

УДК: 534.84:004.94

OECD: 2.03 IU

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.21.12.005

Оценка возможности компьютерного моделирования низкочастотных шумовых полей в производственных помещениях

Уразгалиев Р.Т.^{1*}, Каверзнева Т.Т.², Салкуцан В.И.³¹Магистрант, ^{2,3}К.т.н., доцент^{1,2,3}Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье показана применимость методов компьютерного моделирования при расчете низкочастотных шумовых полей в ограниченных производственных помещениях. Показан один из возможных подходов к решению задачи по расчёту параметров низкочастотных шумовых полей в производственном цехе. Представлен практический пример компьютерного моделирования производственного помещения на примере цеха механической обработки деталей машиностроительной отрасли. Расчёт проведен в программе COMSOL Multiphysics волновыми методами на основе численных решений (метода конечных элементов) в третьооктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 250 Гц. Рассмотрены основные этапы компьютерного моделирования, включающие: задания геометрии помещения, материалов, источников шума, граничных условий и конечно-элементной сетки. Результаты компьютерного моделирования шумовой обстановки в производственном цехе показали сходимость с результатами натурных измерений (относительная погрешность составила 3,9%).

Ключевые слова: шум, метод конечных элементов, компьютерное моделирование, численные волновые методы, производственные помещения

Evaluation of the feasibility of computer modeling of low-frequency noise fields in industrial premises

Urazgaliev R.T.^{1*}, Kaverzneva T.T.², Salkutsan V.I.³¹Master's student, ^{2,3}Ph.D., Assistant professor^{1,2,3}Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

This article demonstrates the applicability of computer modeling methods for calculating low-frequency noise fields in confined industrial spaces. One possible approach to solving the problem of calculating the parameters of low-frequency noise fields in a production workshop is presented. A practical example of computer modeling of a production space is presented using a mechanical processing shop in the mechanical engineering industry as an example. The calculation was performed in COMSOL Multiphysics using wave methods based on numerical solutions (the finite element method) in one-third-octave bands with geometric mean frequencies from 31.5 Hz to 250 Hz. The main stages of computer modeling are considered, including: specifying the room geometry, materials, noise sources, boundary conditions, and a finite element mesh.

*E-mail: urazgaliev.rt@edu.spbstu.ru (Уразгалиев Р.Т.)

The results of computer modeling of the noise environment in the production workshop showed convergence with the results of in-kind measurements (the relative error was 3.9%).

Keywords: noise, finite element method, computer modeling, numerical wave methods, industrial premises

Введение

Шумовой режим в производственных помещениях с точки зрения санитарно-гигиенического благополучия работников должен соответствовать безопасным условиям труда. По данным Минтруда на конец 2024 года под воздействием повышенного уровня шума, ультразвука, инфразвука находились 18,9% занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Вредные факторы рабочей среды (данные Минтруда 2024)

Повышенный уровень шума может вызвать функциональные и психологические негативные изменения в организме человека, профессиональную патологию, временное или стойкое снижение работоспособности [2]. Шум является одним из самых распространённых вредных производственных факторов на рабочих местах. Для снижения уровня шума на практике применяются различные методы, широкое применение получили, например, архитектурно-планировочные и строительно-акустические средства защиты. Но поскольку реализация таких мер дорогостояща и трудоёмка, встаёт вопрос о выборе наиболее рационального и рентабельного мероприятия по снижению шума. Эффективность выбора и применения средств защиты определяется во многом возможностью точно и достоверно оценивать уровни шума на рабочих местах [3], [4].

Аналитические методы расчёта шума в производственных помещениях содержат значительное количество упрощений и допущений, область их применения ограничена простой геометрией, частотным диапазоном. Использование таких методов на сложной геометрии производственных помещений затруднительно. Следует учесть, что некоторые процессы требуют решения связанных задач, совместного расчёта взаимодействующих физических сред [5]. Поэтому целесообразно применять численные методы расчёта звуковых полей. С развитием технологий численных решений математических моделей и автоматизации процессов все больше возможностей даёт нам компьютерное моделирование [6].

Шумовая обстановка внутри помещения может быть оценена численными методами компьютерного моделирования с целью прогнозирования и расчёта уровней шума

как на этапах строительства, так и при эксплуатации и реконструкции. Прогнозирование уровней шума на этапе строительства или реконструкции позволяет заблаговременно применить средства шумозащиты. В случае изменения геометрических и акустических свойств помещения во время эксплуатации расчёт уровня шума методами компьютерного моделирования позволит своевременно и проактивно реагировать на изменения шумовой обстановки на рабочих местах и, соответственно, на возможные риски негативного воздействия на слух работников [7].

Создание эффективной шумозащиты с минимизацией затрат требует новых подходов. Одним из таких подходов является проведение вычислительного эксперимента с использованием CAE-систем инженерного анализа, реализующих универсальные численные методы решения уравнений математической физики [8]. Особое распространение в задачах вычислительной акустики получил метод конечных элементов.

