

РАСЧЕТЫ ИМПУЛЬСНОГО ШУМА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СРЕДСТВ ЕГО СНИЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ

АНТОНОВ А.И.¹, ЛЕДЕНЕВ В.И.¹, МАТВЕЕВА И.В.¹, ШУБИН И.Л.²

¹Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия

Аннотация. На современных производственных предприятиях широкое распространение имеет оборудование, излучающее импульсный шум. Импульсный шум оказывает более неблагоприятное воздействие на организм работающих людей. Поэтому к его ограничению предъявляются более жесткие требования. Выполнение их требует применения конструктивных мероприятий по ограничению мощности излучения импульсов звуковой энергии оборудованием и строительно-акустических мер снижения шума на путях его распространения. И в том и другом случаях необходимо оценивать акустическую эффективность предлагаемых мер. Это возможно при наличии метода расчета, объективно оценивающего распространение импульсного шума в помещениях с учетом их объемно-планировочных и акустических характеристик. В статье предложен статистический энергетический метод расчета импульсного шума, позволяющий оценивать его пространственно-временные характеристики при решении широкого круга задач по снижению воздействия шума на организм работающих. Показаны возможности метода при решении этих задач.

Ключевые слова: шум, импульсный шум, производственные помещения, метод расчета шума, строительно-акустические методы, защита от шума.

CALCULATIONS OF IMPULSE NOISE IN THE DESIGN OF MEANS OF REDUCTION IN INDUSTRIAL BUILDINGS

ANTONOV A.I.¹, LEDENEV V.I.¹, MATVEEVA I.V.¹, SHUBIN I.L.²

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russia,

²Research Institute of Building Physics of RAACS, Moscow, Russia,

Abstract. At modern industrial enterprises, equipment emitting impulse noise is widespread. Impulse noise has a more adverse effect on the body of working people. Therefore, more stringent requirements are imposed on its limitation. Performing them requires the use of constructive measures to limit the power of radiation of pulses of sound energy by equipment and building-acoustic measures to reduce noise in the ways of its propagation. In both cases, it is necessary to evaluate the acoustic efficiency of the proposed measures. This is possible if there is a calculation method that objectively evaluates the propagation of impulse noise in rooms taking into account their space-planning and acoustic characteristics. The article proposes a statistical energy method for calculating impulse noise, allowing to evaluate its spatial-temporal characteristics when solving a wide range of tasks to reduce the impact of noise on the body of workers. The possibilities of the method are shown in solving these problems.

Keywords: noise, impulse noise, industrial premises, noise calculation method, construction and acoustic methods, noise protection.

Введение

На современных производственных предприятиях большое распространение имеет технологическое оборудование, излучающее при работе импульсный шум. Под его воздействием в настоящее время находится большое количество работающих. По сравнению с по-

стоянным шумом импульсный шум оказывает более негативное воздействие на организм человека [1]. Согласно [2] при клинических наблюдениях рабочих, подвергающихся воздействию импульсного шума, установлено, что наиболее часто проявляется сочетание изменений органов слуха, нервной и сердечно-сосудистой системы.

Ограничение воздействия импульсного шума на организм человека является весьма сложной задачей, решение которой имеет большое социально-экономическое значение. Уменьшение вредного воздействия импульсного шума может быть достигнуто двумя путями.

Первый путь связан с конструктивными изменениями в технологическом оборудовании, излучающем импульсный шум. К таким мерам, согласно [3], может относиться уменьшение уровня импульса и его длительности, изменение частоты следования импульсов, сужение ширины полосы частот излучаемого шума. Перечисленные меры достигаются соответствующими конструктивными изменениями в источнике шума, связанными, как правило, со значительными материальными затратами. На стадии их разработки необходимо предварительно производить оценку их акустической эффективности. С этой целью необходимо иметь метод расчета импульсного шума в производственных помещениях, позволяющий строить графики изменения энергетических характеристик импульсного шума во времени с учетом объемно-планировочных и акустических параметров помещений. Например, в случае роста частоты следований импульсов метод должен оценивать изменение глубины модуляции импульсного шума. Установлено, что с ростом частоты уменьшается глубина модуляции и за счет этого несколько снижается биологическая активность шума [3].

Вторым путем ограничения действия импульсного шума является применение строительно-акустических средств снижения импульсного шума, а именно, экранирования, звукоизоляции, звукопоглощения. За счет их применения возможно изменять энергетические, частотные и временные характеристики импульсного шума, приходящего на рабочие места в производственных помещениях. Одним из способов в этом случае является изменение соотношения между импульсным и фоновым шумами, возникающими в помещении. Уменьшение соотношения приводит к уменьшению глубины модуляции, и соответственно, к снижению вредного действия шума. Достигнуть этого можно либо снижением уровня импульса, либо повышением фонового шума [3]. Первое возможно конструктивными изменениями в источнике шума, а второе за счет строительно-акустических средств. Для оценки акустической эффективности строительно-акустических средств необходимо иметь метод расчета энергетических характеристик шума, учитывающий акустические и планировочные параметры помещений.

Таким образом, при оценке акустической эффективности снижения вредного воздействия импульсного шума за счет применения конструктивных мер в его источнике и строительно-акустических средств изменения параметров шумового режима в помещениях необходим метод расчета шума, оценивающий распространение в них импульсного и фонового шума. В статье предлагается такой метод расчета и показываются его возможности и границы применения.

Метод расчета шума в помещениях с импульсными и постоянными источниками шума

Уровень звукового давления импульсного шума в расчетных точках определяется прямой энергией импульса и его отраженной составляющей, возникающей при отражениях звуковой энергии импульса от ограждений. Формирование и распространение отраженной энергии импульса определяется большим количеством факторов. Наиболее важным среди них является характер отражения звука от ограждений [4].

