

Р.А. Байкалова, Н.П. Красненко, Л.Г. Шаманаева

ТУРБУЛЕНТНОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПРИЗЕМНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ

Предложена методика оценки потерь на турбулентное ослабление при распространении звука в приземном слое атмосферы, основу которой составляют выражения для коэффициентов рассеяния флуктуациями температуры и скорости ветра, полученные с использованием кармановской модели спектральной плотности энергии турбулентности.

Экспериментальные исследования рассеяния звука атмосферной турбулентностью показали, что коэффициент дополнительного турбулентного ослабления изменяется в широких пределах в зависимости от метеопараметров. Сечение рассеяния звука в основном определяется флуктуациями скорости ветра при углах рассеяния $\Theta < 80^\circ$, но при $\Theta > 80^\circ$ необходимо учитывать температурные флуктуации. Данные измерений частотной зависимости турбулентного ослабления противоречивы. В [1] приводится зависимость, пропорциональная корню кубическому от частоты, в [2] — квадратичная частотная зависимость.

Теоретический анализ рассеяния звука атмосферной турбулентностью дан в [3], где выражение для эффективного сечения рассеяния было получено для инерционного интервала турбулентности, при этом размеры неоднородности предполагались много меньше внешнего масштаба турбулентности. Выражение, полученное в [3], не позволяет вычислить индикатрису при малых углах рассеяния из-за расходимости подынтегрального выражения, а также получить коэффициент дополнительного турбулентного ослабления. Выражение для коэффициента дополнительного ослабления было предложено в [4] в рамках малоуглового приближения, обычно используемого в теории распространения оптических волн. Однако в [5] была отмечена некорректность использования этого метода для диапазона акустических волн посредством подстановки вместо условия $\lambda \ll l_0$ неадекватного ему условия $\lambda \ll L_0$ для акустического диапазона. Здесь λ — длина падающей волны, l_0 — внутренний масштаб, L_0 — внешний масштаб атмосферной турбулентности.

В этой статье мы предлагаем методику оценки потерь на турбулентное ослабление при распространении звука в приземном слое атмосферы, основу которой составляют выражения для коэффициентов рассеяния флуктуациями температуры [6] и скорости ветра [7], полученные нами с использованием кармановской модели спектральной плотности энергии турбулентности.

Потери на турбулентное ослабление при распространении звукового излучения по приземной трассе от источника до приемника излучения можно представить в виде

$$L_T = \exp \left\{ \int_0^R \beta_{TV}(r, F, L_0, c_T, T, c_V) dr \right\}, \quad (1)$$

где $R = \sqrt{d^2 + (h_u + h_n)^2}$ — длина трассы распространения; d — расстояние между источником и приемником; h_u, h_n — высоты источника и приемника соответственно; T — температура воздуха; F — частота излучения; r — текущая координата вдоль трассы распространения; c_T, c_V — структурные характеристики пульсаций температуры и скорости ветра соответственно;

$$\beta_{TV}(r, F, L_0, c_T, T, c_V) = \beta_T(r, F, L_0, c_T, T) + \beta_V(r, F, L_0, c_V) \quad (2)$$

— полный коэффициент турбулентного ослабления; β_T и β_V — коэффициенты рассеяния пульсациями температуры и скорости ветра соответственно, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \beta_T &= 0,9\lambda^{-1/3} c_T^2 T^{-2} L_0^{-7/3} [0,0714 (B^{7/6} - \lambda^{7/3}) - 0,1A^2 (B^{-5/6} - \lambda^{-5/3}) - A (B^{1/6} - \lambda^{1/3})]; \\ \beta_V &= 2,982c_V^2 \lambda^{-1/3} c^{-2} L_0^{-13/3} [0,1429 (B + 2A) (B^{7/6} - \lambda^{7/3}) - 0,0769 (B^{13/6} - \lambda^{13/3}) - \\ &- A (A + 2B) (B^{1/6} - \lambda^{1/3}) - 0,2A^2 B (B^{-5/6} - \lambda^{-5/3})]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь λ — длина звуковой волны; c — скорость звука; $A = 2L_0^2 + \lambda^2$, $B = 4L_0^2 + \lambda^2$.

Входными параметрами методики оценки потерь на турбулентное ослабление являются; длина трассы распространения R , максимальная из высот расположения источника и приемника $h_{\max} = \{h_{\text{п}} + h_{\text{п}}\}$, а также измеренные либо оценочные значения структурных характеристик температуры и скорости ветра в приземном слое атмосферы. Расчеты проводились для $h_{\max} = 8$ м, что позволило не учитывать высотную зависимость c_v^2 и c_T^2 и ограничиться их значениями в приземном слое, взятыми из [81] и [4]: при сильной турбулентности $c_T^2 = 0,9 \text{ м}^{-2/3} \text{ К}^2$, $c_v^2 = 0,1 \text{ м}^{4/3} \text{ с}^{-2}$, а при слабой турбулентности $c_T^2 = 0,02 \text{ м}^{-2/3} \text{ К}^2$, $c_v^2 = 0,01 \text{ м}^{4/3} \text{ с}^{-2}$. Турбулентное ослабление (в дБ) запишется как $L_T(\text{дБ}) = 10 \lg P_0/P = 10 \lg L_T$, где P , P_0 – мощности принимаемого и посылаемого сигналов. Сравнение частотной зависимости турбулентного ослабления по экспериментальным данным [9] и результатам расчетов по предлагаемой методике представлено на рис. 1.

