

Эффективность шумозащитных барьеров в неоднородной атмосфере.

О.В.Кудрявцев

Одной из важнейших проблем прикладной и технической акустики является проблема снижения уровня окружающего шума. Особое значение приобрело воздействие техногенного шума (транспортного, промышленного, авиационного) на живые организмы, в частности, на человека. Для уменьшения уровня акустических шумов применяются различные преграды, экраны, барьеры, возводимые на пути распространения вредного звука. Если на средних и высоких звуковых частотах применение поглощающих экранов и барьеров различных форм и размеров более или менее позволяет решать задачи снижения уровня шумов, то низкочастотные и инфразвуковые шумы, являющиеся не менее вредными для человека, по-прежнему остаются в зоне повышенного внимания разработчиков звукопоглощающих конструкций.

Из-за постоянного и значительного увеличения интенсивности движения транспорта требуется всё большее увеличение эффективности акустических барьеров, устанавливаемых вдоль автомагистралей. Простое увеличение высоты барьера порождает значительные вторичные трудности – увеличение ветровой нагрузки, удорожание строительства, ухудшение обзора для водителей, плохая эстетика. Поэтому основное направление в увеличении эффективности барьеров в настоящее время состоит в разработке и использовании различного рода насадок на верхнюю кромку акустических барьеров для увеличения их эффективности без значительного увеличения их высоты.

Под акустической эффективностью (АЭ) экрана понимается разность уровней звука в точке наблюдения до и после установки экрана при прочих равных условиях. АЭ экрана возрастает при увеличении его высоты, уменьшения расстояния между экраном и источником шума, при сооружении в верхней части экрана со стороны источников шума дифракционных элементов, а также при облицовке поверхности экрана, обращённой к источнику шума, звукопоглощающим материалом. В плане экран может иметь любую форму, что практически не должно влиять на его акустическую эффективность, но позволит органично вписать его в окружающую среду.

Затухание звука, обусловленное звукозащитными экранами или барьерами, измеренное в реальной среде, часто оказывается гораздо меньше, чем предсказано теорией или модельными экспериментами в заглушенной камере. Практически эффективность

барьеров на открытом воздухе не превышает 25-30 дБ /1/, какие бы конструкции экранов или насадок на верхней кромке не применялись. Основными причинами, вызывающими этот эффект, являются рефракция и рассеяние звука на атмосферных неоднородностях. Положительная рефракция, заключающаяся в завороте звуковых лучей к земной поверхности, обусловлена положительными градиентами скорости звука (при условии температурной инверсии) и скорости ветра вблизи земли при распространении звука по ветру. При отсутствии барьера скорость ветра обычно растет с высотой, причем у поверхности земли градиент скорости довольно значителен. Положительная рефракция приводит к частичной засветке зоны акустической тени за экраном.

Влияние ветра сказывается и на рассеянии звука на ветровых (и температурных) неоднородностях, в результате чего часть рассеянного поля также попадает в область за барьером. Однако, как показывают эксперименты, во многих практических случаях влияние ветра преобладает.

Наличие экрана приводит к появлению дополнительного градиента скорости ветра вблизи верхней кромки за барьером, даже если ветер постоянен по высоте в отсутствие барьера. Этот индуцированный барьером градиент скорости ветра (и, как следствие, градиент скорости звука) положителен, что также приводит к рефракции звука в зону акустической тени за барьером /2/. В этой работе показано, что дополнительный градиент скорости ветра, порожденный барьером, может снизить эффективность последнего более чем на 10 дБ.

На рис. 1 для примера приведены данные экспериментальных измерений искажения барьером вертикального профиля скорости ветра /2/. Первоначальный профиль (верхние графики, полученные на расстоянии 12 м до барьера) приблизительно описывается логарифмическим законом

$$u(z) = b \cdot \ln(1 + z/z_0), \quad (1)$$

где $b = 1,2 u_9 / \ln(1 + z_9/z_0)$, $z_0 = 0,001$ м и $z_9 = 9$ м, u_9 – скорость ветра на высоте 9 метров от поверхности земли.