В процессе многочисленных исследований установлено, что в общем случае реальный характер отражения звука от ограждений близок к зеркально-диффузному отражению. В

настоящее время разработаны методы расчета шума, реализующие такой вид отражения [5,6].

Для оценки непостоянного во времени шума была предложена комбинированная расчетная модель, учитывающая зеркально-диффузный характер отражения, и разработана программа для ее реализации [7]. Расчет отраженной энергии в этом случае производится двумя методами. На основе метода геометрической акустики определяется зеркальная составляющая отраженной энергии, а методом, основанным на интегральном уравнении Куттруфа, диффузная энергия. При использовании такой комбинированной модели требуются значительные вычислительные ресурсы и существенные затраты времени на вычисления. Поэтому модель более пригодна для исследовательских целей, чем для решения практических задач борьбы с шумом. На ее основе возможно, например, производить анализ влияния коэффициентов рассеяния на соотношение энергий зеркальной и рассеянной составляющих в отраженном звуковом поле и на их изменение во времени.

Выполненные на основе этой комбинированной модели исследования показали, что при коэффициентах рассеяния отраженной энергии более 0.20 величина отраженной энергии и ее изменение во времени в основном определяются диффузно отраженной составляющей. Согласно выполненным нами исследованиям [6] в производственных помещениях с технологическим оборудованием коэффициенты рассеяния находятся в пределах от 0.5 до 1.0. Следовательно, это дает возможность использовать при расчетах шума и проектировании средств шумозащиты более простые методы, основанные на представлениях о диффузном характере отражения звука от ограждений.

Пропорции помещений также оказывают влияние на характер формирования отраженного звукового поля. Известно, что в длинных и плоских производственных помещениях отраженное поле при диффузном отражении звука от ограждений имеет квазидиффузный характер, при котором отраженная звуковая энергия не распределяется равномерно по помещению, а имеет явно выраженные спады по мере удаления от источника [7].

Таким образом, при работе в помещении источника шума с непостоянной во времени звуковой мощностью происходит изменение отраженной звуковой энергии во времени и по пространству помещения. В этом случае для расчета пространственно-временных изменений отраженного шума предлагается использовать статистическую энергетическую модель [7]. Модель построена исходя из представлений о том, что в отраженном квазидиффузном звуковом поле существует связь плотности потока \bar{q} и градиента плотности отраженной звуковой энергии ε , имеющая вид

$$\bar{q} = -\eta \text{grad} \varepsilon, \quad (1)$$

где η - коэффициент связи плотности потока и градиента плотности, определяемый выражением [10]

$$\eta = 0.5c\bar{l}, \quad (2)$$

c – скорость звука в воздухе; \bar{l} – средняя длина свободного пробега отраженных звуковых лучей в помещении.

В этом случае распределение звуковой энергии в замкнутом помещении описывается дифференциальным уравнением в частных производных второго порядка

$$\frac{\partial \varepsilon_{(r,t)}}{\partial t} - \eta \nabla^2 \varepsilon_{(r,t)} + m_b \varepsilon = F_{(r,t)}, \quad (3)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа; m_b – пространственный коэффициент затухания звука в воздухе; $F_{(r,t)} = W(1 - \bar{\alpha}) / dv$ – количество излученной отраженной звуковой энергии в объем dv ; W – мощность источника; $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения помещения.

Решая уравнение (3), можно получить распределение отраженной энергии по пространству помещения в любой промежуток времени.

Однозначность решения уравнения (3) обеспечивается заданием граничных и начальных условий.

Граничные условия в соответствии с (1) имеют вид

$$q_{(r,t)} \bar{n} = -\eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial \bar{n}} \Big|_S = \gamma \varepsilon_{(r,t)} \Big|_S, \quad (4)$$

где γ - коэффициент переноса отраженной энергии на границах помещения, определяемый согласно [10] выражением

$$\gamma = \frac{c\alpha_s}{2(2-\alpha_s)}; \quad (5)$$

α_s - коэффициент звукопоглощения на участке поверхности помещения S .

Окончательно, с учетом (2) и (5) граничные условия можно представить в виде

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \bar{n}} \Big|_S = -\frac{\alpha_s}{(2-\alpha_s)l} \varepsilon_{(r,t)} \Big|_S. \quad (6)$$

Начальные условия определяются информацией о начальном распределении отраженной звуковой энергии по помещению

$$\varepsilon \Big|_{t=t_0} = f(x_1, x_2, x_3). \quad (7)$$

Подобные представленной расчетной модели подходы позднее были предложены в зарубежных работах [9-15]. Они основаны на представлениях о диффузионном распространении отраженной звуковой энергии подобно броуновскому движению молекул [16].

В нашем случае для установления начальных условий можно предположить, что действие широкополосного ненаправленного источника шума, расположенного в точке с координатами x_1^0, x_2^0, x_3^0 , представляется в виде последовательного излучения импульсов звуковой энергии при бесконечно малом временном интервале $\partial \tau$. Энергия импульса, участвующая в последующем формировании отраженного звукового поля, составляет величину $W(1-\bar{\alpha})\partial \tau$. При бесконечно малом $\partial \tau$ с достаточным приближением можно считать, что излучаемый импульс энергии первоначально распределяется вблизи источника в малом объеме $V_{ис}$ и, соответственно, начальные условия имеют вид

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{W(1-\bar{\alpha})\Delta \tau}{V_{ис}}; x \in V_{ис}, \\ \varepsilon = 0; x \notin V_{ис}. \end{cases} \quad (8)$$

где $V_{ис}$ - достаточно малая по сравнению с объемом помещения область первоначального распределения импульса.

