

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 534.2

*О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. И. Грачев*

## ПРОГРАММНО-МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС МАТЕМАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ЗВУКООБРАЗОВАНИЯ ОТ ГЛУШИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АВТОНОМНЫХ БЛОКОВ С КАНАЛАМИ ФЛОКЕ\*

Разработан программно-моделирующий комплекс математического расчета звукообразования от глушителей реактивного типа для стрелкового оружия. С помощью пакета прикладных программ, разработанного на основе декомпозиционного подхода к решению краевых задач акустики методом автономных блоков с каналами Флоке, проведен вычислительный эксперимент для широкого класса неоднородностей в полости многокамерных глушителей реактивного типа для стрелкового оружия.

Целью работы является проведение с помощью программно-моделирующего комплекса, разработанного на основе декомпозиционного метода автономных блоков с каналами Флоке, вычислительного эксперимента по расчету влияния стальных диафрагм на процессы звукообразования в глушителях реактивного типа для стрелкового оружия и сравнение полученных результатов математического моделирования с натурным экспериментом.

### 1. Математическая модель глушителя, содержащего неоднородности

Ранее авторами на основе декомпозиционного подхода [1] разработана матричная математическая модель акустического устройства (глушителя), содержащего неоднородности, с учетом источника акустического поля и звукообразования в полупространстве [2]:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}^{-1}\mathbf{T}^{11} & \mathbf{L}^{-1}\mathbf{T}^{12} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{T}^{21} & \mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}\mathbf{T}^{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{b}_1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  – векторы, компонентами которых являются коэффициенты рядов разложения акустического поля по собственным функциям шарового акустического волновода;  $\mathbf{T}$  – матрица передачи;  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$  – матрицы с элементами:

$$L_{kn} = \int_{S_2} P_n(r, \frac{\pi}{2}, \alpha) \bar{v}_{k(2)}^{z*}(r, \alpha) d\bar{S}_2, \quad (2)$$

\* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант № 05-08-33503.

$$M_{kn} = \int_{S_2} \bar{v}_n^{\theta*}(r, \frac{\pi}{2}, \alpha) P_{k(1)}(r, \alpha) d\bar{S}_1,$$

$$N_{kn} = \int_{S_2} \bar{v}_n^{z*}(r, \alpha) P_{k(1)}(r, \alpha) d\bar{S}_2, \quad (2)$$

где  $P$  – избыточное давление;  $r, \theta, \alpha$  – сферические координаты;  $S_2$  – входное сечение глушителя;  $S_1$  – входное сечение полусферы;  $\bar{v}$  – вектор скорости частиц газа;  $\mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1$  – векторы, компонентами которых являются коэффициенты рядов Фурье разложения акустического поля на входном сечении  $S_2$  по собственным функциям круглого акустического волновода (ствола глушителя):

$$a_{k(1)}(n\omega) = iA_{0m} \frac{2\pi\Gamma_{0m}(n\omega)RJ_1(\chi_{0m}R)}{\omega\rho_0\tau(\alpha + in\omega)\chi_{0m}} (1 - \exp(-(\alpha + in\omega)\tau)) P_1,$$

$$b_{k(1)}(n\omega) = A_{0m} \frac{2\pi RJ_1(\chi_{0m}R)}{\tau(\beta - in\omega)\chi_{0m}} (1 - \exp(-(\beta - in\omega)\tau)) v_1^z, \quad (3)$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; \quad k = 1, 2, \dots,$$

где  $k = \{0, m\}$ ;  $J_1(\chi_{0m}R)$  – функция Бесселя первого порядка;  $\chi_{0m} = a_{0m}/R$ ,  $a_{0m}$  – корни уравнения  $J_1'(x) = 0$ ;  $\Gamma_{0m}$  – постоянные распространения собственных волн в круглом акустическом волноводе;  $R$  – радиус акустического волновода (ствола);  $A_{0m} = \sqrt{\frac{2\omega\rho_0}{i\Gamma_{0m}(n\omega)R^2(J_0^2(\chi_{0m}R) + J_1^2(\chi_{0m}R))}}$  – коэффициенты нормировки.

Входными параметрами для математической модели являются: давление  $P_1$  и скорость частиц газа  $v_1^z$  в стволе (на бесконечно малом расстоянии от сечения  $S_1$ ); длительности  $\tau_\alpha, \tau_\beta$  импульсов  $P_1$  и  $v_1^z$ . Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  на уровне 0,25, длительность импульсов  $\tau_\alpha$  и  $\tau_\beta$  определяем следующим образом:  $\alpha = -\frac{1}{\tau_\alpha} \ln 0,25, \quad \beta = -\frac{1}{\tau_\beta} \ln 0,25$ .

