

УДК 534.833.522

OECD 01.03.AA

## Решение трехмерной обратной задачи по определению уровня шума на границе санитарно-защитной зоны промышленного предприятия

Комарова Е.Г.<sup>1</sup>, Пименов И.К.<sup>2</sup><sup>1</sup> Инженер первой категории АО «Концерн «МПО - Гидроприбор»,  
г. Санкт-Петербург, Б. Сампсониевский пр., д. 24<sup>2</sup> Профессор каф. «Гидрофизических средств поиска» СПбГМТУ,  
г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская д.3

### Аннотация

Традиционным методом снижения шума на селитебных территориях является разработка санитарно-защитных зон промышленных предприятий. При этом основой разработки является расчет шума на границе СЗЗ, основанный на прямых методах расчета, когда по известным характеристикам источников шума определяется величина акустического поля. В основе такого подхода обычно используются результаты измерений уровня шума конкретных источников шума, выполненные непосредственно на территории действующего предприятия. Однако, выполнение таких измерений часто затруднено, а иногда невыполнимо ввиду невозможности разделения вкладов каждого источника шума в результирующие уровни шума.

Предлагается выполнять измерения в произвольных точках, расположенных на территории предприятия с известными расстояниями до источников шума. Число точек измерения должно превышать количество источников шума. По результатам измерений уровней звука в выбранных точках, рассчитываются значения уровней звуковой мощности источников шума, в предположении отсутствия экранирующих препятствий – решается обратная задача. На втором шаге метода по известным уровням звуковой мощности с учетом экранирующего влияния застройки рассчитываются уровни звука в точках измерений, которые сопоставляются с измеренными значениями. По величине полученных разностей уровней звука корректируются значения уровней звуковой мощности источников.

Разработанный метод акустического расчета СЗЗ позволяет решить многие проблемы при проведении измерений шумовых характеристик источников шума в эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова:** шум, санитарно-защитная зона, уровни звука, акустический расчет, обратный метод.

### *Solution of the 3D inverse problem to determine the noise level at the border of the sanitary protection zone of an industrial enterprise*

Komarova E.G.<sup>1</sup>, Pimenov I.K.<sup>2</sup><sup>1</sup> Engineer of the first category of JSC «Kontsern MUW - Gidropribor», Saint-Petersburg, B. Sampsonievskiy PR., d. 24<sup>2</sup> Professor of «Hydrophysical means of search» State Marine Technical University of St. Petersburg, St. Petersburg, Lotsmanskaya str. 3

### Abstract

The traditional method of reducing noise in residential areas is the development of sanitary protection zones of industrial enterprises. The basis of this development is the calculation of noise on the border of the SPZ, based on direct methods for calculation, when on the known characteristics of the noise sources determines the value of the acoustic field. This approach is usually used the results of noise measurements of concrete sources of noise, made directly at the operating enterprise. However, the implementation of such measurements is often difficult, and sometimes impossible due to the inability to separate the contributions of each noise source in the resulting noise levels.

It is proposed to perform out measurements at random points located on the territory of the enterprise with known distances to sources of noise. Number of measurement points should exceed the number of noise

\* E-mail: [ikpimenov@list.ru](mailto:ikpimenov@list.ru) (Пименов И.К.)

*sources. By results of measurements of sound levels at selected points it is calculated values for sound power levels of noise sources, assuming the absence of screening barriers - solve the inverse problem. At the second step of the known sound power levels based on the screening effect of buildings it is calculated sound levels at the points of measurement, which are compared with measured values. Values of sound power sources shall be adjusted for the value obtained differences of sound levels.*

*The developed method of acoustic calculation of SPZ allows to solve many problems in the measurement of noise characteristics of noise sources in operating conditions.*

**Key words:** *noise, sanitary protection zone, sound levels, acoustic calculation, the inverse method.*

## Введение

Шумовое загрязнение – одна из актуальных проблем современного города. Шум значительно увеличил рост заболеваемости. Из-за него резко ухудшилось качество окружающей среды и, следовательно, условия существования людей.

