

мы, что особенно важно с точки зрения выполнения требований ФЗ-187 к значимым объектам критической информационной инфраструктуры и

создаваемому в России киберпространству с применением морских БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные беспилотные летательные аппараты. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_\(дрон,_БПЛА\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Беспилотный_летательный_аппарат_(дрон,_БПЛА)). (дата обращения 03.06.2020).

2. Климов С. М., Сычев М. П., Астрахов А. В. Противодействие компьютерным атакам. Методические основы / МГТУ имени Н. Э. Баумана. М., 2013.

3. Колмогоров. Юбилейное издание: в 3 кн. М.: Физико-математическая литература, 2003.

D. E. Vorobieva

Saint Petersburg Electrotechnical University

«SECURITY COCOON» FOR MARINE DRONES

Is dedicated to the implementation of the protected use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the field of maritime transport. The main ideas of the use of maritime UAVs, including in conjunction with unmanned sea vessels, have been analyzed. Proposals have been developed to protect them from targeted impacts in the form of emergency management commands and software bookmarks, in the case of incomplete import substitution in both hardware and, most importantly, software. The results of an in-depth study of the offending model are presented. A model of blocking broadcasting commands, implementing the concept of the Project Safenet of the National Technology Initiative of the Russian Federation in relation to untrustworthy technological means, has been proposed. An analytical model for the operation of the protection system has been proposed. Shown is the possibility of moving from a stochastic threat model to a deterministic model of guaranteed protection against arbitrary impact codes.

Marine UAVs, the continuity of the information system, blocking commands broadcaster, hacker's attacks, «security cocoon»

УДК 534.231.2

Ю. В. Миргородская, Л. Г. Стаценко, А. А. Чусов

Дальневосточный федеральный университет

Исследование акустических свойств помещения при помощи высокопроизводительной программно-аппаратной системы моделирования акустических полей CAMaaS

Проведен обзор программно-аппаратных систем для расчета акустических характеристик помещений моделированием акустических полей. Описаны достоинства и недостатки самых распространенных программ – ODEON, EASE, CATT-Acoustic, CARA. Представлены используемые программами методы расчета акустических характеристик помещений. Предложена математическая модель, которая положена в основу расчета акустического поля в произвольном пространстве и реализована при разработке высокопроизводительной программно-аппаратной системы моделирования физических полей CAMaaS (Computer-Aided Modelling as a Service), разработанной в Дальневосточном федеральном университете. Для апробации инструмента были проведены натурные измерения сертифицированным оборудованием в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013, а также численные расчеты в экспериментальном образце программной среды CAMaaS. Представлены результаты натурных измерений и численных расчетов акустических параметров (время реверберации, уровень звукового давления) конференц-зала «Красный» Дальневосточного федерального университета.

Архитектурная акустика, акустические характеристики помещений, компьютерное моделирование, высокопроизводительные системы моделирования

Одной из важнейших задач архитектурной акустики является исследование акустических

характеристик помещений различного назначения для качественного воспроизведения и записи зву-

ка (конференц-залов, кинотеатров, концертных залов, студий звукозаписи и т. д.). Моделирование акустических параметров помещений стало важным при строительстве новых и реконструкции существующих общественных зданий – как типовых, так и уникальных, что связано с необходимостью еще на стадии проектирования принять меры к обеспечению в залах этих зданий оптимальных условий для слухового восприятия.

В настоящее время первоочередными задачами акустического проектирования стали исследование процессов отражения и поглощения звука поверхностями, влияние отраженных волн на слышимость речи и музыки, методы управления структурой звукового поля, шумовыми характеристиками аппаратуры и др.

С развитием цифровых технологий, созданием новых акустических систем появилась возможность облегчить и автоматизировать расчет акустических характеристик помещений. Существует множество профессиональных программ данного направления. Разработчиками коммерческих программ акустического моделирования выступают в основном зарубежные фирмы, отечественных разработок в этой области практически нет.

Обзор существующих программ. Нами были рассмотрены 8 подобных программ – ODEON, EASE, CATT-Acoustic, CARA, AIST-3D, ARTA, RAMSETE, ULYSSES. Самые распространенные из них – ODEON, EASE, CATT-Acoustic, CARA – рассмотрены более детально [1]–[10].

Исследованные нами системы анализа акустических свойств помещений имеют ряд достоинств и недостатков. К достоинствам относится возможность (простота) расчета основных параметров – времен реверберации и ранних отражений, энергии ранних отражений, коэффициента корреляции, энергетических параметров, индексов передачи речи, уровня звукового давления и др. На основе этих расчетов проводится анализ акустического поля помещения, что позволяет еще на стадии проектирования оптимизировать помещение с точки зрения его акустических свойств.

