### ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОДУШЕК

Генеральный доклад на международной конференции Geofrontiers, 24–26 января 2005 г., г. Остин, Техас, США

**К. РАЙНЕР МАССАРШ** – профессор, компания Vibisol International AB (Стокгольм, Швеция).

Рассмотрены параметры, влияющие на распространение волн в грунте. Предложен простой метод оценки зоны вибрации, находящейся в фокусе благодаря изгибу волн. Теоретические исследования и модельные испытания показали, что открытая траншея является самым лучшим виброизоляционным барьером. Даны параметры, влияющие на эффективность открытых траншей и рекомендации по их проектированию. Приводятся результаты использования газовых подушек в различных геологических условиях, а также рекомендации по их проектированию.

### ПРЕДИСЛОВИЕ

В густонаселенных районах все большее значение приобретают проблемы, связанные с вибрацией грунта. Этому способствуют интенсивное движение, высокая скорость автомобилей, развитие транспортной инфраструктуры на территориях с высокой плотностью населения. Последнее особенно характерно для Европы и Японии, где благодаря расширению сети железных дорог, можно попасть из одной части города в другую на скоростном поезде. Как правило, в промышленности применяется мощное оборудование. Из-за высокой стоимости земли используются более дешевые территории с плохими грунтовыми условиями. При этом строительные работы зачастую выполняются вблизи исторических памятников, чувствительных к вибрации. Все чаще предпочтение отдается выверенным производственным процессам и виброчувствительному электронному оборудованию. Новые здания восприимчивы к колебаниям грунта, так как при строительстве для оптимизации размеров строительных элементов, таких как пол и стены, используется легкий материал. В то же время во многих европейских странах введены строгие экологические нормы, обязывающие виновных в создании вибрации

принять меры по устранению колебаний. Городские и федеральные организации следят за точным исполнением экологических законов.

Многие проектировщики пренебрегают проблемами вибрации. Причина такого отношения в том, что надежные методы прогнозирования и анализа недоступны или выглядят слишком мудреными ДЛЯ инженеровпрактиков. Несмотря на то что на сейсмически активных территориях была проведена большая научно-исследовательская работа, многие аспекты вибрации, вызванной движением транспорта и колебаниями сооружений, до сих пор остаются загадкой. Нередки случаи, когда проблему вибрации осознают слишком поздно и изменить первоначальный дизайн уже сложно. А поскольку методы уменьшения колебаний распространены далеко не повсеместно, вибрационные проблемы чаще решаются в зале суда, чем на инженерной площадке.

## 1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВИБРАЦИИ В ГРУНТЕ

### 1.1. Распространение волн

Механические колебания в грунте, их распространение в геологических образованиях и влияние на постройки – все это составля-

<sup>©</sup> К. Р. Массарш, 2005

комплексную проблему. Существуют научные работы, где объясняются основные принципы распространения волн и даются ссылки на важнейшие публикации по этой теме (Richart и др., 1970; Haupt, 1995). В вопросах вибрации особую важность приобретают параметры стратификации грунта, его динамические характеристики и уровень грунтовых вод. Уникальное явление наблюдаем у геометрических нерегулярностей при их пересечении неоднородностей. На поверхности соприкосновения двух упругих тел происходит частичное отражение и преломление объемных волн. Углы преломления и отражения определяются по закону Снелла. Значения амплитуд волн зависят от угла их падения и коэффициента скорости распространения в двух телах. На свободной поверхности происходит полное отражение волн. Что касается вибрационных проблем, то здесь особую роль играет фронт релеевской волны (R-волны). Rволна распространяется на половину площади свободной поверхности и состоит из вертикальных и горизонтальных вибрационных компонентов. Амплитуда и ее глубина резко уменьшаются, причем сила воздействия волны равна длине последней.

