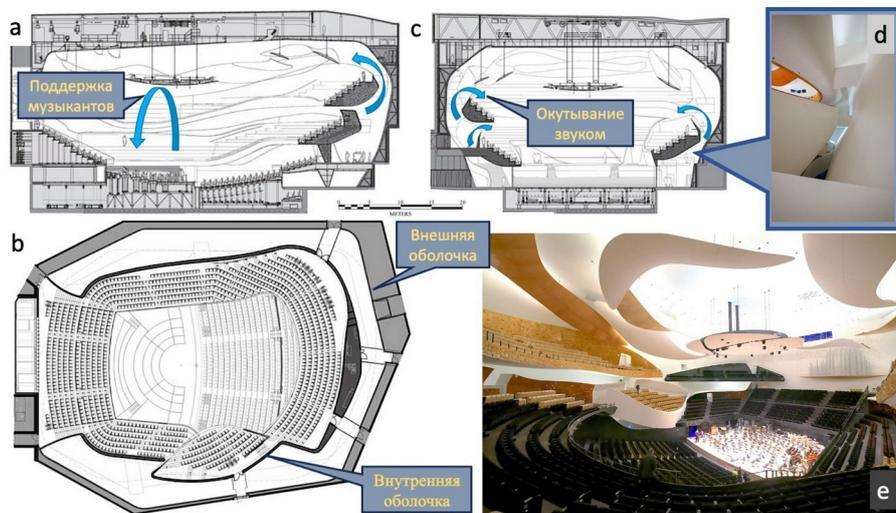


Рисунок 1 - Филармония Парижа:

*a* – продольный разрез; *b* – план; *c* – поперечный разрез; *d* – фото пространства между оболочками; *e* – фото зрительного зала

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.1>

Примечание: по ист. [3]

### Эльбская филармония, Гамбург, Германия

Архитектура: Herzog & de Meuron. Акустика: Nagata Acoustics [5]. Место: Гамбург, Германия, 2017 год. Количество мест: 2100; Объем помещения: 23000 м<sup>3</sup>; Время реверберации, Т30 без зрителей и оркестра: 2,4 сек. Занятый: 2,3 сек. Сила звука, G: 5,4 дБ; Время раннего затухания, EDT: 2,3 сек.; Прозрачность музыки, C80: 0,3 дБ; Центральное время Ts: 135мс.

Такие высокие акустические параметры получены тоже благодаря акустическому моделированию и параметрическому проектированию уникальных акустических панелей (рис.2). Всего спроектировано 10000 акустических панелей с неповторяющимся рельефом. Рельеф поверхности панелей разрабатывался с помощью параметрического моделирования или генеративного моделирования и оптимизации APBD. Базовый рельеф – морская ракушка – варьируется по глубине от 10 до 90 мм и ширине от 40 до 160 мм, в зависимости от места расположения и требуемой длины волны [2]. На сегодняшний день – это один самых совершенных в акустическом смысле зрительных залов для симфонической музыки.

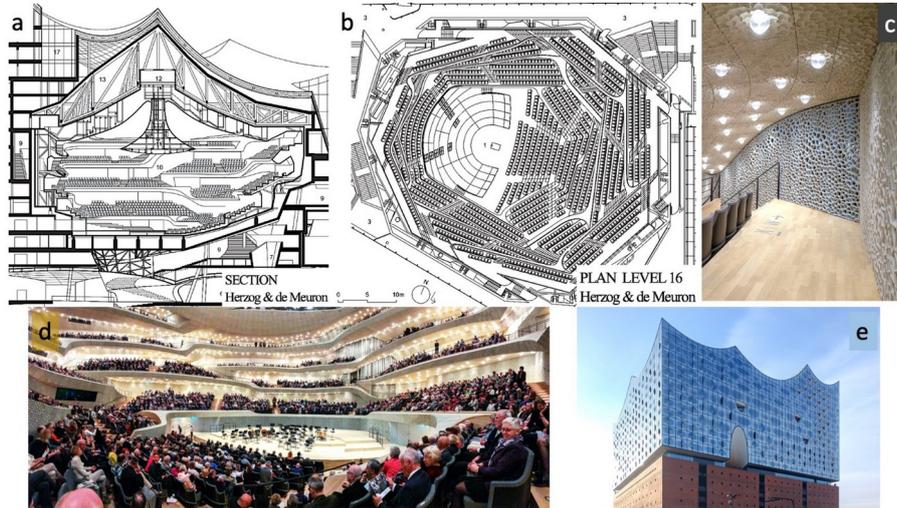


Рисунок 2 - Эльбская филармония, Гамбург:  
*a* – продольный разрез; *b* – план; *c* – стены и потолок из акустических панелей; *d* – фото зрительного зала; *e* – фото здания  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.2>

Примечание: по ист. [5]

**Понятие акустической производительности архитектуры зрительного зала**

В общей схеме процесса создания (возникновения) звука, передачи и восприятия звука слушателем, процесс передачи звука от источника к приемнику предлагается называть *акустической производительностью* архитектуры зрительного зала (рис.3).