Для борьбы с шумом на существующих предприятиях разрабатывается санитарно-защитная зона (далее – СЗЗ). Расчет величины шумового воздействия проводится от каждого источника шума предприятия на точки на границе СЗЗ [1, 2]. В основе такого подхода обычно используются результаты измерений уровней шума конкретных источников, выполненные непосредственно на территории действующего предприятия. Однако проведение таких измерений часто затруднено, а иногда невыполнимо, ввиду невозможности разделения вкладов каждого источника в результирующие уровни шума.

В качестве решения поставленных проблем был разработан обратный метод акустического расчета санитарно защитных зон, представленный на международной конференции, посвященной защите населения от повышенного шума [3]. В рассматриваемом методе предлагается выполнять измерения шума в произвольных точках, расположенных на территории предприятия. Источники шума, которые учитываются в расчете, их количество и координаты определяются на основе общих подходов к инвентаризации источников шума. Число точек измерений должно превышать количество источников шума. По результатам измерений октавных уровней звукового давления (далее – УЗД) или эквивалентных уровней звука в выбранных точках, рассчитываются значения эквивалентных и октавных уровней звуковой мощности (далее – УЗМ) источников шума, в предположении отсутствия экранирующих препятствий – решается обратная задача. Затем, по известным уровням звуковой мощности источников шума с учетом экранирующего влияния застройки рассчитываются уровни звука в точках измерений, которые сопоставляются с измеренными значениями. По величине полученных разностей УЗ корректируются значения уровней звуковой мощности источников. Процедура корректирующих расчетов продолжается до получения заданной сходимости результатов расчета и измерения (например, до  $\pm 3$ дБА в контрольных точках).

## 1. Математическая постановка задачи

Математическое решение обратной задачи состоит в определении коэффициентов дифференциальных уравнений квадратичного функционала между измеренными и расчетными значениями интенсивности звука в точках измерений (для  $n$  точек измерений и  $m$  источников шума):

$$F(n, m) = \sum_n (I_n - \sum_m I_m)^2, \text{ Вт}^2/\text{м}^4 \quad (1)$$

где  $I_n$  [Вт/м<sup>2</sup>] – значения интенсивности звука, определенные из измеренного звукового давления в  $n$  точках;  $I_m$  – рассчитанные значения интенсивности для  $m$

источников (Вт/м<sup>2</sup>).

Значения интенсивности звука в  $n$  точках рассчитываются по формуле:

$$I_n = \frac{P^2}{\rho \cdot c}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность среды (кг/м<sup>3</sup>);  $P$  – звуковое давление в точке измерения (Па);  $c$  – скорость звука в среде (м/с).

Значения интенсивности для  $m$  источников определяются по формуле (как для случая расположения источника шума на звукоотражающей поверхности):

$$I_m = \frac{W_m}{2 \cdot \pi \cdot r^2}, \text{ Вт/м}^2 \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние от источника  $m$  до точки измерения  $n$  (м);  $W_m$  – акустическая мощность « $m$ »-го источника (Вт).

Неизвестными значениями являются значения звуковой мощности источников  $W_m$ . Для их определения находится минимум функционала  $F$ . Минимум функции нескольких переменных достигается при условии равенства нулю ее частных производных:

$$\frac{dF}{dW_m} = 0. \quad (4)$$

Таким образом, получена система линейных алгебраических уравнений, состоящая из  $m$  уравнений с  $m$  неизвестными, из которой определяются значения  $W_m$ .

Решение системы алгебраических уравнений реализовано в программе MathCad и производится путем обращения матрицы коэффициентов по формуле:

$$W_m = A_{m \times m}^{-1} \times B_{m \times 1}, \quad (5)$$

где  $A$  – матрица коэффициентов при  $W$ ;  $B$  – матрица целых значений.

## 2. Решение обратной задачи

Из вышеизложенного видно, что в общем виде этот традиционный алгоритм достаточно прост и применим к большому числу источников шума.

