

УДК 534.21

*И.А. Суторихин, С.А. Литвиненко***Климатические и природные факторы,
влияющие на распространение акустических волн***I.A. Sutorihin, S.A. Litvinenko***Climatic and Natural Factors
Influencing on Distribution of Sonic Waves**

Рассматриваются климатические и природные факторы, влияющие на распространение акустических волн в зоне жилой застройки. Приведены коэффициенты и определена их роль в модели расчета уровня акустического загрязнения.

Ключевые слова: акустические волны, зона жилой застройки, природные и климатические факторы.

При разработке организационно-технических и конструктивных мероприятий по обеспечению уровня акустического комфорта городского населения в зоне влияния автомобильных дорог следует учитывать двойственный характер климатических и природных факторов, оказывающих непосредственное влияние на формирование акустических полей в зоне жилой застройки. Случайный характер влияния погодных явлений на распространение звука затрудняет его оценку и прогнозирование, непонятно, как следует учитывать влияние погоды: в среднем или же ориентироваться на наиболее «неблагоприятные» случаи рассеяния и поглощения. Кроме того, в атмосфере существуют местные, сравнительно быстрые флуктуации скорости и направления ветра, температуры, плотности, влажности – турбулентность. Влияние турбулентности на распространение звука противоречиво: с одной стороны, энергия звуковой волны частично рассеивается на местных неоднородностях, с другой – при прохождении через неоднородную среду взаимодействуют фазы прямой и отраженной от земли волн, уменьшается их когерентность и ослабевают интерференционные эффекты уровня звука.

В природе непрерывно меняются скорость, сила, направление ветра, а также температура, поэтому распространение звуковых волн происходит постоянно в новых условиях, затухание звука возрастает вследствие отражений, рассеивания и удлинения пути, проходимого звуком (при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ звук проходит 318 м/с , а при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 344 м/с). Следует принимать во внимание, что для идеального (в термодинамическом смысле) газа справедливо уравнение Клайперона. Выражение

This article is devoted to studying the influence of climatic and natural factors on distribution of sonic waves over urban territory. Coefficients of the proposed model for calculation of noise level are derived and their significance for estimation is discussed.

Key words: acoustic waves, housing estate zone, natural and climatic factors.

для скорости звука в воздухе выглядит следующим образом

$$c = \sqrt{\frac{\chi R}{\mu} T} \text{ [м/с]}, \quad (1)$$

где $\chi = c_p / c_v$ – отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, μ – молекулярный вес газа; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К.

Ошибка измерения температуры по скорости звука (из-за отличия воздуха от идеального газа в термодинамическом смысле) при пользовании формулой 1 имеет порядок $0,1^{\circ}$ для нормального давления и уменьшается с его понижением [1].

При выяснении влияния влажности воздуха на скорость распространения звука принимается во внимание зависимость отношения теплоемкостей от отношения упругости водяного пара к давлению воздуха e/p , а также зависимость плотности воздуха от этого же отношения и температуры воздуха. В результате во влажном воздухе фазовая скорость звука

$$c_{\text{фаз}} = c_{\text{сух}} [1 + 0,14(e/p)] \text{ [м/с]}. \quad (2)$$

Полный вклад водяного пара в фазовую скорость звука типично меньше, чем $\sim 1\text{ м/с}$ ($\sim 0,3\%$). Для звука с частотой более 100 Гц основной вклад присутствия водяного пара в атмосфере выражается не в изменении фазовой скорости звука, а в ослаблении звука [1].

При наличии ветра фазовая скорость звука определяется так

$$c_{\text{вет}} = c + \mathcal{V} \cos \varphi \text{ [м/с]}, \quad (3)$$

где c – скорость звука в воздухе; \mathcal{G} – скорость ветра; φ – угол между нормалью к фронту волны и направлением ветра.

Чувствительность взаимодействия звуковых волн с атмосферой можно оценить величиной флуктуаций показателя преломления среды n , т.е. отношением фазовой скорости в среде к фазовой скорости при стандартных условиях (при давлении 1 атм. и температуре 0 °С). Результаты сравнения для акустических волн в величинах изменения показателя преломления в N единицах, где $N = (n - 1) \cdot 10^6$, приведены в таблице.

Чувствительность показателя преломления (в N единицах) к изменениям температуры, влажности и скорости ветра для акустических волн

Параметр	Изменения	ΔN
Температура	1 К	~1700
Влажность	1 мб	~140
Ветер	1 м/с	~3000

Отсюда видно, что флуктуации акустического показателя преломления определяются в основном флуктуациями температуры и скорости ветра.

Флуктуации температуры и скорости ветра обусловлены турбулентностью атмосферы, что приводит к рассеянию акустических волн в атмосфере. Качественной характеристикой рассеяния звука является сечение рассеяния $\sigma(\theta)$, представляющее собой приходящуюся на единицу объема долю падающей мощности излучения, рассеянной в направлении θ в единичный телесный угол. При не слишком малых углах рассеяния выражение для определения сечения рассеяния $\sigma(\theta)$ имеет вид

$$\sigma(\theta) = 0,055\lambda^{-1/3} \cos^2 \theta \left(\frac{c_v^2}{c^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 0,13 \frac{c_T^2}{T^2} \right) \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{-11/3} \quad [\text{м}^{-1}]. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что:

1) рассеянная мощность представляет собой сумму двух членов: члена, обусловленного ветровыми пульсациями (нормированного к средней скорости звука в среде), и члена, обусловленного температурными пульсациями (нормированного к средней температуре среды);

2) как ветровой, так и температурный члены рассеяния умножены на $\cos^2 \theta$, это означает, что на угол 90° рассеяния излучения не происходит;

3) ветровой член содержит множитель $\cos^2(\theta/2)$, который означает, что ветровые пульсации не вызывают рассеяния в обратном направлении ($\theta=180^\circ$);

4) как ветровой, так и температурный члены рассеяния умножены на $[\sin(\theta/2)]^{-11/3}$, т.е. боль-

шая часть мощности рассеивается в переднюю полусферу [2].