Современные исследования в области компьютерного моделирования распространения звука в помещениях в большей мере сосредоточены в архитектурной акустике: в проектировании концертных залов, мест площадок для выступлений, офисных помещений и комнат с мультимедийными системами [9]-[12]. Основная задача таких исследований - оценить воспринимаемое качество звука, разборчивость и чёткость речи на основе измеряемых показателей. Также проводятся исследования в области моделирования шума в городской застройке [13]. Исследований в области моделирования акустики производственных помещений мало, в данных работах, как правило, разрабатываются математические модели, описывающие распространение шума [14], [15]. Остаются открытыми и мало исследованы вопросы применимости методов компьютерного моделирования шумовых полей в ограниченных производственных помещениях и разработки подходов в существующих программных пакетах к расчёту параметров шумовых полей в производственных помещениях

1 Методика исследования

Цель работы - оценить возможности применения компьютерного моделирования низкочастотных шумовых полей в производственных помещениях, сравнив результаты моделирования с инструментальными измерениями в цехе.

Были решены следующие задачи:

1. Проведено моделирование геометрии помещения.
2. Выбраны материалы и заданы их акустические свойства.
3. Заданы источники шума и граничные условия на поверхностях объектов.
4. Заданы размер и форма конечно-элементной сетки.
5. Получены распределения уровня шума в объёме помещения.
6. Проведено сравнение результатов моделирования с инструментальными измерениями.

В помещениях с геометрическими размерами, сравнимыми или меньшими по сравнению с исследуемыми длинами волн, волновой метод является подходящим решением для численного моделирования. В работе применены методы компьютерного моделирования низкочастотных шумовых полей в ограниченных производственных помещениях в программе COMSOL Multiphysics волновыми методами на основе численных решений в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 250 Гц.

2 Моделирование производственного цеха

В программе задача реализовывалась через модуль "Акустика", интерфейс "Акустика давлений" (Pressure Acoustics), "Частотное исследование" (Frequency Domain).

В статье представлен практический пример компьютерного моделирования производственного помещения, а именно, цеха механической обработки деталей машиностроительной отрасли. Цех имеет размеры $8 \times 8 \times 4$ м, в нем размещены два токарно-револьверных 1А416 станка, оконные рамы, деревянный стол и стеллаж. Стены, потолок и пол помещения выполнены из кирпича. Согласно паспорту станкового оборудования скорректированный уровень звуковой мощности составляет 96 дБА.

Акустически помещение можно охарактеризовать как ограниченное в объеме, с наличием постоянных по времени и спектру низкочастотных источников шума, преимущественно жестких поверхностей, с преобладанием отраженного звука. Совокупность таких факторов приводит к многократному переотражению звуковых волн от поверхностей, и, как следствие, длительному времени реверберации, гулкости помещения. Преобладание низкочастотного шума в таких условиях представляет повышенную опасность вследствие медленного рассеивания шума в объеме помещения, распространения на большие расстояния, негативного воздействия на психофизиологическое самочувствие работников и возможного резонирования с собственными частотами колебаний внутренних органов человека.

2.1 Задание геометрии помещения и основных компонентов

Геометрия основных компонентов задавалась с помощью геометрических примитивов и логических операций. Модель помещения указана на рисунке 2 (изометрический вид) и на рисунке 3 (вид сверху). Геометрические формы объектов аппроксимировались параллелепипедами.

