

УДК: 534.62

OECD: 01.03.AA

Безэховая звукомерная камера НИИ строительной физики: актуальные акустические характеристики

Бикмухаметов Ф.Р.^{1*}, Канев Н.Г.²¹Лаборант, физический факультет, Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, РФ²Д.ф.-м.н., заведующий лабораторией «Акустика залов», НИИ строительной физики
РААСН, г. Москва, РФ

Аннотация

В данной работе представлены актуальные акустические характеристики безэховой камеры НИИ строительной физики РААСН. Актуальность данного исследования заключается в высокой необходимости проведения измерений в условиях свободного акустического поля как в научных, так и в промышленных целях. Рассмотрено акустическое поле на первом и третьем этажах безэховой камеры, показано, что влияние отраженного от пола звука на третьем этаже несущественно, и третий этаж камеры может рассматриваться как полностью заглушенное помещение в соответствии с критериями ГОСТ ИСО 3745. Помимо этого, камера была исследована на наличие собственных мод, связанных с ее размерами, и было показано, что их наличие не сказывается на качестве проводимых измерений в низкочастотном диапазоне.

Ключевые слова: безэховая камера, собственные моды помещения, свободное акустическое поле, поглощение звука, отраженный импульс

Anechoic sound measuring chamber of the Research Institute of Building Physics: current acoustic characteristics

Bikmukhametov F.R.^{1}, Kanev N.G.²*¹*Laboratory assistant, Faculty of Physics, ITMO University, St. Petersburg, Russia*²*D.Sc., Head of the Laboratory 'Acoustics of Halls', Research Institute of Building Physics,
Moscow, Russia*

Abstract

This paper presents the current acoustic characteristics of the anechoic chamber of the Research Institute of Building Physics. The relevance of this study lies in the high need for measurements in a free acoustic field for both scientific and industrial purposes. The acoustic field on the first and third floors of an anechoic chamber is considered, it is shown that the influence of sound reflected from the floor on the third floor is insignificant, and the third floor of the chamber can be considered as a completely anechoic room in accordance with the criteria of GOST ISO 3745. In addition, the camera was examined for the presence of its own modes related to its size, and it was shown that their presence does not affect the quality of measurements in the low frequency range.

Keywords: *anechoic room, room's own modes, free acoustic field, sound absorption, reflected pulse*

Введение

Безэховая камера – это специальная комната, устройство которой позволяет полностью или очень значительно подавлять отраженные от внутренних поверхностей (потолка, стен и иногда пола) акустические волны, что значительно снижает эхо и повышает точность измерений [1]-[6]. Чаще всего такой эффект достигается за счет покрытия поверхностей камеры специальными конструкциями в виде клиньев или пирамид из пористых звукопоглощающих материалов, таких как поролон и минеральная вата [7], [8]. Такие конструкции позволяют эффективно трансформировать механическую энергию акустической волны в тепловую на широком диапазоне частот. Заглушенные камеры бывают двух типов: заглушенными, в которых звукопоглощающими конструкциями покрыты потолок, стены и пол, и полузаглушенными [9], в которых звукопоглощающими конструкциями покрыты потолок и стены, но не пол. Иногда в безэховых камерах дополнительно делаются второй и третий этажи из решетчатого пола для расширения функциональных возможностей лаборатории.

Безэховая камера в НИИСФ РААСН представляет собой полузаглушенную камеру с тремя этажами. Данный стенд является уникальным в нашей стране по размерам и техническим возможностям. Актуальность описания характеристик и акустически свойств безэховой камеры обуславливается высокой необходимостью проведения измерений в условиях свободного акустического поля, как в научных, так и в промышленных целях в соответствии с методиками, установленными современными стандартами. В настоящей работе представлены акустические характеристики камеры, и показано, что третий этаж безэховой камеры, несмотря на приходящий отраженный от пола первого этажа импульс, можно рассматривать как полностью заглушенное помещение в соответствии с критериями ГОСТ ИСО 3745 [10]. Помимо этого, в работе камера проверяется на наличие собственных мод, существование которых может снизить качество измерений, проводимых в заглушенной комнате. Чтобы показать, что наличие собственных мод никак не влияет на проводимые измерения, первый этаж камеры был проверен на соответствие критериям [10] в низкочастотном диапазоне.