Рисунок 3 - Взаимосвязь процессов создания, передачи и восприятия звука  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.3>

Примечание: авторский

По сути, *акустическая производительность* – это работа, выполняемая архитектурой зрительного зала в процессе передачи звука от источника к слушателю. Оценка *акустической производительности* архитектуры зрительного зала производится по параметрам звукового поля аудитории (зрительной зоны). В этом случае под звуковым полем аудитории будем понимать плоскость, объединяющую органы слуха зрителей. Человек – слушатель и его комфортное восприятие аудиопроизведения – вот основной критерий оценки акустической производительности зрительного зала. Это хорошо согласуется с философией Протагора: «человек – мера всех вещей» [6]. А также с основной задачей Витрувия, которую он ставил перед архитектором театра: стараться, «... чтобы всякий звучащий со сцены *голос* доходил до ушей слушателей отчетливее и приятнее» [7, С. 92]. Лео Беранек изучил термины, применяемые



который описывается впечатлениями услышанного звука на основе слухового опыта. Осмысленное восприятие позволяет сформировать зоны оптимумов значений перцептивных параметров. Таким образом аффективный домен – это система оптимумов, основанная на эстетике и культуре слушателя, позволяющая скорректировать требования к физическим параметрам зрительного зала. Для проектирования очень важно опираться на те параметры, которые можно измерить или спрогнозировать. Например, время *стандартной реверберации* RT60 в помещении – это величина физического домена, которую можно измерить T20 (T30) и которой в настоящее время пользуются в архитектурной акустике зрительного зала. Пропуская через сенсорный фильтр, слушатель оценивает *время воспринимаемой реверберации*, которое может быть измерено как время раннего затухания EDT – это уже величина перцептивного домена. Идеальный случай, когда стандартное и воспринимаемое время реверберации совпадают, как это наблюдается в зрительном зале Эльбской филармонии (см. выше). Изучением процесса сенсорно-перцептивного восприятия занимается наука психоакустика. Развитие технологий измерений позволяет более детально изучать параметры восприятия и на данном этапе сформирован перечень перцептивных параметров, которыми уже можно оценить в цифрах акустические параметры звукового поля, следовательно, и акустическую производительность. Пропуская через когнитивный фильтр, слушатель отмечает *полноту тона* – это характеристика аффективного домена. Компромисс между *ясностью звучания* и *полнотой тона* (полнота звучания) достигается при оптимальном времени реверберации для исполняемого аудиопроизведения. В свою очередь, оптимальное время реверберации для аудиопроизведения определяется жанром, эстетикой и культурой. Определив величину оптимального времени реверберации, можно скорректировать архитектуру зрительного зала, чтобы добиться наилучшего звучания данного произведения в данном зале. Следовательно, в идеальных условиях, акустическая производительность данного зрительного зала должна быть оптимальна для данного аудиопроизведения и жанра.

### Перечень перцептивных параметров ИСО 3382 и их недостатки

Уже существует стандарт ИСО 3382 [11], в котором приводятся перцептивные параметры звукового поля, их типовые значения и пороги восприятия изменения параметров (табл.1). В стандарте нет рекомендаций по оптимальному значению перцептивных параметров, в нем лишь описана теория каждого параметра и метод измерений.

Таблица 1 - Перцептивные параметры звукового поля зрительного зала

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.6>

Субъективный параметр, оцениваемый слушателем	Акустическая величина (наименование и обозначение)	Диапазон усреднения по октавным полосам <sup>a</sup> , Гц	JND Ощущаемое отличие	Типичный диапазон <sup>b</sup>
Ощущаемая реверберация	Время раннего затухания ( <i>EDT</i> ), с	от 500 до 1000	5%	(1,0;3,0) с
Субъективный уровень звука	Сила звука <i>G</i> , дБ	от 500 до 1000	1дБ	(-2; +10) дБ
Ощущаемая ясность звука	Прозрачность музыки <i>C<sub>80</sub></i> , дБ	от 500 до 1000	1дБ	(-5; +5) дБ
	Четкость речи <i>D<sub>50</sub></i>	от 500 до 1000	0,05	(0,3;0,7)
	Центральное время <i>T<sub>s</sub></i> , мс	от 500 до 1000	10мс	(60;260) мс
Пространственность. Кажущаяся ширина источника ( <i>ASW</i> )	Ранняя боковая энергетическая составляющая <i>J<sub>LF</sub></i> или <i>J<sub>LFC</sub></i>	от 125 до 1000	0,05	(0,05;0,35)
Окружение слушателя ( <i>LEV</i> )	Поздний боковой уровень звука <i>L<sub>J</sub></i>	от 125 до 1000	Не известно	(-14; +1) дБ

