СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ШУМА В КВАРТИРАХ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

О.А. Жоголева, Б.И. Гиясов*, И.В. Матвеева, О.О. Федорова

*Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ),
392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е;*

**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26*

АННОТАЦИЯ. Шумовой режим в квартирах во многом определяется внутриквартирными источниками звука. Для его оценки необходимы соответствующие методы расчета шума. К таким методам относится статистический метод расчета, основанный на представлениях о диффузном звуковом поле. Однако в настоящее время отсутствуют исследования возможности его применения для расчета шума в квартирах как в системах акустически связанных помещений.

Целью исследования являлись установление возможности использования статистического метода расчета для оценки шумового режима в квартире как в едином акустическом пространстве и изучение влияния акустических связей между помещениями квартиры на его формирование.

Исследования возможностей статистического метода расчета производились путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными для различных планировочных решений квартир при различных акустических связях между помещениями. Расчеты выполнялись с использованием разработанной компьютерной программы.

Установлено, что точность расчетов, выполненных статистическим методом, соответствует требованиям, предъявляемым к методам расчета воздушного шума в гражданских зданиях. Метод адекватно реагирует на изменения акустических связей между помещениями квартиры как элементами единой системы акустически связанных объемов.

Статистический метод расчета воздушного шума в постановке, предложенной в статье, может эффективно использоваться при расчетах шума, возникающего в квартирах от внутриквартирных источников. Метод адекватно оценивает изменения шумового режима при изменениях положения источников в объеме квартиры и акустических связей между ее помещениями. Его возможно эффективно использовать при разработке мер по акустическому благоустройству квартир.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: внутриквартирный источник звука, шумовой режим квартир, акустически связанные помещения, расчет шума.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жоголева О.А., Гиясов Б.И., Матвеева И.В., Федорова О.О. Статистический метод расчета шума, возникающего в квартирах от внутриквартирных источников звука, и его экспериментальная проверка компюссора // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 4 (103). С. 381–389. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.381-389

STATISTICAL METHOD OF APARTMENT NOISE LEVEL CALCULATION AND ITS EXPERIMENTAL VALIDATION

O.A. Zhogoleva, B.I. Giasov*, I.V. Matveeva, O.O. Fedorova

Tambov State Technical University (TSTU), 112E Michurinskaya str., Tambov, Russian Federation, 392032;

**Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),*

26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337

ABSTRACT. The noise regime in apartments is largely determined by intra-apartment sound sources. Appropriate noise level calculation methods are needed for its estimation. These methods include the statistical calculation method based on the diffuse sound field concept. However, at present, there are no studies of its applicability for the calculation of noise level in apartment as in systems of acoustically related rooms.

The aim of the study was to establish the possibility of using the statistical calculation method to estimate the noise regime in an apartment as in a single acoustic space and to study the influence of acoustic connections between apartment rooms on noise formation.

Studies of statistical calculation method capabilities were made by comparing the results of calculations with the experimental data obtained for various planning apartment solutions including various acoustic connections between rooms. Calculations were carried out using the developed computer program.

It is established that the calculation accuracy of the statistical method corresponds to the requirements for methods of calculating air noise level in civil buildings. The method adequately reacts to variations in the acoustic connection between the apartment rooms as elements of a single system of acoustically related volumes.

The statistical method of calculating air noise levels, as it is proposed in the article, can be effectively used in calculating the noise levels that occur in apartments from in-apartment sources. The method adequately estimates noise regime variations at changes both the noise source position in the volume of the apartment and acoustic connections between its rooms. It can be effectively used in developing measures for the acoustic apartment improvement.

KEY WORDS: intra-apartment noise source, apartment noise regime, acoustically connected rooms, noise calculation

FOR CITATION: Zhogoleva O.A., Giyasov B.I., Matveyeva I.V., Fedorova O.O. Statisticheskiy metod rascheta shuma, vznikayushchego v kvartirakh ot vnutrikvartirnykh istochnikov zvuka, i yego eksperimental'naya proverka [Statistical Method of Apartment Noise Level Calculation and Its Experimental Validation]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 4 (103), pp. 381–389. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2017.4.381-389

На стадии проектирования квартир необходимо производить прогнозирование шумового режима, возникающего при действии в них различных источников звука. Сведения о нем необходимы при разработке планировочных и конструктивных решений квартир и выборе строительно-акустических мер снижения распространяющейся в них звуковой энергии.