1 Характеристики безэховой камеры

Безэховая камера НИИСФ РААСН (рисунок 1) представляет собой помещение с железобетонными стенами, потолком и полом. Стены и потолок покрыты клиньями длиной 1 м из звукопоглощающего материала с целью предотвращения отражения сигналов. Поперечное сечение клина у его основания составляет 0,2 x 0,2 м. Длина комнаты составляет 14,6 м в длину, 13,1 м в ширину, 14,3 м в высоту по железобетонным конструкциям и 12,3 м, в длину, 10,8 м в ширину и 12,2 м в высоту по кончикам клиньев. Камера со звукоотражающим бетонным полом разделена сеткой на 3 этажа (на отметках 4 и 8 м). Объем камеры по железобетонным конструкциям составляет 2735 м³, по кончикам клиньев 1620,6 м³. Схема камеры в поперечном разрезе приведена на рисунке 2.

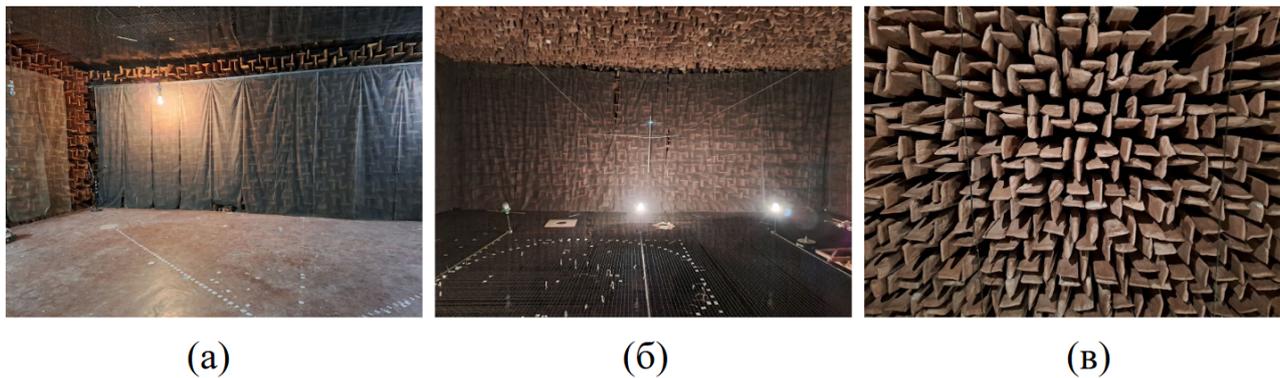


Рисунок 1 – Фотография безэховой камеры НИИ строительной физики: (а) - первый этаж камеры, (б) - третий этаж камеры, (в) - обивка стен и потолка звукопоглощающими клиньями

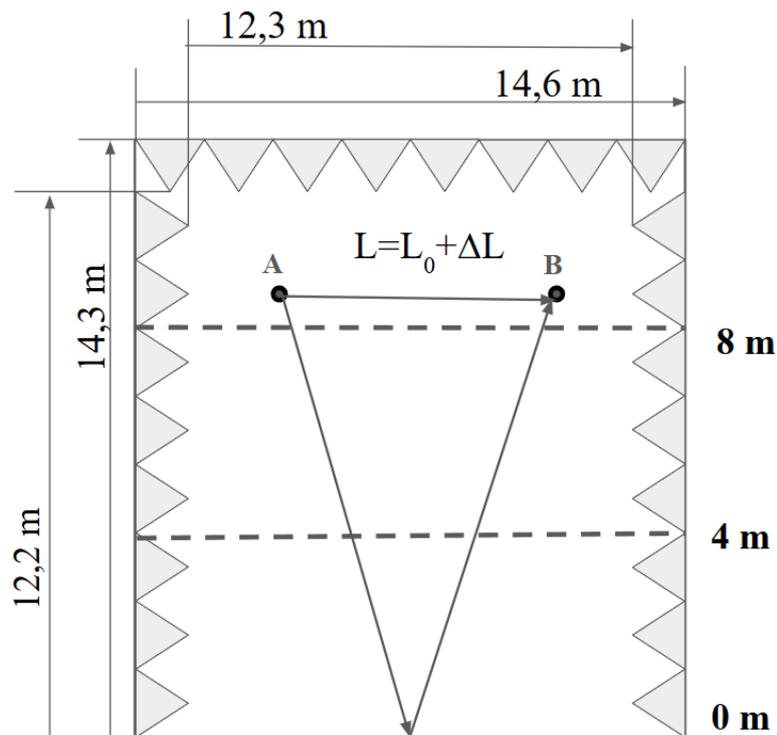


Рисунок 2 – Схема разреза безэховой камеры. В точке А третьего этажа устанавливается источник звука, в точке В - микрофон

2 Влияние отражения звука от пола на третьем этаже безэховой камеры

В данном разделе рассматривается величина импульсного отклика отраженного от пола звука на третьем этаже. Для этого в точке А третьего этажа (рисунок 2) устанавливался ненаправленный излучатель, а в точке В устанавливался микрофон, и измерялся импульсный отклик. В первую очередь представляют интерес два сигнала: первый импульс, напрямую дошедший от излучателя до микрофона (АВ) (рисунок 3а), и второй импульс, сначала отразившийся от пола, а после зафиксированный микрофоном (АОВ).