Из графиков видно, что в области над барьером и за ним наблюдается значительное искажение первоначального профиля скорости ветра, выражающееся в появлении сильного градиента, который при удалении от барьера постепенно уменьшается, стремясь к исходной форме $u(z)$. Таким образом, барьер не только искажает форму вертикального

распределения скорости ветра, но и приводит к ее изменению по трассе распространения звука за барьером, т.е. поле скорости ветра будет теперь выражаться функцией, зависящей от x , z и средней скорости ветра на некотором выбранном горизонте (здесь, например, u_0):

$$u = u(x, z, u_0).$$

z , м

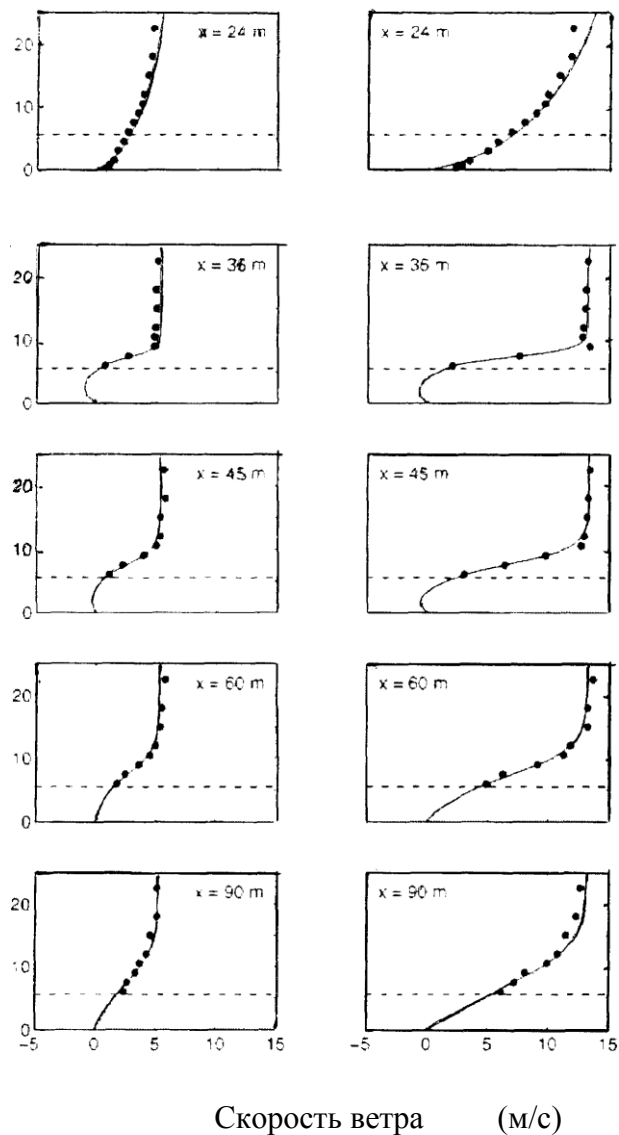


Рис.1

Вертикальные профили скорости ветра на разных расстояниях X от источника: измеренные (точки) и принятые в расчетах (сплошные кривые). Пунктирная линия отображает высоту экрана.

Левая колонка $u_0 = 4$ м/с; правая колонка $u_0 = 10$ м/с.

Механизм засветки зоны акустической тени в пространстве за барьером наиболее просто можно рассмотреть с точки зрения лучевой акустики. Если по теории Пирса /3/ в однородной среде в приемную точку за экраном попадают 4 луча, дифрагированных на кромке установленного на земле барьера (один луч без отражений от земли, по одному лучу с одним отражением до или после дифракции на кромке и луч, дважды отраженный от земли), то при положительной рефракции в приземном звуковом канале приемника достигнет гораздо большее число лучей, в том числе не один раз отразившихся от земли.

