

# Разработка программного обеспечения для акустического моделирования помещений

Е.Е. Истратова, Д.Д. Син, В.А. Трибунский

**Аннотация** — В статье приведены результаты разработки и исследования программного обеспечения для проведения моделирования акустической среды помещений. Объектом исследования в работе являлось помещение, для которого было выполнено моделирование акустической среды за счет подбора значений изменяемых параметров. Принцип работы программного обеспечения заключается в реализации расчетов времени реверберации для указанных точек в помещении с возможностью подбора материалов отделки внутренних поверхностей. Для реализации указанной задачи был проведен анализ предметной области, выполнено исследование существующих аналогов, определена архитектура программного обеспечения, разработан алгоритм работы, на основе которого было реализовано программное обеспечение. Для реализации программы был использован язык программирования C#. Для разработки интерфейса пользователя был выбран фреймворк WPF, а для реализации серверной части — фреймворк ASP.NET Core. Отличительной особенностью готового программного решения является низкая требовательность к вычислительным ресурсам компьютера в сочетании с высокой скоростью и точностью моделирования. Разработанная программа может быть использована как в учебных и научно-исследовательских целях, так и архитектурными бюро для моделирования заданной акустической среды в помещении.

**Ключевые слова** — программное обеспечение, акустика, моделирование помещений, акустическая среда, время реверберации

## I. ВВЕДЕНИЕ

Большинство современных мероприятий требует хорошего, а иногда и отличного качества звука, в соответствии с чем, к помещениям, где они проводятся, предъявляется ряд акустических требований. В качестве примеров подобных залов можно выделить как студии звукозаписи, так и театральные и конференц-залы, а также переговорные комнаты [1]. При проектировании данных помещений необходимо учесть множество деталей, чтобы добиться желаемого качества звучания и величины времени реверберации.

Принято считать, что отражение звука от реальных физических объектов — достаточно сложный процесс, который может быть воссоздан программным обеспечением для моделирования акустики помещений. Основной причиной такого мнения является уровень

детализации, присущий физическому объекту с точки зрения его геометрических и акустических свойств.

В различных литературных источниках приводятся примеры программных решений для акустического моделирования помещений. Так, в статье [2] исследуется сложность отражения звука от стены коридора путем моделирования соответствующих акустических передаточных функций в нескольких положениях приемника перед стеной. В исследовании была изучена сложность различных конфигураций стен путем изменения акустического образа. Результаты показали, что для однородной плоской стены сложность является значительной, а для стены, содержащей различные более мелкие объекты, сложность сильно зависит от положения приемника по отношению к объектам.

Акустическая среда учебной аудитории является одним из наиболее важных факторов, влияющих на преподавание и учебную деятельность. Именно поэтому важно обеспечить хорошую разборчивость речи в ней. Однако из-за ряда физических факторов добиться идеальной акустической среды в классе может быть непросто, особенно в больших мультимедийных аудиториях [3].

В промышленности для анализа влияния акустики на технологический процесс применяют различные аппаратные решения, позволяющие зафиксировать с помощью датчиков значения акустического сигнала для его дальнейшего исследования человеком. В результате расчетные частотные зависимости акустического сигнала сравниваются с измеренными на экспериментальном образце и делаются выводы о необходимости шумоизоляции [4,5]. Таким образом, тематика моделирования акустической среды является актуальной и востребованной. Объектом исследования в работе выступило помещение, для которого было выполнено акустическое моделирование.

## II. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

При проектировании аудиторий, залов собраний, а также залов оперных и драматических театров и кинотеатров необходимо создавать такие условия передачи звука, которые обеспечивали бы наилучшую слышимость музыки и речи. При этом слышимость в залах большой вместимости зависит от: мощности и размещения источника звука; объема и формы помещения; очертания и фактуры ограждающих конструкций, которые определяют положение и рассеивание звуковой энергии при отражении ими падающих звуковых волн.

---

Истратова Евгения Евгеньевна, Новосибирский государственный технический университет, [istratova@mail.ru](mailto:istratova@mail.ru)

Син Дина Диннаковна, Новосибирский государственный технический университет, [dina\\_sin@mail.ru](mailto:dina_sin@mail.ru)

Трибунский Владислав Алексеевич, Новосибирский государственный технический университет, [tva.nstu@gmail.com](mailto:tva.nstu@gmail.com)

Эти факторы учитываются при архитектурном конструировании зала [6].

Архитектурная акустика — это наука, которая занимается разработкой оптимальных условий слышимости в помещениях массового пользования.

Реверберация звука — это процесс постепенного уменьшения интенсивности звука при его многократных отражениях.

Одной из важных физических характеристик зала, определяющей его акустические свойства, является время реверберации (послезвучания). В закрытом помещении (зале) после прекращения звучания звук не исчезает сразу, а затухает постепенно.

Стандартное время реверберации — это время, в течение которого сила звука уменьшается в миллион раз (при этом уровень звукового давления уменьшается на 60 дБ).

Причиной послезвучания является то обстоятельство, что, кроме прямого звука от источника, к слушателю приходит последовательно и масса звуков, отраженных от ограждающих поверхностей и отдельных объемных предметов в зале, постепенно ослабевающих по интенсивности. Теоретически, в предположении идеальной диффузности звукового поля в зале время реверберации оценивается по формуле Сэбина-Эйринга (при малых коэффициентах звукопоглощения  $\alpha$  (1)):

$$T = 0,163 \cdot V / A = 0,163 / (\alpha_{cp} S_{огр}) \quad (1)$$

где  $V$  — объем зала,  $\alpha_{cp}$  — средний коэффициент звукопоглощения,  $A$  — общее звукопоглощение в зале.

При большом объеме зала, для высоких частот, в данную формулу вносят поправку на поглощение звука воздухом в объеме зала с учетом его влажности [7].

Для хорошей акустики зала время реверберации в нем не должно быть как слишком малым (глухой звук), так и чрезмерно большим (гулкость зала). Для залов фиксированного объема и для определенного частотного диапазона желательно некое оптимальное время реверберации звука, зависящее от вида речевых и музыкальных программ (музыкальных жанров). При проектировании естественной акустики зала нужно стремиться к тому, чтобы во всех частотных диапазонах расчетное время реверберации было близко к оптимальному [8].