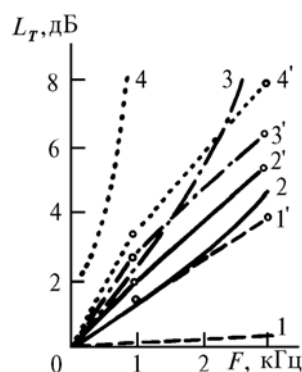


Рис. 1. Частотная зависимость турбулентного ослабления: кривые 1 (расчетная), 1' (экспериментальная) – $R = 154$ м, $h_{\max} = 1,5$ м; 2 (расч.), 2' (эксп.) – $R = 250$ м, $h_{\max} = 5$ м; 3 (расч.), 3' (эксп.) – $R = 375$ м, $h_{\max} = 6$ м; 4 (расч.), 4' (эксп.) – $R = 835$ м, $h_{\max} = 8$ м

Из рисунка видно, что расчетная частотная зависимость L_T при указанных значениях R не всегда удовлетворительно совпадает с результатами эксперимента. Расхождения расчетных и экспериментальных данных, которые присутствуют на графике, можно объяснить тем обстоятельством, что при проведении эксперимента значение не контролировалось.

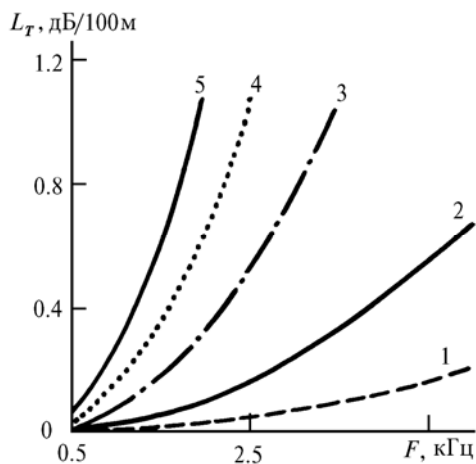


Рис. 2. Турбулентное ослабление для сильной турбулентности при $h_{\max} = 1$ м (кривая 1), 2 (2), 4 (3), 6 (4), 8 м (5)

Удовлетворительное совпадение экспериментального частотного хода и теоретического получается при $h_{\max} = 5$ м и $R = 250$ м (кривые 2 и 2'). В других случаях имеется существенное различие, увеличивающееся с ростом частоты. При $h_{\max} = 1,5$ м (кривые 1 и 1') экспериментальное ослабление выше, чем теоретическое, а сильное расхождение можно попытаться объяснить близостью поверхности земли. При $h_{\max} = 6$ м и $R = 375$ м (кривые 3 и 3'), а также при $h_{\max} = 8$ м и $R = 835$ м (кривые 4 и 4') теоретические расчеты показывают большую крутизну частотной зависимости турбулентного ослабления, чем это следует из экспериментальных данных.

Расчеты L_T при фиксированных h_{\max} для слабой турбулентности в диапазоне частот 500–5000 Гц показывают, что величина турбулентных потерь не превышает 0,004 дБ/100 м при заданных условиях, т.е. турбулентным ослаблением можно пренебречь.

Частотные зависимости турбулентного ослабления, рассчитанные для сильной турбулентности, приведены на рис. 2. Для частот $F < 1$ кГц величина L_T меньше диссипативных потерь на данных трассах. При $h_{\max} < 1$ м значение L_T в несколько раз меньше потерь на молекулярное поглощение. Следовательно, при частотах менее 1 кГц и высотах расположения источника и приемника менее 1 м турбулентное ослабление можно не учитывать. Однако для $h_{\max} = 8$ м уже при $F = 1,5$ кГц L_T достигает значительных величин.

В заключение следует отметить, что учет дополнительного турбулентного ослабления сигнала по трассе при решении задачи распространения звука может привести к существенным погрешностям. Приведенные оценки по предложенной методике не всегда позволяют дать однозначный ответ об ожидаемой величине турбулентного ослабления звука и его частотной зависимости в конкретных условиях. Для этого необходимо проведение более тщательных экспериментальных исследований.

1. Sieg H. //Elektr. Nachr. Tech. 1940. V. 17. P. 197.
2. Muler E.A., Matschat K.R. The scattering of sound by a single vortex and by turbulence. Mechanical Report AF61 (514) (Max-Planck Institute für Stromung- Sterselung. Göttingen, 1959). P. 1143.
3. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. С. 198–208.
4. Brown E.H., Clifford S.F. //JASA, 1976. V. 60. № 4. P. 788–794.
5. Brown E.H., Hall F.F. //Reviews of Geophys. and Space Phys. 1978. V. 16. № 1. P. 47–110.
6. Shamaeva L.G. //JASA. 1983. V. 73. № 3. P. 780–784.
7. Baikalova R.A., Krekov G.M., Shamaeva L.G. //JASA. 1988. V. 83. № 3. P. 661–664.
8. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 195 с.
9. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Муравский В.П. //Акустический журнал. 1984. Т. 30. № 2. С. 171–176.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступило в редакцию
6 апреля 1992 г.

R.A. Baikalova, N.P. Krasnenko, L.G. Shamaeva. Turbulent Attenuation of Sound Wave Propagating in the Atmospheric Surface Layer.

A technique for estimating the energy losses of sound wave propagating in the atmospheric surface layer due to atmospheric turbulence is proposed. The technique is based on the use of expressions for coefficients of sound scattering by fluctuations von of temperature and wind velocity. These expressions have been derived using Karman model of spectral density of turbulent energy.