Для тестовых задач разница между полученными обратным методом после 2-х шагов итерации в «АРМ-Акустика» результатами расчета уровней звука и полученными прямыми методами на границе санитарно-защитных зон, удаленной от границы предприятия на 50 м составляют не более 2 дБА, что вполне удовлетворительно с практической точки зрения, хотя сходимость результатов можно усилить, используя дальнейшие итерационные шаги в рамках изложенного подхода.

Пример, иллюстрирующий работоспособность метода, относится к расчету шума на границе санитарно-защитной зоны порта «Экономия» в г. Архангельск [3].

После трех шагов итерационной настройки акустической модели порта в г. Архангельск, по результатам измерения шума на его территории, расчетные значения, полученные прямым и обратным методами, в котором учитывались высоты расположения источников, практически совпали. На границе санитарно-защитной зоны разность между рассчитанными двумя методами уровнями звука лежит в пределах  $\pm 2$  дБА [4].

### 2.1. Сходимость метода

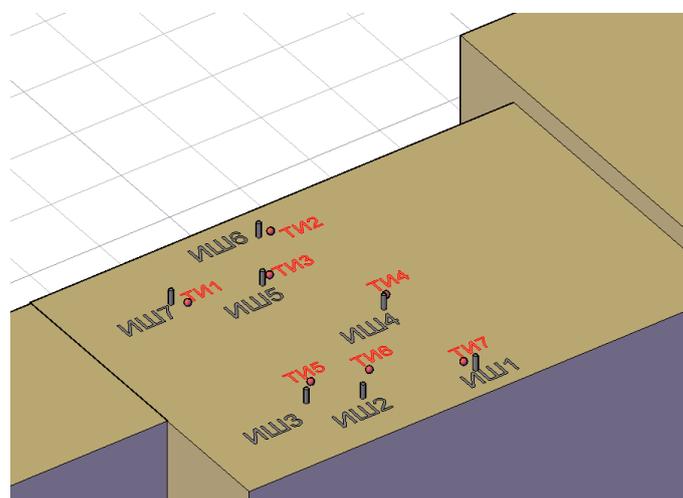
Ввиду того, что система линейных алгебраических уравнений была плохо обусловлена, то для ее более корректного решения был использован специальный подход – метод сингулярного разложения (svd ( $A$ ) в среде Mathcad).

Усовершенствование разработанного обратного метода акустического расчета санитарно-защитных зон позволяет лучше решить проблему выделения определенного источника из группы близкорасположенных при проведении измерений шумовых характеристик источников в условиях эксплуатации предприятия. Использование высотной координаты в расчетах [4] позволяет учитывать труднодоступные источники шума, к которым нет доступа на необходимую для проведения измерений дистанцию (например, трубы котельных, скрубберы и объекты с особым режимом доступа). Использование метода сингулярного разложения [5] позволяет улучшить сходимость и более точно определить шумовые характеристики. Исследования различных моделей, с заведомо плохой сходимостью [5], показывают необходимость введения критерия для выбора точек измерений.

В предыдущих работах [3-5] исследования были проведены для производственных шумов, описываемых в параметрах уровней звука. Однако часто, особенно для разработки средств снижения шума, в первую очередь для систем вентиляции, необходимо оценивать источники шума и их вклад в контрольные расчетные точки в октавных полосах частот. При этом, как известно [6], неопределённость (погрешность) измерений сильно зависит от частоты, существенно увеличиваясь в области низких частот.

## 2.2. Апробация разработанного метода

Для исследования работоспособности метода в октавных полосах частот в данной статье приведены расчеты октавных уровней звукового давления на границе СЗЗ Бокситогорского завода от выбросов систем вентиляции, расположенных на кровле производственного цеха. На рисунке 1 представлена модель, реализованная в программном комплексе АРМ «Акустика».



ТИ – точки измерений; ИШ – источники шума

Рис. 1. Модель кровли производственного цеха Бокситогорского завода

Относительный вклад октавных уровней звукового давления в суммарный уровень звука может быть определен по скорректированным значениям уровней звукового давления (или по скорректированным уровням звуковой мощности в октавных полосах частот). Корректированные по шкале «А» октавные уровни звуковой мощности источников шума (систем вентиляции) приведены на рисунке 2 для выявления основных частот, определяющих вклад в общий уровень звука. Из представленных спектрограмм видно, что основные вклады наблюдаются на частотах

125 Гц, 500 Гц и 1000 Гц, поэтому исследование сходимости метода обратного акустического расчета выполнено для этих частот.