Короткий звуковой сигнал от пистолета (стартового пистолета) улавливается микрофоном, установленным в зале. Электрическое напряжение от микрофона записывается самописцем уровня, работающем в логарифмическом режиме, или осциллографом, шкала которого проградуирована в децибелах. Теоретически, если затухание силы звука  $J$  происходит по экспоненциальному закону, то уровень звукового давления уменьшается со временем по линейному закону. Зная скорость протяжки ленты самописца, на основании данных прямой спада уровня звукового давления, вырисовываемой на ленте, можно оценить время, в течение которого произошел спад уровня звукового давления на 60 дБ. Это и есть время реверберации [9,10].

Структура отражений представляет собой временную последовательность формирования звукового сигнала в определенном месте зала за счет наложения звуковых волн, отраженных от его ограждающих поверхностей (стен, потолка, пола, сцены). Особенно важен начальный этап формирования, когда в конкретную точку приходят первые (ранние) наиболее интенсивные отражения. По времени они носят дискретный характер. В дальнейшем, число отражений резко нарастает, а временные интервалы между ними сокращаются. Отраженные звуки приходят столь часто, что дискретность теряется. Эти слабые и почти непрерывно приходящие отражения формируют так называемый «реверберационный хвост» [11].

Структура ранних мало запаздывающих отражений в разных местах зала может быть различной; она в большой степени зависит от объема зала, формы ограждающих поверхностей (геометрии зала), а также от положения источника звука (по отношению к данной точке зала). «Реверберационный хвост» мало зависит от этих факторов. Проанализировать структуру мало запаздывающих и последующих отражений можно методом геометрической (лучевой) акустики. Более детально ее можно изучить на уменьшенных моделях зала с применением ультразвука [12].

Разборчивость речи — это основная характеристика акустических свойств залов с речевыми программами (аудитории, лекционные залы, залы драматических театров). Наиболее жестким критерием для залов является так называемая слоговая (логотомная) разборчивость речи. Для больших залов рекомендуют проводить экспериментальную оценку разборчивости речи на отдельных местах слушателей. При этом диктор со сцены (кафедры) зачитывает артикуляционную таблицу с произвольным набором слогов, а эксперты на местах записывают эти слоги, как они их слышат. Разборчивость речи количественно оценивается как доля в % правильно услышанных слогов, усредненная по числу экспертов, побывавших на данном месте.

Критериев, по которым оценивают акустические качества залов для музыкальных программ, достаточно много, хотя они отчасти субъективны и не совсем однозначны, например, прозрачность или ясность звучания, пространственность звучания, баланс и т.п. К сожалению, еще не для всех из них установлена связь с физическими параметрами звукового поля в зале. Однако есть ряд факторов, наличие которых однозначно ведет к ухудшению акустики музыкального зала [13].

К мешающим акустическим факторам относятся следующие:

1. Фокусирование звука (концентрация звуковой энергии) на отдельных зрительских местах может происходить при наличии в зале больших вогнутых элементов ограждающих поверхностей с малыми радиусами кривизны (в сравнении с расстояниями до этих элементов от источника звука). Чаще всего, это происходит при высоком куполообразном потолке и вогнутой задней стене. Отраженные от них сильные звуки могут сфокусироваться в одной (или же нескольких) точках, превосходя по интенсивности

прямой звук от источника. Это считается дефектом зала. В открытых театрах и на сценических площадках фокусирование звука может, наоборот, играть положительную роль, создавая хорошую слышимость на больших расстояниях. Для этого сценическая раковина должна иметь форму параболоида вращения, в фокальной плоскости которого располагаются исполнители.

2. Эхо. Обычное эхо (повторение звука) получается, когда на зрительское место, кроме прямого звука от исполнителя, приходят один или несколько первых сильных отражений с большим запазданием по времени. В протяженных залах при высоком потолке и значительной ширине в передней части зала часто этот эффект могут заметить слушатели первых рядов в зале и исполнители на сцене. Минимальное время запаздывания отраженного звука по отношению к прямому, которое может привести к возникновению такого эха, называют критическим интервалом запаздывания. Для чисто речевых залов оно составляет примерно 20—30 мс, для музыкальных залов - 50—80 мс. Особенно опасно эхо, когда оно сопровождается фокусированием звуковой энергии при наличии вогнутых поверхностей в зале. Другая разновидность эха, так называемое порхающее эхо, когда в данную точку (место) периодически возвращаются звуки после многократных отражений. Такое может быть в протяженных (не соразмерных) помещениях правильной геометрической формы при строго параллельных вертикальных стенах с высоким коэффициентом отражения (например, когда стены из мрамора или с большой площадью остекления). Некоторые рекомендации по нивелированию эха и фокусировке звука: изменение геометрии (формы) зала (если это возможно), в частности, некоторый наклон боковых стен по вертикали, не прямоугольное примыкание потолка к задней стене, отсутствие большой площади криволинейных поверхностей в зале. При невозможности (или нецелесообразности) изменения формы зала можно прибегнуть к звукопоглощающей отделке части ограждающих поверхностей, проведя предварительно лучевой анализ зала.

3. Искажение тембра звука наблюдается, когда тембр (окраска) звука на зрительском месте не тождественна тембру звучания инструмента или оркестра на сцене. Такое искажение может возникать при наличии порхающего эха, при отделке части поверхностей зала звукопоглощающими материалами, сильно поглощающими звук в узком диапазоне частот (селективное звукопоглощение), при возбуждении некоторых колебательных мод (частот) в воздушном объеме зала при его несоразмерности и т.д.

4. Нарушение локализации источника звука заключающееся в том, что визуальное положение источника на сцене не совпадает с его слуховым восприятием. Это может быть в случае, когда к слушателю поступают ранние боковые и задние отражения, интенсивность которых во много раз превосходит прямой звук от источника. Так, при

запаздывании отражений на 20 мс энергия отражений должна превосходить энергию прямого звука в 100 раз. Для музыкальных залов небольшая пространственная размытость объекта на сцене даже желательна; для чисто речевых залов это считается акустическим дефектом.

