

Academia. Архитектура и строительство, № 1, стр. 108–114.

Academia. Architecture and Construction, no. 1, pp. 108–114.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 534.231

doi: 10.22337/2077-9038-2023-1-108-114

Оценка энергетических параметров речи на основе импульсной характеристики помещения

Шубин Игорь Любимович (Москва). Доктор технических наук, член-корреспондент РААСН. Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл.почта: niisf@niisf.ru

Антонов Александр Иванович (Тамбов). Доктор технических наук. Тамбовский государственный технический университет (Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106/5. ТГТУ); Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (Россия, 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21. НИИСФ РААСН). Эл.почта: aiant58@yandex.ru

Матвеева Ирина Владимировна (Тамбов). Кандидат технических наук. Тамбовский государственный технический университет (Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106. ТГТУ). Эл.почта: times02@yandex.ru

Яровая Татьяна Сергеевна (Тамбов). Тамбовский государственный технический университет (Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106. ТГТУ). Эл.почта: semshudes@yandex.ru.

Аннотация: Речь каждого отдельного человека как источник звука, характеризуется мощностью излучаемой при разговоре звуковой энергии, её направленностью, частотным спектром. В зависимости от места нахождения человека его положение в пространстве может быть детерминированным или случайным. Чаще всего речь как источник звука является квазислучайным, переменным во времени, импульсным звуковым процессом. Расчёт параметров звуковой энергии, излучаемой человеком при разговоре, в статье предлагается производить с помощью импульсной характеристики помещения. Представлен алгоритм определения импульсной характеристики помещений, приведён пример расчёта и использования характеристики для вычисления энергетических параметров речи. Приведённые в статье результаты расчётов показывают принципиальную возможность использования аппарата энергетического расчёта параметров звукового поля для моделирования речи на основе импульсной характеристики помещения. Результаты могут быть использованы при оценке шумового режима на объектах с массовым пребыванием одновременно разговаривающих людей и разработке мероприятий по созданию благоприятного акустического режима.

Ключевые слова: речь, энергетические параметры речи, импульсная характеристика помещений, расчёт параметров речи.

Evaluation of the Energy Parameters of Speech Based on the Impulse Response of the Room

Shubin Igor' L. (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS. The Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAACS). E-mail: niisf@niisf.ru

Antonov Aleksandr I. (Tambov). Doctor of Technical Sciences. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russia. TSTU); The Scientific-Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russia. NIISF RAACS). E-mail: aiant58@yandex.ru

Matveeva Irina V. (Tambov). Candidate of Technical Sciences. Tambov State Technical University (106, Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russia. TSTU). E-mail: times02@yandex.ru

Yarovaya Tat'yana S. (Tambov). Tambov State Technical University (106, Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russia. TSTU). E-mail: semshudes@yandex.ru

Abstract. Speech is a quasi-random, time-variable, pulsed sound process. It is proposed to calculate the energy parameters of speech using the pulse characteristics of the room. An algorithm for determining the impulse response of rooms is presented, an example of calculating and using the characteristic to calculate speech parameters is given. The results of calculations given in the article show the fundamental possibility of using the apparatus of energy calculation of the parameters of the sound field for modeling speech based on the pulse characteristics of the room.

Keywords: speech, energy parameters of speech, impulse response of premises, calculation of speech parameters

Введение

Разборчивость речи является важной акустической характеристикой не только для концертных залов, но и для большого класса общественных зданий с массовым пребыванием людей, где происходит общение людей между собой, а также осуществляется распространение и восприятие информации через системы звукоусиления. Особые требования с точки зрения разборчивости сигналов предъявляются к объектам, в том числе к промышленным, с системами противопожарных речевых оповещателей.

Оценку разборчивости речи помещений производят на основе формантного подхода с помощью модуляционной передаточной функции системы, с использованием коэффициента чёткости или фактора реверберационных помех [1; 2]. При использовании этих способов необходимо знать энергетические параметры сигналов, например, соотношение уровней полезного сигнала и уровней помех.

Источниками образования звуков речи являются фонация, турбулентный шум. Речевой сигнал является квазислучайным процессом, параметры которого могут быть известны с определённой степенью вероятности. Временное изменение энергетических параметров речи соответствует импульсному звуку (рис. 1) [3]. Средняя длительность гласных звуков составляет 150 мс, средняя длительность согласных звуков 80 мс. Распределение длительности пауз в речевых сигналах имеет случайный характер. Их средняя длительность составляет 400 мс [4].