На рисунке 1 показана конструкция интегрированного глушителя бесшумной снайперской винтовки «Винторез». Ствол в передней части имеет несколько рядов отверстий, выводящих из глушителя часть пороховых газов со дна нарезов. В передней части, перед дульным срезом ствола, глушитель имеет ряд стальных диафрагм с отверстием для пули, тормозящих пороховые газы внутри глушителя.

## 2. Результаты математического моделирования штатного глушителя и глушителя оптимальной конструкции

На рисунке 2 показаны результаты математического расчета зависимости интенсивности звука от угла наклона стальных диафрагм в глушителе.

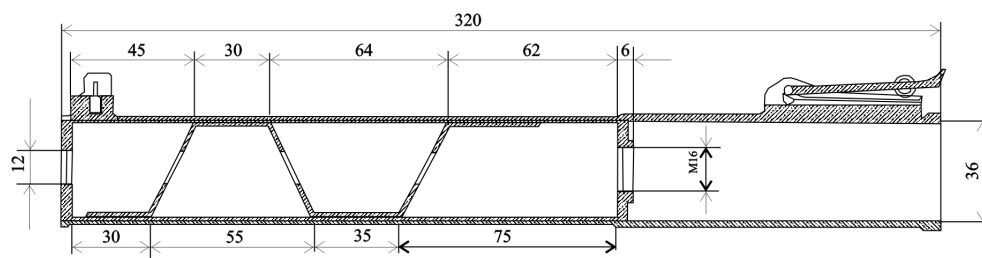


Рис. 1 Конструкция глушителя снайперской винтовки «Винторез»

Результаты математического моделирования получены для 150 временных гармоник и 100 пространственных гармоник. Геометрия поверхности стальных диафрагм глушителя аппроксимировалась ступенчатой моделью, число ступенек – 45. Дальнейшее расширение базиса временных и пространственных гармоник и увеличение числа ступеней практически не изменяло результатов математического моделирования.

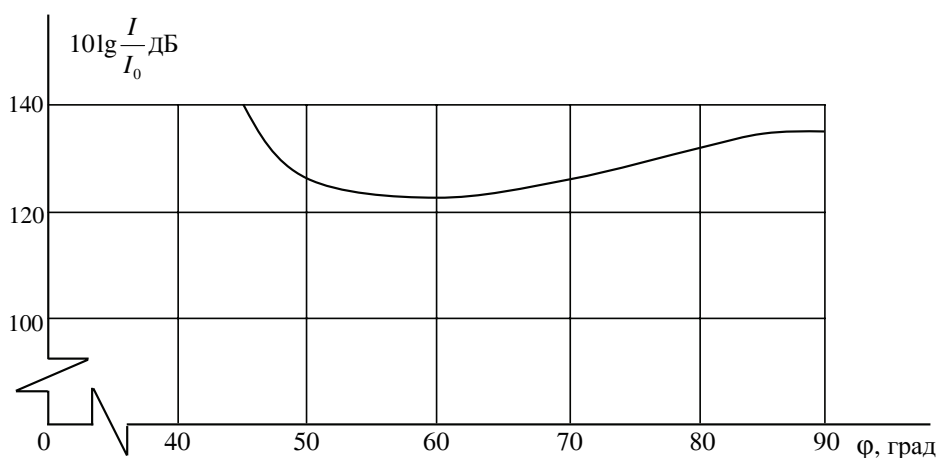


Рис. 2 Результаты математического расчета зависимости интенсивности звука от угла  $\phi$  наклона стальных диафрагм в глушителе «Винтореза»:

$$v_1^z = 280 \text{ м/с}; P_1 = 13,7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2; \tau_\alpha = \tau_\beta = 50 \text{ мкс}; T = 900 \text{ мкс};$$

$$r_0 = 1,2 \text{ м}; \alpha_0 = 0; \theta_0 = 15^\circ; r_0 = 0; \theta_0 = 20^\circ; I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

Из графика (рис. 2) следует, что оптимальные значения угла  $\phi$  наклона диафрагмы составляют  $54\text{--}65^\circ$ . При этих углах интенсивность звука в точке наблюдения  $M$  наименьшая. Заметим, что в штатном глушителе снайперской винтовки «Винторез» угол наклона стальных диафрагм составляет  $61,4^\circ$ .

На рисунке 3 проведено сравнение результатов математического моделирования с натурным экспериментом. Как видно из графика (рис. 3), совпадение результатов математического моделирования с экспериментом вполне удовлетворительное. Результаты математического моделирования глушителя показали, что его конструкция оптимальна с точки зрения звукообразования по углу наклона стальных диафрагм. Совпадение результатов математического моделирования с экспериментом, а также оптимизация конструкции глушителя по звукообразованию свидетельствует о достоверности результатов, полученных с помощью разработанной математической модели.