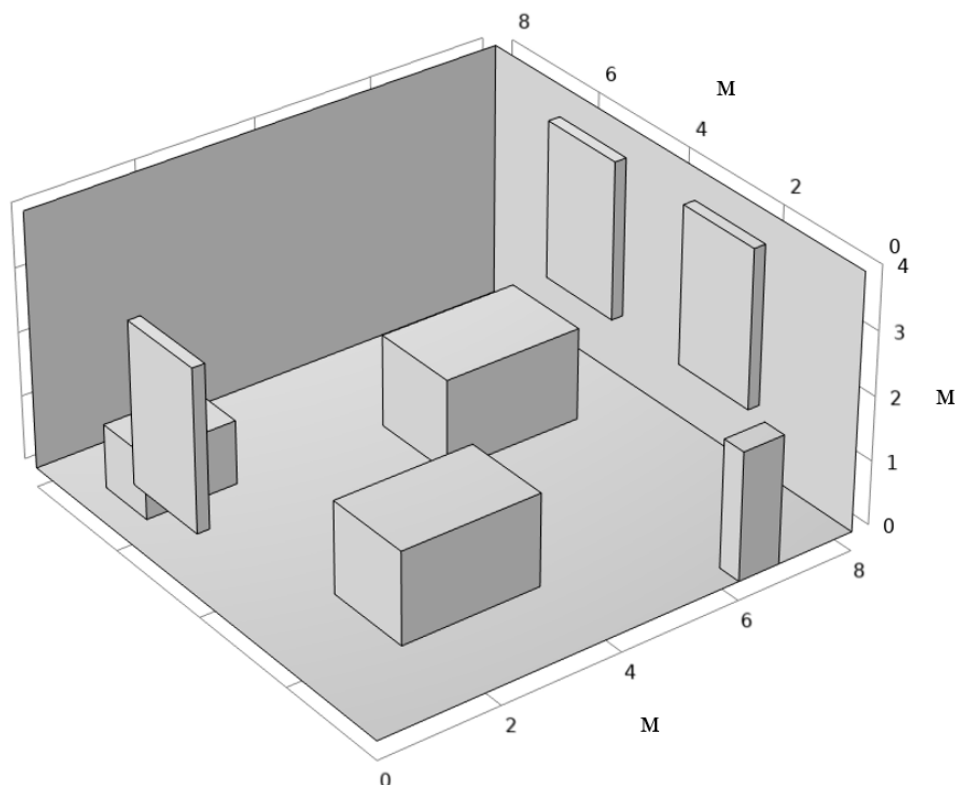


Рисунок 2 – Модель помещения (изометрический вид)

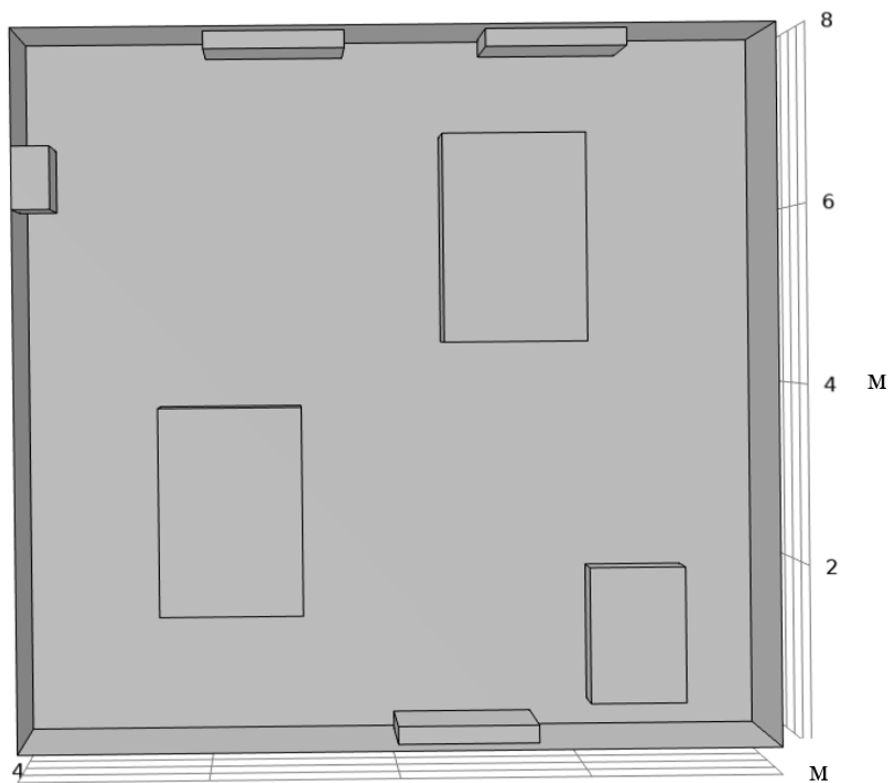


Рисунок 3 – Модель помещения (вид сверху)

2.2 Задание материалов и их свойств

Необходимые материалы (сталь, стекло, дерево, кирпич) выбраны из встроенной библиотеки программы COMSOL Multiphysics и привязаны к соответствующим доменам и поверхностям (таблица 1 и рисунок 4). Заданы основные свойства (скорость звука в материале и плотность материала).

Таблица 1 – Материалы, привязанные к объектам

Материал	Объект	Тип и номер объекта	Коэффициент звукопоглощения на частоте 250 Гц
Воздух	Помещение	домен	-
Сталь	Станки	Домен, №1-№2	0,01
Стекло	Окна	Домен, №3-№5	0,08
Дерево	Стол, шкаф	Домен, №6-№7	0,1
Кирпич	Стены, потолок, пол	Поверхность №8-№13	0,02