С точки зрения распространения звуковой энергии, квартиры следует рассматривать как системы акустически связанных помещений [1–3]. Акустическая связь между ними обеспечивается через открытые проемы и через звукоизолирующие преграды, имеющие конечную звукоизоляцию [4]. Шум внутри квартир во многом определяется внутриквартирными источниками звуковой энергии, которые могут появляться в любом из помещений квартиры и работать одновременно в нескольких из них [3]. При указанных условиях оценка распределения звуковой энергии в акустически связанных объемах квартир должна производиться как в едином, с точки зрения формирования звуковых полей, пространстве.

В настоящее время расчет звуковых полей в акустически связанных помещениях производится расчетными методами, основанными на положениях классических статистической и геометрической теории акустики помещения [5–8], а также на статистическом энергетическом подходе к оценке энергетических характеристик отраженных звуковых полей, разработанном в России [9], и диффузионном подходе, используемом в зарубежной практике [10–16].

Методы, основанные на статистическом энергетическом и диффузионном подходах, разработаны для оценки распределения звуковой энергии в несоразмерных длинных и плоских помещениях больших размеров и в помещениях сложной формы при наличии в них, как правило, технологического оборудования и рассеивающих звук предметов [11, 17, 18] при условии формирования в них квазидиффузных звуковых полей [19].

Большинство современных квартир имеют ячейковые системы планировок, которые состоят из соразмерных помещений. В таких помещениях отношение наибольшего размера к наименьшему не превосходит пяти [20], в них формируются диффузные звуковые поля, поэтому в соразмерных помещениях квартир также возможно производить расчеты шума указанными выше методами.

Пример такого расчета численным статистическим энергетическим методом приведен в статье [1]. Метод в этом случае требует применения

специально разработанной компьютерной программы, не всегда доступной проектировщикам. Учитывая, что отраженная звуковая энергия равномерно распределяется по объему каждого отдельного помещения и меняется только от объема к объему, в практике расчетов шума в акустически связанных помещениях квартир может быть использован статистический метод расчета энергетических характеристик шума, основанный на представлениях о диффузном характере звукового поля, образующегося в соразмерных замкнутых объемах [2].

В данной статье рассматривается статистический метод расчета шума в квартирах, возникающего от внутриквартирных источников, и дается экспериментальная оценка его точности.

В общем случае в любом помещении квартиры с источником звука звуковая энергия определяется прямой и отраженной составляющими. Прямая энергия, как правило, вычисляется достаточно просто. Отраженная энергия зависит от звукопоглощающих характеристик помещений, их акустических связей между собой и других факторов, влияющих на ее распределение в системе помещений квартиры [3].

С позиций статистической теории акустики при диффузном звуковом поле уравнение, описывающее изменение отраженной звуковой энергии в i -м помещении системы акустически связанных соразмерных помещений, может быть получено на основе закона сохранения энергии. Изменение количества отраженной звуковой энергии в i -м помещении системы определяется отраженной энергией, возникающей при работе источника звука в i -м помещении $(1-\alpha_i)W_i$, отраженной энергией, образовавшейся в i -м помещении от прямого звука, проникающего из связанных с ним j -х помещений $(1-\alpha_i)\gamma_{ji}W_j$, проникающего отраженного звука из связанных j -х помещений $\beta_{ji}E_j$, потерями энергии за счет поглощения ее в объеме i -го помещения $\nu_i E_i$ и оттока в смежные акустически связанные помещения энергии отраженного звука $\beta_{ij}E_i$ и энергии прямого звука $\gamma_{ij}W_j$:

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} = \left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \right) W_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} E_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} (1 - \alpha_i) W_j - \nu_i E_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} E_i. \quad (1)$$

Начальные условия при $t = t_0$ задаются в виде $E_i = E_{oi}$. При $t \gg t_0$ в случае постоянно действующих источников шума влияние начального распределения энергии E_{oi} быстро уменьшается и устанавливается стационарное звуковое поле, описываемое уравнением

$$\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}\right) W_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} E_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} (1 - \alpha_i) W_j - v_i E_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} E_i = 0. \quad (2)$$

Схема баланса отраженной энергии для i -го помещения приведена на рис. 1.