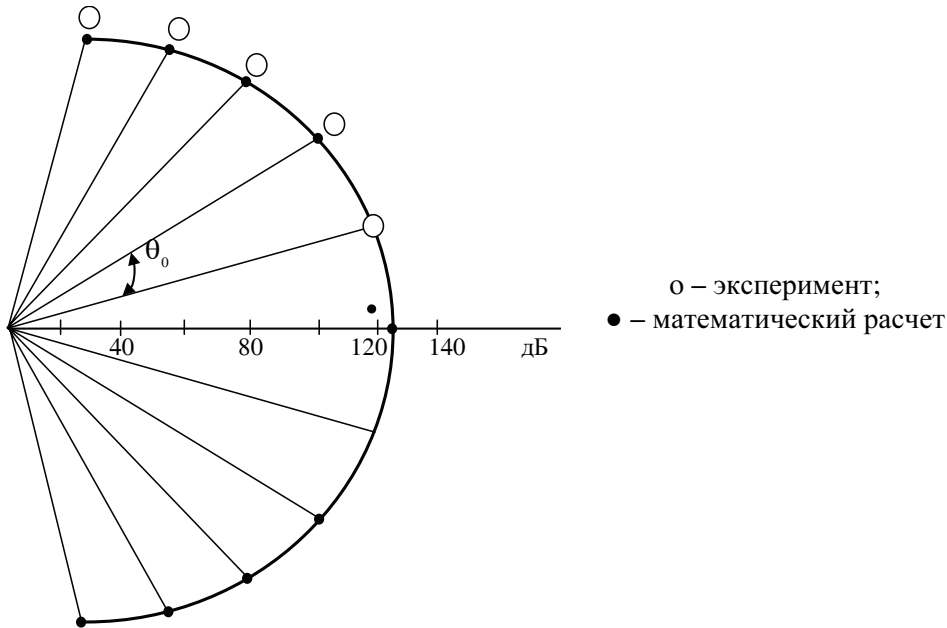


Рис. 3 Диаграмма направленности интенсивности звука от штатного глушителя к снайперской винтовке «Винторез»:  $v_1^z = 280$  м/с;  $P_1 = 13,7$  Н/м<sup>2</sup>;  $\tau_\alpha = \tau_\beta = 50$  мкс;  $T = 900$  мкс;  $r_0 = 1,2$  м;  $\theta_0 = 15^\circ$ ;  $\alpha_0 = 0$

Пакет прикладных программ, разработанный на основе декомпозиционного подхода к решению краевых задач акустики, позволяет проводить вычислительный эксперимент для широкого класса структур неоднородностей в полости глушителя. Авторами была проведена большая работа по поиску новых конструкций неоднородностей для глушителя к снайперской винтовке «Винторез» и их оптимизации для снижения уровня звукообразования.

На рисунке 4 показана оптимальная конструкция глушителя с неоднородностями, разработанная авторами на основе вычислительных экспериментов. Разработанная конструкция глушителя состоит из двух камер. Завихритель представляет собой «винтообразную лестницу» с отверстиями в виде кольцевых секторальных областей (рис. 5).

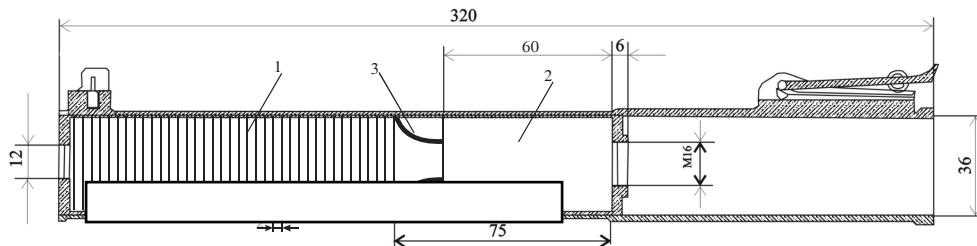


Рис. 4 Двухкамерный глушитель: 1 – камера с завихрителем; 2 – пустотелая камера; 3 – криволинейная диафрагма

На рисунке 6 показаны результаты математического расчета интенсивности звука в точке наблюдения  $M(r_0, \theta_0, \alpha_0)$  в зависимости от угла перфо-

рации (при этом число оборотов «винтообразной лестницы» постоянно и равно  $4\pi$ ). Это условие выполняется, если толщину ступеньки брать равной  $d = \frac{\alpha_p + 90}{12}$ . Наименьшая интенсивность звука наблюдается при углах перфорации  $\alpha_p = 2 - 4^\circ$  и составляет 112 дБ.