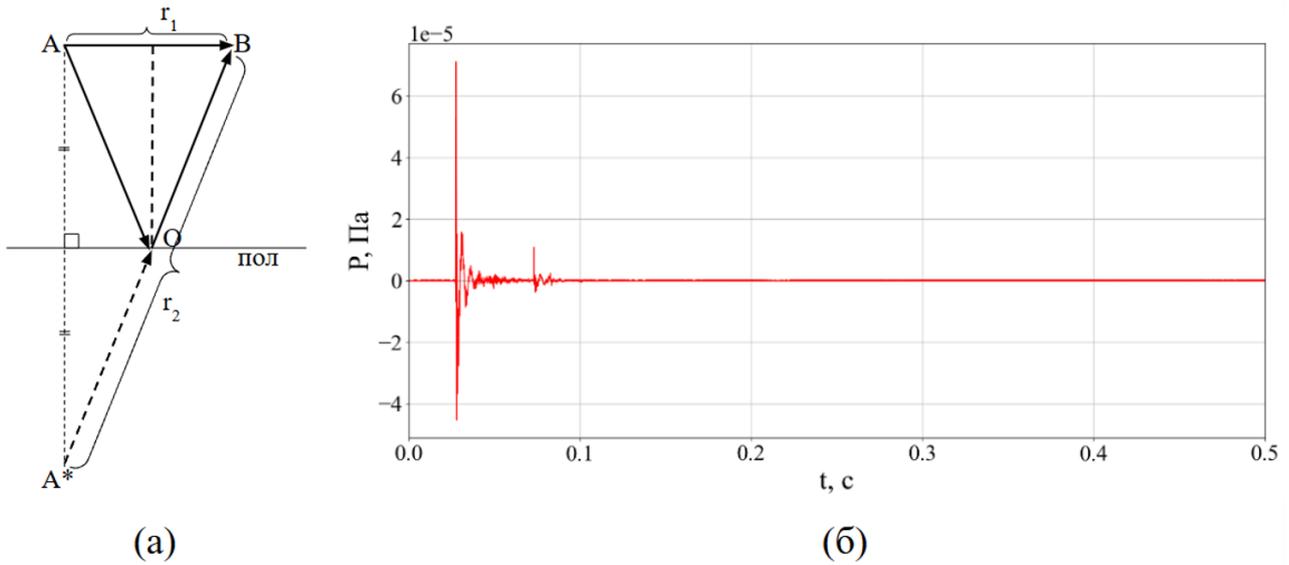


Рисунок 3 – Импульсный отклик от пола на третьем этаже: (а) - схема эксперимента, (б) - график импульсного отклика

Чтобы убедиться в том, что второй импульс (рисунок 2б) – это действительно импульс, отразившийся от пола, было вычислено время, затрачиваемое звуковой волной на прохождение соответствующего пути (АОВ). Для этого была рассчитана длина путей АОВ и АВ, опираясь на положения излучателя и микрофона, а также высоты безэховой камеры. После этого два полученных расстояния вычитались друг из друга и делились на предполагаемую скорость распространения звука в камере (330 м/с). Таким образом, полученное по формуле значение времени:

$$t = \frac{l_{AOB} - l_{AB}}{c}, \quad (1)$$

где l_{AOB} – это длина пути АОВ, l_{AB} – длина пути АВ, c – скорость звука, сравнивалось с соответствующим значением. Совпадение этих двух значений с точностью до 0,001 с, что соответствует погрешности примерно 30 см, что в сравнении с размерами безэховой камеры является незначительной поправкой, говорило о правильности полученного импульса. Уравнение сферической волны [11] записывается следующим образом:

$$P = \frac{P_0}{r} e^{ikr}, \quad (2)$$

где P_0 – амплитуда волны, r – расстояние до наблюдаемой точки. Ее амплитуда уменьшается обратно пропорционально расстоянию r . Таким образом, чтобы найти коэффициент отражения от пола, мы строим точку A^* , симметричную точке А, относительно пола. Далее проводим прямую через точки A^* и В. Амплитуда такой волны в точке В, будет составлять

$$P_2 = \frac{P_0}{r_2} V, \quad (3)$$

где r_2 – это длина отрезка A^*B , P_0 - начальная амплитуда, а V – коэффициент прохождения пола при распространении волны в направлении A^*B . В свою очередь, амплитуда волны, дошедшей напрямую от источника до микрофона, равняется