Примечание: *a* - усреднение по октавным полосам означает арифметическое среднее для величин в октавных полосах, за исключением уровня, который должен усредняться энергетически; *b* - усредненные по частоте значения в отдельных точках измерений в незаполненных концертных и многоцелевых залах объемом до 25000 м<sup>2</sup>

Однако проектирование звучащих залов все еще остается в большей степени архитектурным искусством. Исследователи этого феномена Киркегор и Галсруд [12] считают, во-первых, что приведенные в стандарте перцептивные параметры частотно ограничены и не дают полного представления об архитектурной акустике зрительного зала. Диапазоны частот стандартных параметров значительно уже, чем реальных музыкальных инструментов и нашего слухового восприятия (рис.6). Во-вторых, результаты измерений и вычислений усредняются

по звуковому полю аудитории и сглаживают аномалии на конкретных слушательских местах. В-третьих, для измерений используется всенаправленный источник звукового сигнала, но реальные музыкальные инструменты и голос имеют узкую направленность и особый спектр. Это также отмечается в работе [13], где для оценки параметров звукового поля предлагается использовать направленный источник сигналов.

Октавные полосы с центральными частотами в Гц										
16	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
Частотный диапазон слуха молодого человека										
Частотный диапазон анализа параметров										
Усреднение в диапазоне октав 500 Гц и 1000 Гц.										
Основные частоты >50% оркестровых инструментов.										
Части музыкального спектра не учитываются в параметрах										

Рисунок 6 - Диапазоны частот слухового восприятия и измерений  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.7>

Примечание: по ист. [12]

### Выбор формы зрительного зала на основе акустической производительности

Оценивать акустическую производительность зрительного зала необходимо на каждом этапе проекта, начиная с концепции, а не на последнем этапе подбора акустических материалов, чтобы получить рекомендованное значение времени реверберации в зависимости от объема. Концептуальный этап – это выбор формы зрительного зала. Оценка акустической производительности простых архитектурных форм зрительного зала по значениям перцептивных параметров звукового поля [14], позволяет выбрать форму, наиболее удовлетворяющую конкретному назначению зрительного зала (рис.7). У каждой формы есть свои преимущества, например, веерная форма способствует большей четкости речи (D50) и прозрачности музыки (C80). Обратный веер – большей пространственности звучания (LF), а многоугольная форма большей силе звука (G). Заметим, что прямоугольная форма имеет наименьшую четкость речи и прозрачность музыки, а пространственность звучания и сила звука имеют средние значения из 4-х исследованных форм. И эту зависимость акустической производительности от формы практически невозможно исправить выбором акустических материалов на последнем этапе проектирования зрительного зала.

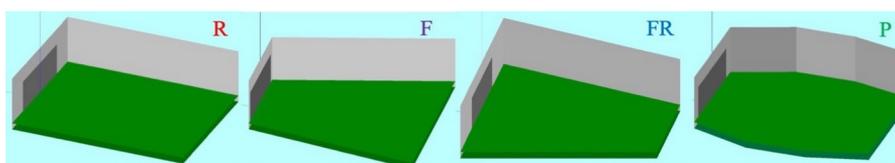


Рисунок 7 - Модели зрительных залов 4-х форм:  
R - прямоугольник; F - веер; FR - обратный веер; P - многоугольник  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.8>