В настоящее время для акустического моделирования все чаще применяется ряд программных продуктов, отличающихся характеристиками и функционалом. При этом у каждой программы есть как положительные, так и отрицательные особенности [14].

Таким образом, цель исследования заключалась в определении критериев сравнения, проведении сравнительного анализа наиболее популярных программных продуктов для акустического анализа и выявлении наиболее универсальных программных продуктов в данной сфере.

Для реализации указанной цели предварительно была проведена классификация существующих программных продуктов и выполнен анализ наиболее распространенных ИТ-решений.

Согласно литературным источникам [15,16], существует два подхода к процессу акустического моделирования помещений. В основу первого из них заложены математические принципы, согласно которым помещение - это призма. Все стены такого помещения, несмотря на то, что они могут иметь различные геометрические параметры, представляют собой плоскости. Это позволяет выполнять расчеты быстро и с более высокой степенью точности. Второй подход основан на применении компьютерной графики. Модель, созданная таким образом, максимально точно повторяет контуры реального помещения за счет повторения всех его поверхностей. Однако главным недостатком данного подхода являются высокие требования, предъявляемые к вычислительным ресурсам.

К программному обеспечению, основанному на математическом подходе, относятся Ansys Sound и Модуль Акустика для COMSOL Multiphysics. Оба программных продукта позволяют отрисовать компьютерную модель помещения, но в процессе работы алгоритмов упрощают сложные геометрические формы в конечное число плоскостей, с которыми в дальнейшем и идет работа. Примерами реализации второго подхода являются следующие программы: EASE, ODEON, CATT-Acoustic и AIST 3D. Они изначально используют алгоритмы, не требующие упрощения геометрии помещений и применяющие расчеты, основанные на трассировке лучей. Подобная разница в подходах связана с тем, что Ansys и COMSOL являлись программами для моделирования физических объектов, и уже впоследствии были адаптированы под акустику и приобрели расширения в виде Ansys Sound и COMSOL Acoustic, тогда как EASE, ODEON, CATT-Acoustic и AIST 3D изначально проектировались под задачи акустического моделирования.

Исследование программных продуктов для акустического моделирования помещений целесообразно начать с анализа отличительных

особенностей каждого решения. Так, EASE и ODEON при проведении расчетов, не учитывают амплитуду звука, что частично ограничивает пользователей, но уменьшает время моделирования и ресурсоемкость. Одним из преимуществ программы CATT-Acoustic является то, что геометрия помещения представлена в отдельном geo-файле, что облегчает обмен данными. AIST 3D среди всего рассматриваемого программного обеспечения является единственным отечественным продуктом, что дает ему преимущество в геополитическом поле. Программы на основе математического подхода также имеют свои преимущества. Например, Ansys Sound позволяет построить спектрограмму не только всего помещения, но и более детальные спектрограммы каждой поверхности. Помимо того, что COMSOL Acoustic построен на применении математического подхода, он имеет возможность дополнить расчеты методом трассировки лучей.

Для проведения сравнительного анализа программного обеспечения для акустического моделирования были рассмотрены следующие критерии: точность модели; скорость расчетов; наличие и качество документации; требования к вычислительным ресурсам; стоимость лицензии.

Под точностью компьютерной модели помещения понимается соответствие рассчитанных параметров и акустики реального помещения. В зависимости от применяемого принципа акустического моделирования и сложности геометрии рассматриваемого помещения точность может значительно варьироваться. Данный критерий, в соответствии с рассмотренными литературными источниками, является наиболее популярным.

Скорость — еще один немаловажный параметр для оценки любого алгоритма, напрямую влияющий на удобство работы с ним со стороны пользователя и сокращающий время выполнения работы, что в итоге позволяет повысить эффективность компании в целом.

Документация важна, в первую очередь, для пользователя, так как позволяет оперативно разобраться с основными принципами работы программного обеспечения. ИТ-решение с подробно описанным функционалом легче изучить и в дальнейшем использовать, а ошибки, возникающие в ходе работы, становятся не такими критичными.

У вычислительных ресурсов нет максимального предела, чем больше математических операций в секунду, тем быстрее будет выполнено моделирование. Но всегда есть минимальный порог, при достижении которого программа теряет все свои преимущества в скорости. Кроме того, качественное программное обеспечение обычно стоит достаточно дорого, а значит, неправильно подобранный продукт может привести к значительным финансовым потерям в попытках увеличения вычислительных мощностей или полного отказа и перехода на другой программный продукт.

Зачастую стоимость лицензии является критическим фактором, особенно для компаний из сферы малого и среднего бизнеса, что и делает данный критерий одним

из важнейших при выборе программного обеспечения.

Для проведения сравнительного анализа на основании литературных источников для каждого программного продукта были определены все критерии сравнения. Полученные абсолютные значения были переведены в относительные для удобства сопоставления и оценивания. В результате была использована шкала от 1 до 6 баллов, где 1 — минимальное значение критерия, а 6 — максимальное. Результаты представлены на рис. 1.

Итоговое соотношение баллов показывает, что лидируют программы на основе геометрического подхода. Обусловлено это в основном повышенной ресурсоемкостью, которая связана с тем, что Ansys и COMSOL ориентированы на расчет реальных физических объектов, и данные расчеты затрагивают большее количество переменных. В свою очередь, Ansys обеспечивает наибольшую точность, а COMSOL демонстрирует оптимальное соотношение точности и скорости. Среди программ, основанных на геометрическом подходе, лидерами стали AIST 3D и EASE. AIST 3D является точным и дешёвым продуктом, кроме того, он почти не требователен к аппаратным ресурсам. EASE, в свою очередь, обеспечивает меньшую точность, но обладает большей скоростью, кроме того EASE популярен среди пользователей и имеет наиболее полный пакет документации, что облегчает работу с ним. Основными преимуществами программы ODEON по сравнению с конкурентами являются: быстрое действие, качественная документация и невысокая цена лицензии. Несмотря на это, данный программный продукт весьма неточен и требователен к ресурсам. Эта особенность делает его достаточно специфичным решением, которое подойдет не всем. Отличным вариантом для малого и среднего бизнеса может стать CATT-Acoustic, который показывает хорошее соотношение скорости и точности, и при этом обладает невысокими ценой лицензии и ресурсоемкостью. Ограничением при использовании данного продукта может стать неполный пакет документов, что частично компенсируется поддержкой сообщества, которое делает различные обучающие статьи и видео на таких площадках, как YouTube.