К недостаткам этих детально рассмотренных программ относится наличие погрешностей вычислений, обусловленных использованием аппроксимирующих статистических и геометрических математических моделей поля и среды распространения акустических волн, которые, например, не учитывают в ряде случаев диффу-

зию звука на рассеивающих поверхностях. Другой недостаток этих программных комплексов – низкая масштабируемость параллельных реализаций имитационного моделирования, недостаточная полнота применения распространенных аппаратных реализаций параллельных вычислений (CUDA), гибридных систем ЭВМ и векторных процессоров.

Вследствие большого числа показателей эффективности программных и имитационных моделей, а также программ, которые реализуют моделирование, выбор лучшей модели сложен (сопоставим со сложностью полного решения задачи оптимизации), поэтому оценка выполняется по двум показателям – числу выходных параметров, получаемых при имитационном моделировании, а также по удобству пользовательского интерфейса. В результате выполненной оценки по первому показателю несомненно превосходство программы CATT, а по второму показателю лидирует программа EASE. Последняя также хорошо показывает себя при создании моделей акустического поля в замкнутых помещениях. Однако в целом можно отметить низкую применимость для этих целей программ компьютерного моделирования акустического поля. С программами для архитектурной акустики ситуация сложилась совершенно иная. Для решения большинства практических задач можно с успехом использовать любую из четырех рассмотренных программ. Все они позволяют корректно вычислять структуру ранних звуковых отражений, что наиболее важно для акустического проектирования, а также определять значения основных критериев акустического качества. Этим, по всей видимости, и определяется широкое применение данных программ в исследовательских работах по акустике помещений. Однако стоит отметить и то, что такие программные продукты – закрытые коммерческие разработки, созданные в большей степени за рубежом и обладающие отмеченными выше недостатками.

Методы расчета акустических характеристик, используемые во всех рассмотренных программах, сходны. Существует три теории, описывающие процесс распространения звукового поля в помещении. Одна из них – статистическая – основана на модели идеального помещения [11]. В ней учитываются лишь объем помещения, площадь и коэффициенты поглощения, но совершенно не отражены форма помещения и места

расположения звукопоглощающих материалов, что существенно сказывается на результатах: расчетное время реверберации отличается от измеренного, а качество звучания в помещениях, одинаковых по объему, но имеющих разную форму, часто оказывается различным.

Волновые методы расчета отклика помещения, например метод конечных элементов, дают значительно более точные результаты, однако применять их на практике можно только для низких частот, так как с ростом частоты резко увеличивается время вычислений: показательно – от числа элементов, и экспоненциально – от глубины переотражений учитываемых компонент акустических волн. Метод позволяет получить точное решение уравнений акустики с учетом интерференции, дифракции и прочих волновых эффектов, в связи с чем в коммерческих программах для расчета акустических свойств помещений волновой подход применяется весьма ограниченно и с высокой степенью численной аппроксимации математических моделей поля.

Достаточно широко в программных комплексах используется лучевая теория. В методах геометрической акустики проводят аналогию с геометрической оптикой, в связи с чем считается, что звук распространяется прямолинейно и, подобно световым лучам, зеркально отражается от стен, т. е. и для него угол падения равен углу отражения. Такое положение работает, когда размеры окружающих препятствий существенно больше длины падающей звуковой волны. Невыполнение этого условия приводит к рассеиванию звуковых волн, и построение отраженных звуковых лучей теряет смысл. Следовательно, наиболее точные результаты в геометрической теории приходятся на область средних звуковых частот [12].

Характер отражений зависит от формы окружающей поверхности. С помощью графических построений, натурного или компьютерного моделирования определяют наилучшие форму и размеры помещения. При этом помещению придают такую форму, чтобы направить звуковые волны от источника звука к слушателям, а временные задержки, обусловленные начальными отражениями, оптимизировать для получения наилучшего восприятия [13].

Основные алгоритмы в методах геометрической оптики – это методы мнимых источников и лучевых траекторий. На основе этой модели были разработаны два основных алгоритма: ray tracing (метод

трассировки лучей) и mirror image (метод мнимых источников). Остальные алгоритмы, как правило, – только модификации этих двух методов [14].

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки. Метод мнимых источников теоретически может оказаться более точным, так как при заданной точности расчета с его помощью можно определить все лучи, попадающие на приемник. Однако с увеличением кратности переотражений объем обчисливаемого массива данных возрастает в геометрической прогрессии, что сказывается на времени расчета. Метод лучевых траекторий в целом более прост и работает быстрее метода мнимых источников. Однако при недостаточном количестве тестовых лучей можно упустить из виду ряд переотражений, что приведет к ошибкам в моделировании.