Рис. 1. Схема баланса отраженной звуковой энергии для i -го помещения

При оценке шумового режима и анализе влияния различных факторов на распределение звуковой энергии в квартире уравнения (1) и (2) удобнее записать через плотности звуковой энергии, учитывая, что в соразмерных помещениях отраженное звуковое поле диффузно и плотность отраженной энергии в i -м помещении определяется как

$$\varepsilon_i = E_i / V_i, \quad (3)$$

и уравнения (1) и (2) можно записать в виде

$$\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial t} = \left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}\right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_i} - v_i \varepsilon_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_i; \quad (4)$$

$$\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}\right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_i} - v_i \varepsilon_i - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_i = 0. \quad (5)$$

В уравнениях (1) – (5) N — общее количество связанных с i -м помещением j -х помещений; α_i — средний коэффициент звукопоглощения в i -м помещении; v_i — коэффициент потерь звуковой энергии в i -м помещении; β_{ij} , β_{ji} — коэффициенты передачи отраженной звуковой энергии из i -го помещения в j -е помещение и наоборот из j -го в i -е; γ_{ij} , γ_{ji} — коэффициенты передачи прямой энергии из i -го помещения в j -е помещение и наоборот из j -го в i -е; V_i — объем i -го помещения.

При диффузном звуковом поле коэффициент потерь в i -м помещении

$$v_i = \frac{c \alpha_i S_i}{4 V_i (1 - 0,5 \alpha_i)}, \quad (6)$$

а коэффициент передачи энергии из i -го помещения в j -е рассчитывается по формуле

$$\beta_{ij} = \frac{c}{4 V_i (1 - 0,5 \alpha_i)} (s_{ij}^{ab} \tau_{ij}^{ab} + s_{ij}^{nep} \tau_{ij}^{nep}). \quad (7)$$

Аналогичным образом определяются коэффициенты β_{ji} .

В выражениях (6) и (7) c — скорость звука в воздухе; S_i , α_i — площадь и средний коэффициент звукопоглощения ограждений i -го помещения; s_{ij}^{ab} , τ_{ij}^{ab} — площадь и коэффициент звукопередачи двери между i -м и j -м помещениями, s_{ij}^{nep} , τ_{ij}^{nep} — те же величины для перегородки.

При записи выражений (4) – (7) использованы известные зависимости статистической теории акустики помещений [5, 6].

Для определения коэффициентов передачи прямой энергии между помещениями через звукоизолирующие ограждения нами предлагается выражение

$$\gamma_{ij} = \Omega_{ij} \tau_{ij} / 4\pi, \quad (8)$$

где Ω_{ij} — телесный угол облучения прямым звуком ограждения между i -м и j -м помещениями

$$\Omega_{ij} = S_{ij} \cos \theta / R^2, \quad (9)$$

где R — расстояние от источника до центра элемента ограждения; θ — угол между направлением R и нормалью к ограждению; S_{ij} — площадь ограждения между i -м и j -м помещениями; τ_{ij} — коэффициент звукопроницаемости ограждения.

Выражения (8) и (9) записаны для случая, когда ограждение состоит из одного элемента. Для ограждения, состоящего из нескольких элементов, имеющих разную звукопроницаемость, коэффициенты рассчитываются отдельно для каждого элемента и, соответственно, в уравнениях (1) – (2) и (4) – (5) производится соответствующий учет проникновения прямого звука в смежные объемы через каждый элемент.

Таким образом, для оценки распределения звуковой энергии в квартирах как в системах акустически связанных помещений необходимо решать системы линейных уравнений (1) и (2) или (4) и (5) (их число равно количеству помещений в квартире). При стационарном режиме работы источников звука системы уравнений (2) и (5) можно решать методом Гаусса. Численное решение системы уравнений (1) и (4) может быть выполнено методом конечных разностей по явной схеме. Например, для уравнения (4), заменив дифференциалы на конечные разности $\Delta \varepsilon$ и Δt , можно записать выражение для приращения энергии в i -м помещении за интервал времени Δt в виде

$$\Delta \varepsilon_i = \left[\left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij}\right) \frac{W_i}{V_i} + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \varepsilon_j + \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} (1 - \alpha_i) \frac{W_j}{V_i} - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \varepsilon_i - v_i \varepsilon_i \right] \Delta t. \quad (10)$$

Плотность отраженной звуковой энергии $\varepsilon_i^{t+\Delta t}$ во время $t + \Delta t$ выражается через плотность ε_i^t во время t с учетом начальных условий $\varepsilon_i^{t_0} = \varepsilon_{0i}$

$$\varepsilon_i^{t+\Delta t} = \varepsilon_i^t + \Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i^t \left[1 - \left(v_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ji} \right) \Delta t \right] + \left[\sum_{j=1}^N (1 - \alpha_i) \gamma_{ji} \frac{W_j^t}{V_j} + \beta_{ji} \varepsilon_j^t + \left(1 - \alpha_i - \sum_{j=1}^N \gamma_{ij} \right) \frac{W_i^t}{V_i} \right] \Delta t. \quad (11)$$

