

*Пропонується методика і алгоритм розрахунку звукопоглинального покриття, що складається з декількох матеріалів. Алгоритм дозволяє розрахувати покриття з мінімальною собівартістю без вимог лінійності до цільової функції і обмеженням. Зроблена постановка оптимізаційної задачі, складені цільова функція і обмеження. Розроблено комп'ютерну програму в середовищі Mathcad*

*Ключові слова: багатотональний шум, звукопоглинальне покриття, октавна смуга, граничний спектр, мінімальна вартість*

*Предлагается методика и алгоритм расчета оптимального звукопоглощающего покрытия, состоящего из нескольких материалов. Алгоритм позволяет рассчитать покрытие с минимальной себестоимостью без требований линейности к целевой функции и ограничениям. Сделана постановка оптимизационной задачи, составлены целевая функция и ограничения. Разработана компьютерная программа в среде Mathcad*

*Ключевые слова: многотональный шум, звукопоглощающее покрытие, октавная полоса, предельный спектр, минимальная стоимость*

# РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ ПОМЕЩЕНИЯ ПРИ МНОГОТОНАЛЬНОМ ШУМЕ

**А. В. Мамонтов**

Старший преподаватель

Кафедра «Охрана труда»

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

E-mail: op@kture.kharkov.ua

## 1. Введение

Несмотря на существующие методы и средства снижения акустического шума как вредного производственного фактора, его негативное влияние на человека и окружающую среду по-прежнему остается важной проблемой. Эта проблема имеет технические, экономические и социальные аспекты.

Одним из способов снижения шума внутри помещения, как известно, является звукопоглощение – применение звукопоглощающих покрытий его поверхностей.

Выбор звукопоглощающих материалов и расчет площади покрытий усложняется тем, что в условиях производства часто приходится бороться с многотональными шумами. Многотональность шумов обычно вызвана действием множества источников (технологического оборудования, транспорта, людей и т. д.). Для поглощения разных тонов требуются различные материалы, отличающиеся по частотным свойствам, стоимости, противопожарным, эстетическим и другим свойствам. То есть, требуется составное звукопоглощающее покрытие. Очевидно, что его расчет является оптимизационной задачей, решение которой может дать существенный экономический и технический эффект. *Актуальность* данной работы объясняется возможностью достижения требуемого эффекта звукопоглощения при минимальных экономических затратах.

## 2. Анализ литературных данных, цель исследования и решаемые задачи

Традиционная инженерная методика расчета звукопоглощающих покрытий [1 - 5] не содержит математического аппарата, позволяющего достичь максимума целевой функции (минимальной стоимости покрытия или максимального снижения шума). Согласно ей, разработчик выбирает один материал, у которого частотная зависимость коэффициента звукопоглощения по форме наиболее близка к спектру шума, и задается величиной площади покрытия. В случае сложного многотонального шума разработчик выбирает несколько материалов, у которых частота максимума спектральной характеристики коэффициента звукопоглощения совпадает с частотой отдельного тона шума, и также задается величиной площади для каждого из материалов. Площадь разработчик определяет приблизительно, полагаясь на свой опыт и интуицию. Далее делается поверочный расчет. Если уровень шума (или звукового давления в октавных полосах) снижается до допустимого значения, задача считается решенной.

При таком подходе решение по определению площади звукопоглощающих покрытий как правило не является оптимальным с точки зрения минимизации шума и экономических затрат. Это означает, что в условиях производства, несмотря на проведенную акустическую обработку помещения, работники все равно

будут получать лишнюю дозу шума, а работодатель понесет лишние затраты.

В статьях [6, 7] приводятся работы по оптимизации звукопоглощающих покрытий. Так, в статье [6] приводится решение оптимизационной задачи, в которой целевой функцией является стоимость покрытия, а ограничениями - значения времени реверберации на заданных частотах. Таким образом, в данной задаче минимизируется стоимость покрытия при соблюдении заданных акустических свойств помещения, а не предельного спектра. Снижение шума в данной работе не рассматривается.