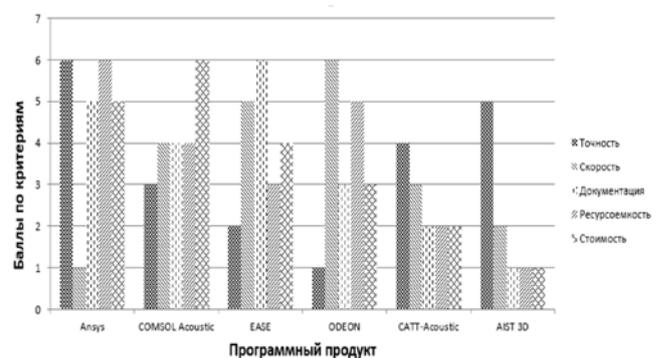


Рисунок 1 — Результаты сравнительного анализа программных продуктов для акустического моделирования помещений

Таким образом, сравнительный анализ программного обеспечения для акустического моделирования помещений показал, что у каждого продукта есть собственные плюсы и минусы. Поэтому для решения каждой конкретной задачи целесообразно подбирать наиболее оптимальный вариант.

### III. РЕАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Разрабатываемое программное обеспечение предназначено для моделирования акустической среды помещения. Под термином «акустическая среда» понимается совокупность звуковых волн природного и техногенного происхождения, непосредственно влияющих на восприятие человеком окружающего пространства.

Объектом исследования является помещение, для которого выполняется моделирование акустической среды за счет подбора значений изменяемых параметров. В качестве ключевых входных характеристик выступают следующие: геометрические размеры помещения; акустические характеристики отделочных материалов; характеристики источника звука; координаты источника звука; координаты контрольных точек.

Принцип работы программы заключается в реализации расчетов времени реверберации для указанных точек в помещении с возможностью подбора материалов отделки внутренних поверхностей.

Таким образом, работа программы заключается в последовательном выполнении следующих действий:

1. Ввод исходных данных.
2. Создание модели помещения.
3. Расчет времени реверберации.
4. Формирование отчета.

Схема работы программного обеспечения приведена на рис. 2.

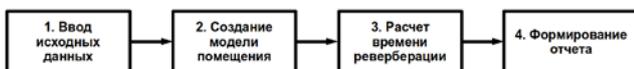


Рисунок 2 — Схема работы программного обеспечения

Первый этап работы с программой связан с непосредственным вводом данных о геометрических размерах помещения; строительных и отделочных материалах, применяемых для обшивки его поверхностей; характеристиках и расположении источника звука и его приемника.

На основе собранных на первом этапе данных осуществляется моделирование геометрии помещения и задание на ней места размещения источника звука и контрольных точек.

Последние два этапа связаны с расчетом времени реверберации в указанных контрольных точках и формированием на его основе отчета о качестве акустической среды помещения.

Таким образом, процесс акустического

моделирования представляет собой предсказание поведения звуковых волн в заданном замкнутом пространстве с учетом его особенностей. Готовый программный продукт может быть использован как в учебных и научно-исследовательских целях, так и архитектурными бюро для моделирования заданной акустической среды в помещении.

Для корректной работы программного обеспечения необходимо определение того, что является входной и выходной информацией. Все входные данные можно разделить на три основные группы, связанные с объектами, воздействующими на акустическую среду помещения. К первой группе относятся параметры, связанные с характеристиками источника звука. Вторую группу составляют критерии, связанные со свойствами приемников звука, то есть с контрольными точками. Третья группа характеристик напрямую зависит от физических свойств моделируемой среды, то есть параметров самого помещения.

Источники звука имеют несколько ключевых характеристик, которые оказывают значительное влияние на акустическое моделирование помещений. К ним относятся следующие:

1. Частота звуковой волны, которая определяет характер взаимодействия звука с поверхностями и предметами в комнате. Звуки более высокой частоты с большей вероятностью будут поглощаться материалами, в то время, как звуки более низкой частоты могут отражаться от поверхностей или проходить через них, преобразовываясь в структурный шум.

2. Направленность источника звука, представляющая собой процесс излучения звуковых волн в определенных направлениях. Данный критерий существенно влияет на общее состояние акустической среды и на качество звука в помещении.

3. Интенсивность источника звука, то есть его громкость. Данная характеристика влияет на общий уровень звука в помещении, а также на распространение и взаимодействие звуковых волн с поверхностями и объектами.

4. Длительность звука, зависящая от конкретного источника звука, то есть общая продолжительность колебаний источника упругих волн. Данный критерий играет роль при определении величины времени затухания и реверберации в помещении.

5. Расположение источника звука в пространстве. Данная характеристика влияет на создание различных эффектов при формировании эха.

Для приемника звука также существует набор параметров, влияющих на качество реализации акустического моделирования помещений. К подобным характеристикам относятся следующие:

1. Расположение приемника и его направленность влияют на его способность улавливать звуковые волны, поступающие от разных направлений.

2. Минимальная интенсивность приемника звука показывает, какую громкость должна иметь звуковая волна, чтобы приемник на нее отреагировал.

На величину времени реверберации влияет несколько факторов, к которым относятся следующие: размер и

форма помещения; материалы, используемые для изготовления или обшивки стен, потолка и пола; наличие мебели или других предметов в помещении.

Все перечисленные факторы относятся к характеристикам, связанным с физическими свойствами моделируемой среды, и могут оказать существенное влияние как на качество звука, так и на акустическую среду в целом.

Выходными параметрами для разрабатываемого программного обеспечения являются значения времени реверберации, рассчитанные в контрольных точках, которые сравниваются с нормативами. На основе этого сопоставления могут быть сделаны выводы о качестве акустической среды в помещении.