Выполненные расчеты показали, что устойчивость решения уравнений по явной схеме обеспечивается при выполнении условия

$$\Delta t < 0,05 / \left(v_i + \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \right). \quad (12)$$

Решая систему уравнений (5), можно определить плотность отраженной энергии в каждом i -м помещении ε_i и вычислить для них уровни звукового давления. При наличии в i -м помещении источника звука уровень звукового давления

$$L_i = 10 \lg \left[(\varepsilon_{\text{пр}i} + \varepsilon_i) c / I_0 \right], \quad (13)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}i}$ — плотность прямой энергии; $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² — пороговая интенсивность звука.

Для реализации рассмотренной расчетной модели разработана компьютерная программа, позволяющая производить расчеты уровней шума в системах акустически связанных соразмерных помещений, в т.ч. и в квартирах и в анфиладных системах помещений [21] при стационарном и нестационарном режимах работы источников шума [22].

Для оценки применимости и точности расчетов шума в квартирах статистическим методом произведена серия экспериментальных исследований в пяти квартирах с ячейковыми системами планировок. Приведем результаты исследований для одной типовой трехкомнатной квартиры. Схема квартиры дана на рис. 2. Квартира состоит из восьми помещений, разделенных кирпичными перегородками со звукоизоляцией 43 дБ, звукоизоляция дверных заполнений 10 дБ, высота помещения 2,7 м. Остальные параметры помещений квартиры даны в табл. 1.

Аппаратурное обеспечение экспериментальных исследований включало источники звуковой энергии, комплект шумометрических приборов и аппаратуру для измерения времени реверберации. При измерениях использовался всенаправленный источник звука (додекаэдр) OED-SP-012-600, звуковая мощность источника 90 дБ и выше. По-

Рис. 2. Схема квартиры

Табл. 1. Параметры помещений квартиры

Номер помещения	Площадь ограждений помещения S_p , м ²	Площадь дверного проема помещения	Объем помещения V , м ³	Средний коэффициент звукопоглощения помещений α_i
1	46,8	2,0	21,6	0,2
2	48,0	1,8	22,5	0,1
3	73,9	2,0	41,5	0,2
4	66,4	1,8	35,0	0,2
5	27,6	1,84	8,1	0,2
6	18,1	1,4	4,8	0,1
7	24,1	1,4	7,8	0,05
8	47,0	1,8	21,9	0,2

казатель направленности источника не превышал ± 5 дБ. Измерения выполнялись шумомером ЭКОФИЗИКА-110А. Исследование реверберации производилось с использованием шумомера и программного обеспечения 110 UTIL приборов фирмы «Октава», позволяющего записывать и анализировать временные и энергетические характеристики шума в помещениях.

Измерения для всех расчетных точек в помещении выполнялись в одной характерной плоскости на уровне 1,5 м от пола. Шумовой фон во всех случаях был на 10...15 дБ ниже уровней звукового давления, создаваемых источником в наиболее удаленных точках. Всего произведено три серии экспериментов при трех изменениях места положения источника шума в квартире. Измерения в каждом помещении производились не менее чем в трех точках, при открытых и закрытых дверях во всех помещениях квартиры.

Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных выполнена на основе результатов статистической обработки. Расхождения между расчетными данными и экспериментом характеризовались статистическим показателем — средним квадратичным отклонением

$$\Delta L_{\text{кв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\Delta L - \Delta \bar{L})^2 / N}, \quad (14)$$

где ΔL — разность измеренного и рассчитанного уровней; $\Delta \bar{L}$ — среднее расхождение данных расчетов и эксперимента, равное $\Delta \bar{L} = \sum_{i=1}^N \Delta L / N$; N — количество расчетных точек.

Расчеты выполнены с использованием компьютерной программы [22].

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных приведены в табл. 2–4.

В целом результаты выполненных экспериментальных исследований и их сравнение с результатами расчетов показывают, что статистический метод обеспечивает достаточную точность расчетов уровней шума в квартирах. Расхождение результатов расчетов с экспериментом не превышает 2 дБ. Метод адекватно реагирует на изменение условий распространения звуковой энергии в акустически связанных помещениях при изменениях акустических связей между помещениями квартиры и поэтому может быть эффективно использован при проектировании средств шумозащиты в квартирах с внутриквартирными источниками звука.