При оценке речи рассматриваются её энергетические характеристики: мгновенные значения уровней, длительности

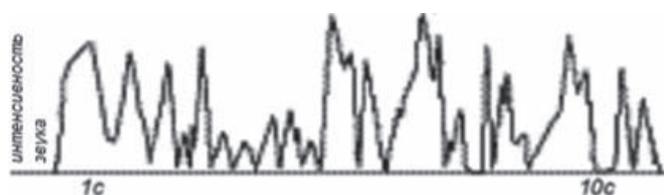


Рис. 1. Вид осциллограммы речевого сигнала (источник: [3])

непрерывного звучания, длительности пауз, динамический диапазон, пик-фактор речевого сигнала и т.д. [5]. Определение этих параметров и их исследование удобно производить с помощью импульсной характеристики или отклика помещения на импульсное возбуждение [6; 7].

Импульсная характеристика помещения

Импульсная характеристика – это реакция помещения на единичный короткий импульс. При расчётах импульсной характеристики используется дельта-функция Дирака, а при измерениях импульс создаётся за счёт выстрела [8; 9]. Измеренная импульсная характеристика широко используется для оценки акустических качеств существующих зрительных залов¹ [10]. На основе анализа и обработки осциллограмм импульсного отклика помещения можно определить время реверберации, выявить отражения сигнала от ограждений, снижающие разборчивость речи или ухудшающие восприятие музыки, определить поверхности и их участки, создающие вредные отражения, и, соответственно, запроектировать мероприятия по улучшению акустики залов [11; 12]. Импульсная характеристика используется также при решении задач по подавлению акустического эха [13].

С помощью сохранённой импульсной характеристики помещения производят цифровую обработку сигналов, например, можно получить звучание музыкального инструмента или восприятие речи в различных помещениях [14]. Для этих целей создаётся база данных импульсных переходных характеристик помещений.

Применение импульсных характеристик для оценки и улучшения акустических качеств помещений подкрепляется нормативной литературой² и практическим опытом. В проектной практике импульсная характеристика помещений используется через компьютерные программы. Однако

¹ ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы. – М. : Стройинформ, 2014. (https://allgosts.ru/91/120/gost_r_iso_3382-1-2013.pdf).

² Там же.

следует отметить, что программные продукты – закрытые коммерческие разработки, созданные в большей степени за рубежом. При этом в большинстве случаев отсутствует подробная информация об используемых алгоритмах, трудно оценить погрешности расчётов, области применения программ не всегда отвечают заявленным параметрам [15; 16]. Нормативная и методическая литература по расчёту и использованию импульсной характеристики для проектирования акустических параметров помещений отсутствует. В данной статье предложен алгоритм построения импульсной характеристики помещений и дан пример расчёта и использования её для определения акустических параметров помещений, а также для энергетического моделирования речи.

Расчёт импульсной характеристики помещения

Импульсная характеристика в случае зеркального отражения звука от ограждений определяется вкладами отдельных отражений импульса от ограждений. Расчёт отражений возможен различными методами геометрической акустики помещений, например, методом прослеживания лучей. Каждое отражение определяется временем прихода в расчётную точку звуковой энергии и ее величиной. Хранение и использование получаемого массива данных сопряжено с определёнными сложностями. По этой причине для решения практических задач импульсную характеристику удобнее представлять в виде столбчатой диаграммы (гистограммы). Ширину столбцов, как правило, увязывают с длительностью импульса и с поставленными задачами, а общее количество столбцов – с временем реверберации. На рисунке 2 а показана начальная часть гистограммы импульсной характеристики длительностью 0,18 с. Длительность импульса и ширина столбцов гистограммы принята равной $\Delta t = 1$ мс. Через 0,16 – 0,18 с после излучения импульса каждый столбец гистограммы включает от 20 до 50 отражений (рис. 2 б). С течением времени количество отражений будет возрастать и составлять по несколько тысяч отражений в каждом столбце гистограммы. Хранение и использование импульсной характеристики в виде графика гистограммы позволяет существенно упростить и ускорить вычисления характеристик речи. При этом все отражения за интервалы Δt суммируются и хранятся в виде одного числа.