На основании проведенного в первом разделе анализа требований к разработке программного обеспечения для акустического моделирования помещений готовый программный продукт целесообразно реализовывать на базе клиент-серверной архитектуры. Это объясняется тем, что данная концепция позволит организовать параллельную работу сразу нескольких пользователей. Когда пользователь отправляет запрос в программу через клиентский интерфейс, запрос отправляется на сервер для обработки. Сервер выполняет расчеты и моделирование и возвращает результаты клиенту для отображения. Перенаправив сложные вычисления на сервер, клиентская машина ориентируется на создание удобного пользовательского интерфейса.

При этом независимая работа сервера обеспечит постоянный доступ к хранимой информации. В качестве клиента будут осуществляться подключения со стороны архитектора, конструктора и администратора. Ранее определенные роли пользователей подразумевают использование графического интерфейса с различным функционалом.

В дополнение к распределению вычислительной мощности клиент-серверная архитектура также позволяет организовать совместную работу между несколькими пользователями. Несколько клиентов могут подключаться к одному и тому же серверу и одновременно работать над одним и тем же проектом, что упрощает совместную работу и обмен ее результатами.

Благодаря тому, что клиент-серверная архитектура позволяет более эффективно использовать вычислительные ресурсы, повышает производительность и скорость отклика, а также обеспечивает совместную работу нескольких пользователей, она является наиболее целесообразным вариантом организации работы программы для акустического моделирования помещений.

В структуре программного обеспечения можно выделить три модуля, отличающихся по своему функциональному назначению. Первый модуль реализуется на стороне клиента и отвечает за процессы, связанные с работой графического интерфейса пользователя и логикой работы, которые предоставляются приложением. Причем у каждой роли пользователей планируется реализация собственного функционала.

Серверная часть представляет собой совокупность двух модулей: базы данных и сервера. Сервер отвечает за выполнение всех операций, обработку данных и хранение их в базе данных. База данных служит важным компонентом программы для акустического моделирования помещений, предоставляя необходимую информацию программе для точного моделирования и прогнозирования поведения звуковых волн в заданном пространстве. В ней хранится вся необходимая для работы системы информация, в том числе формируемые отчеты о качестве акустической среды помещения.

Теория акустических процессов в помещениях основана на законах геометрической оптики. Движение звуковых волн рассматривают подобно движению световых лучей. В соответствии с законами геометрической оптики при отражении от зеркальных поверхностей угол отражения равен углу падения, причем и падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости.

Основная проблема в геометрическом акустическом моделировании — точное и эффективное вычисление путей распространения звука. Так как звук распространяется от источника к приемнику через множество траекторий, содержащих отражения, прохождения и дифракции, то точное моделирование требует больших вычислительных ресурсов.

К полезному звуку, подкрепляющему исходный, относятся все волны, которые достигают уха в течение 50 мс после исходного звука. Концентрированные звуки, приходящие позднее, воспринимаются как эхо.

Немаловажным для слухового восприятия является запаздывание отраженных звуковых волн. Первый запаздывающий сигнал, как правило, приходит от потолка, второй — от боковых стен, третий — от задней стены помещения. Разные требования по времени задержки начальных отражений объясняются особенностями речи и музыкальных звуков и различием решаемых акустических задач.

Так как форма помещения в плане и в разрезе имеет прямоугольную форму, то в работе была учтена структура ранних отражений, включающая следующие две группы отраженных лучей, поступающих от потолка с опозданием на 10-15 мс, от боковых стен с опозданием на 15-25 мс. При расчетах высота источника звука и высота контрольных точек над уровнем пола были приняты, равными 1,2 метра. Причем было введено ограничение, что источник звука и контрольные точки лежат на одной прямой, перпендикулярной ширине помещения.

Таким образом, расчет акустической среды включал в себя следующие этапы: расчет времени реверберации; расчет времени запаздывания первых отражений; сравнение полученных значений с нормативными.

Время реверберации определяется по формуле Сэбина (1). Таким образом, для определения времени реверберации в помещении необходимо предварительно определить его объем, суммарную площадь ограничивающих поверхностей и эквивалентную площадь звукопоглощения, где первое слагаемое — это сумма произведений коэффициентов звукопоглощения

отдельных поверхностей и их площадей; второе слагаемое — это сумма эквивалентных площадей звукопоглощения приемниками; последнее слагаемое — это произведение среднего коэффициента добавочного звукопоглощения на площадь ограждающих поверхностей.

Расчет времени реверберации осуществлялся для частот, равных 125 Гц, 500 Гц и 2000 Гц, поскольку именно эти уровни являются наиболее показательными при моделировании акустической среды. Время реверберации для помещений многоцелевого назначения средней вместимости должно быть в пределах от 0,8 с до 1,2 с. В работе были приняты значения среднего коэффициента добавочного звукопоглощения для частот 125, 500 и 2000 Гц, равные, соответственно, 0,09; 0,05 и 0,05.

Величина времени запаздывания первых отражений характеризует гармоничность акустической среды помещения и не должна превышать значений 10-15 мс для потолка и 15-25 мс для боковых стен.

Время запаздывания первых отражений в работе определяется по формуле (2):

$$\Delta t = (L_1 - L_0) / C \quad (2)$$

где  $C$  — скорость звука (340 м/с);  $L_0$  — это натуральная длина звукового луча (волны);  $L_1$  — это длина отраженного звука, которая складывается из длины луча, прошедшего от источника до отражающей поверхности, а потом до контрольной точки.

Для расчета времени запаздывания первых отражений в работе задают координаты исходной точки, то есть источника звука, и координаты трех контрольных точек, расположенных на высоте 1,2 м над полом. Таким образом, для исходной точки задаются две координаты  $x_0$  и  $y_0$ , а для контрольных точек только по одной координате  $x_i$ . Пример расположения точек на плане помещения приведен на рис. 3.

