

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 534.2

АНТОНОВ А.И., ЛЕДЕНЕВ В.И., ЯРОВАЯ Т.С.

**РАСЧЕТЫ ШУМА ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ БЛАГОУСТРОЙСТВЕ
В ПОМЕЩЕНИЯХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ**

В общественных зданиях различного назначения имеются помещения с массовым пребыванием людей. От одновременно разговаривающих людей в таких помещениях создаются высокие уровни шума, влияющие на здоровье длительно находящихся в них людей, ухудшающие разборчивость речи. Для оценки влияния этого шума на акустические качества среды помещений и разработки мер по их акустическому благоустройству необходимо иметь методы расчета шума, возникающего в помещениях с массовым пребыванием людей. В статье предложены методы расчета прямого звука и отраженного шума от людей как от равномерно распределенных по помещению источников. Методы учитывают особенности излучения звуковой энергии людьми как источниками шума и их влияние на формирование шумового режима помещений. Предложенные методы расчета дадут возможность производить оценку акустических качеств в помещениях с массовым пребыванием людей и целенаправленно регулировать их за счет применения звукопоглощения помещений.

Ключевые слова: помещения с массовым пребыванием людей, источники шума, расчет шума, акустическое благоустройство.

В общественных зданиях различного функционального назначения имеются помещения с массовым пребыванием людей. К ним относятся здания учебного, торгового, спортивного, зрелищного назначения, вокзалы, пешеходные переходы и т.п. В таких помещениях достаточно часто возникают повышенные уровни шума, создающие помехи для нормального протекания функционального процесса и оказывающие негативное воздействие на здоровье находящихся в этих помещениях посетителей.

Основной причиной шума в большинстве случаев является разговор людей. Возникающая при этом звуковая энергия вызывает ухудшение разборчивости речи, что ведет к повышению громкости разговоров и, как следствие, к дальнейшему росту шума и увеличению его негативного воздействия.

Многие помещения с массовым пребыванием людей оборудуются системами речевого оповещения информационного типа. Для надежного восприятия информации необходима достаточно высокая её разборчивость, которая во многом определяется отношением уровней звукового давления, создаваемых системами звукоусиления, и уровней фонового шума. Как известно, количество и расположение оповещателей зависят от размеров помещения, от количества находящихся в них посетителей, от акустических характеристик помещения, определяющих гулкость, от уровня фонового шума и от других условий, влияющих на процесс формирования шумового режима в помещениях [1, 2, 3].

Для создания благоприятных акустических условий в таких помещениях и ограничения воздействующих на организм человека уровней шума требуется выполнение расчетов шума, возникающего в помещениях от разговаривающих людей как от источников шума, имеющих свои характерные особенности. В данной статье рассматриваются методы расчета прямого и отраженного шума, разработанные нами для помещений с массовым пребыванием людей.

Шумовой режим в помещениях с массовым пребыванием людей создается разговаривающими людьми. Люди, как источники шума, имеют ряд особенностей, которые следует учитывать при расчетах шума. К ним относятся: случайное положение говорящих людей за счет их постоянного перемещения в пространстве; непостоянство и прерывистость речи; случайное направление излучаемой энергии; зависимость акустических характеристик речи (спектральный состав, направленность излучения энергии, уровень акустической мощности) от возраста, пола и индивидуальных особенностей говорящего человека. К случайным характеристикам также относится количество одновременно разговаривающих людей. В практике используются осредненные характеристики речи [4].

Для расчета шума необходимо иметь сведения об акустической мощности источника шума, в данном случае говорящего человека, и направленность излучения.

Акустическая мощность говорящего человека как точечного источника звука определяется из выражения

$$L_{WP} = L_P - 10 \lg \left(\frac{\Phi}{4\pi R^2} \right), \quad (1)$$

где Φ - фактор направленности излучения звуковой энергии; R - расстояние от источника до расчетной точки; L_P - спектральная характеристика речевого сигнала на расстоянии $R = 1$ м от источника.

Величина L_P приведена в [4] в зависимости от уровня речевых сигналов: тихая речь - $L_s = 64$ дБ; речь средней громкости - $L_s = 70$ дБ; громкая речь - $L_s = 76$ дБ, где L_s - уровень речевых сигналов с линейным усреднением, и частотной полосы анализа шума.