Применение импульсной характеристики для оценки энергетических параметров звука в расчётной точке показано на примере для помещения с размерами 18×6×3,9 м. Коэффици-

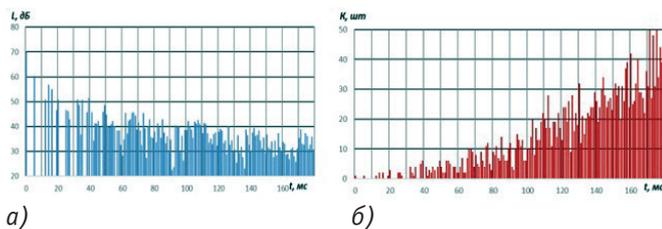


Рис. 2. Гистограмма импульсной характеристики помещения (а) и график количества отражений в столбцах гистограммы (б). Графики авторов статьи

енты звукопоглощения стен и пола равны соответственно 0,2, и 0,7. Расчёт выполнен в октавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц. Положения источника и приёмника речи показаны на рисунке 3. Отражение звука зеркальное.

Параметры помещения: объем 421 м³, площадь ограждающих поверхностей – 403 м², средний коэффициент звукопоглощения – 0,334, время реверберации по формуле Эйринга – $T_{\text{н}} = 0,51$ с.

На рисунке 4 показана рассчитанная характеристика помещения при действии отдельного импульса с уровнем акустической мощности $L_{\text{Wизм}} = 81,4$ дБ, длительность импульса принималась равной $\Delta t = 5$ мс. На основе импульсной характеристики можно рассчитать различные энергетические параметры в расчётной точке на расстоянии 1 м от источника звука.

Энергетические параметры звука в расчётной точке, определяемые по импульсной характеристике

Первый столбец диаграммы (см. рис. 4) соответствует прямому звуку, величина которого составляет $L_{\text{пр}} = 70$ дБ.

Энергетическое суммирование значений уровней всех столбцов гистограммы равно сумме плотности энергии прямого звука и звука всех отражений от ограждений, то есть уровню общего звука

$$L_{\text{об}} = 10 \lg(\epsilon_{0-T_{\text{н}}}/\epsilon_0) = 10 \lg\left(\frac{41,2 \cdot 10^{-9}}{2,94 \cdot 10^{-15}}\right) = 71,5 \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $\epsilon_0 = 2,94 \times 10^{-15}$ Дж/м³ – пороговое значение плотности звуковой энергии; $\epsilon_{0-T_{\text{н}}}$ – сумма плотностей звуковой энергии прямого и отражённого звука, поступающих в расчётную точку

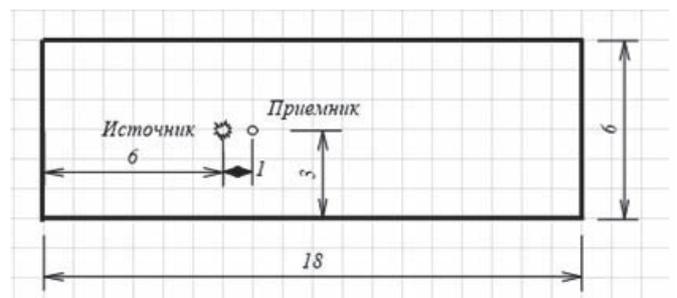
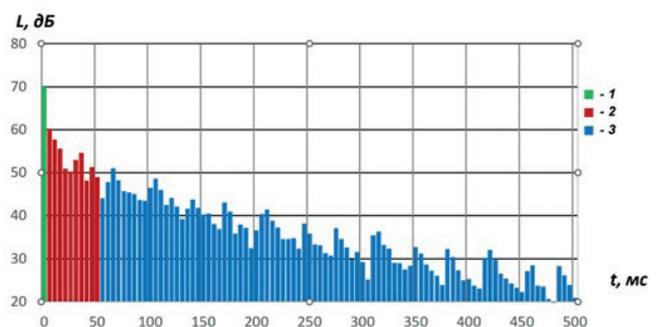


Рис. 3 Схема помещения



1 – прямой звук; 2 – ранние отражения; 3 – поздние отражения
Рис. 4. Импульсная характеристика помещения. Графики авторов статьи

за период фиксации импульса в интервале времени $0-T_n; T_n$ – длительность импульсной характеристики, которую следует принимать равной времени реверберации.

Уровень ранних отражений определяется по импульсной характеристике суммированием отражений за время 50 мс после прихода прямого звука:

$$L_p = 10 \lg(\epsilon_{55-55} / \epsilon_0) = 10 \lg\left(\frac{8,9 \cdot 10^{-9}}{2,94 \cdot 10^{-15}}\right) = 64,8 \text{ дБ.} \quad (2)$$

Здесь и далее индексы плотности звуковой энергии (например, ϵ_{55-55}) указывают на временной интервал, в пределах которого происходит суммирование энергии звуковых волн, приходящих в расчётную точку.