Метод лучевых траекторий принципиально хорошо поддается распараллеливанию, поэтому распространение и увеличение масштабируемости программных и аппаратных параллельных вычислителей позволили методу лучевых траекторий занять доминирующее положение при решении задач подобного типа. Например, при наличии достаточных вычислительных мощностей и не слишком высоких требований к адекватности имитационных моделей моделирование можно выполнять в реальном времени.

Результаты исследований акустических характеристик помещений. На протяжении нескольких лет нами были исследованы около 10 залов различного назначения в городе Владивостоке – Молодежный центр Дальневосточного государственного технического университета, Приморская краевая филармония, Пушкинский театр, Покровский собор, кинотеатр «Уссури», концертные залы приморских районных клубов, конференц-залы Дальневосточного федерального университета [15]–[19]. Исследования были направлены на оценку акустических характеристик помещений различного назначения с целью улучшения качества звучания. Для этого были проведены теоретические расчеты и экспериментальные исследования акустических параметров помещения.

Одним из принципиальных требований к эффективности реализации методов расчета было требование к масштабируемости. Для этой цели было выполнено программное моделирование, использующее симметричные мультипроцессоры, графические процессоры CUDA и распределен-

ное моделирование по узлам вычислительной сети на основе транспортного уровня OSI. Все это вместе с выбранной алгоритмической моделью акустического поля, основанной на использовании лучевого приближения в совокупности с численной аппроксимацией среды распространения звуковых волн и поля, образованного источниками вторичного поля (и кастомизируемой глубиной учитываемых переотражений), позволило обеспечить масштабируемость реализации и ее гибкость в обеспечении требуемой эффективности моделирования, обусловленной результативностью, оперативностью и ресурсоемкостью. Концептуальной основой представления модели поля и среды обеспечения моделирования выбраны принципы компонентно-ориентированного и объектно-ориентированного программирования. При этом модель поля и программная реализация представляются в виде совокупности объектов, каждый из которых относится к определенному классу, а классы образуют иерархию наследования [20], [21].

Математическая модель звукового поля в предметной области. Расчет акустических характеристик помещения основан на представлении волновых элементов поля, порождаемых источником, с учетом их последовательных отражений на поверхностях до приемлемого затухания каждого луча [22].

Для расчета поля в произвольном пространстве была создана математическая модель, основанная на геометрической теории представления акустических волновых процессов. При моделировании источник звука задается сущностью «источник поля». Траектории излучаемых лучей прослеживаются до момента, когда уровень звукового давления уменьшится до заданного значения, или до момента пересечения с «полигональной отражающей поверхностью», являющейся секущей плоскостью пространства. Используя методы геометрической акустики, можно рассчитать импульсный отклик, с помощью которого определить множество акустических параметров помещения и электроакустических систем, а также представить модель звукового поля в режиме нарастания. В данном случае особый интерес представляет метод прослеживания звуковых лучей (ray tracing). Он заключается в отслеживании и построении траектории некоторого набора звуковых лучей, испускаемых источником, при их последовательном переотражении от граничных

поверхностей до приемлемого затухания амплитуды волны, ассоциированной с каждым лучом [23], до кастомизируемого уровня, который обычно равен 60 дБ.

Рассчитывается энергия в зависимости от расстояния с учетом потерь при отражениях. Далее в каждой контрольной точке помещения энергия суммируется. Данный метод не накладывает ограничений на форму помещения, а применяемая модель отражения звука может быть основана на зеркальном или диффузном законах. Диффузный закон отражения моделируется методом Монте-Карло. Метод прослеживания используется для численного моделирования отклика помещения на импульсное возбуждение при проектировании различных помещений.

Плотность энергии звукового поля в стационарном режиме с точки зрения геометрической теории представляется в виде [12]

$$\varepsilon = \varepsilon_D + \varepsilon_R + \varepsilon_N, \quad (1)$$

где ε – общая плотность звуковой энергии; ε_D , ε_R , ε_N – плотности энергии прямого звука, диффузной звуковой энергии, энергии первых звуковых отражений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_D &= \frac{p_{\text{ср}}^2}{\rho c^2}, \\ \varepsilon_R &= \frac{P_A \Omega}{4\pi c} \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2}, \\ \varepsilon_N &= \frac{4P_A \beta_{\text{ср}}^2}{cS(1 - \beta_{\text{ср}})}. \end{aligned}$$