Фактор направленности речи согласно [5] определяется выражением

$$\Phi = 0.3525 (1 + \cos(\theta / 2))^2. \quad (2)$$

где θ – угол между акустической осью источника и направлением на расчетную точку.

Таким образом, уровень звуковой мощности разговаривающего человека при $\theta = 0$ и $R = 1$ м в зависимости от уровня речевого сигнала и частотной полосы анализа с учетом выражения (2) определяются как

$$L_{WP} = L_P + 9.5 \quad (3)$$

и, соответственно, величина акустической мощности равна

$$W_P = W_0 10^{0.1 L_{WP}}, \quad (4)$$

где $W_0 = 10^{-12}$ Вт - пороговое значение акустической мощности.

Важным фактором, влияющим на шумовой режим в местах с массовым пребыванием людей, является количество одновременно говорящих людей. Согласно данным, приведенным в работе [6], в таких помещениях как залы железнодорожных вокзалов в большинстве случаев одновременно разговаривают 40-50 % посетителей, в тоже время в залах ожидания пассажиров процент разговаривающих меньше – 20-30%. Нами установлено, что в рекреационных помещениях школ во время перерывов процент разговаривающих детей может достигать 80-85%. При этом уровень речи соответствует громкой речи.

Следует отметить, что в настоящее время требуется проведение обширных исследований по установлению акустической мощности разговаривающих людей и коэффициентов одновременности речи для различных групп помещений с массовым пребыванием людей.

Основываясь на изложенном, ниже предлагаются методы расчета прямого и отраженного шума в помещениях, возникающего от распределенных источников.

Расчет прямого звука. Перемещение людей и излучение ими звуковой энергии можно представить в виде случайного процесса элементарных точечных излучателей [7, 8]. В этом случае, при большом количестве одновременно разговаривающих людей и равновероятности излучения ими звукового сигнала излучаемую энергию можно равномерно распределить по плоскости помещения и рассматривать ее как плоский источник с известной поверхностной акустической мощностью W'' .

Величина поверхностной акустической мощности в том случае составляет

$$W'' = \frac{W_0 N 10^{0.1 L_{WP}}}{S}, \quad (5)$$

где N – количество источников сигнала (разговаривающих людей); S – площадь, занятая источниками.

Плотность звуковой энергии в расчетной точке будет определяться путем интегрирования выражения

$$\varepsilon_{np} = \int_{S_0} \frac{W'' \Phi}{4\pi r^2 c} dS, \quad (6)$$

где r – расстояние от элемента dS до расчетной точки; c – скорость звука в воздухе.

Для определения уровня звукового давления в расчетной точке можно применить численное интегрирование [9]. Для этого необходимо исходную плоскость S разбить сеткой на K элементов равной площади и суммировать звуковую энергию, приходящую в расчетную точку от каждого элемента как от точечного источника.

Решение этой задачи реализуется нами с использованием разработанной компьютерной программы численным методом.

Величина плотности звуковой энергии определяется на основе суммирования ряда

$$\varepsilon_i = \sum_{k=1}^K \frac{\Phi W_0 N 10^{0.1 L_{WP}}}{4\pi r_{ki}^2 c K}, \quad (7)$$

где r_{ki} – расстояние от центра k -го элемента до i -й расчетной точки.

Уровень звукового давления в i -ой точке соответственно определяется по формуле

$$L_i = L_{WP} + 10 \lg\left(\frac{\Phi N}{4\pi K}\right) + 10 \lg\left(\sum_{k=1}^K \frac{1}{r_{ki}^2}\right). \quad (8)$$

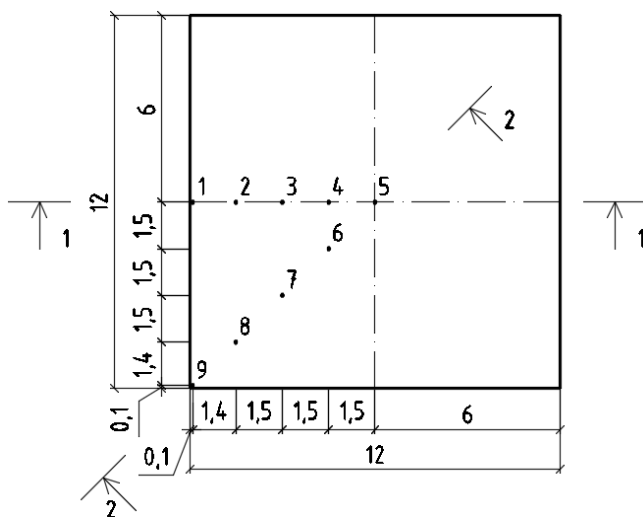


Рисунок 1 – Расчетная схема помещения с положением расчетных точек (1÷9 – номера расчетных точек)