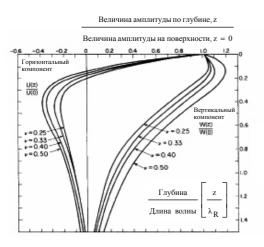


Рис. 1. Изменение амплитуды горизонтальной и вертикальной вибрации, нормализованной по отношению к длине волны

Горизонтальный компонент на поверхности составляет примерно 0,6...0,8 от вертикального компонента. Скорость распространения R-волны немного меньше, чем сдвиго-

вой, или S-волны (87...96%, или, по коэффициенту Пуассона  $\nu$ , в интервале от 0 до 0,5). Длину волны можно вычислить по формуле

$$L = \frac{c}{f},\tag{1}$$

где c — это скорость распространения волны; f — частота вибрации.

### 2. ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНШЕЙ

Колебания в зданиях можно уменьшить путем создания барьеров между сооружением, подвергающимся вибрации, и ее источником. В 1995 г. Хаупт (Haupt, 1995) дал исчерпывающую характеристику методов виброизоляции. Существует множество практических исследований, рассматривающих эффективность виброизоляционных барьеров, в которых используются граничные или конечные элементы. (Ahmad, AL-Hussaini, 1991; Beskos и др., 1986, 1990, Haupt, 1976) Теоретический анализ распространения энергии R-волны по траншее представлен в 1965 г. Долингом. Он рассмотрел изоляционный фактор  $A_r$  в качестве функции нормальной глубины траншеи  $(T/L_r)$ , где T – глубина траншеи,  $L_r$  – длина релеевской волны. Вывод Долинга следующий: тип грунта (коэффициент Пуассона) не оказывает большого влияния на изоляционный эффект. Более сложный теоретический анализ, проведенный Бескосом (Beskos et al, 1986, 1990), Ахмадом и Аль Хусейном (Ahmad, AL-Hussaini, 1991), подтвердил выводы Доллинга. Для более детального ознакомления с этими исследованиями, книгой Хаупта (Haupt, 1978, a, b) и другими трудами по данной тематике целесообразно обратиться к работе Хаупта (Haupt, 1995). Опубликована только незначительная часть экспериментальных исследований, информация о большинстве из них остается в лабораториях и на стройплощадках. Но материалов и документов по практическому применению изоляционных методов не хватает. В большинстве случаев ощущается острый недостаток информации по геотехнике и сведений о динамических свойствах грунта. Своевременное измерение уровня вибрации до и после реализации изоляционных проектов - возможно, именно то, чего не хватает в строительстве.

#### 2.1. Изоляционная эффективность траншей

Первые научные исследования эффективности применения изоляционных барьеров в широкомасштабных проектах были описаны Барканом (Barkan, 1962 г.), изучавшим эффект экранирования открытых траншей и шпунтовых стенок в лессе (пылеватом грунте). При этом скорость распространения волн составляла примерно 150...200 м/с. В 1,8 м от траншеи находился мощный вибратор. Длину траншеи изменяли в пределах (8, 11 м), а глубину постепенно увеличивали до 4 м. В процессе испытаний частота изменялась от 12 до 17 Гц. Изоляционный эффект возрастал при увеличении глубины и длины траншеи. При увеличении частоты колебаний повышалась эффективность экранирования (уменьшалась длина волны). Самый низкий уровень вибрации наблюдался непосредственно за экраном и увеличивался по мере удаления от него. Значения амплитуд колебаний были выше перед экраном. Следовательно, с точки зрения изоляционного эффекта шпунтовые стенки уступают открытым траншеям. К тому же использование шпунтовых стенок не дает результата на горизонтальных амплитудах.

Вудс (Woods, 1968) проводил опыты с использованием экспериментальных моделей в различных изоляционных условиях. Максимальная глубина траншеи составляла 1,2 м. Был задействован вибратор, создающий вертикальные колебания, причем длину волны изменяли от 0,34 до 0,7 м. Исследования с использованием прямых траншей и траншей в форме дуги проводили на разных расстояниях от источника вибрации. На рис. 2 за прямой траншеей в дальней зоне поля изолиниями изображены контуры уменьшения амплитуды (тест по пассивной изоляции). В процессе опыта изменяли длину L и ширину W траншей. Исследования проводили в двух разных точках между вибратором и траншеей. Согласно результатам испытаний, отношение глубины траншеи к длине волны  $(H/L_R)$  является важнейшим изоляционным параметром (рис. 3). Смещение амплитуд по вертикальной оси, измеренное Вудсом в 1968 г., представлено как функция расстояния от источника вибрации для случая пассивной изоляции.

