

УДК: 534.84

OECD: 1.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.39.27.002

Оптимизация акустических параметров зрительного зала для повышения безопасности труда сотрудников образовательного учреждения

Куликов А.С.^{1*}, Васильева А.В.²

¹Студент, ²К.т.н., доцент

^{1,2}Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика»,
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Акустический дискомфорт в образовательных учреждениях выступает скрытым, но критически значимым фактором риска, приводящим к перенапряжению голосового аппарата лекторов и снижению концентрации внимания слушателей, что определяет высокую актуальность данного исследования. Целью работы является улучшение акустических параметров актового зала объемом 4320 м³ для создания безопасных и эргономичных условий труда преподавателей и персонала. Основные задачи включают проведение комплексных натурных измерений, построение цифровой модели помещения и разработку комплекса корректирующих мероприятий. В ходе работы применялись методы инструментального анализа звукового поля, а также метод лучевой трассировки в среде Pachyderm Acoustic. Результаты исследования выявили превышение нормативного времени реверберации на средних частотах до 55% и критическое снижение индекса передачи речи (до 0,42) в дальней зоне помещения. На основе статистической теории вычислен требуемый фонд звукопоглощения и предложен комплекс архитектурно-акустических решений: монтаж минераловатных панелей, установка жесткого акустического козырька и замена кресел. Данные меры позволяют достичь нормативного времени затухания в 1,2 с, повышая разборчивость речи и нивелируя профессиональные риски.

Ключевые слова: акустика помещений, время реверберации, индекс передачи речи, компьютерное моделирование, безопасность труда, звукопоглощающие материалы, акустический комфорт

Optimization of the acoustic parameters of the assembly hall to improve the occupational safety of teachers

Kulikov A.S.^{1*}, Vasileva A.V.²

¹Student, ²Ph.D., Associate Professor

^{1,2}Department of Technosphere Safety and Computational Mechanics, Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

Acoustic discomfort in educational institutions acts as a hidden but critically important risk factor, leading to overstrain of the vocal apparatus of lecturers and a decrease in listener concentration, which

*E-mail: artmkulikov@yandex.ru (Куликов А.С.)

determines the high relevance of this study. The aim of the work is to improve the acoustic parameters of an assembly hall with a volume of 4320 m³ to create safe and ergonomic working conditions for teachers and technical staff. The main objectives include conducting comprehensive in-situ measurements, building a verified digital model of the room, and developing a set of corrective measures. The work employed instrumental sound field analysis methods, as well as the ray tracing method in the Pachyderm Acoustic environment. The results revealed an excess of the standard reverberation time at medium frequencies by up to 55% and a critical decrease in the speech transmission index (down to 0.42) in the far zone of the room. Based on statistical theory, the required sound absorption area was calculated, and a set of architectural and acoustic solutions was proposed: installation of mineral wool panels, a rigid acoustic visor, and replacement of chairs. These measures make it possible to achieve a standard decay time of 1.2 s, increasing speech intelligibility and leveling occupational risks.

Keywords: room acoustics, reverberation time, speech transmission index, computer modeling, occupational safety, sound-absorbing materials, acoustic comfort

Введение

При проектировании крупных учебных и многоцелевых зрительных залов в современных образовательных учреждениях приоритетной задачей является не только создание выразительного архитектурного облика, но и формирование акустически безопасной среды для людей. С позиций техносферной безопасности и охраны труда, условия, в которых осуществляют свою профессиональную деятельность преподаватели, лекторы и технический персонал, напрямую зависят от акустического режима закрытого помещения.

Избыточная гулкость, высокий уровень реверберационного фона и плохая артикуляционная слышимость не только снижают эффективность усвоения образовательного материала, но и формируют серьезную психофизиологическую нагрузку. Большинство крупных залов, спроектированных несколько десятилетий назад, не были рассчитаны на использование мощных систем звукоусиления и мультимедийных проекторов. Также такие залы спроектированы без учета шумового воздействия источников, генерирующих дополнительный фоновый шум, таких как приточно-вытяжные системы вентиляции, устанавливаемые в пространстве зала и автотранспортные потоки с проникающим в помещение шумом [1]-[3].