Для реализации расчетной модели, состоящей из параболического уравнения (3) с граничными и начальными условиями (6) и (8), использован метод разделения переменных (метод Фурье) [7]. Метод пригоден для расчетов в помещениях правильной прямоугольной формы с граничными условиями (6) в виде (см. рис.1).

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \Big|_{x_j=l_j} = -k_j^+ \varepsilon \Big|_{x_j=l_j}; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \Big|_{x_j=0} = +k_j^0 \varepsilon \Big|_{x_j=0}. \quad (9)$$

где $k_j^+ = \frac{\alpha_j^+}{(2-\alpha_j^+)l}$; $k_j^0 = \frac{\alpha_j^0}{(2-\alpha_j^0)l}$; α_j - коэффициент звукопоглощения j -ой поверхности.

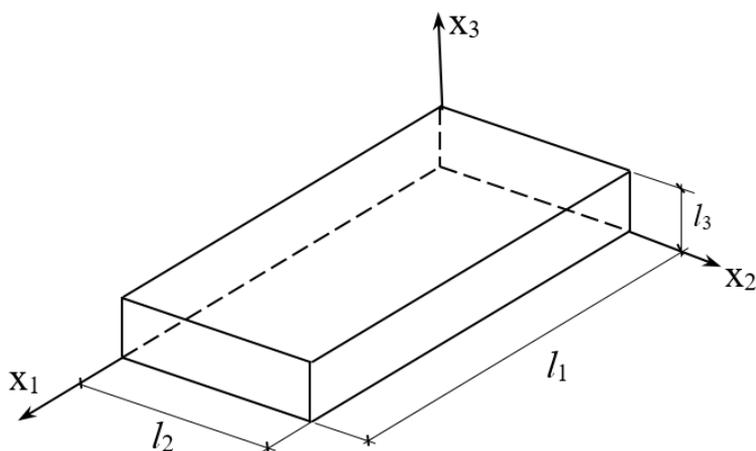


Рисунок 1 – Система координат помещения

Выражение для описания процесса распределения и затухания импульса энергии в пространстве помещения в этом случае имеет вид

$$\varepsilon_{\text{имп}} = \sum_m \sum_n \sum_q \frac{W(\tau)(1-\bar{\alpha})\varphi_m\varphi_n\varphi_q\varphi_m^0\varphi_n^0\varphi_q^0}{B_m B_n B_q} e^{-U_{mnq}(t-\tau)} d\tau. \quad (10)$$

Если звуковая энергия излучается источником в течение интервала времени $\tau_1 < t < \tau_2$, то результат его действия равен сумме действий всех импульсов и для получения энергетических характеристик отраженного звукового поля необходимо проинтегрировать выражение (10).

Если координаты расчетной точки (x_1, x_2, x_3) и источника (x_1^0, x_2^0, x_3^0) постоянны, получим

$$\varepsilon = (1-\bar{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\varphi_m\varphi_n\varphi_q\varphi_m^0\varphi_n^0\varphi_q^0}{B_m B_n B_q} \int_{\tau_1}^{\tau_2} W(\tau) \exp[-U_{mnq}(t-\tau)] d\tau. \quad (11)$$

В формулах (10) - (11) t – время наблюдения импульса энергии; τ – начальный момент времени после импульса излучения; $\varphi_m\varphi_n\varphi_q$ – система ортогональных тригонометрических собственных функций; $\varphi_m^0\varphi_n^0\varphi_q^0$ – значения собственных функций в точке источника; U_{mnq} – показатель затухания во времени амплитуд частных решений; B_1 – нормирующие множители.

Собственные функции определяются по формуле

$$\varphi_i = \cos \left[\mu_i \left(\frac{2x_j}{l_j} - 1 \right) \right], \quad (12)$$

где i, j – индексы, связанные соотношениями:

$$\begin{cases} i = m \in \{1, 2, \dots, \infty\} \\ j = 1 \end{cases}; \quad \begin{cases} i = n \in \{1, 2, \dots, \infty\} \\ j = 2 \end{cases}; \quad \begin{cases} i = q \in \{1, 2, \dots, \infty\} \\ j = 3 \end{cases}.$$

Собственные числа μ_i , обеспечивающие соблюдение граничных условий (9), определяются из решения трансцендентных уравнений

$$\text{tg}(2\mu_i) = \frac{2\mu_i(k_j^+ + k_j^0)l_j}{4\mu_i - k_j^+ k_j^0 l_j^2}, \quad (13)$$

причем $\mu_i > 0$ и $\mu_{i+1} < \mu_i$.

Показатели затухания находятся по формуле

$$U_{mnq} = 0,5cl_{cp} \left[\frac{2m_B}{l_{cp}} + 4 \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\mu_j}{l_j} \right)^2 \right], \quad (14)$$

а нормирующие сомножители из выражения

$$B_i = \int_0^{l_j} [\varphi_i]^2 dx_j. \quad (15)$$

Выражение (11) можно использовать и для оценки распределения отраженной звуковой энергии при работе постоянного источника шума. В этом случае имеем

$$\varepsilon = W(1 - \tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}} e^{-U_{mnq} r/c}, \quad (16)$$

где r – расстояние от источника до точки расчета.