В статье [7] оптимизационная задача решается методом линейного программирования. Достигается минимальная стоимость покрытия при удовлетворительных уровнях звукового давления (предельном спектре). Однако применение данного метода имеет ограничение. Оно вызвано тем, что целевая функция и ограничения должны иметь линейный вид, что не всегда возможно.

**Цель исследования** состоит в разработке методики расчета оптимального звукопоглощающего покрытия помещения, при котором целевая функция и ограничения могут иметь нелинейный вид (нелинейное программирование). Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Составить целевую функцию и ограничения оптимизационной задачи [8, 9].
2. Составить методику и алгоритм расчета оптимального покрытия без требований линейности к целевой функции и ограничениям.
3. Составить компьютерную программу расчета в среде Mathcad.

### 3. Целевая функция, ее ограничения и постановка задачи

Оптимизация заключается в достижении минимальной стоимости составного звукопоглощающего покрытия, состоящего из нескольких материалов. При этом каждый материал предназначен для эффективного поглощения отдельного тона шума. Каждым из этих материалов будут покрываться различные участки поверхностей помещения (стен и потолка).

В качестве целевой функции предлагается рассматривать стоимость покрытия, которая определяется произведением удельной стоимости материала (с учетом стоимости крепежных элементов и работ по установке) на площадь:

$$\min F = \min \left( \sum_{j=1}^k C_j \cdot S_j \right), \quad (1)$$

где  $C_j$  - удельная себестоимость материала, грн/м<sup>2</sup>;  $j$  - номер выбранного материала из числа доступных материалов;  $S_j$  - площадь покрытия отдельным материалом, м<sup>2</sup>;  $k$  - количество выбранных материалов.

Ограничениями являются:

- максимально допустимая площадь покрытия;
- максимально допустимая стоимость покрытия;
- допустимые уровни звукового давления на среднегеометрических частотах октавных полос (предельный спектр).

Ограничение по площади запишется следующим образом:

$$\sum_{j=1}^k S_j \leq S_{\text{доп}}. \quad (2)$$

Ограничение по стоимости запишем так:

$$\sum_{j=1}^k C_j \cdot S_j \leq S_{\text{доп}}. \quad (3)$$

Ограничения по уровням звукового давления будут выглядеть так:

$$L_i \leq L_{\text{доп},i}, \quad (4)$$

где  $L_i$  - рассчитанный уровень звукового давления на среднегеометрической частоте (62,5; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц);  $i$  - номер октавной полосы, дБ;  $L_{\text{доп},i}$  - допустимый уровень звукового давления, дБ. Величина  $L_i$  зависит от площади звукопоглощения нелинейно.

### 4. Методика и алгоритм расчета оптимального покрытия

В основу методики положены следующие действия:

- выбор количества и видов звукопоглощающих материалов. Это делается традиционным способом путем сравнения частотных характеристик требуемого снижения шума и коэффициента звукопоглощения материалов. Каждый материал подбирается так, чтобы максимумы этих характеристик совпадали. Количество материалов выбирается по количеству тонов в спектре шума;
- генерация случайных значений площади покрытия, отводимых под выбранные материалы;
- расчет снижения уровня звукового давления в каждой октавной полосе;
- проверка ограничений (2 - 4);
- выбор оптимального варианта покрытия.

Для решения поставленной задачи предлагается алгоритм, представленный на рис. 1. Исходными данными являются:

- звуковая мощность (Вт) источников шума на среднегеометрических частотах (62,5; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц) октавных полос;
- координаты (м) источников шума и расчетной точки;
- максимально допустимая площадь (м) покрытия;
- максимально допустимая стоимость (у. е.) покрытия;
- допустимые уровни звукового давления (дБ) на среднегеометрических частотах октавных полос (предельный спектр);
- значения площади (м<sup>2</sup>) и коэффициента звукопоглощения поверхностей помещения до акустической обработки;
- частотные характеристики коэффициента звукопоглощения материалов, предлагаемых для акустической обработки;

- количество циклов расчета.

Выбор звукопоглощающих материалов делается на основании сравнения спектров действующего шума и требуемого снижения шума. Из числа доступных звукопоглощающих материалов выбираются те, у которых максимум спектральной характеристики коэффициента звукопоглощения совпадает с локальным максимумом требуемого снижения шума (рис. 2, а).