$$P_1 = \frac{P_0}{r_1}, \quad (4)$$

где r_1 – это расстояние от источника до микрофона. Выражая P_0 в двух последних равенствах и приравнивая соответствующие части равенств, получаем формулу для нахождения коэффициента V , который в случае распространении волны в направлении АОВ является коэффициентом отражения:

$$V = \frac{P_2 r_2}{P_1 r_1}. \quad (5)$$

В ходе обработки получен коэффициент отражения $r = 0,998$, что соответствует практически полному отражению звука. Данный результат хорошо согласуется с действительностью, так как пол в безэховой камере бетонный и гладкий, и его коэффициент отражения действительно должен быть близок к единице. Теперь определим, какое влияние на третьем этаже оказывает звук, отраженный от пола первого этажа. Для этого возьмем уже имеющиеся экспериментальные данные и вычислим соотношение амплитуды отраженного сигнала к амплитуде прямого сигнала:

$$\delta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (6)$$

В ходе обработки был получен коэффициент отражения, усреднённый по семи точкам измерения, который составил $\delta = 0,145$. Заметим, что влияние коэффициента отражения от пола на третьем этаже сильно меньше, чем на первом.

Дополнительно приведем оценку разницы между прямым и отраженным звуками в дБ. Для этого воспользуемся известной формулой:

$$\Delta L = 20 \log \frac{P_2}{P_1} = -16,7 \text{ дБ}. \quad (7)$$

В соответствии с [10], можно не учитывать дополнительный источник шума, если он тише основного хотя бы на 15 дБ. Таким образом, на третьем этаже можно не учитывать отраженный от пола звук и рассматривать третий этаж как полностью заглушенное помещение в соответствии с существующим стандартом [10].

3 Собственные моды безэховой камеры

В помещениях могут возникать стоячие волны, чье появление обуславливается размерами самого помещения [12]-[13]. Наличие стоячих волн создает целый ряд проблем для проведения измерений в безэховых камерах. В заглушенной комнате мы хотим добиться свободного акустического поля, наличие же стоячих волн сильно искажает желаемую картину. Например, при проведении измерений на частоте, соответствующей появлению стоячей волны, результат будет зависеть от того, в какой точке находится микрофон, что снижает качество эксперимента. При измерении диаграммы направленности излучателя на соответствующих частотах мы будем видеть пики и провалы, а при измерении АЧХ результаты эксперимента будут искажены наличием собственных мод помещения. Поэтому очень важно, чтобы безэховая камера не имела высокодобротных собственных мод. На рисунке 4 приведены результаты измерений уровня звукового давления в углу первого этажа камеры, в котором располагается микрофон. В противоположном углу размещен источник шума. Измерения проводились с работающим источником и с выключенным, с целью измерить уровень фонового шума. Из результатов измерений следует, что звуковой сигнал превышает фоновые значения только на частотах выше 30 Гц.