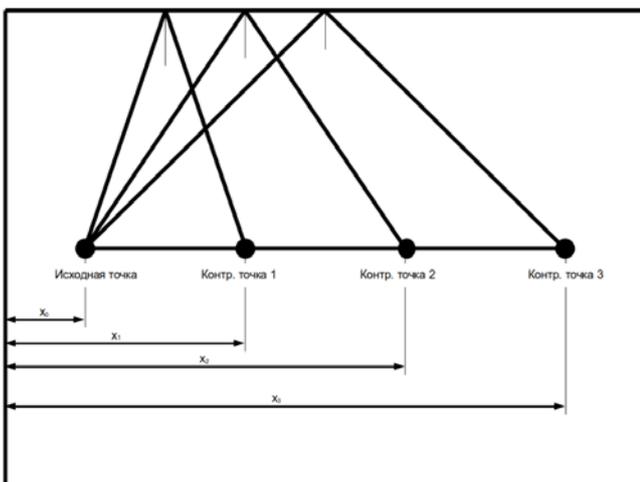


Рисунок 3 — Размещение точек на плане помещения

При расчете времени запаздывания первых отражений для боковых стен полученная величина не должна превышать 10-15 мс. При расчете времени запаздывания первых отражений для потолка

полученная величина не должна превышать 15-25 мс.

Таким образом, алгоритм работы программного обеспечения (рис. 4) включает следующие основные этапы: ввод данных, проведение расчетов, вывод результатов.

Процесс выбора инструментальных средств для реализации программного обеспечения для проведения акустического моделирования помещений включал несколько этапов, связанных с определением программных продуктов определенного функционального назначения. Таким образом, предварительным этапом стал выбор групп инструментальных средств, необходимых для разработки. В результате анализа литературных источников и существующих программ-аналогов, были выделены следующие группы инструментов: система управления базами данных; фреймворк для разработки интерфейса пользователя; фреймворк для разработки серверной части.

В результате сравнения систем управления базами данных для реализации программного обеспечения для акустического моделирования помещений был выбран программный продукт MySQL, который отличается высокой производительностью и минимальной стоимостью лицензии. Для разработки интерфейса пользователя был выбран фреймворк WPF, написанный на языке программирования C#. На основании ряда критериев наиболее оптимальным вариантом для разработки серверной части был выбран фреймворк ASP.NET Core.

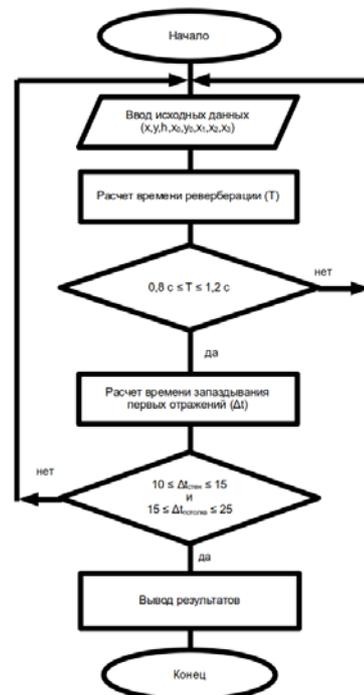


Рисунок 4 — Блок-схема алгоритма работы программного обеспечения

На основании анализа исходных данных была спроектирована база данных, физическая модель данных которой приведена на рис. 5.

Рисунок 6 — Главное окно программы

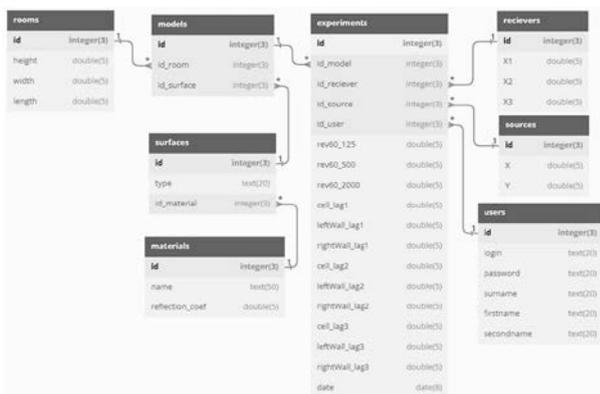


Рисунок 5 — Физическая модель данных

Таблица materials представляет собой перечень отделочных материалов и хранит в себе наименование материала и его коэффициент отражения звука.

Таблица rooms хранит в себе список помещений, для которых могут быть выполнены или уже проводились эксперименты по исследованию акустической среды. Каждое помещение имеет такие характеристики, как: высота, ширина, длина, уникальный номер.

Таблица experiments содержит отчеты по всем выполненным исследованиям, включая информацию о том, для какой модели помещения оно было проведено, каким оператором, когда и какие при этом участвовали исходные и контрольные точки, а также информацию о результатах анализа акустической среды в помещении.

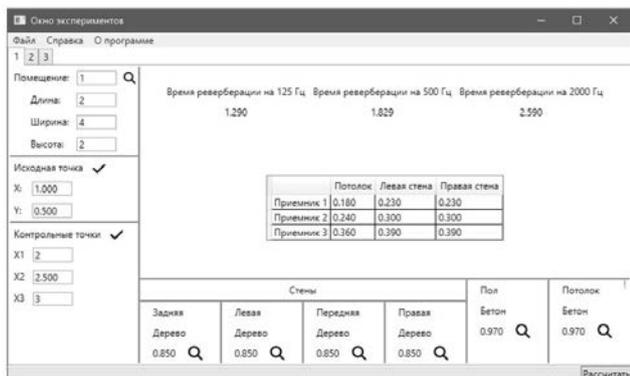
Таблица receivers включает перечень всех приемников звука, каждый из которых имеет собственные координаты внутри помещения.

Таблица users содержит информацию об операторе, проводившем эксперимент, а именно: фамилию, имя, отчество, данные для авторизации.

В таблице sources хранятся координаты источника звука.

Таблица models включает полноценную модель помещения, объединяя геометрические характеристики помещения и акустические параметры его поверхностей.

Таблица surfaces содержит описание типов поверхностей помещения: правая, левая, передняя, задняя стены; пол; потолок. Также в данной таблице хранятся данные об акустических коэффициентах материалов, нанесенных на конкретную поверхность.



Для входа в программу применяется авторизация, позволяющая ограничить доступ пользователей в информационную систему в соответствии с их ролями. После успешной авторизации пользователю становится доступно рабочее окно программы (рис. 6).