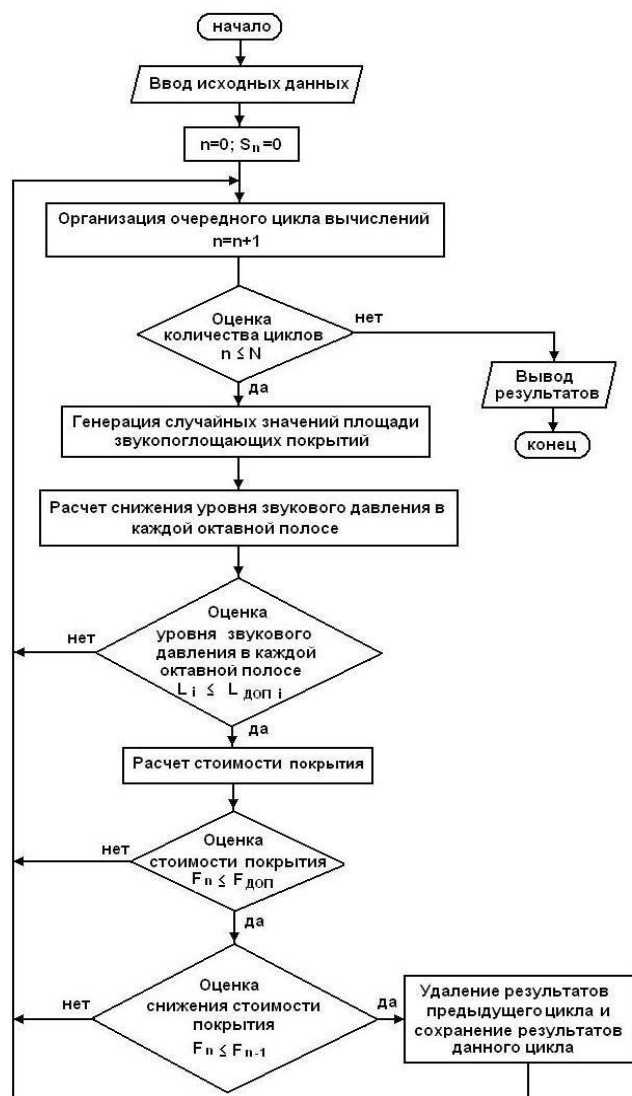


Рис. 1. Алгоритм расчета оптимального звукопоглощающего покрытия при многотональном шуме

На рис. 2, б приведены следующие обозначения материалов [4, 5]:

- Мат 1 – плиты ПА/О, минераловатные акустические отделочные, покрыты краской на основе поливинилацетатной эмульсии с белым пигментом, лицевая поверхность перфорирована круглыми отверстиями диаметром 4 мм с шагом 14 мм и глубиной 5 мм, размер 500x500 мм;

- Мат 2 – плиты ПА/С минераловатные акустические стандартные, покрыты белой краской с набрызгом под мрамор, 500x500 мм;

- Мат 3 – маты из супертонкого стекловолокна, обложка из стеклоткани ССТЭ-6;

- Мат 4 – металлический лист, перфорация в «шахмат» >46%, диаметр 6 мм, размер 500x1000 мм.