Здесь $p_{\text{ср}}^2 = p_{D\text{ср}}^2 + p_{R\text{ср}}^2 + p_{N\text{ср}}^2$ – средний квадрат звукового давления; ρ – плотность воздуха; c – скорость звука; S – площадь ограничивающих поверхностей; P_A – мощность источника звука; Ω – коэффициент осевой концентрации; n – число отражающих поверхностей; Φ_i – парциальный коэффициент направленности источника; β_i – коэффициент отражения i -й поверхности помещения; r_i' – расстояние от источника (с координатами (x_0, y_0, z_0)) до i -й отражающей поверхности; r_i'' – расстояние от i -й отражающей поверхности до точки приема (с координатами (x, y, z)); $\beta_{\text{ср}}$ – средний коэффициент отражения.

$$p_{Dcp}^2 = \frac{p_{1cp}^2 \Phi_d^2}{r_d^2}, \quad (2)$$

где

$$p_{1cp}^2 = \frac{P_A \Omega \rho c}{4\pi} \quad (3)$$

— квадрат звукового давления на расстоянии 1 м от источника по его оси; Φ_d^2 — квадрат коэффициента направленности источника для угла между его акустической осью и направлением на рассматриваемую точку; r_d^2 — квадрат расстояния от источника до точки приема;

$$p_{Rcp}^2 = p_{1cp}^2 \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2}; \quad (4)$$

$$p_{Ncp}^2 = \frac{p_{1cp}^2 \cdot 16\pi \beta_{cp}^2}{\Omega S(1 - \beta_{cp})}. \quad (5)$$

Из (2)–(5) окончательное выражение для среднего квадрата звукового давления принимает вид

$$p_{cp}^2 = \frac{p_{1cp}^2 \Phi_d^2}{r_d^2} + p_{1cp}^2 \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i^2 \beta_i}{(r_i' + r_i'')^2} + \frac{p_{1cp}^2 \cdot 16\pi \beta_{cp}^2}{\Omega S(1 - \beta_{cp})}.$$

Тогда передаточная функция помещения между точками источника и приемника примет вид

$$p(x, y, z) = -iV \frac{fc^2 \rho}{2\pi} \sum_N \frac{p_{Ncp}(x, y, z) p_{Ncp}(x_0, y_0, z_0)}{f^2 - f_{N_0}^2 - 2\delta_N f_{N_0}},$$

где V — амплитуда колебательной скорости; f — средняя октавная частота; p_{Ncp} — среднее звуковое давление, создаваемое первыми отражениями; δ_N — величина, характеризующая затухание за счет поглощающих границ помещения; f_{N_0} — вещественная часть собственных частот; $f_{N_0} + i\delta_N = f_N$ — собственные комплексные частоты. В случае малого затухания $f_{N_0} = f_N$.

Представленная математическая модель положена в основу расчета акустического поля в произвольном пространстве. Эта математическая модель реализована специалистами области информационных технологий посредством параллельного алгоритма при разработке высокопроизводительной программно-аппаратной системы моделирования акустических полей, аппаратно-представленной в виде распределенной пятикластерной платформы

[23]. Экспериментальный образец программной среды получил название САМааS (Computer-Aided Modelling as a Service) [24].

Сравнение натурных измерений и численных расчетов акустических характеристик помещений. Проведены численные расчеты в экспериментальном образце программной среды САМааS, а также натурные измерения акустических параметров сертифицированным оборудованием в соответствии с требованиями [25].

Для оценки достоверности результатов численных расчетов и натурных измерений проведены сравнения основных параметров акустического поля — времени реверберации и уровня звукового давления. В качестве примера приведены результаты исследований конференц-зала «Красный» Дальневосточного федерального университета, трехмерная модель которого представлена на рис. 1.

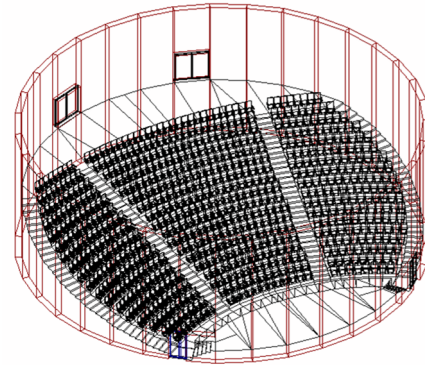


Рис. 1

Протокол испытаний. Место измерений — конференц-зал «Красный», ДВФУ, корпус С, кабинет С637, объем помещения $V = 7228.8639 \text{ м}^3$. Зал рассчитан на 700 мест, сиденья имеют обивку толщиной 10 см, тип обивочного материала — пористый, сиденья подняты. Стены — акустические панели, потолок — звукопоглощающие панели.