Соответственно, суммарный уровень звукового давления прямого и отраженного шума от источника постоянной звуковой мощности в i -ой расчетной точке будет определяться по формуле

$$L_i = L_p + 10 \lg \left[\frac{\Phi e^{-m_p r_i}}{\Omega c r_i^2} + (1 - \tilde{\alpha}) \sum_m \sum_n \sum_q \frac{\varphi_m \varphi_n \varphi_q \varphi_m^0 \varphi_n^0 \varphi_q^0}{B_m B_n B_q U_{mnq}} e^{-U_{mnq} r/c} \right], \quad (17)$$

где Φ – фактор направленности источника, Ω – пространственный угол излучения источника.

Таким образом, рассмотренный метод разделения переменных может быть использован для решения поставленных выше задач при работе в помещении импульсных источников и источников, создающих фоновый шум. Для реализации метода разработана компьютерная программа.

Использование метода для решения задач по оценке импульсного шума

Для оценки возможностей разрабатываемого метода выполнено решение ряда задач. Задачи решены для помещения размерами $60 \times 60 \times 6$ м. Расчеты произведены для октавной полосы с $f_{cp} = 2000$ Гц. Средний коэффициент звукопоглощения ограждений равен $\bar{\alpha} = 0.10$. Во всех случаях точечный источник периодического действия находился в точке с координатами: $x=10$ м, $y=30$ м, $z=1.2$ м.

На рис.2 приведены графики изменений уровней отраженного шума в помещении в расчетной точке с координатами $x=26$ м, $y=30$ м, $z=1.5$ м при действии импульсов разной формы (см. табл.1). Для вариантов 1-3 длительность импульса равна 0.5 с, для варианта 4 – 1.5 с, для варианта 5 – 1.0 с. Длительность импульсов подобрана исходя из условия равенства общей излучаемой энергии. Акустическая мощность импульса принята $W_{им} = W_0 10 \lg(10^{0.1 L_w})$ при $L_w = 10$ дБ, $W_0 = 10^{-12}$ Вт. Расчеты выполнены при периоде излучения 1.5 с. Как видно, изменяя форму импульса можно достичь некоторого снижения шума. На это указано ранее в работе [3].

Рассмотрено влияние частоты излучения импульсов на соотношение $L_{max} - L_{min}$. Результаты приведены на рис.3.

При расчетах установлено следующее.

Уровни эквивалентного шума равны: при периодичности работы источника $\Delta T = 0.6$ с – $L_{экв} = 61.9$ дБ; при $\Delta T = 1.2$ с – $L_{экв} = 58.9$ дБ. Разность максимального и минимального уровней шума составила:

- при периодичности источника шума $\Delta T = 0.6$ с – $L_{max} - L_{min} = 69.2 - 58.0 = 11.2$ дБ;
- при $\Delta T = 1.2$ с – $L_{max} - L_{min} = 69.2 - 46.7 = 22.5$ дБ.

Минимальный уровень шума можно рассматривать как постоянный фоновый шум. Результаты согласуются с данными работы [3].

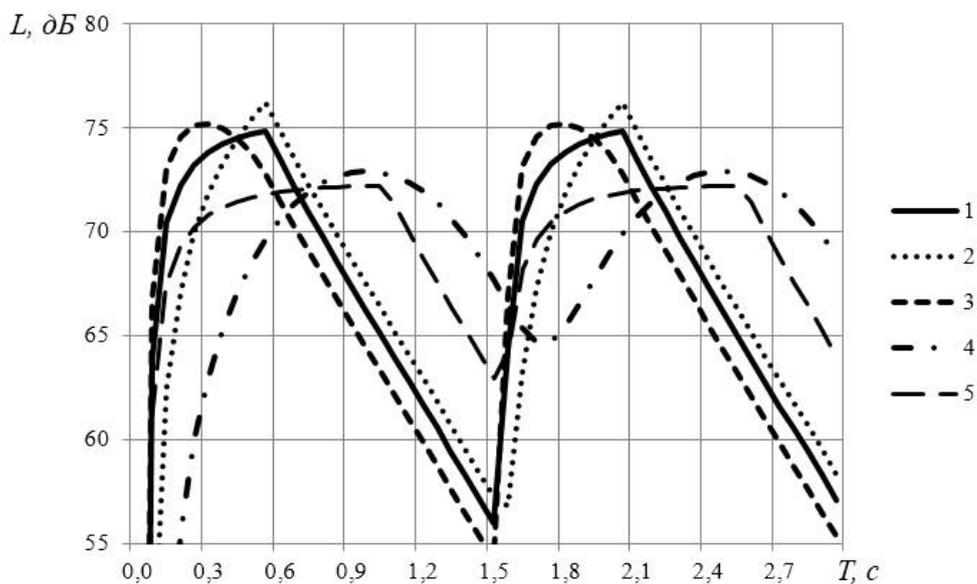


Рисунок 2 – Изменение уровней отраженного звукового давления в помещении при разных формах импульсов (см. таблицу 1)