Предложенный метод расчета наиболее эффективен при большом количестве источников шума и в больших по площади помещениях. В случае небольшого количества посетителей в помещениях и при их небольших размерах расчеты можно выполнять путем прямого компьютерного моделирования, основанного на определении уровней звукового давления прямого звука от каждого разговаривающего человека как от точечного источника. При этом все люди случайным образом расставляются по залу достаточно большое количество раз, а их координаты устанавливаются с помощью функции случайных чисел с равномерным распределением вероятности событий. Этот метод может быть использован как для оценки уровней шума непосредственно, так и для проверки других методов расчета.

Выполнен расчет шума от 36 человек, находящихся в помещении железнодорожного вокзала размерами $a \times b \times h = 12 \times 12 \times 3$ м. Учитывая, что коэффициент одновременности разговора $K_{од} = 0.5$ [6], одновременно общаются между собой $N = 18$ человек. Речь средней громкости с линейным по энергии уровнем $L_s = 70$ дБ. Согласно [4] на частоте $f = 500$ Гц $L_p = 66$ дБ и соответственно $L_{WP} = 75.5$ дБ. Схема помещения с указанием расчетных точек дана на рисунке 1.

Результаты расчета уровней прямого звука показаны на рисунке 2. На этом же графике показаны перепады уровней для характерных расчетных точек: $\Delta L_{19} = 2.1$ дБ, $\Delta L_{15} = 2.2$ дБ и $\Delta L_{59} = 4.3$ дБ.

Для сравнения на графике приведены также результаты прямого компьютерного моделирования.

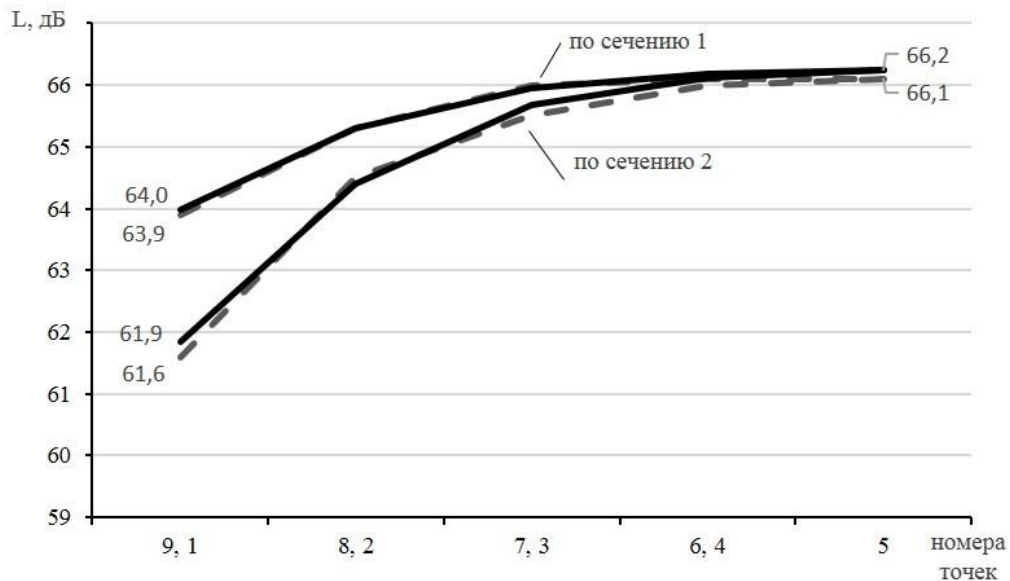


Рисунок 2 – Графики рассчитанных уровней давления прямого звука:
сплошная линия – численный метод; пунктирная линия – метод прямого компьютерного моделирования
(положение сечений 1 и 2 показано на рисунке 1)

Максимальная разница уровней прямого звука в расчетных точках помещения, полученных данными методами, составляет 0.3 дБ, что говорит о достаточной точности предложенного метода расчета.

Предложенный метод расчета прямого звука на основе усреднения распределения источников сигнала обеспечивает возможность последующего нахождения отраженной составляющей звуковой энергии внутри помещений.