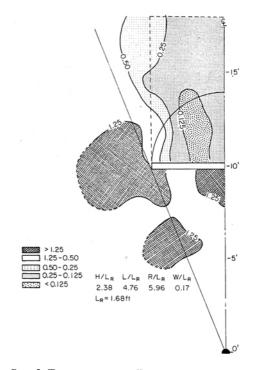


Рис. 2. Тест по пассивной изоляции: контуры снижения амплитуды колебаний (Woods, 1968)

С увеличением  $H/L_R$  возрастает эффективность изоляции. Изоляционный эффект достигает максимума непосредственно за траншеей, вдоль центральной линии. В этом месте средний изоляционный эффект равен 75% (амплитудный коэффициент — 0,25). Перед траншеей колебания увеличивались, следовательно, она отражала энергию волн. Впоследствии проведенные исследования подтвердили выводы Баркана (1962) о том, что использование барьеров со шпунтовыми стенками не уменьшает вертикальные колебания грунта.

Долинг (Dolling, 1970) провел несколько систематических крупномасштабных полевых исследований с использованием траншей, наполненных бентонитовым раствором. Длину волны варьировали в интервале 1,5...12 м за счет изменения частоты вибрации. В большинстве случаев в экспериментах были задействованы траншеи, находящиеся на расстоянии 3 м от источника вибрации. Подробный анализ полученных результатов

содержится в книге Хота (Haupt, 1978а). Было выявлено, что эффективными изоляционными барьерами являются только траншеи глубиной не меньше  $0.8L_R$ .

В 1981 г. в лабораторных условиях Хотом были проведены опыты на моделях виброизоляторов. В качестве грунта использовался искусственно уплотненный однородный, песок. Исследовались батареи открытых и доверху наполненных траншей длиной примерно 0,2...0,5м. По итогам работы Хота изоляционный эффект моделей меньше, чем предполагал Долинг (Dolling, 1965). Виброизоляционный эффект на глубине, равной длине одной волны, может быть выражен как коэффициент уменьшения амплитуды A<sub>R</sub>, значение которого равно примерно 0,4...0,2 (уменьшение на 60...80%).

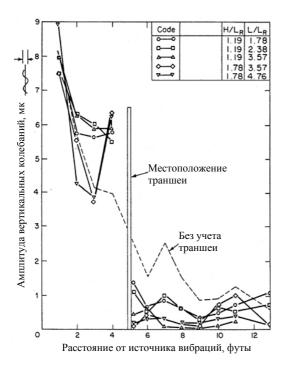


Рис. 3. Зависимость максимального значения амплитуд вертикальных колебаний от расстояния до источника вибрации по результатам пяти опытов (Woods, 1968)

Анализ работ по изучению эффекта изоляции открытых траншей показывает следующее: 1) важнейшим фактором виброизоляции открытых траншей является их глубина, которая должна соответствовать примерно

одной длине волны максимальной частоты; 2) использование траншей, наполненных жидкостью, позволяет значительно уменьшить распространение вертикальных волн, так как в воде поперечная сила не действует. Однако горизонтальные колебания передаются через траншеи как волны сжатия; 3) для виброизоляции ширина траншеи не имеет большого значения; 4) перед траншеей часть энергии волны отражается, что может увеличить уровни вибрации.

#### 2.2. Аспекты проектирования

В литературе описано множество методов оценки изоляционного эффекта барьеров. Обычно так называемые стандартные показатели из прошлых измерений сравнивают со значениями вибрации, измеренной через определенный промежуток времени. В большинстве случаев данных об измерениях уровня вибрации до использования изоляционных барьеров нет, поэтому используют примерные значения. Этот подход субъективен и не учитывает такого важного фактора виброизоляции, как частота колебаний (длина волны). Более целесообразным представляется анализ вибрационных записей в области частоты (рис. 4). Определив коэффициент уменьшения амплитуды для разных частотных интервалов, представим его как функцию нормализованной глубины барьера (см. рис. 8). Отметим, что частотный спектр нередко имеет неправильные очертания, поэтому в значении изоляционного эффекта могут отражаться главным образом те изменения спектра, которые происходят на его границе. Однако эти изменения представляют собой только числовое выражение, которое не имеет никакого практического значения.