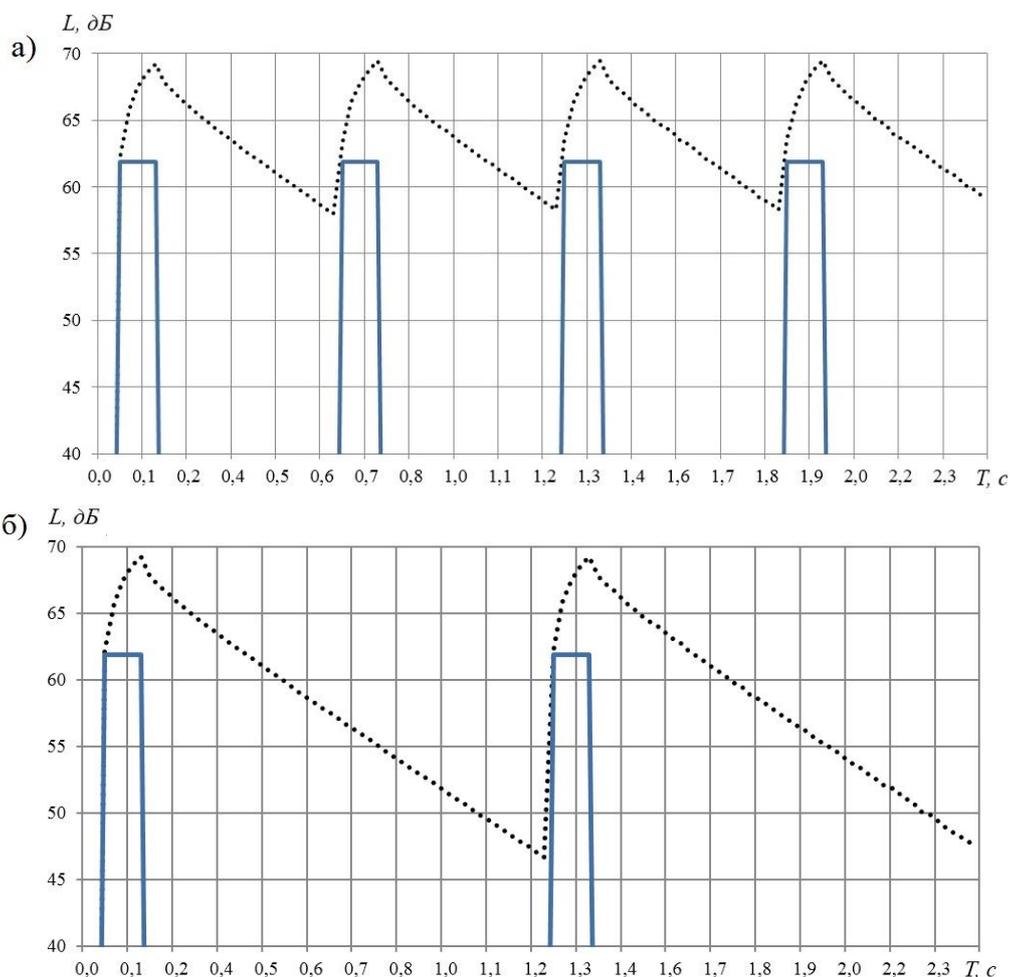
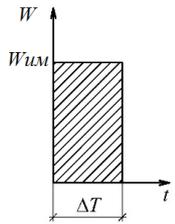
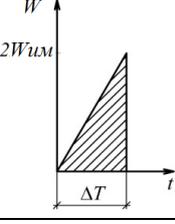
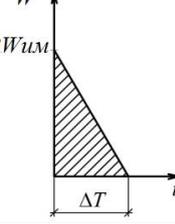
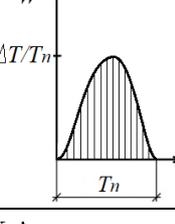
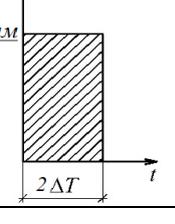


Рисунок 3 – Изменение уровней звукового давления в расчетной точке на расстоянии 16 м от источника шума при длительности прямоугольного импульса 0.1 с: а) при периодичности действия источника 0.6 с; б) при периодичности действия источника 1.2 с:
 _____ - уровень прямого звука; - суммарный уровень прямого и отраженного звука

Таблица 1 – Варианты излучения порции звуковой энергии

Номер варианта	Схема	Выражение для W_t
1		$W_t = W_{UM}$ при $0 < t < \Delta T$
2		$W_t = \frac{2W_{UM}t}{\Delta T}$ при $0 < t < \Delta T$
3		$W_t = 2W_{UM} \left(1 - \frac{t}{\Delta T} \right)$ при $0 < t < \Delta T$
4		$W_t = \Delta T / T_n [1 - \cos(2\pi t / T_n)]$ при $0 < t < T_n$
5		$W_t = W_{UM}/2$ при $0 < t < 2\Delta T$

Оценено влияние на величину импульсного шума положения расчетных точек относительно источника. Результаты расчета приведены на рис.4.

При расчетах установлено следующее.

Уровни эквивалентного шума равны: на расстоянии $r=5$ м – $L_{ЭКВ}=64.3$ дБ; при $r=30$ м – $L_{ЭКВ}=55.8$ дБ. Разность максимального и минимального уровней шума составила:

- при $r=5$ м – $L_{max} - L_{min} = 75.4 - 47.1 = 28.3$ дБ;
- при $r=30$ м – $L_{max} - L_{min} = 64.1 - 45.7 = 18.4$ дБ.

Минимальный уровень шума или постоянный фоновый шум почти одинаков во всех точках помещения. Видно, что удаление рабочих мест от источника существенно снижает разность $L_{max} - L_{min}$, то есть уменьшает вредность импульсного шума [3].