Во время измерений помещение не заполнено. Температура и относительная влажность в помещении во время измерений 20 °C и 60% соответственно. Измерения времени реверберации проведены с помощью стартового пистолета ИЖ-37 «Сигнал». Измерения уровня звукового давления проведены с помощью: активной акустической системы JBL EON510/230, генератора шума Minirator MR1; шумомера Экофизика-110А.

Выбраны 3 позиции источника звука на сцене на высоте 1.5 м. Одна позиция — по центру, и по одной позиции — справа и слева на равных расстояниях от центральной линии. Выбраны 12 позиций точек измерения, равномерно распределенных по всей площади зрительских мест на высоте 1.2 м (рис. 2).

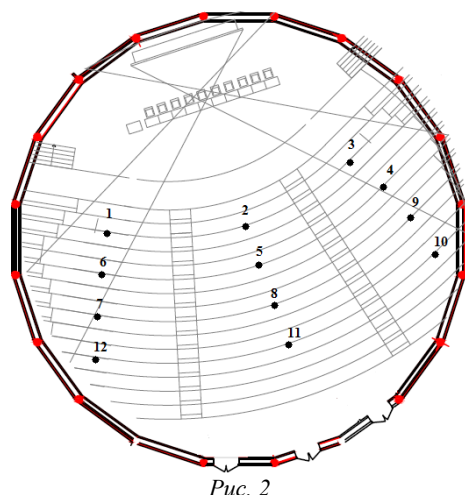


Рис. 2

Результаты измерений времени реверберации. Время реверберации было измерено в 12 точках. С помощью программы Adobe Audition CS6 путем записи были получены и проанализированы экспериментальные данные. Эхограмма звуковой дорожки при выстреле из стартового пистолета в точке 6 представлена на рис. 3.

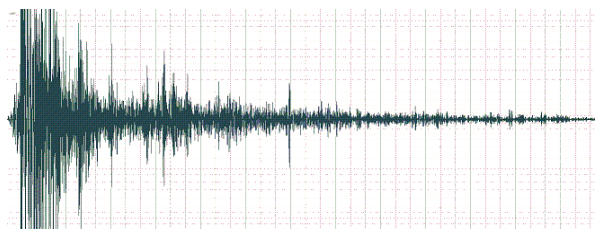


Рис. 3

Значения времени реверберации на средних октавных частотах, полученные экспериментальным путем и расчетом в программной среде SAMaas, представлены в табл. 1.

Частотные характеристики времени реверберации изображены на рис. 4, где $T_{\text{эксп}}$ – время реверберации, полученное экспериментальным путем, $T_{\text{расч}}$ – время реверберации, полученное расчетным путем.

Видно, что прослеживается незначительное различие между значениями рассчитанного и измеренного времени реверберации.

Результаты измерения уровня звукового давления. Измерения уровней звукового давле-

Таблица 1

Наименование характеристики	Значение характеристики на частоте, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Измеренное время реверберации, с	1.5	1.4	1.7	2.00	1.91	1.46
Расчетное время реверберации, с	1.9	1.8	2.1	1.90	1.70	1.30