Рассеяние звука в атмосфере происходит также на присутствующих в ней аэрозольных частицах. Для волн слышимого звукового диапазона параметр $\pi D/\lambda$ (D – диаметр частицы) дождевой капли лежит в интервале 0,0001÷1,3, градин – 0,0009÷9, снежинок и ледяных кристаллов – 0,0009÷13. С ростом $\pi D/\lambda$ увеличивается доля излучения, рассеянного вперед, однако максимальная доля падающего излучения рассеивается в направлении назад. В отсутствие осадков вклад частиц атмосферных образований и примесей в рассеянный сигнал пренебрежительно мал [3].

Звуковые волны при распространении в атмосфере постепенно затухают вследствие поглощения звуковой энергии из-за теплопроводности воздуха, его вязкости и молекулярной диссипации. Диссипация связана с распределением энергии между различными степенями свободы молекул и является доминирующей [4]. Коэффициент поглощения звука, обусловленный вязкостью и теплопроводностью воздуха, определяется формулой Стокса-Кирхгофа [1], которая имеет вид

$$\alpha_{кл} = 53,54\eta f^2 / p c \quad [\text{м}^{-1}], \quad (5)$$

где η – вязкость воздуха; p – атмосферное давление; c – скорость звука; f – частота звука.

Для обычных атмосферных условий $\alpha_{кл} \cong 4,24 \cdot 10^{-11} f^2 \quad [\text{м}^{-1}]$. Молекулярное поглощение звука связано с релаксационными процессами в многоатомных газах, коим является атмосферный воздух.

Рассмотрим расчет уровня звука, создаваемого источником или системой источников звукового поля при условии отсутствия препятствий распространения звука, т.е. в свободном звуковом поле. Учитывая, что уровень звука вычисляется по формуле

$$L = 20 \lg(p / p_0), \quad (6)$$

где p – среднеквадратичная величина звукового давления; p_0 – исходное значение звукового давления в воздухе, получаем выражение для давления и нормальной составляющей колебательной скорости

$$\frac{L}{20} + \lg p_0 = \lg p \Rightarrow p = p_0 \cdot 10^{\frac{L}{20}} \Rightarrow v_n = \frac{p_0}{\rho c} \cdot 10^{\frac{L}{20}}. \quad (7)$$

Следует отметить, что натурные измерения уровня шумового загрязнения ($L_{Аэжб}$) промышленного центра рекомендуется проводить в солнечные безветренные дни, при температуре от –10 до +30 °С. Расчетным путем же $L_{Аэжб}$ вычисляется по формуле

$$L_{Аэжб} = 10 \lg I + 13,3 \lg V + 4 \lg(1 + \rho) + \Delta L_{A1} + \Delta L_{A2} + 15, \quad (8)$$

где I – интенсивность движения автотранспорта, ед/час; V – средняя скорость потока, км/час; ρ – доля средств грузового и общественного транспорта в

потоке, %; ΔL_{A1} – поправка, учитывающая вид покрытия проезжей части улицы или дороги; ΔL_{A2} – поправка, учитывающая продольный уклон улицы или дороги [4].

Независимо от интенсивности движения и функции распределения интервалов в транспортном потоке эквивалентный уровень шума уменьшается на 3 дБА при увеличении вдвое расстояния от бесконечного участка дороги. За бесконечный в расчетах приближенно принимается участок автодороги длиной не менее 2 км, полностью открытый для точки измерения шума. Величину снижения эквивалентного уровня шума вследствие процессов поглощения звуковой энергии в воздухе и удаления точки расчета от оси полосы движения следует определять по формуле

$$\Delta L_1 = 10K_p \lg(l + l_s - 7,5) / l_s + (\alpha / 100), \quad (9)$$

где ΔL_1 – поправка на удаление точки расчета от полосы движения; K_p – коэффициент, учитывающий рассеяние звуковой энергии в зависимости от со-

стояния поверхности; l – расстояние от точки расчета до ближайшей оси полосы движения; l_s – расстояние от точки 7,5 м до оси эквивалентной полосы движения; α – коэффициент поглощения звука в воздухе (обычно принимается 0,5) [4].

На основе анализа природных и климатических факторов, оказывающих влияние на распространение акустических волн в атмосфере, можно прийти к выводу, что ветер, туман, различные осадки имеют эпизодический характер и в расчет распространения акустических полей на территории города могут не приниматься. Температура и влажность играют существенную роль на расстояниях более 1 км, поэтому ими также можно пренебречь. Для получения расчетным путем характеристик уровня шумового загрязнения города, имеющих небольшую погрешность по сравнению с натурными измерениями, нужно учитывать множество факторов (проводить измерения согласно рекомендациям, учитывать вид покрытия проезжей части, интенсивность движения транспорта, скоростной режим и т.д.).

Библиографический список

1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. – Томск, 2001.
2. Монин А.С. Некоторые особенности рассеяния звука в турбулентной атмосфере // Акустический журнал. – 1961. – Т. VII, вып. 4.
3. Релей Д.У. Теория звука. – М., 1944. – Т. 1, 2.
4. Курбатова А.С., Башкин В.Н., Касимов Н.С. Экология города. – М., 2004.