Под горизонтальной строкой меню показаны вкладки с проводимыми экспериментами. Это позволяет пользователю работать параллельно с несколькими вариантами расчетов.

В структуре главного окна можно выделить несколько ключевых функциональных блоков. Блок ввода данных расположен в левой части окна и отвечает за настройку параметров как исследуемого помещения, так и задание координат источника звука и контрольных точек.

В нижней части главного окна размещен блок для работы с материалами и поверхностями. В нем перечислены все поверхности помещения с указанием применяемых отделочных материалов и их коэффициентов отражения звука. Клик на значке с изображением лупы дает возможность пользователю перейти к выбору отделочного материала для конкретной поверхности. Окно для выбора материалов включает строку поиска и список материалов. В составе списка показаны материалы, имеющие в своем названии фрагмент текста, введенный в поисковой строке. При этом, в случае пустой поисковой строки, осуществляется вывод всех наименований материалов в алфавитном порядке, но не превышающий 50 значений на лист. В центральной части главного окна программы размещено окно с результатами расчетов времени реверберации и времени запаздывания первых отражений. В нижней части главного окна справа расположена кнопка «Рассчитать». При ее нажатии на сервер отправляется запрос на проведение расчетов, также одновременно идет запись в базу данных исходных параметров помещения, координат источника и приемников звука и других выбранных значений.

В процессе работы сервера периодически по достижении определенных внутренних отметок пользователю отображается процент выполнения эксперимента. Эти значения показаны в полосе загрузки слева от кнопки рассчитать. Готовые результаты расчетов сервер отправляет клиенту, который отображает их в соответствующем блоке в центральной части главного окна программы.

Для определения эффективности работы готовую программу сравнили с программами-аналогами. В качестве объекта сравнения выступил зал многоцелевого назначения, имеющий в плане и в разрезе форму прямоугольника. В эксперименте был выполнен расчет времени реверберации и времени запаздывания первых отражений для трех контрольных точек, размещенных на определенных расстояниях от источника звука. Для отделки поверхностей были использованы одинаковые материалы (бетон для пола и потолка; для стен — пластиковые панели с коэффициентом отражения звука, равным 0,96).

Сравнение проводили по двум критериям: точность и скорость выполнения расчетов. В качестве эталона точности в помещении был проведен эксперимент, определенное в ходе которого, время реверберации было взято за 100%. Полученные при помощи моделирования значения времени реверберации сравнивали с данной величиной, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сравнения с программами-аналогами

Программы	Точность, %	Скорость, с
Ansys	74	5
Odeon	91	15
Ease	95	21
Разработанное ПО	92	3

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы было спроектировано и протестировано программное обеспечение для акустического моделирования помещений.

В ходе выполнения был проведен анализ предметной области, заключающийся в определении основных понятий и характеристик акустики. Также был выполнен анализ программ для акустического моделирования помещений. В итоге были сформулированы цель и задачи разрабатываемого программного обеспечения.

Следующим этапом являлось проектирование программного обеспечения, состоящее из определения принципа работы программного обеспечения; выявления входной и выходной информации; выбора архитектуры программного обеспечения; проектирования алгоритма работы программы. Кроме того, были определены инструментальные средства для разработки программного обеспечения. В качестве решения для клиентской части программы был выбран фреймворк .NET WPF, для серверной части были выбраны инструментальные средства ASP.NET и MySQL.

Заключительным этапом стала разработка программного обеспечения. В результате была выполнена программная реализация разработанного алгоритма, разработана база данных, спроектирован пользовательский интерфейс, выполнено сравнение с программами-аналогами.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Истратова Е.Е., Черный Ю.С., Бирюля С.И. Сравнительный анализ программного обеспечения для акустического моделирования помещений // Творчество и современность. — 2017. — № 2 (3). — С. 102-108.
- [2] Kuster M., de Vries D. Modelling and Order of Acoustic Transfer Functions Due to Reflections from Augmented Objects. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2007, 030253 (2006). <https://doi.org/10.1155/2007/30253>.
- [3] Zhu P., Tao W., Lu X. Optimisation design and verification of the acoustic environment for multimedia classrooms in universities based on simulation. Build. Simul. 15, 1419–1436 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0875-7>.

- [4] Hegde V., Yellampalli S.S., Ravikumar H.M. Simulation, mathematical modeling, fabrication and experimental analysis of piezoelectric acoustic sensor for energy harvesting applications. Microsyst Technol 26, 1613–1623 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04702-x>.
- [5] Kytin V.G., Kytin G.A. Modeling of Acoustic Resonance in Spherical Resonators for the Precision Determination of Thermodynamic Temperature. Meas Tech 58, 50–58 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0662-x>.
- [6] Люкина Е.В., Чернышова Т.В. Яновский А.С. Совершенствование методов акустического проектирования // Т-Comm. - 2016. - № 10. - С. 23-27.
- [7] Миргородская Ю.В., Бернавская М.В., Стаценко Л.Г. Объектный анализ акустического поля, создаваемого различными источниками звука в произвольном помещении // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2018. - № 6 (200). - С. 85-94.
- [8] Кузнецова А.И. Методы моделирования акустического пространства оперных театров // Вестник Академии русского балета им. А. Я. Вагановой. - 2018. - № 1 (54). - С. 51-59.
- [9] Гиясов Б.И., Леденев В.И., Макаров А.М. Компьютерный анализ влияния технологического оборудования на акустические характеристики производственных помещений // Вестник МГСУ. - 2012. - № 11. - С. 271-277.
- [10] Панфилов А.П., Тиганов Р.Е., Тихонов Р.А. Виртуальная система моделирования акустики для малогабаритной студии звукозаписи CC SAM // Вестник ИИШ ДВФУ. - 2022. - № 3 (52). - С. 117-122.
- [11] Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н., Щиржецкий А.Х. К проблеме акустического проектирования современных залов многоцелевого назначения // Жилищное строительство. - 2019. - № 7. - С. 16-24.
- [12] Мигачева Т.А., Черкасова Н.А. К определению акустических параметров в программной среде // Вестник магистратуры. - 2015. - № 11-1 (50). - С. 66-69.
- [13] Горчакова С.Д., Сапожников А.П. Оценка качества и улучшение акустической среды в учебной аудитории // ИВД. - 2018. - № 4 (51). - С. 14-24.
- [14] Люкина Е.В., Чернышева Т.В., Литвин С.А. Прогнозирующее моделирование при акустическом проектировании // Т-Comm. — 2021. — № 9. — С. 31-36.
- [15] Белов В.В., Буркатовская Ю.Б., Кожевникова А.В. Статистическое имитационное моделирование в атмосферно-оптических и акустических приложениях // Вычислительные технологии. — 2021. — № 3. — С. 57-75.
- [16] Чусов А.А., Стаценко Л.Г., Черкасова Н.А. Объектно-ориентированный подход при моделировании акустического поля в помещении // Вестник инженерной школы ДВФУ. — 2020. — № 4 (29). — С. 16-24.