Аналогичным образом определяются поздние отражения, приходящие в расчётную точку после 50 мс от прихода прямого звука

$$L_n = 10 \lg(\epsilon_{55-T_n} / \epsilon_0) = 10 \lg\left(\frac{2,7 \cdot 10^{-9}}{2,94 \cdot 10^{-15}}\right) = 59,6 \text{ дБ,} \quad (3)$$

где $\epsilon_{55-T_n} = \epsilon_{0-T_n} - \epsilon_{np} - \epsilon_{55-55} = (41,2 - 29,6 - 8,9)10^{-9} = 2,7 \times 10^{-9} \text{ Дж / м}^3$; $\epsilon_{np} = 29,6 \times 10^{-9} \text{ Дж / м}^3$ – плотность энергии прямого звука.

Согласно ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013³ для характеристики акустических качеств помещений используют ряд параметров, которые в случае рассматриваемого помещения имеют следующие величины:

– коэффициент отношения энергии ранних и поздних отражений

$$C_{50} = 10 \lg(\epsilon_{55-55} / \epsilon_{55-T_n}) = L_{ран} - L_{позд} = 64,8 - 59,6 = 5,2 \text{ дБ;} \quad (4)$$

– отношение полезной энергии ко всей звуковой энергии импульсного отклика, или коэффициент чёткости, предложенный Тиле [18]

$$D_{50} = \frac{\epsilon_{np} + \epsilon_{55-55}}{\epsilon_{0-T_n}} = \frac{(29,6 + 8,9)10^{-9}}{41,2 \cdot 10^{-9}} = 0,94. \quad (5)$$

К полезной энергии Тиле относит энергию прямого звука и энергию отражений, запаздывающих не более чем на 50 мс;

– время реверберации, которое определяется по кривой спада отражённого звука на интервале от 5 до 25 дБ. Согласно рисунку 3 снижение энергии с 55 до 35 дБ произойдёт за $330 - 20 = 310$ мс. При этом время реверберации составит $T_{20} = 0,31 \times 60 / 20 = 0,93$ с. Видно, что при зеркальном отражении время реверберации почти в два раза выше, чем время, определённое, по выражению Эйринга, для случая диффузного отражения звука от ограждений;

– ранняя поддержка, определяемая как отношение энергии звука (в децибелах), отражённого в течение 100 мс, к энергии прямого звука, включающего и отражение от пола

$$ST_{Early} = 10 \lg\left(\frac{\epsilon_{20-100}}{\epsilon_{0-20}}\right) = 10 \lg\left(\frac{7,14 \cdot 10^{-9}}{(29,6 + 3,1) \cdot 10^{-9}}\right) = -6,6 \text{ дБ.} \quad (6)$$

– поздняя поддержка, определяемая как отношение энергии позднего звука (в децибелах) к энергии прямого и отражённого от пола звука

$$ST_{Late} = 10 \lg\left(\frac{\epsilon_{100-1000}}{\epsilon_{0-10}}\right) = 10 \lg\left(\frac{1,42 \cdot 10^{-9}}{(29,6 + 3,1) \cdot 10^{-9}}\right) = -13,6 \text{ дБ.} \quad (7)$$

Полученные энергетические характеристики позволяют рассчитать фактор реверберационных помех:

$$Q = \frac{\epsilon_{np} + \epsilon_{55-55}}{\epsilon_{55-T_n}} = \frac{(29,6 + 8,9)10^{-9}}{2,7 \cdot 10^{-9}} = 13,1. \quad (8)$$

При наличии фонового шума плотность его энергии учитывается в знаменателе выражения (8).

Фактор реверберационных помех является важным показателем степени разборчивости сигнала в помещении, в том числе при массовом скоплении разговаривающих между собой людей.

Оценка изменения энергетических характеристик звука в расчётной точке помещения при действии источника с переменной во времени акустической мощностью

С помощью импульсной характеристики можно рассчитать плотность звуковой энергии в расчётной точке помещения, для которой определена импульсная характеристика при различных временных параметрах акустической мощности источника шума $W_{(t)}$. Для этого действие источника шума представляется в виде последовательности излучения отдельных импульсов. Вклад каждого импульса в изменение плотности звуковой энергии в расчётной точке корректируется с учётом излучённой акустической мощности. Изменение плотности звуковой энергии в расчётной точке оценивается по выражению:

$$\epsilon_{\tau} = \sum_{t=t_n}^{t=t_k} \frac{W_{(t)} \epsilon_{(T)}}{W_{им}} \text{ при } T = \tau - t - \frac{r}{c} > 0, \quad (9)$$