Табл. 2. Расчетные и экспериментальные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника шума в помещении № 1

Номер помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 4000$ Гц, дБ		
	измеренные L_z	расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$	измеренные L_z	расчетные L_p	$\Delta L_{\text{кв}}$
<i>Все двери помещений квартиры открыты</i>						
1	88,31	87,10	1,21	85,93	87,10	1,17
2	82,55	81,40	1,15	80,14	81,40	1,26
3	76,13	76,50	0,37	75,19	76,50	1,31
4	78,64	76,10	2,54	75,89	76,10	0,21
5	82,05	81,20	0,85	80,70	81,20	0,50
6	69,75	69,10	0,65	68,41	69,10	0,69
7	67,75	67,20	0,55	66,23	67,20	0,97
8	77,14	76,20	0,64	74,53	76,20	1,68
<i>Все двери помещений квартиры закрыты</i>						
1	90,30	88,90	1,46	89,20	88,90	0,30
2	73,20	72,30	0,87	71,20	72,30	1,10
3	68,60	67,20	1,36	66,10	67,20	1,14
4	65,30	66,60	1,30	64,80	66,60	1,85
5	82,80	81,50	1,29	79,60	81,50	1,87
6	70,40	71,80	1,37	72,10	71,80	0,32
7	68,30	70,10	1,85	71,80	70,10	1,72
8	53,80	52,80	0,96	51,70	52,80	1,09

Табл. 3. Расчетные и экспериментальные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в помещении № 2

Номер помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 4000$ Гц, дБ		
	измеренные L_z	расчетные L_p	ΔL_{kv}	измеренные L_z	расчетные L_p	ΔL_{kv}
<i>Все двери помещений квартиры открыты</i>						
1	82,10	80,80	1,26	79,80	80,80	1,01
2	90,10	88,50	1,59	88,40	88,50	0,14
3	71,20	69,90	1,33	68,20	69,90	1,69
4	71,60	70,30	1,34	68,80	70,30	1,46
5	79,90	78,10	1,79	77,10	78,10	0,98
6	66,90	68,10	1,19	66,20	68,10	1,88
7	64,10	63,20	0,92	61,30	63,20	1,87
8	69,40	69,20	0,20	67,50	69,20	1,70
<i>Все двери помещений квартиры закрыты</i>						
1	71,20	71,30	0,15	69,90	71,30	1,45
2	90,60	89,00	1,59	88,50	89,00	0,48
3	44,00	42,10	1,94	40,40	42,10	1,74
4	44,10	42,30	1,77	43,90	42,30	1,64
5	64,10	62,50	1,60	60,80	62,50	1,70
6	52,20	50,80	1,40	49,10	50,80	1,70
7	47,70	45,80	1,86	44,60	45,80	1,18
8	38,20	36,50	1,70	35,40	36,50	1,10
<i>Открыта дверь второго помещения</i>						
1	82,10	80,90	1,20	81,60	80,90	0,70
2	88,70	87,60	1,05	87,90	87,60	0,30
3	54,70	55,70	1,04	54,30	55,70	1,36
4	54,90	53,20	1,70	52,70	53,20	0,53
5	75,20	73,50	1,70	71,90	73,50	1,60
6	68,60	67,30	1,25	63,10	64,30	1,25
7	67,40	66,20	1,20	65,10	66,20	1,10
8	56,40	55,10	1,30	54,20	55,10	0,90

Табл. 4. Расчетные и экспериментальные уровни шума в помещениях квартиры при расположении источника в помещении № 3

Номер помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 4000$ Гц, дБ		
	измеренные L_z	расчетные L_p	ΔL_{kv}	измеренные L_z	расчетные L_p	ΔL_{kv}
<i>Все двери помещений квартиры открыты</i>						
1	75,20	73,90	1,33	73,50	73,90	0,39
2	69,80	68,10	1,70	66,40	68,10	1,67
3	84,90	83,90	1,00	85,10	83,90	1,17
4	67,10	65,40	1,70	64,70	65,40	0,72
5	72,00	70,20	1,82	71,50	70,20	1,28
6	58,90	57,10	1,80	58,60	57,10	1,48
7	66,90	65,10	1,80	63,90	65,10	1,20
8	57,90	56,40	1,50	55,40	56,40	1,05
<i>Все двери помещений квартиры закрыты</i>						
1	61,20	59,80	1,40	58,40	59,80	1,40
2	43,50	44,10	0,59	42,90	44,10	1,20
3	85,80	84,90	0,90	85,20	84,90	0,26
4	45,70	46,20	0,51	44,80	46,20	1,40