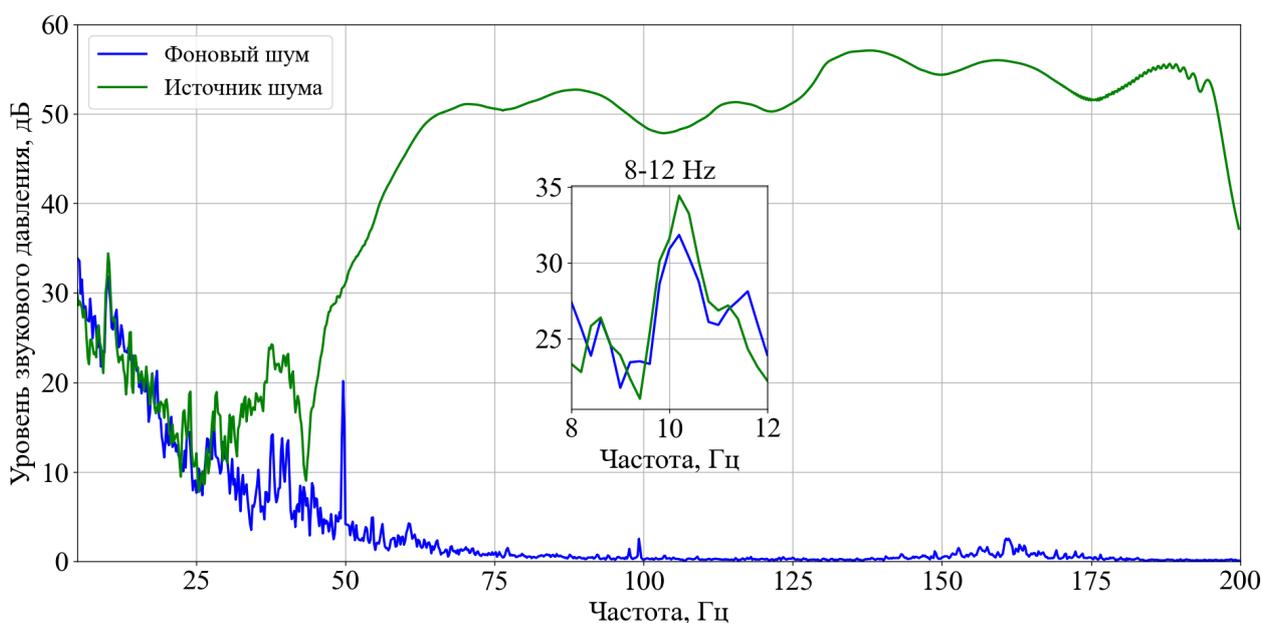


Рисунок 4 – Результаты измерений уровня звукового давления в углу камеры и расположении источника звука в противоположном углу

В низкочастотной области на рисунке 4 есть только один ярко выраженный пик – на частоте 10,2 Гц, соответствующий первой собственной частоте помещения. На более высоких частотах собственные резонансы помещения не проявляются, что говорит об их значительном демпфировании.

4 Соответствие безэховой камеры критериям ГОСТ ИСО 3745

Проведена проверка безэховой камеры на соответствие критериям [10]. Согласно [10] в безэховой камере должно создаваться свободное акустическое поле или свободное акустическое поле над отражающей поверхностью в случае, если проверяется полузаглушенная камера. Это означает, что уровень звукового давления должен быть обратно пропорционален расстоянию до источника. В первую очередь интерес представляет область низких частот, на которых возможно проявление собственных резонансов помещения.

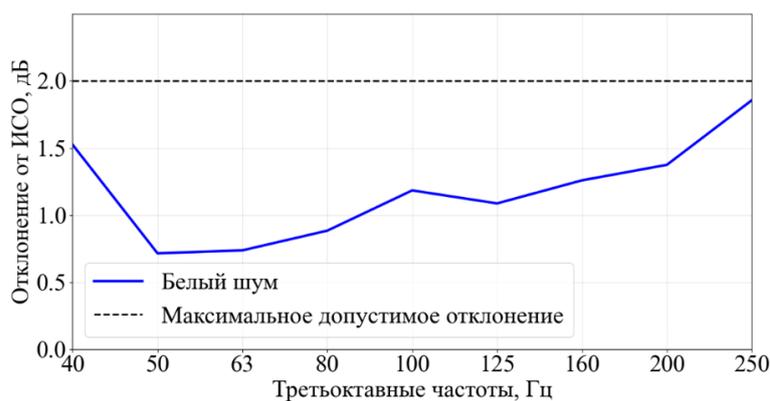
4.1 Источник звука

Для проведения проверки соответствия требованиям [10] необходим ненаправленный источник звука. Это означает, что амплитуда акустической волны, создаваемой источником, должна иметь примерно одинаковое значение на поверхности полусферы заданного радиуса. В качестве источника звука используется додекаэдр (рисунок 5а).

На рисунке 5б приведены результаты измерения отклонений, согласно которым источник можно считать ненаправленным в диапазоне 40-250 Гц. Для определения ненаправленности излучатель устанавливают приблизительно в центре камеры. Далее на полусфере радиуса 1,5 м выбирают 32 точки, в которых измеряют акустическое давление. Далее считают среднее значение акустического давления по всем точкам. Отклонение давления в каждой точке от среднего значения не должно превышать значения, указанного в стандарте. Эксперимент осуществлялся с помощью излучателя, конденсаторного микрофона, шумомера, генератора и источника питания (рисунок 6).



(a)



(б)

Рисунок 5 – Источник: а) фото источника, б) соответствие источника критериям ГОСТ ИСО 3745



Рисунок 6 – Фото экспериментальной установки

В [10] рекомендовано использование случайного сигнала, под определение которого подходит белый шум. С помощью генератора и излучателя мы создавали белый шум, уровень звукового давления которого измерялся с помощью проверенного шумомера-спектроанализатора. На рисунке 5б черной пунктирной линией обозначено максимально допустимое отклонение экспериментальных данных от табличных, представленных в пункте А.2.2.2 ГОСТа. Синей сплошной линией представлено измеренное для излучателя отклонение в режиме белого шума. Как можно видеть, излучатель является ненаправленным в диапазоне 40–250 Гц для белого шума.