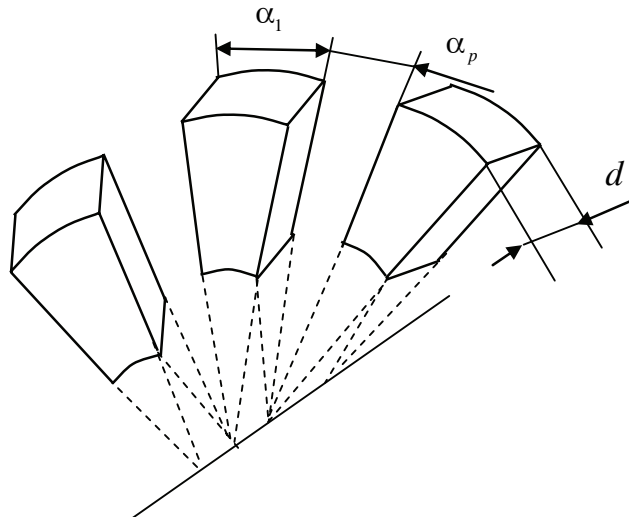


Рис. 5 Фрагмент разработанной конструкции завихрителя:  
 $\alpha_1, d$  – размеры ступени;  $\alpha_p$  – угол перфорации

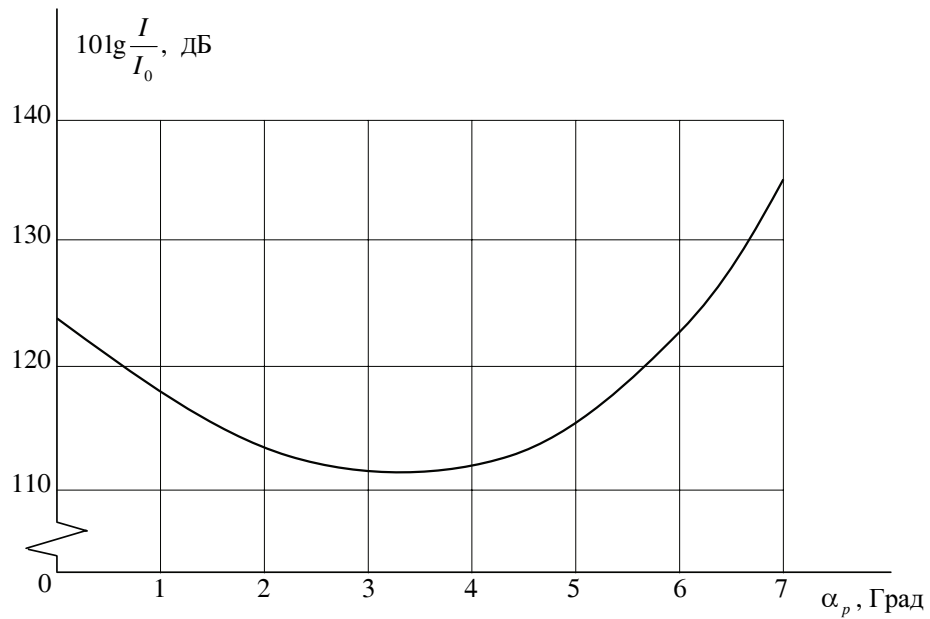


Рис. 6 Зависимость интенсивности звука от угла перфорации в двухкамерном глушителе:  $v_1^z = 280$  м/с,  $P_1 = 13,7 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>,  $\tau_\beta = \tau_\gamma = 50$  мкс,  $T = 900$  мкс,  $r_0 = 1,2$  м,  $\alpha_0 = 0$ ,  $\theta_0 = 15^\circ$ ,  $\alpha_1 = 9^\circ$ ,  $d = (\alpha_p + 90)/12$

Результаты численных исследований на разработанной математической модели показали, что интенсивность звука от двухкамерного глушителя (рис. 4) на 10–14 дБ ниже, чем от штатного глушителя снайперской винтовки «Винторез» (рис. 1). Результаты экспериментальных измерений интенсивности звука от изготовленного образца двухкамерного глушителя показали, что интенсивность звука на расстоянии  $r_0 = 1,2$  м,  $\alpha_0 = 0$ ,  $\theta_0 = 15^\circ$  составляла 112 дБ, от штатного глушителя – 124 дБ.

### **Заключение**

Разработанный программно-моделирующий комплекс математического расчета звукообразования от глушителей с различной внутренней структурой позволяет дать рекомендации по внесению изменений в конструкции существующих глушителей с целью снижения уровня звукообразования от них в свободном пространстве и формировать облик принципиально новых конструкций глушителей реактивного типа для стрелкового оружия.

### **Список литературы**

1. **Голованов, О. А.** Математическое моделирование акустических устройств декомпозиционным методом автономных блоков с каналами Флоке / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. И. Грачев // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2007. – № 4.
2. **Голованов, О. А.** Решение трехмерных задач дифракции акустических волн на неоднородностях декомпозиционным методом автономных блоков с каналами Флоке / О. А. Голованов, Г. С. Макеева, А. И. Грачев // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2007. – № 4.