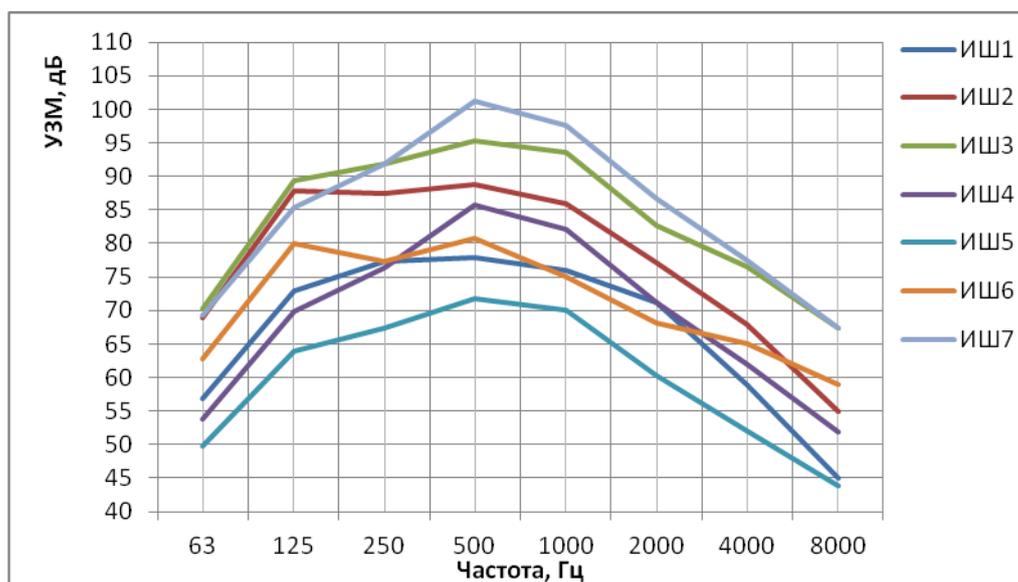


Рис. 2. Корректированные октавные уровни звуковой мощности источников шума

Сопоставление уровней звукового давления для частоты 125 Гц, рассчитанных с использованием обратного метода после 2-х шагов корректировки модели в АРМ-Акустика, и «измеренных» в точках наблюдений приведено в таблице 1.

Таблица 1

Рассчитанные обратным методом и измеренные/ заданные значения УЗД (дБ) в точках наблюдений для частоты 125 Гц

ТИ	«Измеренные»/ исходные УЗД, дБ	Рассчитанные обратным методом УЗД на «2»-м шаге корректировки, дБ	Разность, дБ
1	2	3	4
1	84	86,3	-2,3
2	82,2	82,7	-0,5
3	78	80,3	-2,3
4	81,9	81,3	0,6
5	88,5	87,7	0,8
6	85,4	85	0,4
7	81,5	81,4	0,1

Разность между результатами расчета уровней звукового давления для частоты 125 Гц на границе санитарно-защитной зоны (1000 м от границы завода) прямым методом и обратным представлена в таблице 2.

Таблица 2

Значения УЗД для частоты 125 Гц на границе СЗЗ

РТ	Рассчитанные прямым методом УЗД, дБ	Рассчитанные обратным методом УЗД на «2»-м шаге корректировки, дБ	Разность, дБ
1	2	3	4
1	35	35,2	0,2
2	23,2	23,9	0,7

Сопоставление уровней звукового давления для частоты 500 Гц, рассчитанных с использованием обратного метода после 5-ти шагов корректировки модели в АРМ-Акустика, и «измеренных» в точках наблюдений приведено в таблице 3.