4.2 Проверка камеры как полузаглушенного пространства

Теперь проверим акустическое поле над отражающей поверхностью на первом этаже. Для этого, в соответствии с пунктом А.3.3 в [10], выбираются пять траекторий с началом в акустическом центре излучателя и направленных в углы комнаты таким образом, что ни одна траектория не была параллельна полу, каждая траектория должна содержать минимум 10 точек, первая точка располагается на расстоянии минимум 0,5 метра от акустического центра излучателя, расстояние между двумя соседними точками минимум 0,1 м. Запись сигнала в каждой точке проводится 30 секунд, что соответствует

критериям [10]. Первые четыре траектории представляли из себя лучи, с началом в центре камеры и ведущими в углы камеры, образованные полом и двумя соседними стенами так, что траектория составляла угол 15° с полом. Пятая траектория представляла собой луч, направленный под углом 60° к полу и ведущий в верхний угол камеры. В предположении, что акустическое давление в точке обратно пропорционально расстоянию до источника, мы вычисляем следующее значение:

$$L_p(r) = 20 \lg \left(\frac{a}{r - r_0} \right), \quad (8)$$

где

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N r_i q_i - \sum_{i=1}^N r_i^2 \sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}, \quad (9)$$

где r_i – это расстояние от i -ой точки измерения до центра измерительной сферы, r_0 – смещение акустического центра вдоль траектории микрофона. Оно является расстоянием между акустическим центром источника и центром измерительной полусферы. В нашем случае мы считаем, что акустический центр совпадает с геометрическим центром и полагаем $r_0 = 0$.

$$q_i = 10^{-0,05 L_{pi}}. \quad (10)$$

Отклонение уровней звукового давления от расчетных определяется по формуле:

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i), \quad (11)$$

где L_{pi} – это экспериментально измеренный уровень звукового давления в точке, $L_p(r_i)$ – это расчетный уровень звукового давления в точке. Максимальное допустимое отклонение регулируется [10]. Экспериментальные данные представлены на рисунке 7.

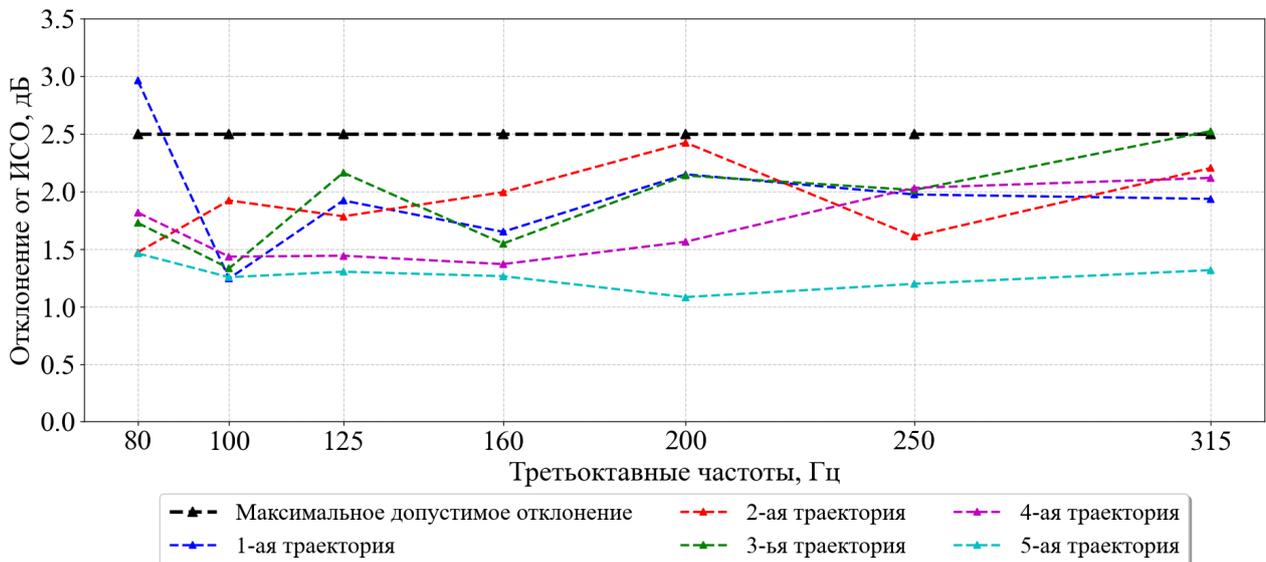


Рисунок 7 – Отклонение экспериментальных данных на первом этаже от критериев ГОСТ ИСО 3745 для полузаглушенной камеры

Как можно видеть, в низкочастотном диапазоне камера полностью удовлетворяет существующим критериям. Таким образом, собственные колебания или отражения от поверхностей камеры не влияют на качество эксперимента, проводимого в заглушенной камере.