Если рассматривать наиболее типичную ситуацию, когда источник находится достаточно близко к экрану, а приемник далеко, то со стороны источника кривизной лучей (которых всего два, достигших верхней кромки барьера) можно пренебречь, а со стороны приемника будет большое число лучей, зависящее от расстояния. Для типичного в приземной атмосфере профиля скорости ветра при наветренном распространении звука на расстоянии, например, 10 км число лучей может быть порядка 100.

При такой ситуации большую роль уже начинают играть местные и топографические свойства грунта. Топография включает в себя физико-акустические и отражательные параметры грунта, различные препятствия и особенности ландшафта, наличие той или иной растительности, строений и т.п. Все эти характеристики в той или иной мере обуславливают отражение и дифракцию не только непосредственно, но и косвенно, влияя на атмосферу и изменяя ее метеорологические (температурные и ветровые) характеристики.

В зависимости от характера грунта он может отражать звук (каменистая почва, асфальт или водная поверхность) или поглощать (травяное покрытие, песчаная почва, лесистое пространство и т.п.). В первом случае лучи, отраженные от земли (в особенности при малых углах скольжения, когда коэффициент отражения близок к единице), затухают слабо и дают значительный вклад в дифрагированное поле. В случае поглощающего грунта лучи, многократно отраженные от земли, сильно затухают, в результате чего их вкладом в дифрагированное поле иногда можно пренебречь. Луч, не претерпевший отражения и вследствие этого не затухающий под влиянием земли (за исключением поглощения в воздухе), несет наибольшую часть акустической энергии и, следовательно, определяет основную часть дифрагированного поля. Таким образом, в расчетном плане данная ситуация наиболее проста и не занимает много вычислительного времени. При расчетах дифракции, по-видимому, следует воспользоваться моделью земной поверхности, обладающей неким импедансом, зависящим от типа грунта и от частоты /4/.

Для оценки эффективности акустических экранов в неоднородной атмосфере обычно применяются методы, использующиеся при числовых расчетах распространения звука: метод параболического уравнения /5/, комбинированный метод преобразования Фурье-Бесселя (быстрая полевая программа) и дифракционной теории Келлера /6/, лучевой метод для стратифицированной движущейся атмосферы /7/, а также метод граничных элементов /8/.

Акустические модели, основанные на параболическом уравнении, учитывают совместное влияние градиентов ветра и температуры, выраженное лишь через один параметр, а именно вертикальный градиент эффективной скорости звука. Вследствие этого трехмерностью вектора ветра пренебрегают.

Лучевые методы не учитывают частотную зависимость дифракции и рефракции.

Методы, основанные на быстрой полевой программе, предполагают независимость акустических свойств атмосферы от расстояния.

Метод граничных элементов, основанный на сеточном алгоритме и использующийся при численном интегрировании дифференциальных уравнений Эйлера, особенно удобен для расчетов характеристик барьеров общего профиля, в атмосфере, неоднородной по всем трем координатам и с любым импедансом поверхности грунта. Поскольку в данном методе рассматриваемая пространственная область разбивается на ячейки размером порядка $1/10$ - $1/12$ длины волны, то решение задачи ограничивается частотой и возможностями компьютера (размером оперативной памяти и быстродействием).

При разработке компьютерной программы оценки эффективности акустических экранов в настоящей работе использован модифицированный метод преобразования Фурье-Бесселя (быстрая полевая программа) в комбинации с дифракционной теорией Келлера, в которой вещественные углы падения и дифракции звуковой волны на кромке барьера заменены комплексными углами, характеризующими как обычные плоские волны, так и неоднородные.

Входными параметрами являются: распределение скоростей звука и ветра по высоте, частотная зависимость коэффициента поглощения звука в атмосфере, направление ветра относительно направления распространения звука, характеристики грунта (плотность, скорости и коэффициенты затухания продольных и поперечных волн - для отражающей границы, характеристический импеданс границы и его зависимость от частоты в соответствии с эмпирическими формулами Аттенборо /4/ или Делани-Базли /9/ - для

импедансной границы), частота или спектр сигнала, высота барьера и его положение относительно источника и приемника звука, высоты источника и приемника, а также расстояние между ними.