где t_n, t_k – время начала и окончания действия источника звука, с; $\epsilon_{(T)} = \epsilon_0 \cdot 10^{0,1LT}$ – плотность звуковой энергии импульсной характеристики, рассчитанная по уровням рисунка 4; τ – время определения плотности звуковой энергии в расчётной точке, с; r – расстояние от источника звука до расчётной точки, м; c – скорость звука в воздухе, м/с; r/c – время запаздывания сигнала; $W_{им}$ – акустическая мощность импульса энергии, используемого для построения импульсной характеристики. При суммировании ряда параметры t и τ изменяются с шагом гистограммы импульсной характеристики Δt .

На основе импульсной характеристики выполнена оценка изменения уровней звукового давления в расчётной точке при действии «прямоугольных» импульсов длительностью излучения 10, 80 и 150 мс (рис. 5). Уровень акустической мощности всех импульсов принят одинаковым $L_W = L_{W_{им}} =$

³ ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 1. Зрительные залы. – М.: Стройинформ, 2014 (https://allgosts.ru/91/120/gost_r_iso_3382-1-2013.pdf).

81,4 дБ. Из рисунка 5 видно, что с увеличением длительности импульсов формы графиков приобретают более плавный характер.

На рисунке 6 показаны графики изменения уровней звука в расчётной точке импульса длительностью 80 мс прямоугольной формы излучения с $L_w = 81,4$ дБ и импульса такой же длительности с линейным возрастанием излучаемой энергии от нуля до максимального значения. Пиковое значение уровня звуковой мощности импульса с нарастающей акустической мощностью излучения составляет $L_w = 84,4$ дБ. Таким образом, в обоих случаях общая излучённая энергия импульсов одинакова. Различия в графиках уровней звукового давления видны на рисунке 6. Эти различия заметны во время нарастания уровней звука и почти не имеют значения во время затухания энергии импульсов. По результатам этого расчёта можно сделать предположение, что форма графиков изменения излучаемой энергии не оказывает существенного влияния на процесс затухания звуковой энергии после окончания излучения источника шума или в промежутках между импульсами источника при его периодическом действии.

Энергетическое моделирование речи

Импульсная характеристика даёт возможность выполнять энергетическое моделирование речи, состоящей из нескольких импульсов различной формы, акустической мощности и длительности излучения. На рисунке 7 показан фрагмент графика изменения акустической мощности речи. Длительность импульсов и пауза между ними соответствуют средним значения темпа речи. При необходимости в расчётах можно использовать энергетические характеристики мощности компонентов речи, измеренные в заглушенной камере.

Результаты расчёта изменения уровней прямого и отражённого звука речи показаны на рисунке 8. Для речи вычислены акустические характеристики:

- максимальный уровень, превышаемый в течение 1% длительности сигнала $L_{\max} = 76,2$ дБ;
- минимальный уровень, превышаемый в течение 99% длительности сигнала $L_{\min} = 41,0$ дБ;
- средний уровень

$$L_{\text{cp}} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \sum_{t=0}^{t=T} 10^{0,1L_t} \right) = 66,4 \text{ дБ}, \quad (10)$$

где $T = 1000$ мс – продолжительность фрагмента речи; L_t – уровни речи по гистограмме рисунка 8; параметр t изменяется с шагом Δt ;

- динамический диапазон звукового сигнала, равный разнице между его максимальным и минимальным уровнями $L_d = L_{\max} - L_{\min} = 76,2 - 41,0 = 35,2$ [дБ]. Величина динамических диапазонов речевого сигнала соответствует обычному значению 35...45 дБ [3; 4];

- пик-фактор определяется как разница между максимальным и средним уровнями сигнала $L_{\text{пик}} = L_{\max} - L_{\text{cp}} = 76,2 - 66,4 = 9,8$ [дБ]. Рассчитанное значение пик-фактора соот-

ветствует параметрам среднестатистической речи в 10...12 дБ [3; 4].