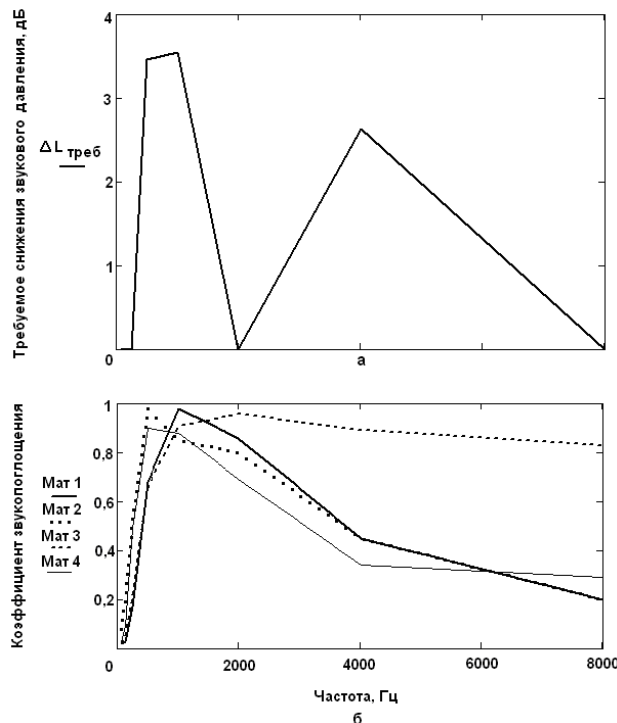


Рис. 2. Зависимости требуемого снижения звукового давления  $\Delta L_{\text{ТРЕБ},i}$  (а) и коэффициента звукопоглощения материалов от частоты (б)

Расчет требуемого снижения звукового давления в каждой октавной полосе делается по формуле

$$\Delta L_{\text{ТРЕБ},i} = L_i - L_{\text{ДОП},i}, \quad (5)$$

где  $L_i$  - рассчитанный уровень звукового давления в октавной полосе, дБ

$$L_i = 20 \lg \frac{\sqrt{\rho C (I_{\text{ПР}i} + I_{\text{ДИФ}i})}}{P_0}, \quad (6)$$

где  $\rho$  - плотность воздуха (1,205 кг/м<sup>3</sup>);  $C$  - скорость звука (344 м/с);  $I_{\text{ПР}i}$  - интенсивность прямого звука, Вт/м<sup>2</sup>;  $I_{\text{ДИФ}i}$  - интенсивность диффузного (рассеянного) звука, Вт/м<sup>2</sup>,

$P_0$  - значение звукового давления порога слышимости ( $2 \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>),

$$I_{\text{ПР}i} = \frac{1}{4\pi} \sum_1^m \frac{W_{mi}}{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2 + (z_0 - z_m)^2}, \quad (7)$$

где  $m$  - количество источников шума в помещении;  $W_{mi}$  - звуковая мощность источника в заданной октавной полосе, Вт;  $x_0, y_0, z_0$  - координаты расчетной точки, м;  $x_m, y_m, z_m$  - координаты источника шума, м,

$$I_{\text{ДИФ}i} = \frac{4(1 - \alpha'_i) \sum_1^m W_{mi}}{\alpha'_i S}, \quad (8)$$

где  $\alpha'_i$  - средний коэффициент звукопоглощения до акустической обработки;  $S$  – суммарная площадь звукопоглощающих поверхностей до акустической обработки.

Генерация случайных значений площади звукопоглощающих покрытий делается по остаточному принципу. Допустим, для облицовки помещения выбраны три материала. Площадь первого генерируется в пределах  $0 \dots S_{доп}$ . Площадь остальных генерируется последовательно в пределах оставшейся (не занятой) площади (рис. 3, Mathcad [10]).

$$\begin{cases} S1_n := \text{round}(\text{rnd}(S_{доп})) \\ S2_n := \text{round}(\text{rnd}(S_{доп}-S1_n)) \\ S3_n := \text{round}(\text{rnd}(S_{доп}-S1_n-S2_n)) \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, для расчета и оценки стоимости покрытия, состоящего из трех материалов, выражение (3) преобразуется в выражение (10):

$$C_1 \text{round}(\text{rnd}(S_{доп})) + C_2 \text{round}(\text{rnd}(S_{доп} - S1_n)) + C_3 \text{round}(\text{rnd}(S_{доп} - S1_n - S2_n)) \leq F_{доп}, \quad (10)$$

где  $C_1; C_2; C_3$  - соответственно, значения удельной стоимости материалов.

На рис. 3 показана генерация случайных значений площади покрытий в среде Mathcad.