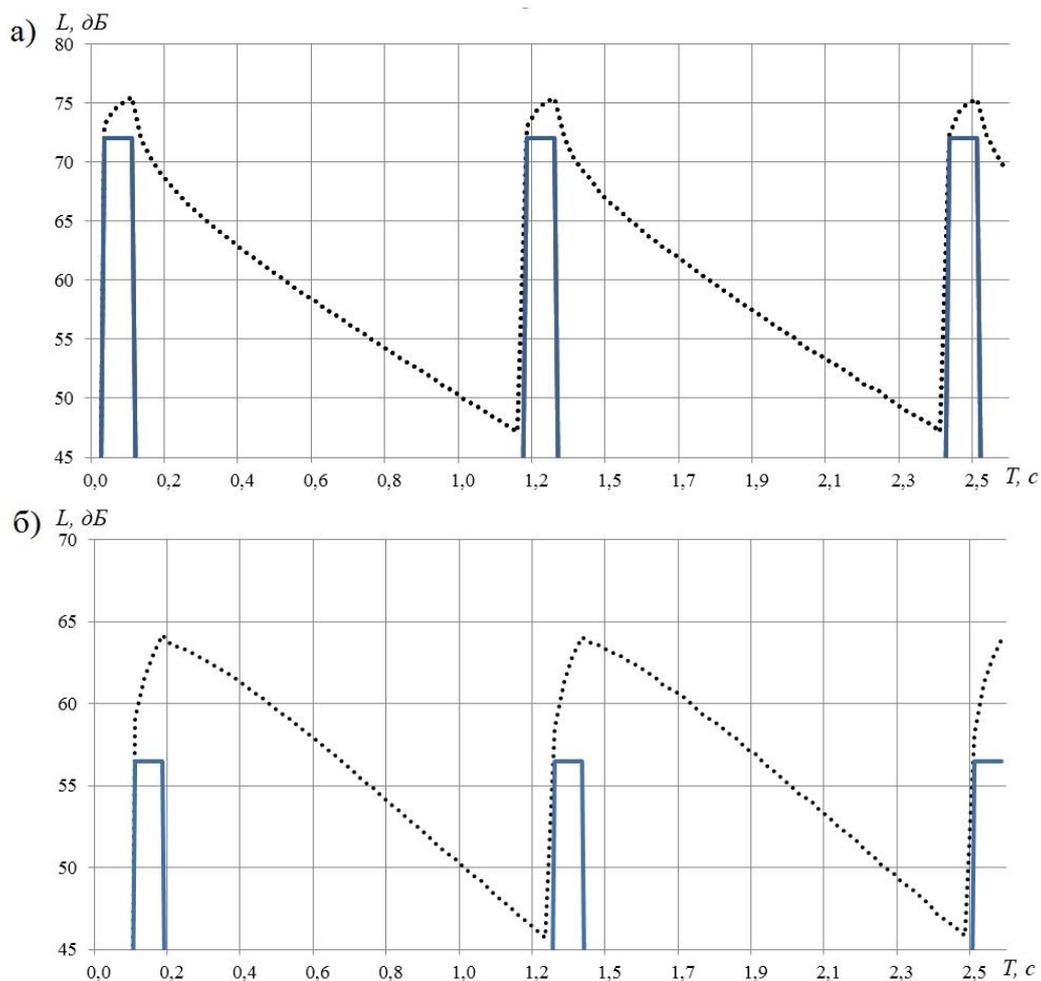


Рисунок 4 – Изменение уровней звукового давления в расчетной точке при периодичности действия источника 1.2 с и длительности прямоугольного импульса 0.1 с: а) на расстоянии от источника шума $r=5$ м (вверху); б) на расстоянии от источника шума $r=30$ м (внизу): ——— - уровень прямого звука; - суммарный уровень прямого и отраженного звука

Оценено влияние звукопоглощения помещения на характеристики импульсного шума. Результаты расчета приведены на рис.5.

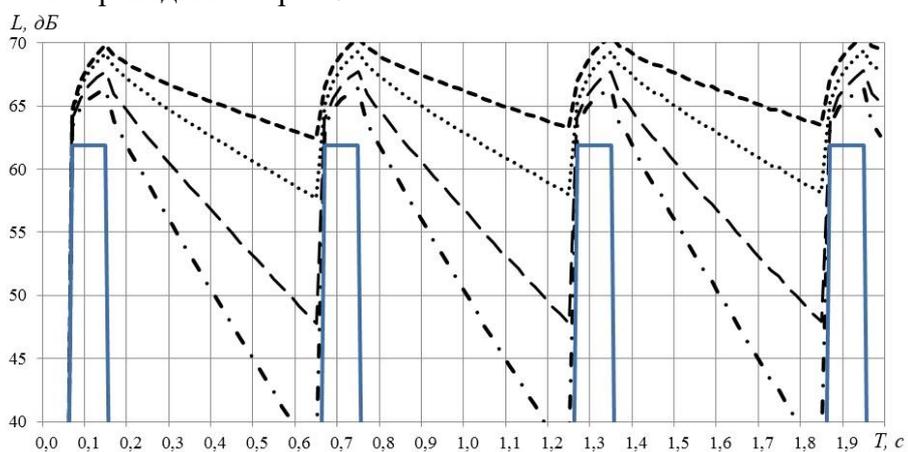


Рисунок 5 - Изменение уровней звукового давления в расчетной точке на расстоянии $r = 16$ м от источника шума при периодичности действия источника 0.6 с и длительности прямоугольного импульса – 0.1 с при средних коэффициентах звукопоглощения: - - - - $\alpha = 0.05$; $\alpha = 0.1$; - - - - $\alpha = 0.2$; - . - . $\alpha = 0.3$

При расчетах установлено следующее. Уровни эквивалентного шума равны: при $\alpha = 0.05 - L_{экв} = 64.0$ дБ, при $\alpha = 0.1 - L_{экв} = 61.9$ дБ, при $\alpha = 0.2 - L_{экв} = 59.1$ дБ, при $\alpha = 0.3 - L_{экв} = 57.1$ дБ. Разность максимального и минимального уровней шума составила: при $\alpha = 0.05 - L_{max} - L_{min} = 70.6 - 63.2 = 7.4$ дБ; при $\alpha = 0.1 - L_{max} - L_{min} = 69.3 - 58.0 = 11.3$ дБ, при $\alpha = 0.2 - L_{max} - L_{min} = 67.8 - 47.7 = 20.1$ дБ, при $\alpha = 0.3 - L_{max} - L_{min} = 66.4 - 36.9 = 29.5$ дБ. Видно, что с ростом звукопоглощения возрастает разность $L_{max} - L_{min}$, то есть увеличивается вредность импульсного шума [3].