Параметры импульсной характеристики приведены для зеркального отражения звука. В случае других моделей

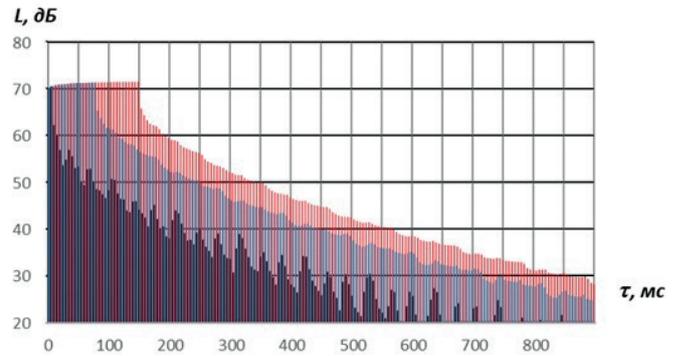


Рис. 5. Изменение энергии в расчётной точке при действии импульсов длительностью 10, 80 и 150 мс. График авторов статьи

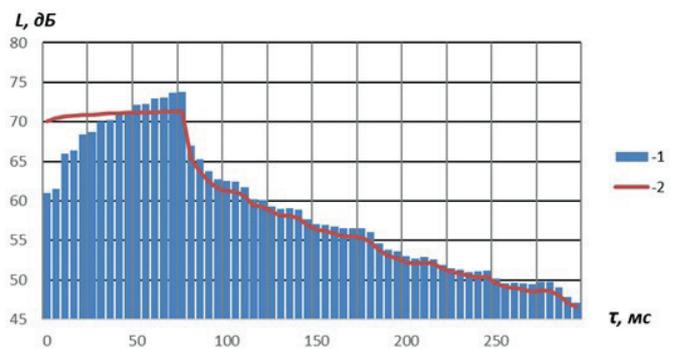


Рис. 6. Изменение энергии прямоугольного импульса (1) и импульса с линейным нарастанием акустической мощности (2). График авторов статьи

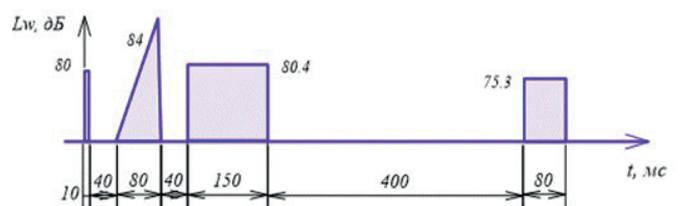


Рис. 7. Энергетическая мощность фрагмента речи (условно). Диаграммы авторов статьи

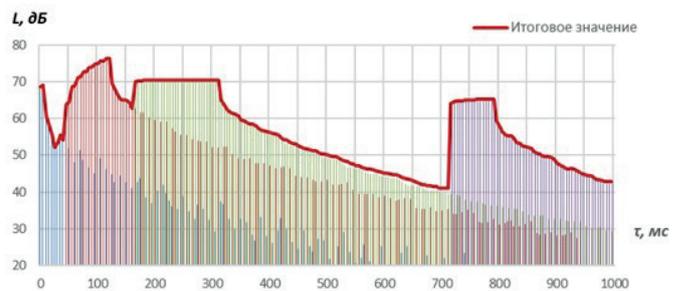


Рис. 8. Изменение уровней звукового давления речи в расчётной точке на расстоянии 1 м от источника. График авторов статьи

отражения звука от ограждений будет отличаться только методика расчёта импульсной характеристики. Например, для диффузного отражения звука нами предложен простой и достаточно точный метод получения аналитического выражения для импульсной характеристики помещения [6].

Заключение

В статье описан эффективный алгоритм расчёта импульсной характеристики помещений, приведён пример расчёта и использования характеристики для определения параметров речи. Приведённые в статье результаты расчётов показывают принципиальную возможность использования аппарата энергетического расчёта изменяющихся во времени параметров звукового поля для моделирования речи на основе импульсной характеристики помещения.