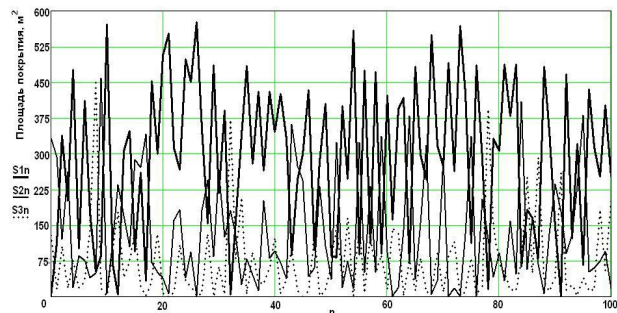


Рис. 3. Случайные значения площади (S) от цикла вычислений n

Результатом оптимизации являются значения площади звукопоглощающих покрытий помещения, отвечающих поставленной цели.

### 5. Оценка результатов оптимизации

В качестве примера было взято производственное помещение с размерами 20x15x5м. Координаты (м) источника шума в прямоугольной системе координат (x; y; z): 10; 1; 1. Координаты (м) расчетной точки: 15;10;1,8. Площадь дверей составила 8 м<sup>2</sup>, окон – 64 м<sup>2</sup>

В качестве материалов звукопоглощающих покрытий были выбраны: плиты ПА/О (материал 1, см. п.3 и рис. 2 настоящей статьи), плиты ПА/С (материал 2) и маты из супертонкого стекловолокна (материал 3). Удельная стоимость материалов с учетом крепежных элементов составила: 10; 12; 5 у.е./м<sup>2</sup>, соответственно. Допустимая стоимость покрытия – 1000 у. е.

На рис. 4 приведены исходные данные компьютерной программы оптимизации звукопоглощающих покрытий (среда Mathcad): частотные характеристики материалов помещения (таблица KF), спектр источника шума (ЗМ), и предельный спектр (ПС).

На рис. 5 представлен закон распределения случайной величины стоимости оптимального покрытия помещения указанными материалами, полученный в результате ста вычислений. Количество циклов в каждом вычислении составило 10<sup>5</sup>.

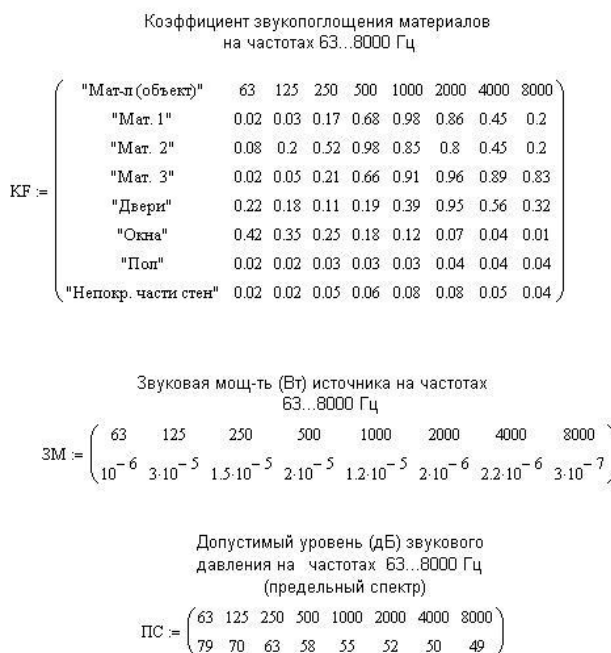


Рис. 4. Исходные данные компьютерной программы (Mathcad)

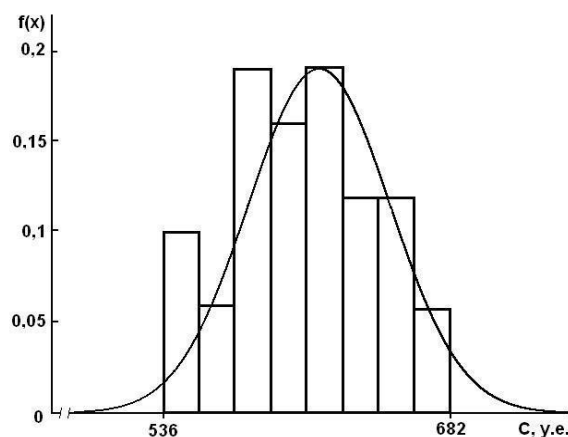


Рис. 5. Зависимость плотности вероятности f(x) от стоимости покрытия С

В результате проделанных вычислений был построен интервальный вариационный ряд с минимальным значением выборки 536 у. е. и максимальным - 682 у. е. Математическое ожидание равно 607,824 у. е. а среднее квадратическое отклонение - 36,097 у.е. С помощью критерия Пирсона была подтверждена ги-

потеза о нормальном законе распределения случайной величины стоимости покрытия для уровня значимости 0,02 и числа степеней свободы 5.