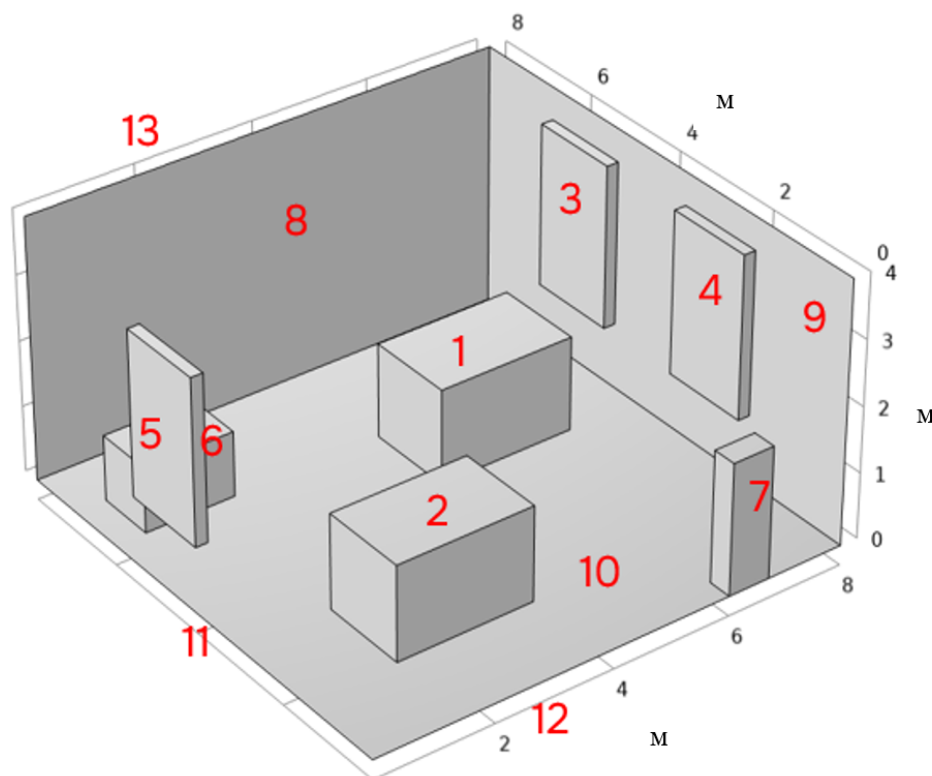


Рисунок 4 – Нумерация доменов и поверхностей

2.3 Задание источников и граничных условий

Программа позволяет описывать источник звука, подходящий для нашего случая (при отсутствии открытых границ), различными способами, основные из них:

- математические источники (монопольные и дипольные источники в точках и доменах; линейные источники);
- давление, ускорение или скорость на внутренних и внешних границах;
- виброакустическая связка для сопряжения с вибрациями твердых тел.

В качестве источников шума выступают токарные станки. В общей постановке задачи моделирование источника требует решение связанной задачи «механика-акустика», для чего необходимо иметь точную геометрическую модель станка, определить и задать значения сил и моментов, которые приводят к движению и колебанию узлов станка относительно друг друга. На основе этого определить вибрации основных элементов станка и излучаемый ими шум во внешнюю среду. В силу сложности и трудоёмкости описанной задачи в данной работе применяется упрощение.

Был выделен основной и типичный режим работы токарных станков – резка металлических заготовок, поскольку в данном режиме станки работают большую часть времени. Авторами были проведены измерения среднеквадратичных значений виброускорений во всем диапазоне частот (оценка широкополосной вибрации) на внешних поверхностях основных узлов (передняя и задняя бабка, корпус, станина, узел обработки) в рабочем режиме с помощью шумомера-вибromетра «Эко-110А». Далее определено среднее значение по всем исследуемым узлам. Значение виброускорения составило $0,4 \text{ м/с}^2$ (таблица 2).

Таблица 2 – Значение виброускорений на узлах станка

Узел станка	Величина ускорения, м/с^2	Средняя величина ускорения, м/с^2
Задняя бабка	0,35	0,4
Передняя бабка	0,45	
Станина	0,25	
Узел обработки	0,55	

Вибрация основных узлов станка передаётся на внешние поверхности, создавая колебания воздуха вблизи станка, далее эти колебания передаются по воздуху, и излучается шум. Упрощённо в качестве источника шума можно представить вибрирующую поверхность станка. Источник шума имитировался граничным условием на поверхности станка, заданным ускорением.

Граничные условия на поверхностях стен, потолка, пола и остальных геометрических компонентов – жесткая поверхность.

2.4 Задание конечно-элементной сетки

Форма конечно-элементной сетки – тетраэдральная (рисунок 5). При использовании метода конечных элементов и волновых методов инженеры и консультанты программы COMSOL рекомендуют размер сетки – 5 или 6 ячеек на наименьшую длину волны (при квадратичном приближении).