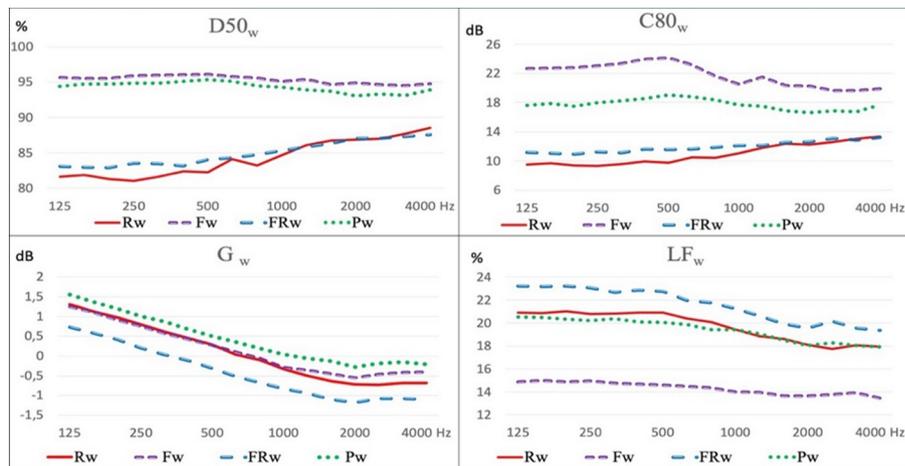


Рисунок 8 - Графики зависимости значений акустических параметров  $D50_w$ ,  $C80_w$ ,  $G_w$ ,  $LF_w$  от частоты у 4-х форм зрительных залов с отражающими боковыми стенами  
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2024.48.2.9>

### Заключение

Предлагаемое понятие *акустическая производительность* архитектуры зрительного зала включает в себя все параметры звукового поля, которые могут быть измерены в реальном зале или спрогнозированы с помощью моделей. Дальнейшие исследования в архитектурной акустике, музыкальной акустике, психоакустике и электроакустике позволят дополнить и может даже пересмотреть параметры звукового поля, но архитектурное проектирование зрительного зала на основе *акустической производительности* можно считать новой парадигмой, которая спустя двадцать веков приближает нас к философии Витрувия: «*Всякий, кто усвоил себе эту теорию, сможет ...довести театр до того совершенства, которое отвечает природе голоса и наслаждению слушателей*» [1, С. 96].

### Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю, кандидату архитектуры, доценту ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крычкова» Лихачеву Евгению Николаевичу.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Acknowledgement

The author expresses their gratitude to their scientific supervisor, PhD in Architecture, Associate Professor of FSBEI HE "Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts named after A.D. Kryachkov" Likhachev Evgeny Nikolaevich.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

- Xing S. Performance-based and performance-driven architectural design and optimization / S. Xing // Front. Arch. Civ. Eng. — 2010. — Vol. 4. — P. 512-518.
- Shtrepi. L. Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice / L. Shtrepi, A. Astolfi, E. Badino // Acoustics. — 2020. — Vol. 2. — p. 246–278. — DOI: 10.3390/acoustics2020016
- Philharmonie De Paris // Nagata Acoustics International. — 2022. — URL: <https://www.nagata-i.com/portfolio/philharmonie-de-paris/> (accessed: 05.12.2023).
- Interview with Sir Harold Marshall, Principal Acoustician of the Philharmonie de Paris, pioneer of lateral reflections and great innovator in concert hall design. — 2018. — URL: <https://www.marshallday.com/news/2018/sir-harold-marshall-on-philharmonie-de-paris/> (accessed: 05 12 2023).
- Elbphilharmonie Hamburg, Grosser Saal. — 2017. — URL: [https://nagataacoustic.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2019/06/Elbphilharmonie\\_NAGATA.pdf](https://nagataacoustic.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2019/06/Elbphilharmonie_NAGATA.pdf) (accessed: 05 12 2023)
- Летучих А.Н. Основные идеи древнегреческой софистики / А.Н. Летучих // Бюллетень медицинских Интернет-конференций. — 2017. — Т. 7. — № 6.
- Витрувий. Десять книг об архитектуре / Витрувий; пер. Ф.А. Петровского. — Москва: Издательство Всесоюзной Академии архитектуры, 1936. — Т. I. Текст трактата. — 331 с.
- Beranek L. Concert Halls and Opera Houses. Music, Acoustics and Architecture / L. Beranek. — New-York: Springer: Verlag, 2004.