Выходными параметрами (результаты счета) являются: зависимости от частоты и расстояния амплитуды и фазы звукового поля, а также эффективность барьера, определяемая как разность уровней звука в отсутствии барьера и при его наличии.

На приведенных ниже рисунках представлены некоторые графики расчета эффективности барьера. Высота барьера на всех рисунках принята равной 5 м; высоты источника и приемника одинаковы и равны 2 м; расстояние от источника до барьера равно 20 м. Скорость ветра по высоте распределялась по логарифмическому закону и просто прибавлялась к однородной скорости звука. Распределение общей скорости звука при его распространении в направлении ветра приведено на рис.2.

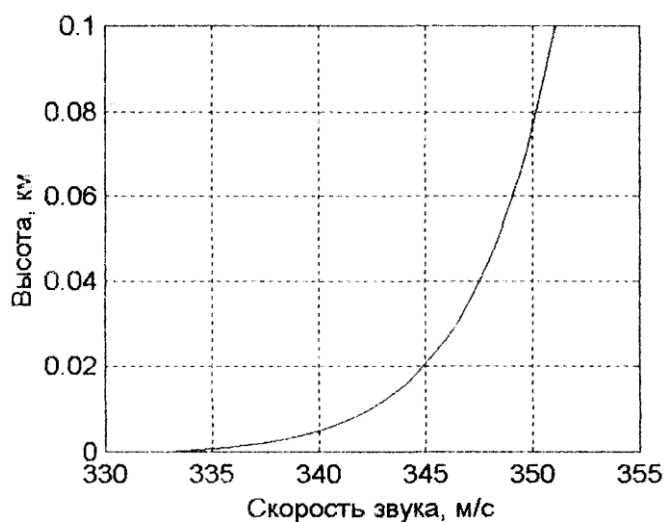


Рис.2. Распределение скорости звука

Плотность атмосферы принята равной 1,3 кг/куб.м. Плотность грунта - 2,0 тн/куб.м. Скорости продольных и сдвиговых волн равнялись соответственно 1,6 км/с и 0,8 км/с; коэффициенты их затухания - 0.10 дБ/(м·кГц) и 2.0 дБ/(м·кГц). Коэффициент поглощения звука в воздухе (в неперах на метр) рассчитывался по эмпирической формуле

$$\alpha = 0.005756 \cdot f^{1.3} \cdot (1 + f^2) / (1 + 10 \cdot f^2),$$

где f - частота в кГц.

Импеданс границы рассчитывался по эмпирической формуле /9/

$$Z = (f/\sigma)^{0.75} [0.0511 + (f/\sigma)^{0.75} - i \cdot 0.0768 (f/\sigma)^{0.02}] / \cos \theta,$$

где f - частота в кГц, σ - сопротивление потоку для пористой среды, равное $100 \text{ кН} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$.

На рисунках 3–6 приведены графики зависимости эффективности барьера от расстояния для частоты 100 Гц в однородной атмосфере и для распределения скорости звука, изображенного на рис.2, для отражающего и импедансного грунта.