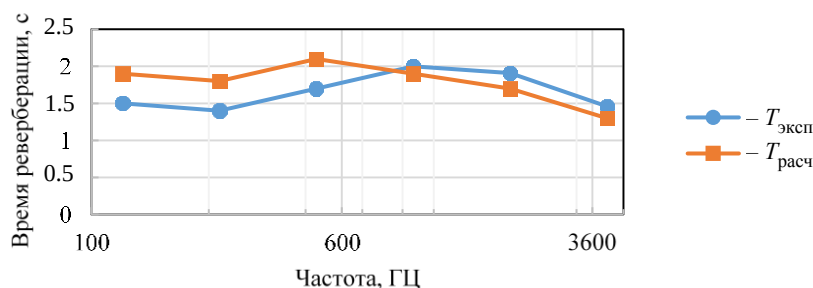


Рис. 4

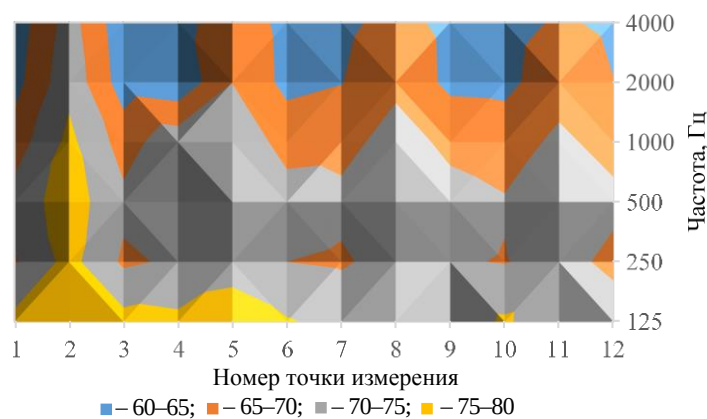


Рис. 5

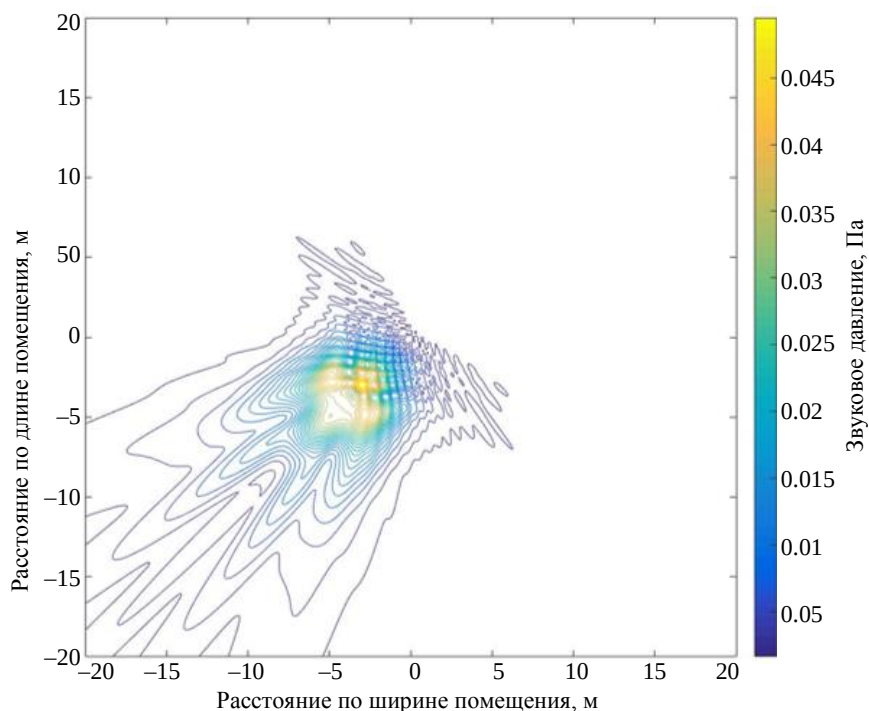


Рис. 6

Таблица 2

Параметр	Значение параметра на частотах, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Измеренный уровень звукового давления ($L_{p\text{экс}}$, дБ)	69.0	71.0	72.4	69.8	65.9	64.8
Расчетный уровень звукового давления ($L_{p\text{расч}}$, дБ)	75.6	78.4	87.1	85.3	82.1	78.3

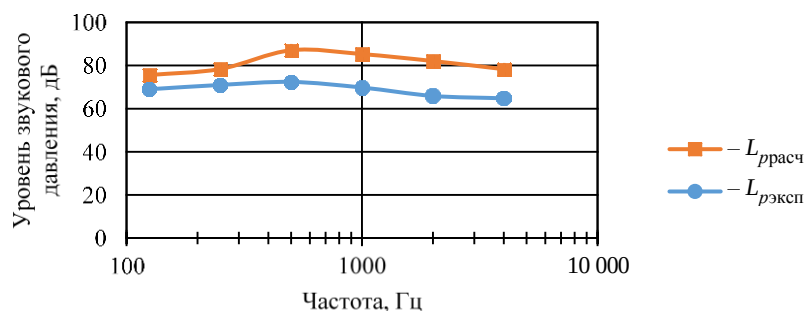


Рис. 7

ния проводились в 12 точках помещения для частот 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Гц.

Частотная характеристика уровней звукового давления, измеренных в 12 точках пространства, представлена на рис. 5.

В качестве результата представлена картина звукового поля для каждой средней октавной частоты. На рис. 6 представлена картина звукового поля для частоты 500 Гц. Цветом отмечены минимальные и максимальные значения звукового давления в паскалях. По осям отмечены координаты точек измерений.

По результатам измерений и расчетов в табл. 2 приведены средние значения уровней звукового давления в помещении на средних октавных частотах.