Расчет отраженного шума. Расчет отраженного шума в помещениях с массовым пребыванием людей может быть выполнен методами геометрической и статистической теорий акустики помещений [11]. Следует отметить, что в случае распределенных по помещению источников, когда длины пробега при зеркальном и диффузном отражениях звука от ограждений примерно равны [12], расчеты геометрическими и статистическими методами будут иметь примерно одинаковую точность. Следовательно, в этом случае для расчета отраженного шума удобнее использовать наиболее простой статистический метод диффузного поля. Расчет уровней звукового давления отраженной звуковой энергии в этом случае будет производиться по формуле

$$L_{om} = L_{wp} + 10 \lg \left(\frac{4N(1 - \bar{\alpha})}{\bar{\alpha}S} \right), \quad (9)$$

где $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения; S – площадь внутренних поверхностей помещения.

Ниже приведен пример расчета шума для ранее рассмотренного помещения при коэффициентах звукопоглощения стен – $\alpha = 0.1$, пола – $\alpha = 0.15$, потолка – $\alpha = 0.5$. Средний коэффициент звукопоглощения ограждений – $\bar{\alpha} = 0.25$.

Согласно (3) уровень отраженного звукового давления отраженного шума равен

$$L_{om} = 75.5 + 10 \lg \left(\frac{4 \cdot 18(1 - 0.25)}{0.25 \cdot 432} \right) = 72.4 \text{ дБ}.$$

Здесь площадь поверхностей ограждений равна $S=2(12 \times 12 + 2 \times 12 \times 3) = 432 \text{ м}^2$.

С учетом ранее определенного уровня прямого звука (см. рисунок 2) уровень звукового давления в центре помещения будет равен

$$L = 10 \lg (10^{0.1 \cdot 66.1} + 10^{0.1 \cdot 72.4}) = 73.3 \text{ дБ}.$$

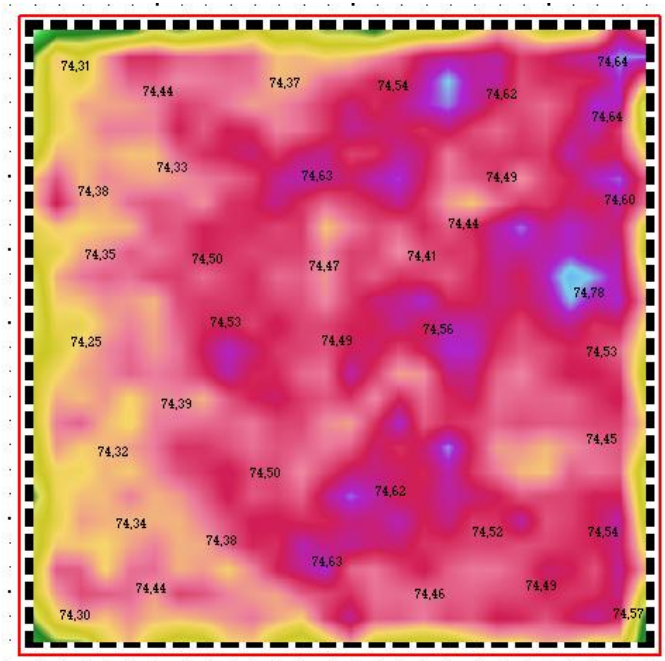


Рисунок 3 – Шумовая карта помещения с равномерно распределенными источниками шума, рассчитанная методом прослеживания лучей при зеркальном отражении звука от ограждений

Для сравнительной оценки точности диффузного метода был произведен расчет уровней шума в данном помещении методом прослеживания лучей при зеркальной модели отражения звука от ограждений. В этом случае плоский источник шума, представляющий собой группу равномерно распределенных по помещению говорящих людей, был заменен на 70 точечных источников шума с равномерной по пространству диаграммой излучения. Каждый точечный источник излучал 500 лучей, которые прослеживались до уменьшения их энергии в 10^6 раз [13]. Полученное распределение шума в помещении приведено на рисунке 3.

На карте видны локальные провалы и увеличения уровней звукового давления из-за дискретности принятой модели метода прослеживания лучей. В тоже время звуковое поле можно считать достаточно равномерным. Полученные уровни звукового давления изменяются в пределах 0.4 дБ. Результаты хорошо со-

гласуются с методом диффузного поля и, следовательно, его можно использовать при практических расчетах отраженного шума в помещениях с массовым пребыванием людей.