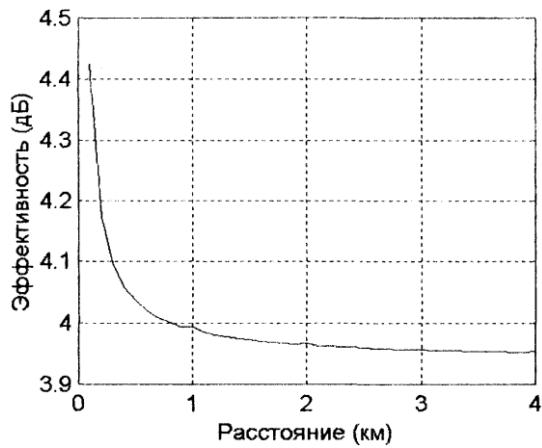


Рис.3. Эффективность барьера в однородной атмосфере для отражающего грунта

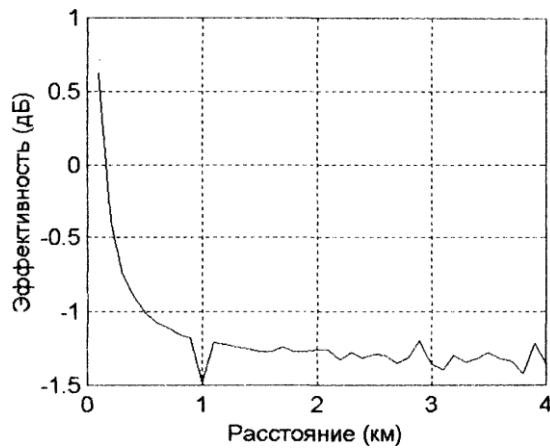


Рис.4. Эффективность барьера в однородной атмосфере для импедансного грунта

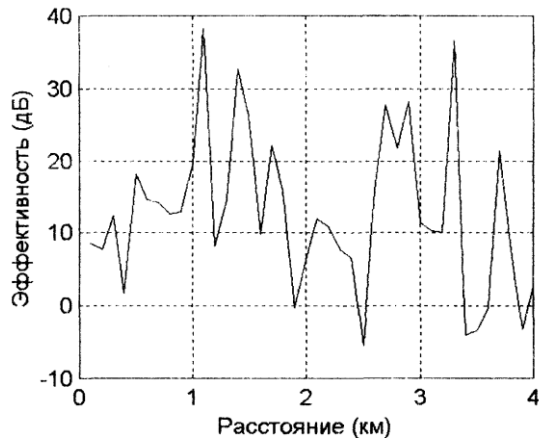


Рис.5. Эффективность барьера в неоднородной атмосфере
для отражающего грунта

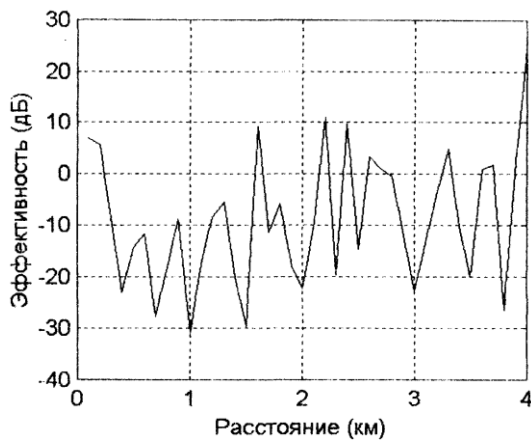


Рис.6. Эффективность барьера в неоднородной атмосфере
для импедансного грунта

На следующих рисунках приведены графики частотной зависимости эффективности барьера в неоднородной атмосфере на расстоянии 1 км для отражающего и импедансного грунта.