Фундаментальной проблемой лекционных залов с высокой реверберацией является возникновение так называемого «эффекта Ломбарда» – неконтролируемого рефлекторного форсирования голоса спикером в попытках преодолеть маскирующий гул собственного отраженного голоса и фонового шума. При длительных речевых нагрузках (от 4 до 8 академических часов) избыточное подсвязочное давление приводит к микротравмам гортани, развитию функциональной дисфонии, фонастении и образованию доброкачественных фиброзных узлов на голосовых складках, что классифицируется как профессиональное заболевание. Параллельно с этим аудитория слушателей сталкивается с явлением «временной маскировки», когда мощные гласные звуки формируют длительный реверберационный хвост, перекрывающий короткие высокочастотные согласные, несущие основную смысловую информацию. Процесс непрерывной когнитивной расшифровки деградированного сигнала требует повышенного слухового усилия, вызывая быстрое умственное и психоэмоциональное истощение [2], [4].

Целью настоящего исследования является улучшение акустических параметров зрительного зала объемом 4320 м³ для создания безопасных условий труда преподавателей

и звукорежиссеров за счет снижения времени реверберации и повышения индекса передачи речи (STI) до нормативных значений.

1 Описание объекта и методов исследования

В качестве объекта исследования выбран актовый зал Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Данное помещение представляет собой классическое многофункциональное образовательное пространство в форме вытянутого параллелепипеда, предназначенное для проведения поточных лекций, научных конференций и массовых мероприятий.

Линейные параметры объекта, определенные на основе проектно-технической документации и натурных замеров, составляют: длина от сцены до задней стены – 41,15 м, ширина – 17,5 м, высота потолка – 6 м. Общий строительный объем достигает 4320 м³, а площадь пола равна 720,12 м². Профиль зрительного зала является плоским (без амфитеатрального подъема), что физически затрудняет беспрепятственное прохождение прямого звука к удаленным рядам. Ограждающие конструкции представлены массивными оштукатуренными стенами, обладающими минимальным коэффициентом звукопоглощения, а зрительские места укомплектованы полностью деревянными жесткими креслами без текстильной обивки. Электроакустический комплекс зала спроектирован по двухпортальной напольной схеме (ground stack) с использованием широкополосных систем LEM ПР500 и сабвуферов E&M SAB2284, что в условиях жесткого прямоугольного объема провоцирует мощные низкочастотные резонансы и зоны акустической тени.

Для получения метрологически достоверных данных применялся измерительный комплекс, соответствующий требованиям ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 [5] и МЭК 60268-16 [6]. В качестве генератора тестового сигнала использовался всенаправленный додекаэдрический излучатель OED-SP360, установленный в рабочей зоне сцены. Регистрация спада звуковой энергии (с использованием розового шума) осуществлялась шумомером-анализатором спектра класса 1 «Экофизика-110А» с микрофонным капсюлем ВМК-205. Матрица измерений включала 12 уникальных комбинаций (3 позиции источника и 4 контрольные точки приемника, включая места в партере, центре, на рабочем месте звукорежиссера и в зоне дальних рядов – рисунок 1).