Таким образом, при оценке распределения шума в помещениях с массовым пребыванием людей возможно использовать предложенные нами методы расчета, и именно, производить расчеты прямого звука численным методом, реализующим уравнение (6), а расчеты отраженного шума статистическим методом диффузного поля.

С использованием этих методов при проектировании речевого оповещения можно оценивать уровни ожидаемого фоновых шума и, соответственно, степень разборчивости транслируемой через системы звукоусиления речи.

Методы дают возможность производить оценку акустических качеств в помещениях с массовым пребыванием людей и целенаправленно их регулировать за счет применения звукопоглощения помещений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асминин В.Ф. Роль речевого оповещения и анализ его качественных характеристик, влияющих на обеспечение успешной эвакуации людей при пожаре / В.Ф. Асминин, Е.Н. Епифанов, А.И. Антонов, В.Я. Манохин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2012. № 4 (28). С. 142-149.

2. Асминин В.Ф. Методика акустического проектирования одиночного пожарного речевого оповещателя / В.Ф. Асминин, Е.Н. Епифанов, А.И. Антонов, С.Н. Кузнецов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2013. № 3 (31). С. 121-127.
3. Асминин В.Ф. Анализ методик размещения оповещателей систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре / В.Ф. Асминин, А.И. Антонов, Е.Н. Епифанов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. - 2014. Т. 1. № 1 (5). С. 232-234.
4. Железняк В.К. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации / В.К. Железняк, Ю.К. Макаров, А.А. Хорев // Специальная техника. - 2000. №4. С. 39-45.
5. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий / Л.И. Макриненко. - Москва: Стройиздат, 1986. - 173 с.
6. Прасол В.М. Влияние шумового режима на архитектурно-планировочное решение железнодорожных вокзалов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.23.10). - Москва, 1985. - 24 с.
7. Булавин Л.А. Компьютерное моделирование физических систем / Л.А. Булавин, Н.В. Выгорницкий, Н.И. Лебовка // Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». - 2011. - С. 352.
8. Самарский А.А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. М.: Наука Физматлит. - 1997. - 320 с.
9. Яровая Т.С. Математическое моделирование прямого звука при экологической оценке шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей / Т.С. Яровая, А.И. Антонов // В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов. Материалы Международной научно-практической конференции. - 2016. - С. 204-210.
10. Антонов А.И. Метод расчета шума в плоских производственных помещениях с равномерно распределенным в них шумным оборудованием / А.И. Антонов, А.Ф. Зубков, В.И. Леденев, И.В. Матвеева // Научный журнал строительства и архитектуры. - 2016. № 4 (44). С. 21-29.
11. Антонов А.И. Математическое моделирование процессов распространения звуковой энергии в зданиях / А.И. Антонов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. -2014. № 3 (53). С. 17-23.
12. Леденев В.И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий. / В.И. Леденев // Тамбов: Изд-во Тамб.гос.техн.ун-та. - 2000. - 156 с.
13. Forsberg P.A. Fully discrete ray tracing / P.A. Forsberg // Applied Acoustics. - 1985. V.18, No. 6. Pp. 393-397.

Антонов Александр Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов
Доктор технических наук, доцент, доцент кафедры «Архитектура и строительство зданий»
E-mail: aiant58@yandex.ru

Леденев Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги», советник РААСН
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Яровая Татьяна Сергеевна

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов
Магистрант кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»
E-mail: semshudes@yandex.ru

A.I. ANTONOV, V.I. LEDENEV, T.S. YAROVAYA

**CALCULATION OF NOISE IN ACOUSTIC IMPROVEMENT
IN PREMISES WITH THE MASS STAY OF PEOPLE**

In public buildings for various purposes there are rooms with a massive stay of people. From simultaneously talking people in such premises, high noise levels are created, affecting the health of long-term people in them, worsening the intelligibility of speech. To assess the influence of this noise on the acoustic quality of the environment of the premises and the development of measures for their acoustic improvement, it is necessary to have methods for calculating the noise that occurs in rooms with a large population of people. The article proposes methods for calculating direct sound and reflected noise from people as from sources uniformly distributed over the room. The methods take into account the peculiarities

of the radiation of sound energy by people as sources of noise and their influence on the formation of the noise regime of premises. The proposed methods of calculation make it possible to evaluate the acoustic qualities in rooms with a mass stay of people and to control them purposefully through the use of sound absorption of premises.