9. Lokki T. Wheel of Concert Hall Acoustics / T. Lokki, A. Kuusinen // *Acta Acustica United with Acustica*. — 2017. — Vol. 103. — P. 185-188. — DOI: 10.3813/AAA.919046.
10. Kaplanis N. Perception of Reverberation in Small Rooms: A Literature Study / N. Kaplanis, S. Bech, S.H. Jensen [et al.] // *AES 55th International Conference*. — Helsinki, 2014.
11. ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 Акустика. Измерение акустических параметров помещений. — 2014. — Ч. 1. Зрительные залы.
12. Kirkegaard L.A. In Search of a New Paradigm: How Do Our Parameters and Measurement Techniques Constrain Approaches to Concert Hall Design? / L.A. Kirkegaard, T. Gulsrud // *Acoustics Today*. — 2011. — Vol. 7. — № 1. — P. 7-14.
13. Исаков Ю.И. Особенности архитектурного акустического проектирования зрительного зала с круговым расположением зрителей / Ю.И. Исаков, Е.Н. Лихачев // *Sciences of Europe*. — 2021. — С. 18-24.
14. Исаков Ю.И. Влияние простых архитектурных форм на акустическое качество зрительного зала / Ю.И. Исаков, Е.Н. Лихачев // *Приволжский научный журнал*. — 2023. — №4. — С. 223-231.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Xing S. Performance-based and performance-driven architectural design and optimization / S. Xing // *Front. Arch. Civ. Eng.* — 2010. — Vol. 4. — P. 512-518.
2. Shtrepi. L. Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice / L. Shtrepi, A. Astolfi, E. Badino // *Acoustics*. — 2020. — Vol. 2. — p. 246-278. — DOI: 10.3390/acoustics2020016
3. Philharmonie De Paris // Nagata Acoustics International. — 2022. — URL: <https://www.nagata-i.com/portfolio/philharmonie-de-paris/> (accessed: 05.12.2023).
4. Interview with Sir Harold Marshall, Principal Acoustician of the Philharmonie de Paris, pioneer of lateral reflections and great innovator in concert hall design. — 2018. — URL: <https://www.marshallday.com/news/2018/sir-harold-marshall-on-philharmonie-de-paris/> (accessed: 05 12 2023).
5. Elbphilharmonie Hamburg, Grosser Saal. — 2017. — URL: [https://nagataacoustic.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2019/06/Elbphilharmonie\\_NAGATA.pdf](https://nagataacoustic.wpenginepowered.com/wp-content/uploads/2019/06/Elbphilharmonie_NAGATA.pdf) (accessed: 05 12 2023)
6. Letuchih A.N. Osnovnye idei drevnegrecheskoy sofistiki [Basic ideas of ancient Greek sophistry] / A.N. Letuchih // *Bjulleten' medicinskih Internet-konferencij* [Bulletin of Medical Internet Conferences]. — 2017. — Vol. 7. — № 6. [in Russian]
7. Vitruvij. Desjat' knig ob arhitekture [Ten Books on Architecture] / Vitruvij; transl. by F.A. Petrovsky. — Moscow: Publishing House of the All-Union Academy of Architecture, 1936. — Vol. I. Text of the treatise. — 331 p. [in Russian]
8. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses. Music, Acoustics and Architecture / L. Beranek. — New-York: Springer: Verlag, 2004.
9. Lokki T. Wheel of Concert Hall Acoustics / T. Lokki, A. Kuusinen // *Acta Acustica United with Acustica*. — 2017. — Vol. 103. — P. 185-188. — DOI: 10.3813/AAA.919046.
10. Kaplanis N. Perception of Reverberation in Small Rooms: A Literature Study / N. Kaplanis, S. Bech, S.H. Jensen [et al.] // *AES 55th International Conference*. — Helsinki, 2014.
11. GOST R ISO 3382-1-2013 Akustika. Izmerenie akusticheskikh parametrov pomeschenij [GOST R ISO 3382-1-2013, Acoustics. Measurement of Room Acoustic Parameters]. — 2014. — Pt. 1. Performance spaces. [in Russian]
12. Kirkegaard L.A. In Search of a New Paradigm: How Do Our Parameters and Measurement Techniques Constrain Approaches to Concert Hall Design? / L.A. Kirkegaard, T. Gulsrud // *Acoustics Today*. — 2011. — Vol. 7. — № 1. — P. 7-14.
13. Isakov Ju.I. Osobennosti arhitekturnogo akusticheskogo proektirovaniya zritel'nogo zala s krugovym raspolozheniem zritelej [Specific Features of Architectural Acoustic Design of an Auditorium with a Circular Arrangement of Spectators] / Ju.I. Isakov, E.N. Lihachev // *Sciences of Europe*. — 2021. — P. 18-24. [in Russian]
14. Isakov Ju.I. Vlijanie prostyh arhitekturnyh form na akusticheskoe kachestvo zritel'nogo zala [Influence of Simple Architectural Shapes on the Acoustic Quality of the Auditorium] / Ju.I. Isakov, E.N. Lihachev // *Privolzhsnij nauchnyj zhurnal* [Volga Scientific Journal]. — 2023. — №4. — P. 223-231. [in Russian]