Список источников

1. Продеус, А.Н. О некоторых особенностях развития объективных методов измерений разборчивости речи / А.Н. Продеус. – Текст : непосредственный // Электроника и связь. Акустические приборы и системы. – 2010. – № 2. – С. 217–223.
2. Маньковский, В.С. Акустика студий и залов для звукопроизводства. – Москва : Искусство, 1966. – 375 с. – Текст : непосредственный.
3. Алдошина, И.А. Основы психоакустики. Ч. 17.1. Слух и речь / И.А. Алдошина. – Текст : непосредственный // Звуко-режиссёр. – 2002. – № 1. – С. 39–43.
4. Алдошина, И.А. Основы психоакустики, Ч. 17.2. Слух и речь / И.А. Алдошина. – Текст : непосредственный // Звуко-режиссёр. – 2002. – № 3. – С. 86–92.
5. Beranek, L. Concert Halls and Opera Houses / Second Edition. – Текст : непосредственный. – New York : Springer-Verlag, 2004. – 243 p.
6. Non-constant noise calculation using the room response function / A. Antonov, V. Ledenev, N. Merkusheva [et al.]. – Текст : непосредственный // Proceedings of 2020 International Congress on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2020 : 49, Advances in Noise and Vibration Control Technology. – Seoul, 2020.
7. Расчёт непостоянного шума с использованием функции отклика помещения, определяемой по экспериментальным данным / А.И. Антонов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева, М.А. Пороженко. – DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-6-117-128. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 117–128.
8. Lamothe, M.J.R. Acoustical Characteristics of Guns as Impulse Sources / M.J.R. Lamothe, J.S. Bradley. – Текст : электронный // Can. Acoust. – 1985. – V. 13 (2). – P. 16–24. – URL: https://www.researchgate.net/publication/44060266_Acoustical_characteristics_of_guns_as_impulse_sources (дата обращения 23.01.2023).
9. Pätynen J. Investigations on the balloon as an impulse source / J. Pätynen, B.F. Katz, T. Lokki. – Текст : электронный // J. Acoust. Soc. Am. – 2011. – V. 129. – P. 27–33. URL: https://www.researchgate.net/publication/49819084_Investigations_on_the_balloon_as_an_impulse_source (дата обращения 23.01.2023).
10. Кравчун, П.Н. Акустические измерения в концертных залах с использованием разных тестовых сигналов / П.Н. Кравчун, М.Ю. Ланэ. – Текст : непосредственный // Жилищное строительство. – 2016. – № 1-2. – С. 32–35.
11. Макриненко, Л.И. Акустика помещений общественных зданий. – Москва : Стройиздат. – 1986. – 174 с. – Текст : непосредственный.
12. Hojan E. Subjective Evaluation of Acoustic Properties of Concert Halls Based on Their Impulse Response / E. Hojan, C. Pösselt. – DOI: doi.org/10.1121/1.400202. – Текст : электронный // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1990. – V. 88. – P. 1811. – URL: <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.400202> (дата обращения 23.01.2023).
13. Patent RU-2685053-C2 Evaluation of the impulse response of the room to suppress acoustic echo / Florenzio Dinej, Jellepeddi Atuluya; Assignee Microsoft Technology Licensing LLC (US). – № 2016122040; Priority Date 05.12.2013; Filing Date 28.11.2014; Publication Date 16.04.2019, Bulletin № 11. – 27 p.
14. Karjalainen, M. About Room Response Equalization and Dereverberation / M. Karjalainen, T. Paatero, J.N. Mourjopoulos, P.D. Hatziantoniou. – DOI:10.1109/ASPAA.2005.1540200. – Текст : электронный // Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA). – P. 183–186. – URL: https://www.researchgate.net/publication/4192815_About_room_response_equalization_and_dereverberation (дата обращения 16.06.01.2023).
15. Savioja, L. Overview of Geometrical Room Acoustic Modeling Techniques / L. Savioja, P. Svensson. – Текст : электронный // Journal of the Acoustical Society of America. – 2015. – V. 138. – P. 708–730. URL: https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/6761044/Overview_of_geometrical.pdf (дата обращения 23.01.2023).
16. Ланэ, М.Ю. Компьютерное моделирование при акустическом проектировании помещения / М.Ю. Ланэ. – Текст : электронный // Шоу-Мастер. – 2012. – № 2. – URL: http://www.show-master.ru/categories/kompyuternoe_modelirovanie_pri_akusticheskom_proektirovanii_pomeshcheniya.html (дата обращения 25.10.2022).
17. Thiele, R. Richtungerteilung und Zeitfolge der Schallrueckwurfe in Raumen / R. Thiele. – Текст : электронный // Acustica. – 1953. – V. 3, № 2. – P. 291–302. – URL: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaau/1953/00000003/a00204s2/art00007> (дата обращения 23.01.2023).

References

1. Prodeus A.N. O nekotorykh osobennostyakh razvitiya ob"ektivnykh metodov izmerenii razborchivosti rechi [On Some Features of the Development of Objective Methods of Measuring Speech Intelligibility]. In: *Elektronika i svyaz'. Akusticheskie*

pribery i sistemy [Electronics and Communications. Acoustic Devices and Systems], 2010, no. 2, pp. 217–223. (In Russ.)

2. Man'kovskii V.S. Akustika studii i zalov dlya zvukovosproizvedeniya [Acoustics of Studios and Halls for Sound Reproduction]. Moscow, Iskusstvo Publ., 1966, 375 p. (In Russ.)