**Истратова Евгения Евгеньевна.** Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления. Количество печатных работ: 121. Область научных интересов: информационные технологии, информационные сети, системы компьютерного зрения. e-mail: [istratova@mail.ru](mailto:istratova@mail.ru) (ответственная за переписку).

**Син Дина Диннаковна.** Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Кандидат архитектуры, доцент, доцент кафедры иностранных языков. Количество печатных работ: 21. Область научных интересов: иностранные языки, акустическое моделирование, информационные системы.

**Трибунский Владислав Алексеевич.** Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. Студент факультета автоматики и вычислительной техники. Количество печатных работ: 5. Область научных интересов: информационные технологии, информационные системы.

# Development of software for rooms acoustic modeling

E.E. Istratova, D.D. Sin, V.A. Tribunskiy

**Abstract** — The article presents the results of the development and research of software for modeling the acoustic environment of premises. The object of study in the work was the room for which the simulation of the acoustic environment was performed by selecting the values of the variable parameters. The principle of operation of the software is to implement calculations of the reverberation time for the specified points in the room with the possibility of selecting materials for finishing the internal surfaces. To implement this task, an analysis of the subject area was carried out, a study of existing analogues was carried out, the architecture of the software was determined, an algorithm was developed, on the basis of which the software was implemented. The C# programming language was used to implement the program. The WPF framework was chosen to develop the user interface, and the ASP.NET Core framework was chosen to implement the server side. A distinctive feature of the ready-made software solution is the low demands on computer computing resources, combined with high speed and accuracy of modeling. The developed program can be used both for educational and research purposes, and by architectural bureaus for modeling a given acoustic environment in a room.

**Keywords** — software, acoustics, room modeling, acoustic environment, reverberation time.

## REFERENCES

- [1] Istratova E.E., Cherniy Yu.S., Biryulya S.I. Comparative analysis of software for acoustic modeling of premises // *Tvorchestvo i sovremennost'*. - 2017. - № 2 (3). - S. 102-108.
- [2] Kuster M., de Vries D. Modelling and Order of Acoustic Transfer Functions Due to Reflections from Augmented Objects. *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2007, 030253 (2006). <https://doi.org/10.1155/2007/30253>.
- [3] Zhu P., Tao W., Lu X. Optimisation design and verification of the acoustic environment for multimedia classrooms in universities based on simulation. *Build. Simul.* 15, 1419–1436 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0875-7>.
- [4] Hegde V., Yellampalli S.S., Ravikumar H.M. Simulation, mathematical modeling, fabrication and experimental analysis of piezoelectric acoustic sensor for energy harvesting applications. *Microsyst Technol* 26, 1613–1623 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04702-x>.
- [5] Kytin V.G., Kytin G.A. Modeling of Acoustic Resonance in Spherical Resonators for the Precision Determination of Thermodynamic Temperature. *Meas Tech* 58, 50–58 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0662-x>.
- [6] Lyukina E.V., Chernyshova T.V., Yanovsky A.S. Improvement of acoustic design methods // *T-Comm.* - 2016. - № 10. - S. 23-27.
- [7] Mirgorodskaya Yu.V., Bernavskaya M.V., Statsenko L.G. Object analysis of the acoustic field created by various sound sources in an arbitrary room // *Izvestiya SFU. Technical science.* - 2018. - № 6 (200). - S. 85-94.
- [8] Kuznetsova A.I. Methods for modeling the acoustic space of opera theaters. *Bulletin of the Academy of Russian Ballet. A. Ya. Vaganova.* - 2018. - № 1 (54). - S. 51-59.
- [9] Giyasov B.I., Ledenev V.I., Makarov A.M. Computer analysis of the impact of technological equipment on the acoustic characteristics of industrial premises. *Vestnik MGSU.* - 2012. - № 11. - S. 271-277.
- [10] Panfilov A.P., Tiganov R.E., Tikhonov R.A. Virtual acoustic modeling system for a small-sized recording studio CC SAM // *Bulletin of ISH FEFU.* - 2022. - № 3 (52). - S. 117-122.
- [11] Shchirzhetsky Kh.A., Sukhov V.N., Shchirzhetsky A.Kh. On the problem of acoustic design of modern multi-purpose halls // *Zhishchnoe stroitel'stvo.* - 2019. - № 7. - S. 16-24.
- [12] Migacheva T.A., Cherkasova N.A. To the definition of acoustic parameters in the software environment // *Bulletin of the Magistracy.* - 2015. - № 11-1 (50). - S. 66-69.
- [13] Gorchakova S.D., Sapozhnikov A.P. Assessment of the quality and improvement of the acoustic environment in the classroom // *IVD.* - 2018. - № 4 (51). - S. 14-24.
- [14] Lyukina E.V., Chernysheva T.V., Litvin S.A. Predictive Modeling in Acoustic Design // *T-Comm.* - 2021. - № 9. - S. 31-36.
- [15] Belov V.V., Burkatovskaya Yu.B., Kozhevnikova A.V. Statistical simulation modeling in atmospheric-optical and acoustic applications // *Computational technologies.* - 2021. - № 3. - S. 57-75.
- [16] Chusov A.A., Statsenko L.G., Cherkasova N.A. Object-oriented approach to modeling the acoustic field in a room // *Bulletin of the FEFU Engineering School.* - 2020. - № 4 (29). - S. 16-24.