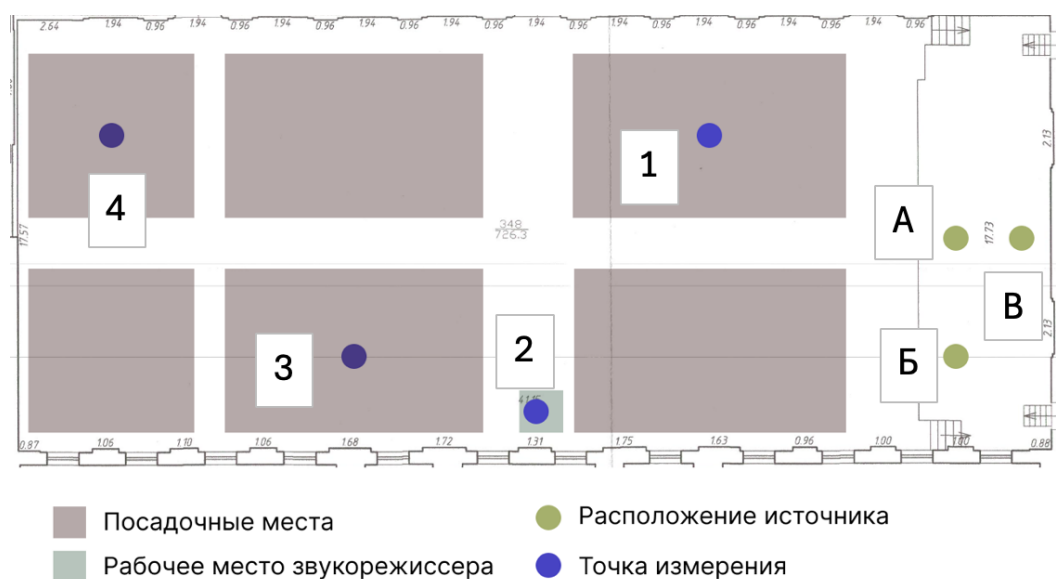


Рисунок 1 – Схема расположения источника и точек измерений

С целью разработки корректирующих мероприятий была построена геометрическая 3D модель зала в CAD-среде Rhinoceros. Акустическое моделирование производилось методом трассировки лучей в специализированном программном модуле Pachyderm Acoustic с генерацией от 50 000 до 100 000 лучей на источник. Валидация применения лучевых методов была подтверждена расчетом частоты Шрёдера, составившей 37,27 Гц, что существенно ниже исследуемого речевого диапазона (от 125 Гц) [7].

2 Анализ полученных результатов

Анализ экспериментальных данных, полученных с помощью программного комплекса Signal+, выявил глубокий дисбаланс звукового поля и наличие выраженных акустических дефектов среды.

В соответствии с нормативами СП 51.13330.2011 [8], для залов многоцелевого назначения объемом 4320 м³ нормативное время реверберации на средних частотах (500-1000 Гц) должно составлять 1,2 с. Результаты измерений в пустом зале продемонстрировали значения T₆₀ на уровне 1,46-1,61 с в данном диапазоне, что фиксирует превышение норматива на 21-55%. В низкочастотном диапазоне (100-200 Гц) время затухания достигало критических 2,05-2,27 с, формируя устойчивый низкочастотный гул, маскирующий речь.

Интегральная оценка разборчивости речи проводилась путем расчета индекса передачи речи (STI). В ближней зоне (Точка 1, партер) показатель STI составил 0,56-0,58, что соответствует градации «Удовлетворительно» за счет доминирования энергии прямого звука от порталных систем. Однако по мере удаления от сцены происходила значительная деградация сигнала. В центральной части зала (Точка 2) индекс упал до 0,47-0,49, на рабочем месте звукорежиссера (Точка 3) он составил 0,42-0,45, а на дальних рядах (Точка 4) зафиксировался на уровне 0,42-0,47 («Плохо» по шкале МЭК 60268-16 [6]). Индекс четкости D₅₀ в этих зонах снижался до 48-54%.