На рис. 6 показана таблица – результат оптимизации расчета составного звукопоглощающего покрытия, соответствующего минимальному значению выборки. В строках 0...2 указаны материалы и соответствующие значения площади покрытия, в строке 3 – стоимость покрытия, в строках 4...11 – значения звукового давления на стандартных среднегеометрических частотах октавных полос.

|    | 0               | 1      |
|----|-----------------|--------|
| 0  | "Мат. 1, кв.м " | 1      |
| 1  | "Мат. 2, кв.м"  | 3      |
| 2  | "Мат. 3., кв.м" | 98     |
| 3  | "Стоим., у.е"   | 536    |
| 4  | "Lp63, дБ"      | 49.334 |
| 5  | "Lp125, дБ"     | 64.253 |
| 6  | "Lp250, дБ"     | 59.084 |
| 7  | "Lp500, дБ"     | 57.962 |
| 8  | "Lp1000, дБ"    | 54.582 |
| 9  | "Lp2000, дБ"    | 46.513 |
| 10 | "Lp4000, дБ"    | 47.872 |
| 11 | "Lp8000, дБ"    | 39.826 |

Рис. 6. Результат оптимизации (пример, Mathcad)

Полученные данные позволяют убедиться в закономерности достижения оптимального результата и в эффективности предложенного алгоритма.

## 6. Выводы

Наряду с рассмотренными методами стала очевидной необходимость разработки новой методики, алгоритма и компьютерной программы расчета звукопоглощающего покрытия помещения при многоотвальном шуме.

*Научная новизна* заключается в решении оптимизационной задачи на основе генерации случайных значений площади, отводимых под разные материалы с последующим выбором оптимального варианта покрытия.

*Практическая значимость* заключается в возможности достижения существенного экономического эффекта при акустической обработке производственных помещений со сложным спектром шума, а также в улучшении условий труда.

## Литература

1. Иофе, В. К. Справочник по акустике [Текст] / В. К. Иофе, В.Г. Корольков, М.А. Сапожков – М.: Связь, 1979. - 312 с.
2. Выходец, А. В. Радиовещание и электроакустика [Текст] / А. В. Выходец и др. - М.: Радио и связь, 1989. - 430 с.
3. Сапожков, М. А. Электроакустика [Текст] / М. А. Сапожков - М.: Связь, 1978. - 272 с.
4. Никифоров, А. С. Звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы [Текст] / А. С. Никифоров. - М.: Связь, 2006. - 322 с.
5. Дзюндзюк, Б.В. Охрана труда. Сборник задач [Текст] / Б.В. Дзюндзюк и др. - Харьков, - 2006.-243 с.
6. Мамонтов, А. В. Методика расчета оптимальных звукопоглощающих покрытий помещений [Текст] / А. В. Мамонтов // АСУ и приборы автоматики: всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. - 2010.- Вып. 150. – С. 82-88.
7. Мамонтов, А. В. Снижение акустического шума при производстве и эксплуатации РЭС [Текст] / А. В. Мамонтов, Т. Е. Стыщенко // Радиотехника: всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. -2004.- Вып. 139. – С.163-166.
8. Деньдобренко, Б. Н. Автоматизация конструирования РЭА [Текст] / Б. Н. Деньдобренко, А. С. Малика - М.: Высшая школа. - 1980. - 384 с.
9. Акулич, И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах [Текст] / И. Л. Акулич - М.: Высшая школа, 1993. - 275 с.
10. Гурский, Д. Вычисления в Mathcad -12 [Текст] / Д. Гурский, Е. Турбина - М.: Питер, 2006. - 544 с.