4.3 Проверка камеры как заглушенного пространства

Важным является вопрос: можно ли рассматривать третий этаж камеры как полностью заглушенное пространство, в силу малого влияния отраженного от пола звука. Проверим третий этаж согласно критериям [10]. Аналогично предыдущим шагам выбирается траектория, направленная в верхний угол камеры. На траектории выбрана 21 точка. Результаты измерений приведены на рисунке 8.

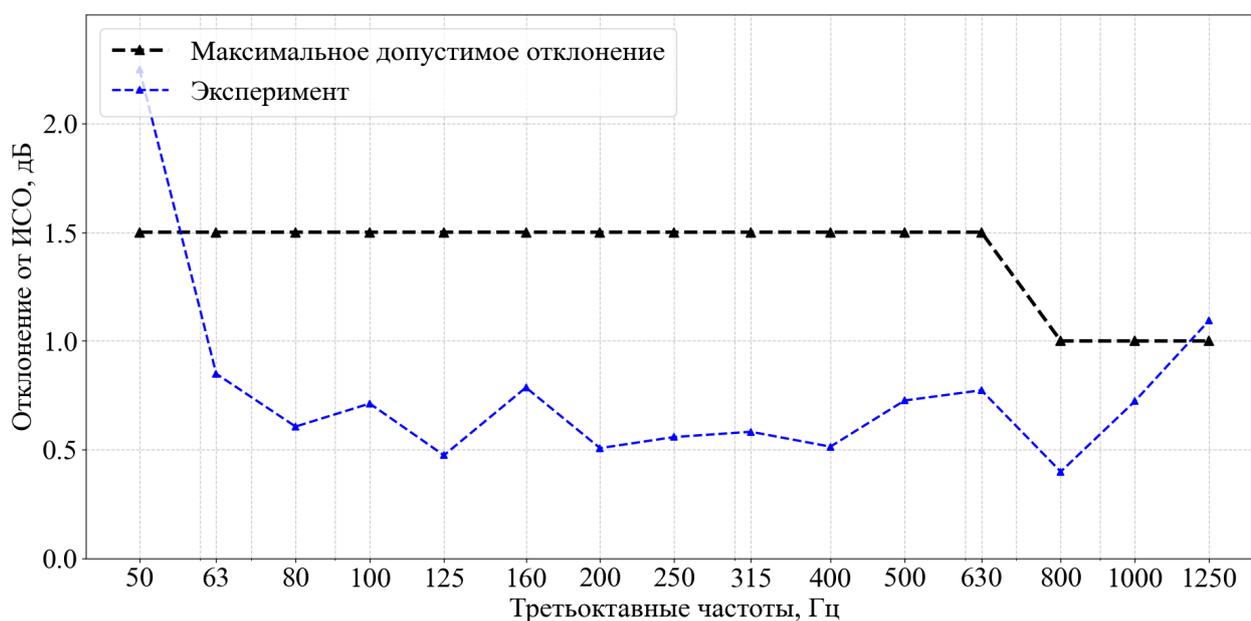


Рисунок 8 – Отклонение экспериментальных данных на третьем этаже от критериев ГОСТ ИСО 3745 для заглушенной камеры

Таким образом становится ясно, что третий этаж безэховой камеры может рассматриваться как полностью заглушенное помещение. Отметим, что полученные результаты о выполнении требования для заглушенного и полузаглушенного пространства получены при помощи источника звука формально удовлетворяющем требованиям ненаправленности только в диапазоне частот 40–250 Гц (рисунок 5б). Поэтому данные измерения формально подтвердили соответствие камеры требованиям ГОСТ в указанном диапазоне, что с точки зрения практики является наиболее критичным, поскольку на низких частотах вследствие влияния собственных резонансов помещения могут проявляться отклонения от свободного поля.

Заключение

В работе представлены результаты измерений акустических характеристик звукомерной камеры НИИСФ РААСН – помещения размером 14,6 м x 13,1 м x 14,3 м по железобетонным конструкциям и 12,3 м x 10,8 м x 12,2 м по кончикам клиньев с потолком и стенами, полностью поглощающими звук, и отражающим полом. В результате измерений было установлено, что на третьем уровне камеры, расположенном на расстоянии 8 м от твердого пола, выполняются критерии заглушенного помещения

согласно [10]. Данный результат обоснован двумя способами: измерением звука, отраженного полом, и проверкой условий свободного акустического поля.