Таблица 3

Рассчитанные обратным методом и измеренные/ заданные значения УЗД (дБ) в точках наблюдений для частоты 500 Гц

ТИ	«Измеренные»/ исходные УЗД, дБ	Рассчитанные обратным методом УЗД на «5»-м шаге корректировки, дБ	Разность, дБ
1	2	3	4
1	86,7	86,5	0,2
2	74,1	75,9	-1,8
3	76	78,5	-2,5
4	84,1	84,2	-0,1
5	81,4	79,7	1,7
6	75,9	77,3	-1,4
7	73,9	74,9	-1

Разность между результатами расчета уровней звукового давления для частоты 500 Гц на границе санитарно-защитной зоны (1000 м от границы завода) прямым методом и обратным представлена в таблице 4.

Таблица 4

Значения УЗД для частоты 500 Гц на границе СЗЗ

РТ	Рассчитанные прямым методом УЗД, дБ	Рассчитанные обратным методом УЗД на «5»-м шаге корректировки, дБ	Разность, дБ
1	2	3	4
1	25,6	27,2	1,6
2	10,4	11,6	1,2

Сопоставление уровней звукового давления для частоты 1000 Гц, рассчитанных с использованием обратного метода после 3-х шагов корректировки модели в АРМ-Акустика, и «измеренных» в точках наблюдений приведено в таблице 5.

Таблица 5

Рассчитанные обратным методом и измеренные/заданные значения УЗД (дБ) в точках наблюдений для частоты 1000 Гц

ТИ	«Измеренные»/ исходные УЗД, дБ	Рассчитанные обратным методом УЗД на «3»-м шаге корректировки, дБ	Разность, дБ
1	2	3	4
1	79,7	78,6	1,1
2	66,6	68,1	-1,5
3	69,6	71,5	-1,9
4	77,2	77,3	-0,1
5	76,2	74,5	1,7
6	70,1	70,6	-0,5
7	68,5	68,9	-0,4

Разность между результатами расчета уровней звукового давления для частоты 1000 Гц на границе санитарно-защитной зоны (1000 м от границы завода) прямым методом и обратным представлена в таблице 6.

*Таблица 6*  
Значения УЗД для частоты 1000 Гц на границе СЗЗ

РТ	Рассчитанные прямым методом УЗД, дБ	Рассчитанные обратным методом УЗД на «3»-м шаге корректировки, дБ	Разность, дБ
1	2	3	4
1	14,2	16	1,8
2	0	0	0

Исследование показало, что метод работает в октавном диапазоне частот. С ростом частоты растет количество шагов итерации и увеличивается разница между рассчитанными двумя методами уровнями звукового давления. Однако эта разница лежит в пределах  $\pm 2$  дБ, что вполне допустимо.

### **Заключение**

Разработанный метод акустического расчета СЗЗ позволяет решить многие проблемы при проведении измерений шумовых характеристик источников шума в эксплуатационных условиях:

- выделения определенного источника из группы близкорасположенных;
- труднодоступность источника шума для проведения измерений вблизи него;
- трудоемкость замеров и высокая квалификация специалистов, выполняющих акустические измерения.

В частности, при измерении шума от множества выбросных патрубков, кучно расположенных на кровле одного здания, представляется возможным определение УЗМ каждого источника шума в октавных полосах частот.

### **Список литературы**

1. ГОСТ 31295.2-2005 «Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчета».
2. ГОСТ 31297-2005 «Шум. Технический метод определения уровней звуковой мощности промышленных предприятий с множественными источниками шума для оценки уровней звукового давления в окружающей среде».
3. Пименов И.К., Комарова Е.Г., Ягло М.А. Обратный метод акустического расчета санитарно-защитной зоны. III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита населения от повышенного шумового воздействия», СПб, 2011.
4. Пименов И.К., Комарова Е.Г. Решение трехмерной обратной задачи по определению уровня шума на границе санитарно-защитной зоны промышленного предприятия. IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», СПб, 2013.
5. Пименов И.К., Комарова Е.Г. Особенности применения обратного метода акустического расчета для оценки санитарно-защитных зон промышленных предприятий. XXVII сессия Российского акустического общества, Санкт-Петербург, 2014 г.
6. ГОСТ 17168-82 (СТ СЭВ 1807-79) «Фильтры электронные октавные и третьоктавные. Общие технические требования и методы испытаний».