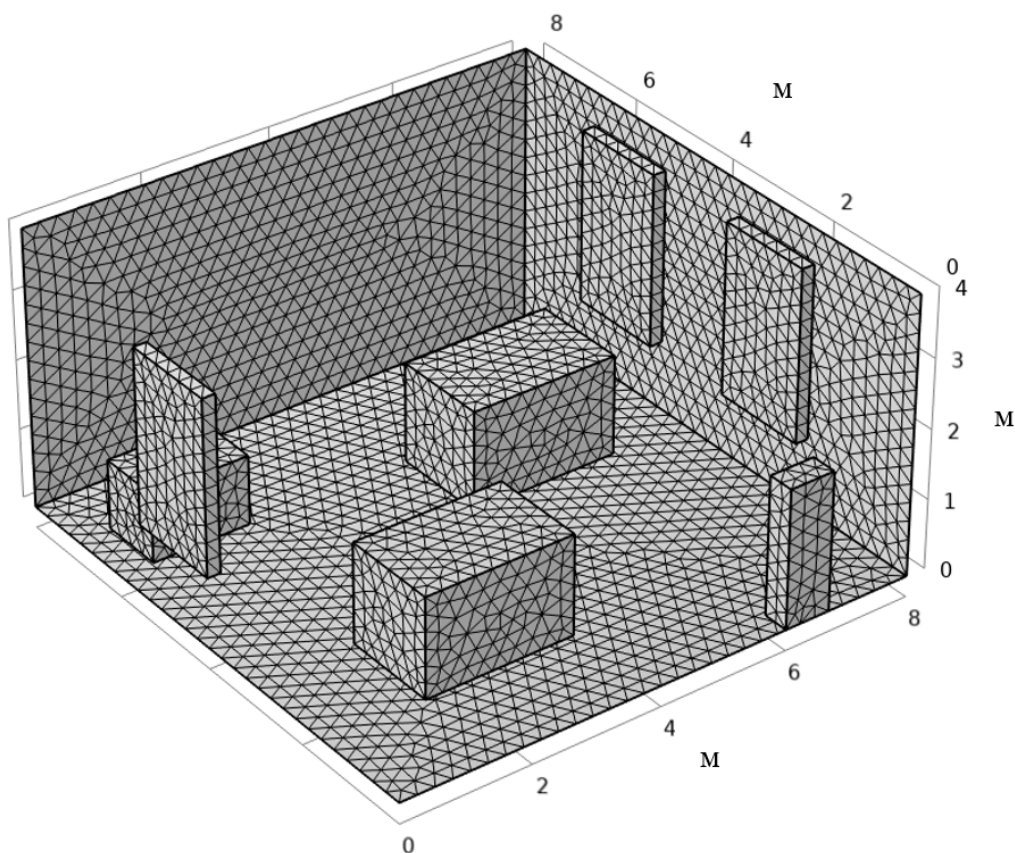


Рисунок 5 – Конечно-элементная сетка, заданная на геометрии помещения

Расчёт размеров сетки представлен ниже по формулам (1) и (2). Максимальный размер сетки составил 0,27 м, а наименьший размер сетки – 0,14 м.

$$h_{max} = \frac{c}{5\nu_{min}} = \frac{340}{5 * 250} \approx 0,27 \text{ м}, \quad (1)$$

$$h_{min} = \frac{c}{2 * 5\nu_{min}} = \frac{340}{10 * 250} \approx 0,14 \text{ м}, \quad (2)$$

где c – скорость звука в воздухе, м/с, ν_{min} – наименьшая частота, Гц.

При построении данной модели были использованы следующие допущения и упрощения:

1. Предполагается, что цех изолирован от внешней среды, то есть звук извне не попадает вовнутрь через стены и окна;
2. Предполагается, что цех не имеет открытых границ, например, открытой двери или окна;
3. Вклад в общий уровень шума работниками и другими малошумными объектами (оборудованием) пренебрежимо мал;
4. Принято упрощение, что граничные условия – жесткая поверхность;
5. Упрощено представление источника.

3 Результаты исследования

Программа позволяет получить в качестве результата моделирования распределение звукового давления или уровня звука в объеме помещения, на изоповерхностях и плоскостях, а также значения давления или уровня звука в расчётной точке или вдоль линии в исследуемом частотном диапазоне. В качестве результата получено распределение уровня звукового давления в объеме помещения (рисунок 6) и в плоскостях нахождения органов слуха работников, приведен пример графиков на частоте 100 Гц (рисунок 7).

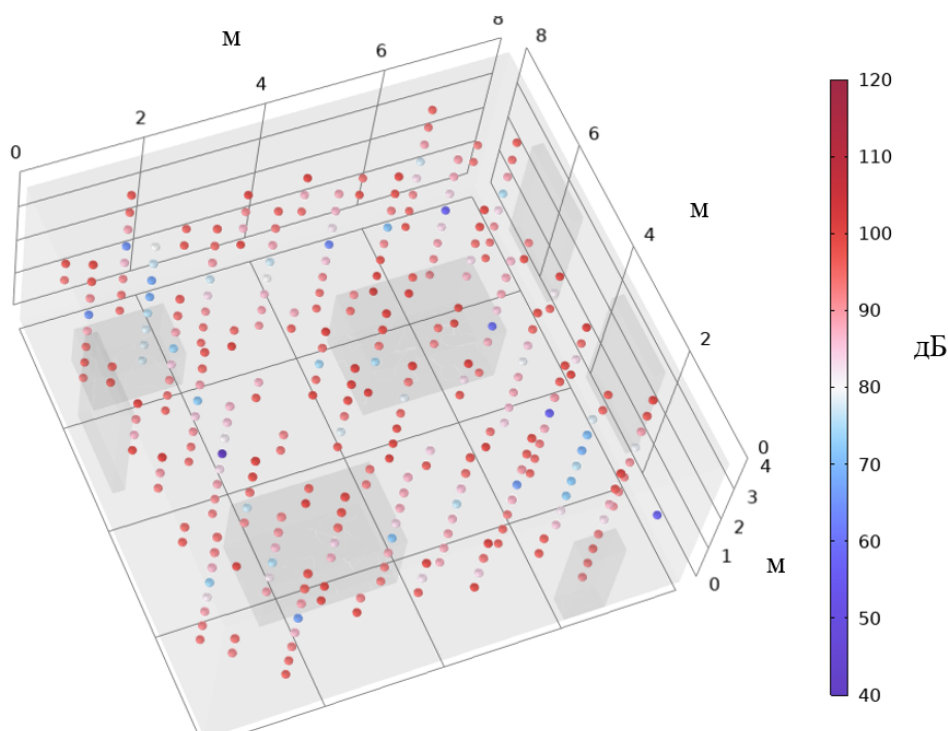


Рисунок 6 – Распределение уровня звукового давления в объеме помещения на частоте 100 Гц