3 Мероприятия по улучшению акустической среды

Для нормализации характеристик зала был произведен расчет эквивалентной площади звукопоглощения по формуле Сэбина. При целевом времени T₆₀ = 1,2 с требуемый фонд звукопоглощения составил 579,6 м². Исходя из этого, в компьютерную модель был внедрен следующий комплекс инженерных средств коллективной защиты:

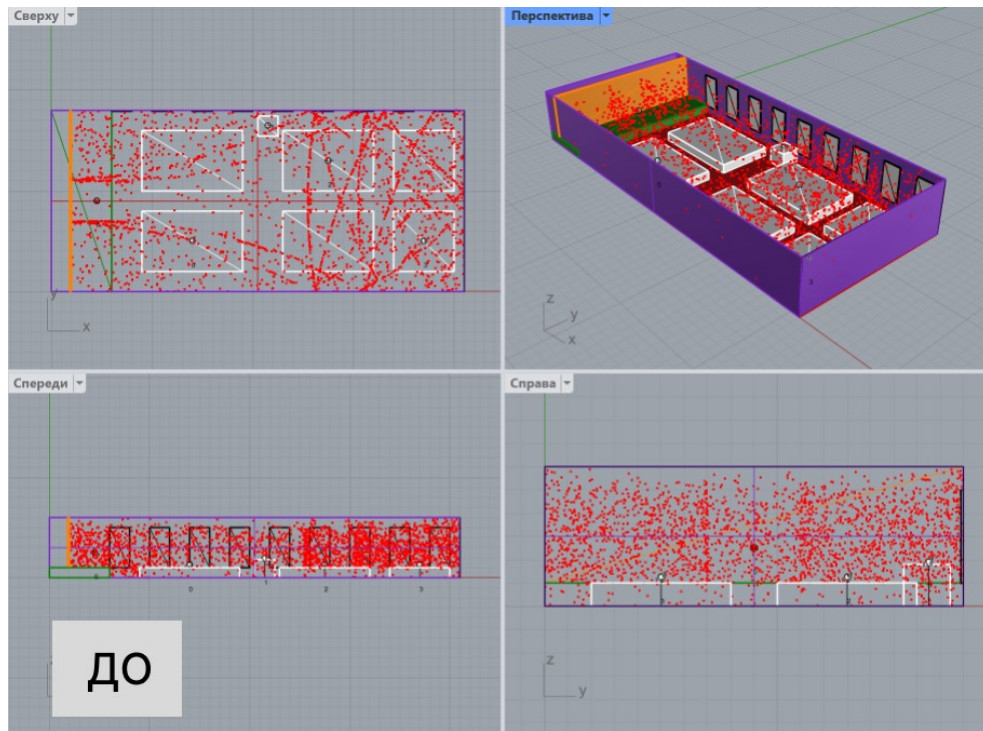
1. Монтаж звукопоглощающих панелей на основе минеральной ваты (толщиной 50 мм) на отnose 50 мм по всей площади задней стены. Данное решение (с коэффициентом поглощения $\alpha = 0,90-0,95$) направлено на полное устранение интенсивных поздних эхосигналов (театрального эха), маскирующих согласные звуки в центре зала.

2. Установка жесткого акустического козырька над сценическим пространством под углом 15°-25° к горизонту. Конструкция из ДВП перехватывает звуковую энергию до рассеивания в зоне колосников и формирует направленный поток полезных ранних отражений (в пределах 50 мс) в дальнюю часть зрительного зала.