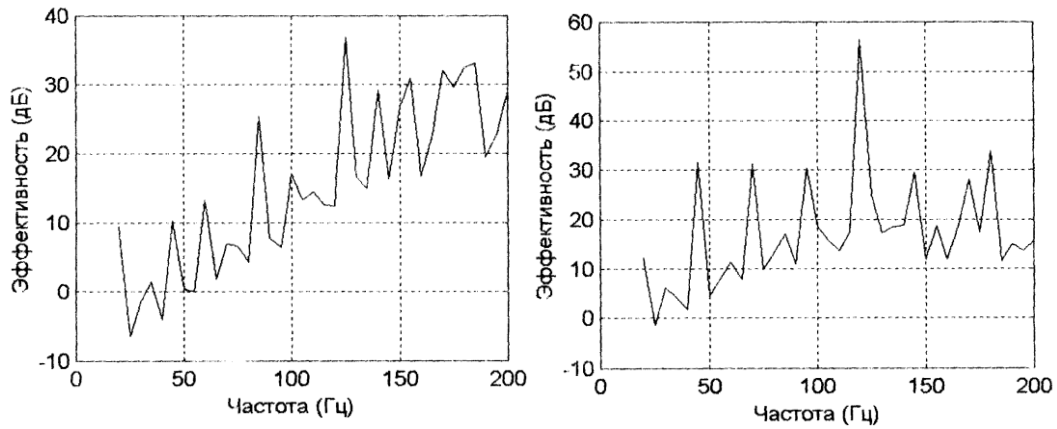


Рис.7. Частотная зависимость эффективности барьера в неоднородной атмосфере при распространении по ветру для отражающего (слева) и импедансного (справа) грунтов

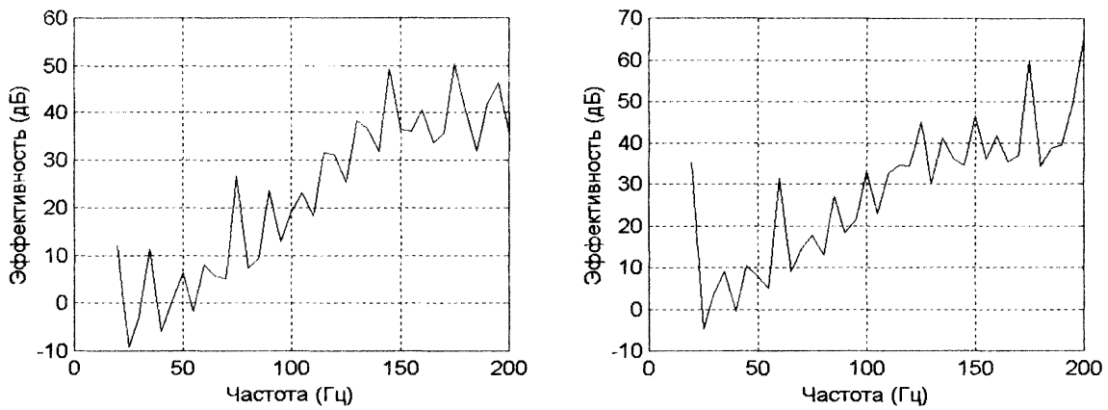


Рис.8. Частотная зависимость эффективности барьера в неоднородной атмосфере при распространении навстречу ветру для отражающего (слева) и импедансного (справа) грунтов

Литература.

1. U.J. Kurze. Noise reduction by barriers.– JASA, 1974, v.55, № 3, 504-518.
2. E.M. Salomons. Reduction of the performance of a noise screen due to screen-induced wind-speed gradients. Numerical computations and wind-tunnel experiments. – JASA, 1999, v.105, № 4, 2287-2293.
3. A.D. Pierce. Diffraction of sound around corners and over wide barriers.– JASA, 1974, v.55, № 5, 941-955.
4. K. Attenborough. Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces. – J.Sound Vib., 1985, v.99, 521-544.
5. E.M. Salomons. Diffraction by a screen in downwind sound propagation: a parabolic-equation approach.– JASA, 1994, v.95, № 6, 3109-3117.
6. K.B. Rasmussen. Sound propagation over screened ground under upwind conditions. – JASA, 1996, v.100, № 6, 3581-3586.
7. E.M. Salomons. Downwind propagation of sound in an atmosphere with a realistic sound-speed profile: a semianalytical ray model. – JASA, 1994, v.95, № 5, 2425-2436.
8. R. Blumrich, D. Heimann. A linearized Eulerian sound propagation model for studies of complex meteorological effects.– JASA, 2002, v.112, № 2, 446-455.
9. M.E. Delaney, E.N. Bazley. Acoustical properties of fibrous absorbent materials.– Applied Acoustics, 1970, v.3, 105-116.