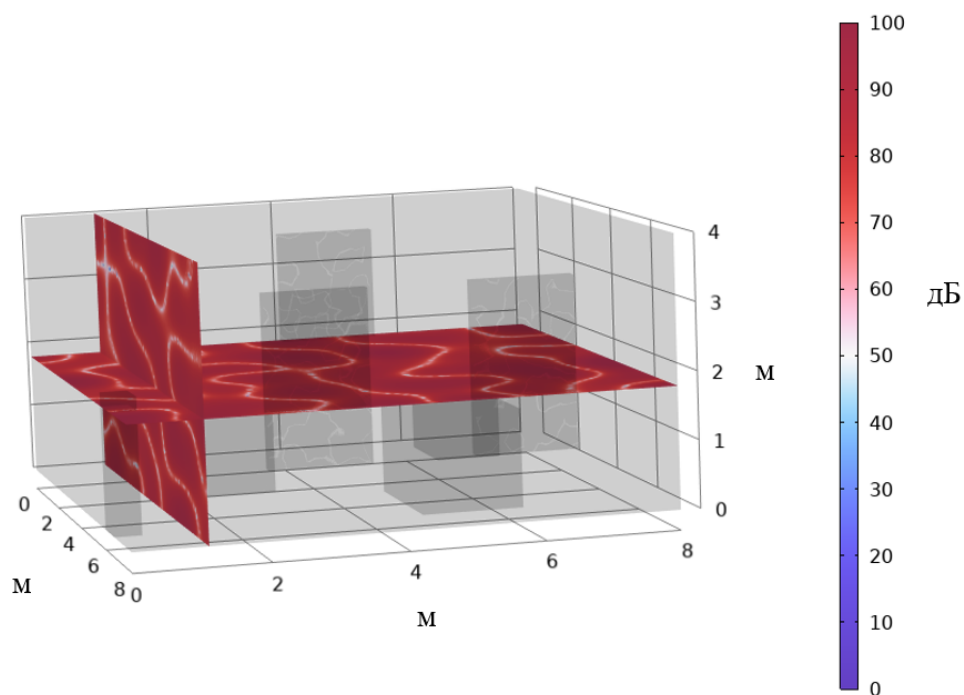


Рисунок 7 – Распределение уровня звукового давления в плоскостях нахождения органов слуха на частоте 100 Гц

Уровни звукового давления на рабочем месте в зависимости от частоты приведены на графике (рисунок 8).

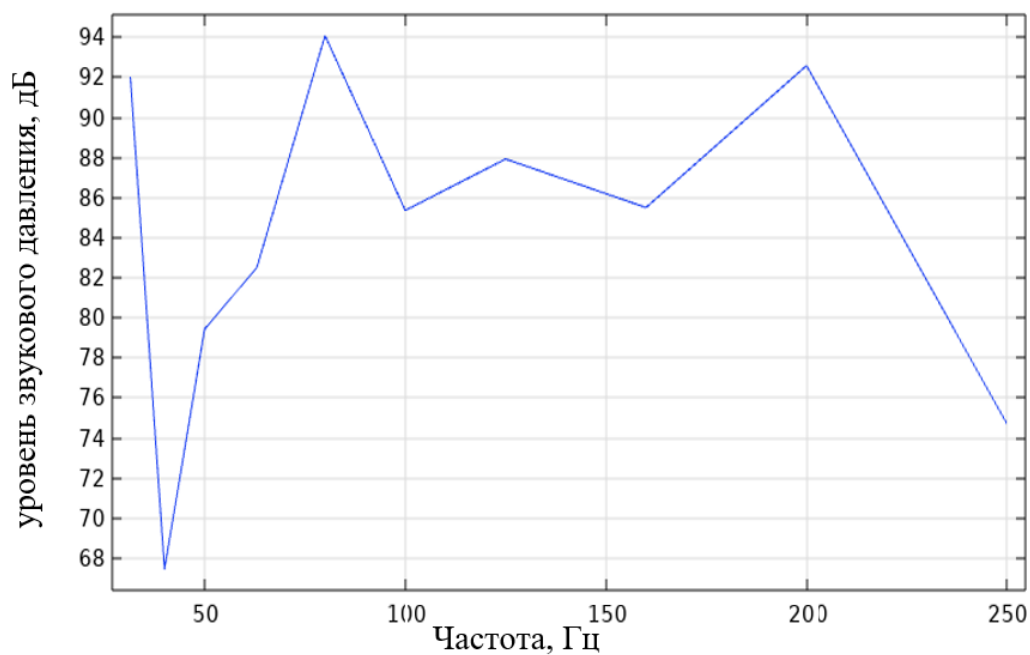


Рисунок 8 – График зависимости уровня звукового давления от частоты в расчётной точке