Таким образом, в низкочастотной области (63-250 Гц) заглушенная камера НИИСФ РААСН является полузаглушенным пространством на уровне пола и полностью заглушенным пространством на высоте 8 м.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 25-79-31027, <https://rscf.ru/project/25-79-31027/>

Список использованных источников

1. Beranek L. L., Sleeper Jr H. P. The design and construction of anechoic sound chambers //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1946. – Vol. 18, N 1. – P. 140-150. DOI: 10.1121/1.1916351.
2. Kim K. Design and analysis of experimental anechoic chamber for localization //The Journal of the Acoustical Society of Korea. – 2012. – Vol. 31, N 4. – P. 225-234.
3. Cuyx B. et al. Design and validation of a low-cost acoustic anechoic chamber //Audio Engineering Society Convention 149. – Audio Engineering Society, 2020.
4. Kekus-Kumor P., Sieradzki A. A low-cost anechoic chamber for rotor aeroacoustics research: design and validation //Transactions on aerospace research. – 2025. – Vol. 2025, N 2. – P. 18-39. DOI: 10.2478/tar-2025-0007.
5. Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев Ю.В. и др. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик. // Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, N 1. – С. 114-126
6. Haasjes R., Berkhoff A. P. A small-scale active anechoic chamber //Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 224. – P. 110130. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110130.
7. R. W. Young O. H. Schuck. A novel, highly effective sound-absorbing arrangement and the construction of a dead room. //, J. Acoust. Soc. Am. – 1941. – Vol. 13. – P. 191-193.
8. Christian J. et al. Absorber Geometry Size Optimization For Acoustic Anechoic Chamber Design Using Genetic Algorithm //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2243, N 1. – P. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012085
9. Pinhède C. et al. Towards an active semi-anechoic room: simulations and first measurements //Acta Acustica. – 2024. – Vol. 8. – P. 56. DOI: 10.1051/aacus/2024052
10. ГОСТ ИСО 3745-2014. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер. – Введ. 01.11.2015. – М. : Стандартиформ, 2015. – 59 с.
11. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 495 с.
12. Kurz E. et al. The edge absorber as a ‘modal brake’ //Forum Acusticum. – 2020. – P. 1745-1752.
13. R. Hofer, ‘Analyse des modalen Schallfeldes zur Untersuchung der Funktionsweise von Kantenabsorbern (Analysis of the modal sound field to study the operation of edge absorbers)’ : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spcs.tugraz.at/student-projects/Weselak-33.html> (Грац, сентябрь 2022 года)

References

1. Beranek L. L., Sleeper Jr H. P. The design and construction of anechoic sound chambers //The Journal of the Acoustical Society of America. – 1946. – Vol. 18, N 1. – P. 140-150. DOI: 10.1121/1.1916351.
2. Kim K. Design and analysis of experimental anechoic chamber for localization //The Journal of the Acoustical Society of Korea. – 2012. – Vol. 31, N 4. – P. 225-234.
3. Cuyx B. et al. Design and validation of a low-cost acoustic anechoic chamber //Audio Engineering Society Convention 149. – Audio Engineering Society, 2020.
4. Kekus-Kumor P., Sieradzki A. A low-cost anechoic chamber for rotor aeroacoustics research: design and validation //Transactions on aerospace research. – 2025. – Vol. 2025, N 2. – P. 18-39. DOI: 10.2478/tar-2025-0007.
5. Kopyev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Yu.V., et al. Development of an anechoic facility for aeroacoustic experiments and investigation of its acoustic characteristics. // Acoustic Journal. – 2017. – Vol. 63, N 1. – P. 114-126.
6. Haasjes R., Berkhoff A. P. A small-scale active anechoic chamber //Applied Acoustics. – 2024. – Vol. 224. – P. 110130. DOI: 10.1016/j.apacoust.2024.110130.
7. R. W. Young O. H. Schuck. A novel, highly effective sound-absorbing arrangement and the construction of a dead room. //, J. Acoust. Soc. Am. – 1941. – Vol. 13. – P. 191-193.
8. Christian J. et al. Absorber Geometry Size Optimization For Acoustic Anechoic Chamber Design Using Genetic Algorithm //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2243, N 1. – P. 012085. DOI: 10.1088/1742-6596/2243/1/012085
9. Pinhède C. et al. Towards an active semi-anechoic room: simulations and first measurements //Acta Acustica. – 2024. – Vol. 8. – P. 56. DOI: 10.1051/aacus/2024052
10. GOST ISO 3745-2014. Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms. – Date of introduction 01.11.2015. – Moscow: Standartinform, 2015. -59 p.
11. Isakovich, M. A. General Acoustics. – Moscow: Nauka, 1973. – 495 p.
12. Kurz E. et al. The edge absorber as a ‘modal brake’ //Forum Acusticum. – 2020. – P. 1745-1752.
13. R. Hofer, ‘Analyse des modalen Schallfeldes zur Untersuchung der Funktionsweise von Kantenabsorbern (Analysis of the modal sound field to study the operation of edge absorbers)’ : [Electronic resource]. – URL: <https://www.spcs.tugraz.at/student-projects/Weselak-33.html> (Graz, September 2022)