Окончание табл. 4

Номер помещения квартиры	Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 1000$ Гц, дБ			Уровни шума в октавной полосе с $f_{cp} = 4000$ Гц, дБ		
	измеренные L_a	расчетные L_p	ΔL_{KB}	измеренные L_a	расчетные L_p	ΔL_{KB}
5	61,10	60,70	0,38	61,00	60,70	0,32
6	48,60	50,10	1,52	48,10	50,10	1,97
7	45,50	46,40	0,88	44,90	46,40	1,50
8	46,40	46,30	0,05	45,10	46,30	1,20
Открыта дверь третьего помещения						
1	76,90	75,10	1,78	73,80	75,10	1,32
2	60,20	61,80	1,58	60,20	61,80	1,58
3	85,10	83,30	1,77	81,90	83,30	1,43
4	58,50	57,10	1,38	56,20	57,10	0,92
5	70,90	69,40	1,46	68,20	69,40	1,24
6	61,20	60,30	0,90	59,30	60,30	1,00
7	63,10	62,20	0,92	60,70	62,20	1,48
8	54,60	53,20	1,37	51,60	53,20	1,63

ЛИТЕРАТУРА

1. Леденев В.И., Воронков А.Ю., Жданов А.Е. Метод оценки шумового режима квартир // Жилищное строительство. 2004. № 11. С. 15–17.
2. Антонов А.И., Жоголева О.А., Леденев В.И. и др. Метод расчета шума в квартирах с ячейковыми системами планировки // Жилищное строительство. 2013. № 7. С. 33–35.
3. Жоголева О.А., Матвеева И.В., Федорова О.О. Проблемы акустического благоустройства квартир в зданиях эксплуатируемого жилого фонда // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. № 2 (14). С. 72–76.
4. Антонов А.И., Жоголева О.А., Леденев В.И. и др. Влияние звукопоглощения помещений и звукоизоляции дверей на шумовой режим в квартирах жилых зданий // Жилищное строительство. 2014. № 6. С. 45–48.
5. Kuttruff H. Room Acoustics. 4th edition. London : Spon, 2000.
6. Фурдуев В.В. Электроакустика. М. : Гостехтеориздат, 1948. 515с.
7. Скучик Е. Основы акустики. М. : Изд-во иностр. лит., 1959. Т. 2. 565 с.
8. Морз Ф. Колебания и звук. Л. : Гостехтеориздат, 1949. 496 с.
9. Леденев В.И., Антонов А.И., Жданов А.Е. Статистические энергетические методы расчета отраженных шумовых полей помещений // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2003. Т. 9. № 4. С. 713–717.
10. Visentin C., Valeau V., Prodi N. et al. A numerical investigation of the sound intensity field in rooms by using diffusion theory and particle tracing // Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010. Sydney. Australia. 2010. Pp. 23–27.
11. Billon A., Picaut J., Valeau V. et al. Acoustic Predictions in Industrial Spaces Using a Diffusion Model // Advances in Acoustics and Vibration. Volume 2012. Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/aav/2012/260394/>.
12. Visentin C., Prodi N., Valeau V. et al. A numerical and experimental validation of the room acoustics diffusion theory inside long rooms // 21st International Congress on Acoustics. Jun 2013. Canada. Режим доступа: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00845722/document>.
13. Visentin C., Prodi N., Valeau V. et al. A numerical investigation of the Fick's law of diffusion in room acoustics // The Journal of the Acoustical Society of America. 2012. Vol. 132. Issue 5. Pp. 3180–3189.
14. Foy C., Picaut J., Valeau V. Modeling the reverberant sound field by a diffusion process: analytical approach to the scattering // Proceedings of Internoise 2015, San Francisco. August 9–12, 2015.
15. Foy C., Picaut J., Valeau V. Introduction de la diffusivite des parois au sein du modèle de diffusion acoustique // Congrès Français d'Acoustique/Vibrations, SHocks and NOise. 2016. Le Mans, 11–15 avril 2016.
16. Foy C., Valeau V., Picaut J. et al. Spatial variations of the mean free path in long rooms: Integration within the room-acoustic diffusion model // Proceedings of the 22 International Congress on Acoustics 2016. Buenos Aires, 5 to 9 September 2016.
17. Леденев В.И., Макаров А.М. Расчет энергетических параметров шумовых полей в производственных помещениях сложной формы с технологическим оборудованием // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 2. С. 94–101.
18. Соломатин Е.О., Антонов А.И., Леденев В.И. и др. Метод оценки шумового режима в производственных помещениях энергетических объектов // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 250–252.
19. Леденев В.И., Соломатин Е.О., Гусев В.П. Оценка точности и границ применимости статистических энергетических методов при расчетах шума в производственных помещениях энергетических объектов // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 237–240.
20. Осипов Г.Л., Юдин Е.Я., Хюбнер Г. Снижение шума в зданиях и жилых районах / под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. М. : Стройиздат, 1987. 558 с.
21. Антонов А.И., Головкин А.В., Жоголева О.А. и др. Метод оценки шумового режима в общественных здании