Проведено сравнение результатов моделирования с результатами инструментального измерения, для чего были отобраны шесть расчётных точек в модели и в помещении. Они были пространственно синхронизированы (координаты точек

в программе совпадали с координатами микрофонов шумомеров). Далее для каждой точки рассчитывался уровень шума на частоте 100 Гц, в итоге определялась средняя относительная погрешность. Инструментальные измерения уровней шума проводились с помощью шумомера «Эко-110А», 1 класс точности. Пределы допускаемой основной инструментальной погрешности прибора в нормальных условиях составляют $\pm 0,7$ дБ.

При сравнении полученных результатов с инструментальными измерениями относительная погрешность составила 3,9% (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнение результатов моделирования и инструментальных измерений

Номер точки	Уровень звукового давления, рассчитанный в модели, дБ	Уровень звукового давления, измеренный шумомером, дБ	Относительная погрешность, %
№1	70,2	73,8	4,9 %
№2	74,3	72,1	3,1 %
№3	75,6	78,2	3,3 %
№4	80,0	84,1	4,8 %
№5	84,2	83,1	1,3 %
№6	85,5	90,7	5,7 %
Средняя относительная погрешность 3,9%			

Заключение

Предлагаемый подход к расчёту уровней шума в производственных цехах демонстрирует (на примере конкретного цеха) применимость методов компьютерного моделирования при расчете низкочастотных уровней шума. Однако, во-первых, необходимо провести дополнительные исследования при различных условиях, геометрии и акустики производственных помещений, чтобы подтвердить надежность результатов моделирования, а во-вторых, расширить частотный диапазон, провести детализацию геометрии и точности задания источников шума. Можно предложить создание гибридных моделей, учитывающих низкочастотный и средне-высокочастотный диапазон источников шума.

Расчёт уровней шума на основе компьютерного моделирования в программе COMSOL Multiphysics показал сходимость результатов с инструментальными измерениями.

Наличие подобных моделей позволит оценить уровни шума не только на этапах проектирования и эксплуатации цеха, но и учесть вклад размещения дополнительных источников шума в помещениях цеха, а также картографировать распределение шума в объеме помещения и, как следствие, обоснованно выбирать мероприятия и средства снижения шума.

Список использованных источников

1. Удельный вес численности работников, занятых на работах с вредными или опасными условиями труда, в организациях. Официальный сайт Росстата [Электронный ресурс]. – https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения 10.03.2026).

2. Каверзнева Т. Т., Скрипник И. Л., Воронин С. В. Оценка условий труда токаря по измерению уровня шума на рабочем месте // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2018. – С. 174-176.

3. Макаров, А. М. Оценка шумового режима при проектировании шумозащиты в производственных зданиях с помещениями сложной формы и технологическим оборудованием: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Макаров Александр Михайлович ; [место защиты: Науч.-исслед. ин-т строит. физики Рос. акад. архитектуры и строит. наук]. – Москва, 2009. – 190 с. : ил.

4. Матвеева, И. В. Оценка звуковых полей помещений при проектировании объёмнопланировочных и конструктивных решений производственных зданий с учётом защиты от шума : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Матвеева Ирина Владимировна ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов, 2000. – 186 с. : ил.

5. Крутова В. Л., Завьялов Д. С. Изучение акустических характеристик на площадке выхода комбайна // Noise Theory and Practice. – 2026. – Т. 12. – № 1. – С. 47-56.

6. Антонов А. И., Леденев В. И. Компьютерное моделирование процессов формирования и распространения звуковой энергии в замкнутых воздушных объемах // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. – 2018. – С. 142-147.

7. Уразгалиев Р.Т. Акустическое моделирование как инструмент снижения шума в производственных помещениях // Инновационные пути обеспечения техносферной безопасности на современном этапе развития науки и образования, Санкт-Петербург, 26 ноября 2025 года. – Ташкент: Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", 2025. – 205 с. – EDN PIBEFK.

8. Ремшев Е. Ю. и др. Оценка возможности моделирования вибро-шумовых характеристик трубопровода и их элементов методом компьютерного моделирования // Noise Theory and Practice. – 2021. – Т. 7. – № 3 (25). – С. 36-41.

9. Zamora J. A., Bolaños J. P. B., Quirós N. M. Evaluación de modelos acústicos del Teatro Nacional de Costa Rica: hacia un diseño mejorado de concha acústica // Tecnología en Marcha. – 2025. – Т. 38. – № 3. – С. 59-71.

10. LI X., ZHANG P. Research on architectural indoor acoustic simulation based on COMSOL multiphysics technology // Experimental Technology and Management. – 2025. – Т. 42. – № 12. – С. 148-154.