Keywords: rooms with mass stay of people, noise sources, noise calculation, acoustic improvement.

BIBLIOGRAPHY

1. Asminin V.F. Rol' rechevogo opoveshcheniya i analiz yego kachestvennykh kharakteristik, vliyayushchikh na obespecheniye uspezhnoy evakuatsii lyudey pri pozhare / V.F. Asminin, Ye.N. Yepifanov, A.I. Antonov, V.YA. Mano-khin // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. - 2012. № 4 (28). S. 142-149.
2. Asminin V.F. Metodika akusticheskogo proyektirovaniya odinochnogo pozhnogo rechevogo opoveshchate-lya / V.F. Asminin, Ye.N. Yepifanov, A.I. Antonov, S.N. Kuznetsov // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. - 2013. № 3 (31). S. 121-127.
3. Asminin V.F. Analiz metodik razmeshcheniya opoveshchateley sistem opoveshcheniya i upravleniya evakuatsiyey lyudey pri pozhare / V.F. Asminin, A.I. Antonov, Ye.N. Yepifanov // Pozhnaya bezopasnost': problemy i perspektivy. - 2014. T. 1. № 1 (5). S. 232-234.
4. Zheleznyak V.K. Nekotoryye metodicheskiye podkhody k otsenke effektivnosti zashchity rechevoy informa-tsii / V.K. Zheleznyak, YU.K. Makarov, A.A. Khorev // Spetsial'naya tekhnika. - 2000. №4. S. 39-45.
5. Makrinenko L.I. Akustika pomeshcheniy obshchestvennykh zdaniy / L.I. Makrinenko. - Moskva: Stroyiz-dat, 1986. - 173 s.
6. Prasol V.M. Vliyaniye shumovogo rezhima na arkhitekturno-planirovochnoye resheniye zheleznodorozh-nykh vokzalov: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk (05.23.10). - Moskva, 1985. - 24 s.
7. Bulavin L.A. Komp'yuternoye modelirovaniye fizicheskikh sistem/ L.A. Bulavin, N.V. Vygornitskiy, N.I. Lebovka // Dolgoprudnyy: Izdatel'skiy Dom «Intelekt». - 2011. - S. 352.
8. Samarskiy A.A. Matematicheskoye modelirovaniye. Idei. Metody. Primery / A.A. Samarskiy, A.P. Mikhaylov. M.: Nauka Fizmatlit. - 1997. - 320 s.
9. Yarovaya T.S. Matematicheskoye modelirovaniye pryamogo zvuka pri ekologicheskoy otsenke shumovogo rezhima v zdaniyakh s massovym prebyvaniyem lyudey / T.S. Yarovaya, A.I. Antonov // V. I. Vernadskiy: ustoychivoye razvitiye regionov. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. - 2016. - S. 204-210.
10. Antonov A.I. Metod rascheta shuma v ploskikh proizvodstvennykh pomeshcheniyakh s ravnomerno raspre-delen-nyy v nikh shumnyy oborudovaniyem / A.I. Antonov, A.F. Zubkov, V.I. Ledenev, I.V. Matveyeva // Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury. - 2016. № 4 (44). S. 21-29.
11. Antonov A.I. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov rasprostraneniya zvukovoy energii v zdani-yakh / A.I. Antonov // Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. -2014. № 3 (53). S. 17-23.
12. Ledenev V.I. Statisticheskoye energeticheskoye metody rascheta shumovyykh poley pri proyektirovanii proizvodstvennykh zdaniy. / V.I. Ledenev // Tambov: Izd-vo Tamb.gos.tekhn.un-ta. - 2000. - 156 s.
13. Forsberg P.A. Fully discrete ray tracing / P.A. Forsberg // Applied Acoustics. - 1985. V.18, No. 6. Pp. 393-397.

A.I. Antonov

Tambov State Technical University, Tambov
Doctor of Technical Sciences, Associate professor «Architecture and building construction»
E-mail: aiant58@yandex.ru

V.I. Ledenev

Tambov State Technical University, Tambov
Doctor of Technical Sciences, professor, professor of Department "Urban construction and roads", advisor to RAACS
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

T.S. Yarovaya

Tambov State Technical University, Tambov
Master of the Department "Urban construction and roads"
E-mail: semshudes@yandex.ru