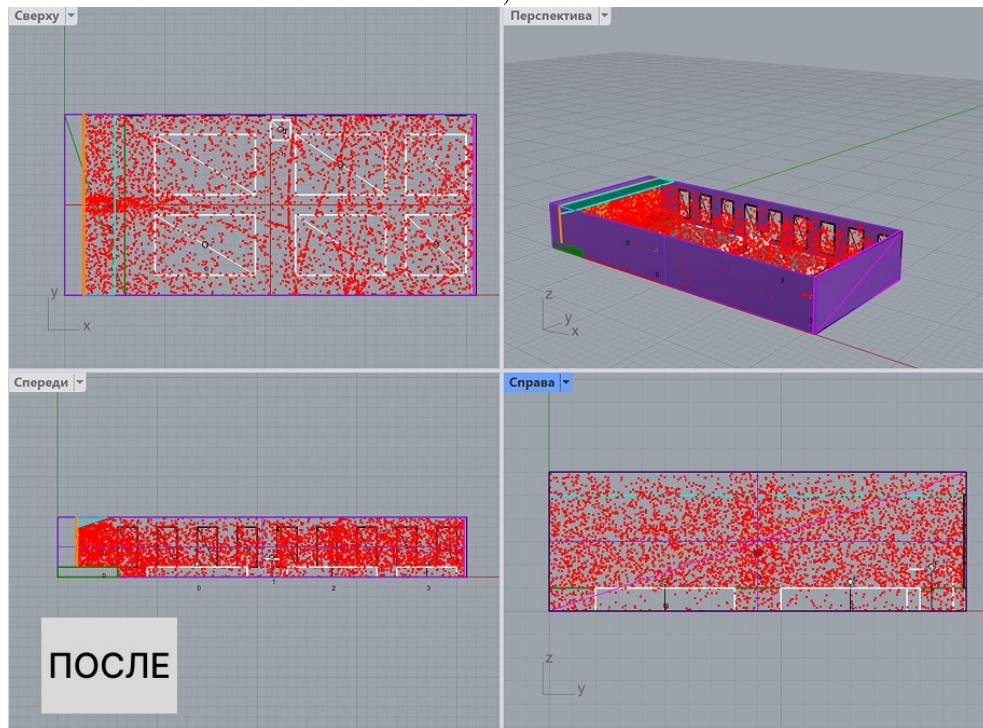
3. Замена жестких деревянных посадочных мест на театральные кресла с мягкой пористой обивкой (пенополиуретан 30-50 мм, $\alpha = 0,60-0,70$). Эта мера обеспечивает необходимый демпфирующий буфер, гарантирующий стабильность акустических параметров вне зависимости от количества присутствующих студентов.

4. Децентрализация системы звукоусиления путем монтажа дополнительных сателлитов (линий задержки) на боковых стенах во второй половине зала с фазовой синхронизацией через DSP-процессоры.

После перерасчета 3D-модели в Pachyderm Acooustic зафиксировано качественное улучшение акустической среды (рисунок 2, таблица 1). Расчетные значения времени реверберации на частотах 500-1000 Гц выравнивались до нормативного значения 1,2 с во всех зонах. Синтезированный индекс передачи речи (STI) гарантированно преодолел порог в 0,65, перейдя в категорию «Хорошо» даже на самых удаленных местах (точка 4).



а)



б)

Рисунок 2 – Модель распространения звука в пространстве актового зала:
а) до проведения мероприятий; б) после проведения мероприятий

Таблица 1 – Сравнение значений времени реверберации (Т60) до и после проведения мероприятий, при конфигурации источника А, в первой точке измерений

Параметр	Октавные полосы со среднегеометрическими частотами, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Время реверберации (Т60) до проведения мероприятий, с	1,96	1,69	1,51	1,43	1,61	1,52	1,43	1,3
Время реверберации (Т60) после проведения мероприятий, с	1,83	1,87	1,52	1,12	1,19	1,58	1,15	1,2

Заключение

Проведенное исследование убедительно доказывает, что акустическая среда многофункциональных зрительных залов является не просто архитектурным аспектом, но базовым фактором техносферной безопасности и охраны труда в образовательном учреждении. Выявленные в ходе натурных испытаний дефекты – завышенное время реверберации (до 1,61 с) и низкий индекс STI (0,42) – выступают прямыми катализаторами профессиональных заболеваний лекторов и когнитивного истощения студентов.