11. Ziqing T., Fenghua L. Research on the Archaeoacoustic Simulation of Daxiong Main Halls in Chinese Buddhist Temples Through Comsol Tool // SMARATUNGGA: JURNAL OF EDUCATION AND BUDDHIST STUDIES. – 2022. – Т. 2. – № 2. – С. 83-102.

12. Kang S. et al. An investigation of acoustic environments in large and medium-sized open-plan offices in China // Applied Acoustics. – 2022. – Т. 186. – С. 108447.

13. Dzyuba N. et al. Protection Against Traffic Noise Acoustic Screens with Solar Cells // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Т. 988. – № 3. – С. 032003.

14. Антонов А. И. и др. Компьютерное моделирование акустических параметров производственных помещений предприятий текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 193.

15. Богданова Ирина Виссарионовна, Лоскутникова Инна Николаевна, Заяшникова Кристина Александровна Исследование процесса распространения шума на основе комплексной математической модели // Безопасность техногенных и природных систем.

2017. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protssessa-rasprostraneniya-shuma-na-osnove-kompleksnoy-matematicheskoy-modeli> (дата обращения: 01.05.2026).

References

1. The proportion of employees engaged in jobs with harmful or hazardous working conditions in organizations. Official website of Rosstat [Electronic resource]. – https://rosstat.gov.ru/working_conditions (date of access 10.03.2026).
2. Kaverzneva T. T., Skripnik I. L., Voronin S. V. Assessment of working conditions of a turner by measuring the noise level in the workplace // Modern technologies: current issues, achievements and innovations. – 2018. – P. 174-176.
3. Makarov, A.M. Evaluation of the noise regime in the design of noise protection in industrial buildings with rooms of complex shape and technological equipment: dis. ... Candidate of Technical Sciences : 05.23.01 / Makarov Alexander Mikhailovich ; [place of defense: Scientific research. in-t builds. Physics of the Russian Academy of Sciences. architecture and building sciences]. – Moscow, 2009. 190 p. : ill.
4. Matveeva, I. V. Assessment of sound fields in rooms when designing spatial planning and structural solutions for industrial buildings, taking into account noise protection: dis. ... Cand. of Tech. Sci.: 05.23.01 / Matveeva Irina Vladimirovna; Tambov State Technical University. – Tambov, 2000. – 186 p.: ill.
5. Krutova V. L., Zavyalov D. S. Study of Acoustic Characteristics at the Combine Exit Site // Noise Theory and Practice. – 2026. – Vol. 12. – No. 1. – Pp. 47-56.
6. Antonov A. I., Ledenev V. I. Computer Modeling of the Processes of Formation and Propagation of Sound Energy in Enclosed Air Volumes // Sustainable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport. – 2018. – Pp. 142-147.
7. Urazgaliyev R. T. Acoustic modeling as a tool for noise reduction in industrial premises // Innovative ways to ensure technosphere safety at the current stage of development of science and education, St. Petersburg, November 26, 2025. - Tashkent: National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers", 2025. - 205 p. - EDN PIBEFK.
8. Remshev E. Yu. et al. Evaluation of the feasibility of modeling the vibration and noise characteristics of a pipeline and its elements using computer modeling // Noise Theory and Practice. - 2021. - Vol. 7. - No. 3 (25). - Pp. 36-41.
9. Zamora J. A., Bolaños J. P. B., Quirós N. M. Evaluación de modelos acústicos del Teatro Nacional de Costa Rica: hacia un diseño mejorado de concha acústica // Tecnología en Marcha. – 2025. – T. 38. – No. 3. – pp. 59-71.
10. LI X., ZHANG P. Research on architectural indoor acoustic simulation based on COMSOL multiphysics technology // Experimental Technology and Management. – 2025. – T. 42. – No. 12. – pp. 148-154.
11. Ziqing T., Fenghua L. Research on the Archaeoacoustic Simulation of Daxiong Main Halls in Chinese Buddhist Temples Through Comsol Tool // SMARATUNGGA: JOURNAL OF EDUCATION AND BUDDHIST STUDIES. - 2022. - Vol. 2. - No. 2. - Pp. 83-102.
12. Kang S. et al. An investigation of acoustic environments in large and medium-sized open-plan offices in China // Applied Acoustics. - 2022. - Vol. 186. - Pp. 108447.
13. Dzyuba N. et al. Protection Against Traffic Noise Acoustic Screens with Solar Cells // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – T. 988. – № 3. – P. 032003.
14. Antonov A. I. et al. Computer modeling of acoustic parameters of industrial

premises of textile industry enterprises // News of higher educational institutions. Technology of the textile industry. - 2016. - No. 4. – P. 193.

15. Bogdanova Irina Vissarionovna, Loskutnikova Inna Nikolaevna, Zayashnikova Kristina Aleksandrovna Study of the noise propagation process based on a complex mathematical model // Safety of technogenic and natural systems. 2017. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protsessa-rasprostraneniya-shuma-na-osnove-kompleksnoy-matematicheskoy-modeli> (date of access: 01.05.2026).