Графики частотной зависимости уровней звукового давления, полученные экспериментальным путем и расчетным, представлены на рис. 7: $L_{p\text{расч}}$ – уровень звукового давления, полученный расчетным путем, $L_{p\text{экс}}$ – уровень звукового давления, полученный экспериментальным путем.

Таблица 3

Программы	Характеристики			
	Учет геометрии среды	Используемые методы	Визуализация	Относительная производительность и функциональность, %
EASE	Ограничение: геометрическая модель среды – только в форме параллелепипеда	Статический и имитационный	Распределение уровня звукового давления в контрольных точках	87.4
ODEON	Только ограничение на сложность: чем дальше от источников, тем менее детализирована модель	Статистический и имитационный	Распределения поля в виде набора траекторий лучей	90.6
CATT-Acoustic	Произвольная геометрия	Лучевых траекторий	Распределение уровня звукового давления в контрольных точках	68.5
CARA	Произвольная форма с ограничением по площади ограничивающих поверхностей	Лучевых траекторий	Распределение уровня звукового давления в горизонтальной плоскости	67.2
CAMaas	Произвольная геометрия. Сложность модели ограничивается сверху допустимыми стоимостью развертывания системы и временем анализа	Статистический, волновой и имитационный	Распределение поля в виде матриц интенсивностей на произвольном наборе секущих плоскостей; распределение поля линиями уровня	93.4

Сравнивая значения уровней звукового давления, полученные экспериментальным путем и с помощью разрабатываемого программного обеспечения CAMaas, можно видеть, что различия между ними невелики.

Сравнение основных характеристик программно-аппаратных систем для расчета акустических характеристик помещений представлено в табл. 3.

В заключении можно отметить, что рассмотренные программные средства исследований акустических свойств помещений основаны либо на слишком сложном, либо на чрезмерно упрощенном методе анализа и выпускаются в основном зарубежными фирмами.

В течение нескольких лет проводились исследования акустических свойств различных залов города Владивостока. Эти исследования показали, что при моделировании акустических полей в помещении необходимо обратить особое внимание на быстродействие. Разработанное в Дальневосточном федеральном университете программное обеспечение CAMaas позволило справиться с проблемой низкого быстродействия с помощью имитационного моделирования акустического поля посредством параллельных вычислений. Для создания высокопроизводительной програм-

мно-аппаратной системы моделирования акустических полей были применены методы компонентно-ориентированного и объектно-ориентированного программирования. В основу расчета поля в произвольном пространстве (математической модели) была положена геометрическая теория. Исследованы характеристики звукового поля, представлена математическая модель распространения волн в акустических средах, обеспечивающая расчет полной структуры переотражений звуковых лучей и обладающая возможностями проведения численных экспериментов.