Произведена оценка влияния фонового шума на изменение импульсного шума в расчетной точке. Результаты приведены на рис.6.

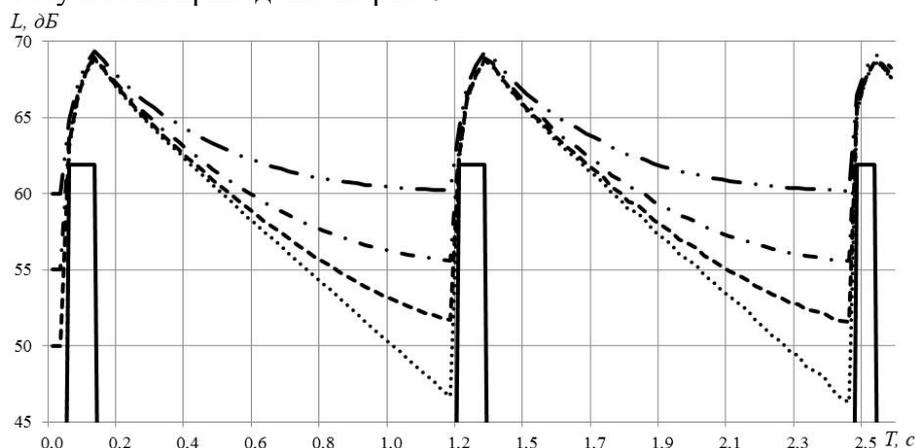


Рисунок 6 - Изменение уровней звукового давления в расчетной точке на расстоянии $r = 16$ м от источника шума при периодичности действия источника 0.6 с и длительности прямоугольного импульса $- 0.1$ с при различных значениях фонового шума: фоновый шум от других источников шума отсутствует $L_{\phi} = 0$ дБ; - - - - - $L_{\phi} = 50$ дБ; - . - . - . $L_{\phi} = 55$ дБ; _ _ _ _ _ $L_{\phi} = 60$ дБ

При расчетах установлено следующее. С ростом фонового шума уменьшается разность $L_{max} - L_{min}$. За счет этого частично снижается вредность импульсного шума, что согласуется с положениями, указанными в работе [3].

Выводы

1. Предложенный метод расчета импульсного шума в производственных помещениях позволяет решать широкий круг задач по снижению его вредного воздействия на организм работающих.
2. Компьютерная реализация метода обеспечивает возможность оценивать распределение импульсного шума по объему помещения и тем самым устанавливать зоны помещения, где импульсный шум превышает нормативные уровни.
3. Достоверные сведения о размерах зоны импульсного шума и о его характеристиках в пределах зоны позволяют производить целенаправленный выбор строительно-акустических средств снижения импульсного шума.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов Г.А., Лихницкий А.М. Импульсный шум и его влияние на организм человека. Л.: Медицина. 1975. 207 с.
2. Хаймович М.Л. О влиянии импульсного шума на организм работающих // III Всесоюзная конференция по борьбе с шумом и вибрацией: материалы тезисов докладов секции «Действие шума и вибраций на организм». Челябинск. 1980. С.35-37.
3. Каньшин В.Б. Исследование воздействия и рассмотрение методов снижения шумов импульсного характера на организм человека // III Всесоюзная конференция по борьбе с шумом и вибрацией: материалы тезисов докладов секции «Действие шума и вибраций на организм». Челябинск. 1980. С.24-27.
4. Антонов А.И., Леденев В.И., Матвеева И.В., Федорова О.О. Влияние характера отражения звука от ограждений на выбор метода расчета воздушного шума в гражданских и промышленных зданиях // Приволжский научный журнал. 2017. № 2 (42). С. 16-23.

5. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection // *Procedia Engineering* (см. в книгах). 2017. № 176. Pp. 218-225. doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.291
6. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 1 (77). С. 13-22. doi.: 10.18720/MCE.77.2
7. Леденев В.И. Статистические энергетические методы расчета шумовых полей при проектировании производственных зданий. Тамбов. 2000. 156 с.
8. Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T., Tsukernikov I. Coupling Coefficient of Flux Density and Density Gradient of Reflected Sound Energy in Quasi-Diffuse Sound Fields // *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*. V.26. № 4.
9. Visentin C., Valeau V., Prodi N., Picaut J. 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* (Sydney, Australia). 2010. Pp. 23–27.
10. Billon A., Picaut J., Valeau V., Sakout A. Acoustic Predictions in Industrial Spaces Using a Diffusion Model // *Hindawi Publishing Corporation Advances in Acoustics and Vibration*. 2012.
11. Visentin C., Prodi N., Valeau V., Picaut J. A numerical and experimental validation of the room acoustics diffusion theory inside long rooms // *21st International Congress on Acoustics*. (Canada). 2013.
12. Visentin C., Prodi N., Valeau V., Picaut J. A numerical investigation of the Fick's law of diffusion in room acoustics // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012.
13. Foy C., Picaut J., Valeau V. Modeling the reverberant sound field by a diffusion process: analytical approach to the scattering // *Proceedings of Internoise*. (San Francisco). 2015.
14. Foy C., Picaut J., Valeau V. Introduction de la diffusivité des parois au sein du modèle de diffusion acoustique // *CFA / VISHNO*. 2016.
15. Foy C., Valeau V., Picaut J., Prax C., Sakout A. 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*. (Buenos Aires). 2016.
16. Ollendorf F. Statistisches raumakustikales Diffusionsproblem // *Acustica*. 1969. Vol. 21. No. 4. Pp. 236-245.