Применение современных цифровых симуляционных комплексов позволило рассчитать систему корректирующих мероприятий. Установка акустического козырька, глубокое поглощение на тыловой стене и модернизация зрительских кресел позволили сбалансировать звуковое поле, полностью исключив эффект Ломбарда и пространственную неравномерность. Внедрение предложенных решений формирует безопасную, предсказуемую и эргономичную среду, обеспечивая 100% слоговую разборчивость информации и гарантируя сохранение здоровья всех участников образовательного процесса.

Список использованных источников

1. Буторина М.В. Основы виброакустики. Теория и практика борьбы с шумом и вибрацией: учебник / М. В. Буторина, Н. И. Иванов, А. Е. Шашурин. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2024. – 391 с. – ISBN 978-5-00221-070-1.
2. Panfilova A.A., Ruud J.G., van Sloun W., Wijkstra H. [et al.] A review on B/A measurement methods with a clinical perspective // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2021. - Vol. 149, N 4. – P. 2237. DOI: 10.1121/10.0003627.
3. Петрова Е.В., Мамонтова А.Д., Канев Н.Г. Проблемы акустики аудиторий нового учебного корпуса МГТУ им. Н.Э. Баумана // Акустика среды обитания: Материалы X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 29–30 мая 2025 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 2025. – С. 340-346.
4. Куликов А.С. Теоретический анализ и оптимизация акустических параметров зрительного зала образовательного учреждения / А. С. Куликов // Акустика среды обитания: Материалы XI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов,

Москва, 28–29 мая 2026 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 2026. – С. 277-281.

5. ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013 Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 2. Время реверберации обычных помещений. - М.: Стандартиформ, 2014. - 20 с.

6. ГОСТ Р 53575-2009 (МЭК 60268-16:2003) Оборудование звуковых систем. Часть 16. Объективная оценка разборчивости речи по индексу передачи речи. - М.: Стандартиформ, 2010. - 43 с.

7. Бараева Д.С., Сумбатян М.А. Об эффективном алгоритме расчета акустических параметров в помещении на основе метода трассировки лучей // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2022. - N 1. - С. 4-13.

8. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1): Свод правил. - М.: Минрегион России, 2011. - 43 с.

References

1. Butorina M.V. Fundamentals of Vibroacoustics. Theory and Practice of Noise and Vibration Control: a textbook / M.V. Butorina, N.I. Ivanov, A.E. Shashurin. – Saint Petersburg: Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, 2024. – 391 p. – ISBN 978-5-00221-070-1.

2. Panfilova A.A., Ruud J.G., van Sloun W., Wijkstra H. [et al.] A review on B/A measurement methods with a clinical perspective // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2021. - Vol. 149, N 4. - P. 2237. DOI: 10.1121/10.0003627.

3. Petrova, E.V., Mamontova A.D., Kanev N.G. Problems of acoustics in classrooms of the new academic building of the Bauman Moscow State Technical University // Acoustics of the habitat: Proceedings of the X All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, Moscow, May 29-30, 2025. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University (National Research University)", 2025, pp. 340-346.

4. Kulikov A.S. Theoretical analysis and optimization of acoustic parameters of the auditorium of an educational institution / A. S. Kulikov // Acoustics of the habitat: Proceedings of the XI All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists, Moscow, May 28-29, 2026. Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University (National Research University)", 2026, pp. 277-281.

5. GOST R ISO 3382-2-2013 Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2. Reverberation time in ordinary rooms. - М.: Standartinform, 2014. - 20 p.

6. GOST R 53575-2009 (IEC 60268-16:2003) Sound system equipment. Part 16. Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. - М.: Standartinform, 2010. - 43 p.

7. Baraeva D.S., Sumbatyan M.A. On an efficient algorithm for calculating acoustic parameters in a room based on the ray tracing method // University news. North-Caucasian region. Natural sciences. - 2022. - N 1. - P. 4-13.

8. SP 51.13330.2011 Protection against noise. Updated edition of SNiP 23-03-2003. - М.: Minregion Rossii, 2011. - 43 p.