ях с анфиладными системами планировки // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 4 (54). С. 139–144.

22. Свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ № 2014661638 РФ. Расчет звуково-

го поля в системе соразмерных акустически связанных помещений / А.И. Антонов, О.А. Жоголева, И.Л. Шубин ; правообл. ТГТУ. Заявка № 2014619411; поступ. 17.09.2014; зарег. 10.11.2014.

Поступила в редакцию в январе 2017 г.

Принята в доработанном виде в феврале 2017 г.

Одобрена для публикации в марте 2017 г.

Об авторах: **Жоголева Ольга Александровна** — ассистент кафедры городского строительства и автомобильных дорог, **Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)**, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е, 8 (4752) 63-03-72, gsiad@mail.tambov.ru;

Гиясов Ботир Иминжонович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектурно-строительного проектирования, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, dandyr@mail.ru;

Матвеева Ирина Владимировна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры городского строительства и автомобильных дорог, **Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)**, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е, 8 (4752) 63-03-72, gsiad@mail.tambov.ru;

Федорова Ольга Олеговна — магистрант кафедры городского строительства и автомобильных дорог, **Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)**, 392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112, корп. Е, 8 (4752) 63-03-72, gsiad@mail.tambov.ru.

REFERENCES

1. Ledenev V.I., Voronkov A.Ju., Zhdanov A.E. Metod otsenki shumovogo rezhima kvartir [Method of Noise Apartment Regime Estimation]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2004, no. 11, pp. 15–17. (In Russian)
2. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. et al. Metod rascheta shuma v kvartirakh s yacheykovymi sistemami planirovki [Method for Noise Calculating in Cellular Planning Apartments]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2013, no. 7, pp. 33–35. (In Russian)
3. Zhogoleva O.A., Matveeva I.V., Fedorova O.O. Problemy akusticheskogo blagoustroystva kvartir v zdaniyakh ekspluatiruyemogo zhilogo fonda [Problems of Acoustic Improvement of Utilize Housing Stock Apartments]. *Biosfer'naya sovместimost': chelovek, region, tehnologii* [Biosphere Compatibility: Person, Region, Technology]. 2016, no. 2 (14), pp. 72–76. (In Russian)
4. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. et al. Vliyanie zvukopogloshheniya pomeshcheniy i zvukoizolyatsii dverej na shumovoj rezhim v kvartirah zhilykh zdaniy [Influence of Sound Absorption and Sound Insulation Premises Doors on the Noise Regime of Domestic Building Apartments]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2014, no. 6, pp. 45–48. (In Russian)
5. Kuttruff H. *Room Acoustics*. 4th edition. Spon, London. UK. 1999.
6. Furduev V.V. *Elektroakustika* [Electroacoustics]. Moscow, Gosttehorizdat Publ., 1948, 515 p. (In Russian)
7. Skuchik E. *Acoustic Fundamentals*. Somerset, New Jersey, Wiley, 1956, vol. 2, 565 p.
8. Morse P. *Vibrations and Sound*. New York, McGraw-Hill Book Company Inc., 1948, 468 p.
9. Ledenev V.I., Antonov A.I., Zhdanov A.E. Statisticheskiye energeticheskiye metody rascheta otrazhennykh shumovykh poley pomeshcheniy [Statistical Methods for Calculating the Energy of the Reflected Noise Fields of Premises] *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2003, vol. 9, no. 4, pp. 713–717. (In Russian)
10. Visentin C., Valeau V., Prodi N. et al. A numerical investigation of the sound intensity field in rooms by using diffusion theory and particle tracing. *Proceedings of the 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*. Sydney. Australia. 2010, pp. 23–27.
11. Billon A., Picaut J., Valeau V. et al. Acoustic Predictions in Industrial Spaces Using a Diffusion Model. *Advances in Acoustics and Vibration*. Vol. 2012. Режим доступа: <https://www.hindawi.com/journals/aav/2012/260394/>.
12. Visentin C., Prodi N., Valeau V. et al. A numerical and experimental validation of the room acoustics diffusion theory inside long rooms. *21st International Congress on Acoustics*. June 2013. Canada.
13. Visentin C., Prodi N., Valeau V. et al. A numerical investigation of the Fick's law of diffusion in room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2012, vol. 132, issue 5, pp. 3180–3189.
14. Foy C., Picaut J., Valeau V. Modeling the reverberant sound field by a diffusion process: analytical approach to the scattering. *Proceedings of Internoise*. 2015, San Francisco. August 9–12, 2015.
15. Foy C., Picaut J., Valeau V. Introduction de la diffusivite des parois au sein du modèle de diffusion acoustique. *Congrès Français d'Acoustique/Vibrations, SHocks and Noise*. 2016. Le Mans, 11–15 avril 2016.
16. Foy C., Valeau V., Picaut J. et al. Spatial variations of the mean free path in long rooms: Integration within the room-acoustic diffusion model. *Proceedings of the 22 International Congress on Acoustics*. 2016, Buenos Aires, September 5 to 9, 2016.
17. Ledenev V.I., Makarov A.M. Raschet energeticheskikh parametrov shumovykh poley v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh slozhnoy formy s tekhnologicheskimi oborudovaniyem [Calculation of Energy Parameters of Noise Fields in Industrial Complicated Form Premises with Manufacturing Equipment]. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura* [Scientific Herald