В ходе работы проведены натурные измерения сертифицированным оборудованием в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 3382-1–2013 и численные расчеты в экспериментальном образце программной среды CAMaas акустических параметров конференц-зала «Красный» Дальневосточного федерального университета. Для оценки достоверности результатов численных расчетов и натурных измерений проведены сравнения основных параметров акустического поля – времени реверберации и уровня звукового давления. Представленные результаты показали, что существует небольшое отклонение, которое можно устранить в ходе дальнейшего преобразование алгоритма в более сложный вид.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ODEON. URL: <https://odeon.dk/product/what-is-odeon/> (дата обращения 25.12.2020).
2. EASE – Enhanced Acoustic Simulator for Engineers. URL: <http://arhiton-spb.com/afmg.php> (дата обращения 13.12.2020).
3. Acoustic. URL: www.catt.se (дата обращения 04.12.2020).
4. ARTA. URL: <http://www.artalabs.hr/> (дата обращения 18.12.2020).
5. AIST3d. AIST-Lab. URL: <http://www.aist.aaanet.ru> (дата обращения 26.12.2020).
6. Краткое описание программы CARA. URL: <http://cxo.lv/soft/comsoft/81-cara> (дата обращения 14.12.2020).
7. RAMSETE. URL: <http://www.ramsete.com/home.htm> (дата обращения 06.10.2020).
8. ULYSSES. URL: <https://www.ifbsoft.de/ulysses/ra-sim.html> (дата обращения 15.12.2020).
9. Ланэ М. Ю. Компьютерное моделирование при акустическом проектировании помещения // Шоу-Мастер. 2012. № 2 (69). URL: http://www.show-master.ru/categories/kompyuternoe_modelirovanie_pri_akusticheskom_proektirovanii_pomeshcheniya.html (дата обращения 16.12.2020).
10. Акустическое моделирование: Acoustic Group, 2014. URL: <http://acoustic-group.com.ua/services/modeling/> (дата обращения 18.12.2020).
11. Ефимов А. П. Три взгляда на акустику помещений // Install-pro. 2000. № 3–7. URL: <http://rus-arch.ru/efimov1.htm> (дата обращения 15.12.2020).
12. Макриненко Л. И. Акустика помещений общественных зданий. М.: Стройиздат, 1986.
13. Тодоров Н. Ф. Моделирование и исследование ауризации при распространении радиоволн: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2014.
14. Маньковский В. С. Акустика студий и залов для звуковоспроизведения. М.: Искусство, 1966.
15. Озвучание и акустический расчет центрального зала молодежного центра ДВГТУ // Молодежь и науч.-техн. прогресс. Материалы региональной науч.-практ. конф. Ч. 2. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2004. С. 134–135.
16. Стаценко Л. Г., Паскаль Ю. В., Подтоптаный Д. А. Акустика Покровского собора г. Владивостока с учетом взаимного влияния его объемных составляющих // Сб. тр. XIX сессии Российского акустического общества. Т. III. М.: ГЕОС. С. 188–191.
17. Шевцов С. Е., Стаценко Л. Г. Миргородская Ю. В. Экспериментальное исследование акустических характеристик старейшего театрально-концертного зала Пушкинского театра г. Владивостока // Сб. тр. XXII сессии Российского акустического общества. Т. III. М.: ГЕОС, 2010. С. 314–317.
18. Копаяев С. С., Миргородская Ю. В. Исследования акустических характеристик зала «Средний» // Молодежь и науч.-техн. прогресс: Материалы региональной науч.-практ. конф. Владивосток, май-июнь 2016 / под общ. ред. Р. А. Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2017. С. 145–149.
19. Жуков А. А., Миргородская Ю. В. Экспериментальное исследование акустических параметров большого зала русского оперного дома // Молодежь и научно-технический прогресс: Материалы региональной науч.-практ. конф. Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2015. С. 74–77.
20. Чусов А. А., Стаценко Л. Г. Разработка адаптируемых распределенных систем параллельного моделирования, анализа и визуализации физических полей. Владивосток: Издательский дом ДВФУ, 2014.
21. Объектно-ориентированный подход при моделировании акустического поля в помещении / Н. А. Черкасова, А. А. Чусов, Л. Г. Стаценко, С. Н. Кулигин, А. П. Лысенко // Вестн. Инж. шк. ДВФУ. 2016. № 4(29). URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/> (дата обращения 14.12.2020).
22. Параллельный алгоритм численного моделирования акустического поля с учетом рассеивания звука при переотражениях / С. Н. Кулигин, А. А. Чусов, А. П. Лысенко, Л. Г. Стаценко, Н. А. Черкасова // Вестн. Инж. шк. ДВФУ. 2016. № 4(29). URL: <https://www.dvfu.ru/vestnikis/archive-editions/> (дата обращения 14.12.2020).
23. Объектный анализ акустического поля, создаваемого различными источниками звука в произвольном помещении / Ю. В. Миргородская, М. В. Бернавская, Л. Г. Стаценко, А. А. Чусов, Н. А. Черкасова // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2018. № 6 (200). С. 85–94.
24. Чусов А. А. Гибкая архитектура для параллельного анализа и визуализации физических полей: авторефер. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.11. Владивосток, 2012.
25. ГОСТ Р ИСО ISO 3382-1-2013. Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Ч. 1. Зрительные залы. М.: Стандартинформ, 2014.

Yu. V. Mirgorodskaya, L. G. Statsenko, A. A. Chusov
Far Eastern Federal University

STUDYING ACOUSTICAL PARAMETERS OF HALLS USING HIGH-PERFORMANCE ACOUSTICAL FIELD SIMULATION SOFTWARE AND HARDWARE

We review computer systems used to simulate acoustical fields in order to compute acoustical parameters of halls. In the paper we analyze efficiency of such well-known software as ODEON, EASE, CATT-Acoustic and CARA. Also, some commonly used methods of acoustical field calculation are observed. We also propose a mathematical model which was based on in order to implement a high-performance computing system CAMaaS used to simulate physical fields developed at the Far-Eastern Federal University. In order to verify adequacy and measure functional efficiency of the implementation, measurements of actual fields (reverberation time and levels of sound pressure) were conducted using certified tools for acoustical measurements and with respect to ISO 3382-1-2013. Those measurements, which took place in the hall «Krasniy» of the Far-Eastern Federal University, were compared with the results of simulations using CAMaaS in order to assert adequacy of the simulations. These results are presented in the paper.

Architectural acoustics, room acoustics, computer modeling, high performance modeling systems