3. Aldoshina I.A. Osnovy psikhoakustiki. Ch. 17.1. Slukh i rech' [Fundamentals of Psychoacoustics. Part 17.1. Hearing and Speech]. In: *Zvukorezhisser* [Sound Engineer], 2002, no. 1, pp. 39–43. (In Russ.)

4. Aldoshina I.A. Osnovy psihoakustiki. Ch. 17.2. Slukh i rech' [Fundamentals of Psychoacoustics. Part 17.2. Hearing and Speech]. In: *Zvukorezhisser* [Sound Engineer], 2002, no. 3, pp. 86–92. (In Russ.)

5. Beranek L. Concert Halls and Opera Houses, 2nd ed. New York, Springer-Verlag, 2004, 243 p. (In Engl.)

6. Antonov A., Ledenev V., Merkusheva N. [et al.] Non-constant Noise Calculation Using the Room Response Function. In: *Proceedings of 2020 International Congress on Noise Control Engineering, INTER-NOISE 2020 : 49, Advances in Noise and Vibration Control Technology*, Seoul, 2020. (In Engl.)

7. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Porozhenko M.A. Raschet nepostoyannogo shuma s ispol'zovaniem funktsii otklika pomeshcheniya, opredelyaemoi po eksperimental'nym dannym [Calculation of Non-Constant Noise Using the Room Response Function Determined from Experimental Data]. In: *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2021, vol. 23, no. 6, pp. 117–128, DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-6-117-128. (In Russ., abstr. in Engl.)

8. Lamothe M.J.R., Bradley J.S. Acoustical Characteristics of Guns as Impulse Sources. In: *Can. Acoust*, 1985, V. 13(2), pp.16–24. (In Engl.)

9. Pätynen J., Katz B.F., Lokki T. Investigations on the Balloon as an Impulse Source. In: *J. Acoust. Soc. Am*, 2011, V. 129, pp. 27–33. (In Engl.)

10. Kravchun P.N., Lane M.Yu. Akusticheskie izmereniya v koncertnykh zalakh s ispol'zovaniem raznykh testovykh signalov [Acoustic Measurements in Concert Halls Using Different Test Signals]. In: *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2016, no. 1-2, pp. 32–35. (In Russ., abstr. in Engl.)

11. Makrinenko L.I. Akustika pomeshchenii obshchestvennykh zdaniy [Acoustics of Public Buildings]. Moscow, Strojizdat Publ., 1986, 174 p. (In Russ.)

12. Hojan E., Pösselt C. Subjective Evaluation of Acoustic Properties of Concert Halls Based on Their Impulse Response. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, V. 88, P. 1811. DOI: doi.org/10.1121/1.400202. URL: <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.400202> (Accessed 01/23/2023). (In Engl.)

13. Patent RU-2685053-C2 Evaluation of the impulse response of the room to suppress acoustic echo / Florenzio Dinej, Jellepeddi Atuluya; Assignee Microsoft Technology Licensing LLC (US), № 2016122040; Priority Date 05.12.2013; Filing Date 28.11.2014; Publication Date 16.04.2019, Bulletin № 11, 27 p. (In Engl.)

14. Karjalainen M., Paatero T., Mourjopoulos J.N., Hatziantoniou P.D. About room Response Equalization and Dereverberation. In: *Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)*, pp. 183–186. DOI: 10.1109/ASPAA.2005.1540200. URL: https://www.researchgate.net/publication/4192815_About_room_response_equalization_and_dereverberation (Accessed 01/16/2023)/ (In Engl.)

15. Savioja L., Svensson P. Overview of geometrical Room Acoustic Modeling Techniques. In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, V. 138, pp. 708–730. URL: https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/6761044/Overview_of_geometrical.pdf (Accessed 01/23/2023). (In Engl.)

16. Lane M.Yu. Komp'yuternoe modelirovanie pri akusticheskom proektirovanii pomeshcheniya [Computer Modeling in Acoustic Design of a Room]. In: *Show-master* [Show Master], 2012, no. 2. URL: http://www.show-master.ru/categories/kompyuternoe_modelirovanie_pri_akusticheskom_proektirovanii_pomeshcheniya.html (Accessed 10/25/2022). (In Russ.)

17. Thiele R. Richtungerteilung und Zeitfolge der Schallruckwurfe in Raumen. In: *Acustica*, 1953, V. 3, no. 2, pp. 291–302. URL: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/dav/aaua/1953/00000003/a00204s2/art00007> (Accessed 01/23/2023). (In Germ.)