REFERENCES

1. Suvorov G.A., Likhniitskiy A.M. Impul'snyy shum i yego vliyaniye na organizm cheloveka [Impulse noise and its effect on the human body]. Leningrad: Meditsina. 1975. 207 p. (rus)
2. Khaymovich M.L. O vliyaniy impul'snogo shuma na organizm rabotayushchikh [On the effect of impulse noise on the body of workers]. III Vsesoyuznaya konferentsiya po bor'be s shumom i vibratsiyey: materialy tezisev dokladov sektsii «Deystviye shuma i vibratsiy na organizm» [All-Union Conference on Combating Noise and Vibration: Materials of Abstracts of the Section "Effect of Noise and Vibrations on the Body"]. Chelyabinsk, 1980. Pp. 35-37.
3. Kan'shin V.B. Issledovaniye vozdeystviya i rassmotreniye metodov snizheniya shumov impul'snogo kharaktera na organizm cheloveka [Examination of the impact and consideration of methods for reducing pulsed noise on the human body]. III Vsesoyuznaya konferentsiya po bor'be s shumom i vibratsiyey: materialy tezisev dokladov sektsii «Deystviye shuma i vibratsiy na organizm» [All-Union Conference on Combating Noise and Vibration: Materials of Abstracts of the Section "Effect of Noise and Vibrations on the Body"]. Chelyabinsk. 1980. Pp.24-27.
4. Antonov A.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V., Fedorova O.O. Vliyaniye kharaktera otrazheniya zvuka ot ograzhdeniy na vybor metoda rascheta vozdušnogo shuma v grazhdanskikh i promyshlennykh zdaniyakh [Influence of the nature of the reflection of sound from fences on the choice of method for calculating airborne noise in civil and industrial buildings]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal*. 2017. No. 2 (42). Pp. 16-23.
5. Tsukernikov I., Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T. Noise calculation method for industrial premises with bulky equipment at mirror-diffuse sound reflection. *Procedia Engineering*. 2017. No 176. Pp. 218-225.
6. Giyasov B.I., Ledenyov V.I., Matveeva I.V. Method for noise calculation under specular and diffuse reflection of sound. *Magazine of Civil engineering*. 2018. No. 1 (77). Pp. 13-22. doi.: 10.18720/MCE.77.2
7. Ledenev V.I. Statisticheskiye energeticheskiye metody rascheta shumovykh poley pri proyektirovaniy proizvodstvennykh zdaniy [Statistical energy methods for calculating noise fields in the design of industrial buildings]. Тамбов, 2000. 156 p.
8. Antonov A., Ledenev V., Shubin I., Nevenchannaya T., Tsukernikov I. Coupling Coefficient of Flux Density and Density Gradient of Reflected Sound Energy in Quasi-Diffuse Sound Fields. *Journal of Theoretical and Computational Acoustics*. V.26. No 4.
9. Visentin C., Valeau V., Prodi N., Picaut J. 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* (Sydney, Australia). 2010. Pp. 23–27.
10. Billon A., Picaut J., Valeau V., Sakout A. Acoustic Predictions in Industrial Spaces Using a Diffusion Model. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Acoustics and Vibration*. 2012.

11. Visentin C., Prodi N., Valeau V., Picaut J. A numerical and experimental validation of the room acoustics diffusion theory inside long rooms. 21st International Congress on Acoustics. (Canada). 2013.
12. Visentin C., Prodi N., Valeau V., Picaut J. A numerical investigation of the Fick's law of diffusion in room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012.
13. Foy C., Picaut J., Valeau V. Modeling the reverberant sound field by a diffusion process: analytical approach to the scattering. Proceedings of Internoise. (San Francisco). 2015.
14. Foy C., Picaut J., Valeau V. Introduction de la diffusivité des parois au sein du modèle de diffusion acoustique. CFA VISHNO. 2016.
15. Foy C., Valeau V., Picaut J., Prax C., Sakout A. 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. (Buenos Aires). 2016.
16. Ollendorf F. Statistischer Raumakustikalsdiffusionsproblem. *Acustica*. 1969. Vol. 21. No. 4. Pp. 236-245.

Информация об авторах:

Антонов Александр Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
д-р. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Архитектура и строительство зданий»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Леденев Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
д-р. техн. наук, проф., проф. кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Матвеева Ирина Владимировна

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Городское строительство и автомобильные дороги»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Шубин Игорь Любимович

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН)»,
г. Москва, Россия,
д-р. техн. наук, ст. науч. сотр., директор ФГБУ «НИИСФ РААСН»,
E-mail: niisf@mail.ru

Information about authors:

Antonov Alexander Ivanovich

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
doctor in tech. sc., docent, head of dep. «Architecture and construction of buildings»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Ledenev Vladimir Ivanovich

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
doctor in tech. sc., prof., prof. of the dep. «Urban development and roads»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Matveeva Irina Vladimirovna

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. «Urban development and roads»,
E-mail: gsiad@mail.tambov.ru

Shubin Igor Lyubimovich

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., senior researcher, director of the Research Institute of Building Physics of Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences,
E-mail: niisf@mail.ru