of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]. 2008, no. 2, pp. 94–101. (In Russian)

18. Solomatin E.O., Antonov A.I., Ledenev V.I. et al. Metod otsenki shumovogo rezhima v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh energeticheskikh ob"yektov [Estimation Method of the Noise Regime in the Energy Facility Premises]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2009, no. 5, pp. 250–252. (In Russian)

19. Ledenev V.I., Solomatin E.O., Gusev V.P. Otsenka tochnosti i granits primenimosti statisticheskikh energeticheskikh metodov pri raschetakh shuma v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh energeticheskikh ob"yektov [Evaluation of Preciseness and Application of Statistical Energy Methods in Noise Level Calculation in Industrial Energy Facility Premises]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2010, no. 3, pp. 237–240. (In Russian)

20. Osipov G.L., Judin E.Ja., Hjubner G. *Snizheniye shuma v zdaniyakh i zhilykh rayonakh* [Noise Reduction in Buildings and Residential Areas]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987, 558 p. (In Russian)

21. Antonov A.I., Golovko A.V., Zhogoleva O.A. et al. Metod otsenki shumovogo rezhima v obshchestvennykh zdaniyakh s anfiladnymi sistemami planirovki [Method of the Noise Regime Estimation in Public Buildings with Enfilade Planning Systems] *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice Vernadsky University]. 2014, no.4 (54). pp.139-144. (In Russian)

22. Antonov A.I., Zhogoleva O.A., Shubin I.L. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii. programmy dlya EVM. Raschet zvukovogo polya v sisteme sorazmernykh akusticheskikh svyazannykh pomeshcheniy* [Certificate of State Registration of the Computer Program. Calculation of the Sound Field in the System of Proportionate Acoustically Coupled Spaces]. On the Record of 10.11.2014. (In Russian)

Received in January 2017.

Adopted in revised form in February 2017.

Approved for publication in March 2017.

About the authors: **Zhogoleva Olga Alexandrovna** — Assistant Lecturer, Department of Urban and Road Construction, **Tambov State Technical University (TGTU)**, 112E Michurinskaya str., Tambov, 392032, Russian Federation; gsiad@mail.tambov.ru; +7 (4752) 63-03-72;

Giyasov Botir Iminzhonovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Architectural and Construction Design, **Moscow State University of Civil Engineering National Research University (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; dandyr@mail.ru;

Matveeva Irina Vladimirovna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Urban and Road Construction, **Tambov State Technical University (TGTU)**, 112E Michurinskaya str., Tambov, 392032, Russian Federation; gsiad@mail.tambov.ru; +7 (4752) 63-03-72;

Fedorova Olga Olegovna — Graduate Student, Department of Urban and Road Construction, **Tambov State Technical University (TGTU)**, 112E Michurinskaya str., Tambov, 392032, Russian Federation; gsiad@mail.tambov.ru; +7 (4752) 63-03-72.