Относительная амплитуда колебаний (изоляционный эффект  $A_r$ ) вычисляется по формуле

$$A_r = \frac{A_{fa}}{A_{fb}},\tag{2}$$

где  $A_{fa}$  и  $A_{fb}$  – амплитуды колебаний до и после эксплуатации траншеи.

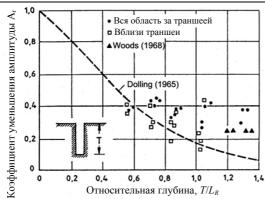


Рис. 4. Результаты опытов по виброизоляции на моделях открытых траншей (Haupt, 1981). Результаты исследований Вудса (Woods, 1968) и спрямление кривой по прогнозу Долинга (Dolling, 1965)

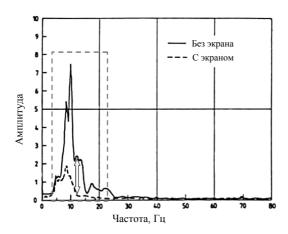


Рис. 5. Определение виброизоляционного эффекта по частотному спектру импульсов колебаний. Пунктиром отмечен диапазон интересующих нас частот

Коэффициент глубины t (относительная глубина траншеи) определяется по формуле

$$t = \frac{d}{\lambda},\tag{3}$$

где d – глубина траншеи;  $\lambda$  – длина волны.

При разработке изоляционных барьеров на первое место выходит определение «проблемных» частот. Отметим, что в большинстве случаев резонанс влияет на элементы построек или полы зданий вследствие увеличения колебаний. Следовательно, первостепенной задачей является определение критических частот колебаний.

Затем необходимо определить спектральный состав колебаний, которые распространяются в грунте и воздействуют на фундамент. Это можно сделать, измерив вибрацию на участке между виброисточником и сооружениями, подвергающимися ее воздействию. Оптимальными методами определения скорости распространения волн, вызывающих вибрацию (как правило, это релеевские или поверхностные волны) являются измерения на поле сейсмических воздействий (SASW сейсмический анализ спектральных волн, исследование поверхностных волн, тесты в вертикальных и поперечных скважинах). После получения данных о частоте колебаний и скорости распространения волн установление критической длины волны не составит труда. Как уже говорилось, глубина изоляционного барьера должна соответствовать длине одной волны. Но даже при выполнении этого условия изоляционный эффект на центральной линии за траншеей ограничивается примерно 80%. Для анализа изоляционного эффекта открытых траншей большую ценность представляют выводы Хаупта, опубликованные в 1981 г.

# 2.3. Изоляционная эффективность материала барьеров

При анализе виброизоляционной эффективности барьеров различных видов большое внимание уделяется соотношению сопротивлений барьера и грунта. Сопротивление Z определяется по формуле

$$Z = c\rho$$
, (4)

где c — скорость распространения волн;  $\rho$  — плотность материала.

Отражение распространяющихся волн зависит от разницы в сопротивлениях грунта и материала, из которого сделан изоляционный барьер. Предположим, что материал состоит из идеально ровных слоев с постоянным сопротивлением. На поверхности каждого слоя волны будут отражаться или преломляться при изменении сопротивления. Распространяющаяся энергия колебаний может быть представлена как коэффициент прохождения энергии  $E_n$ :

$$E_n = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2},\tag{5}$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – сопротивления грунта и барьера соответственно.

На рис. 6 изображен график, построенный по уравнению (5). Предполагаемое сопротивление грунта  $Z_1 = 500$  (c = 250 м/с,  $\rho = 2$  т/м³). Когда  $Z_1 = Z_2$ , вся энергия распространена ( $E_n = 1$ ). Высокий изоляционный эффект наблюдается при небольшом сопротивлении барьера. С другой стороны, очень трудно добиться высокого сопротивления, при котором жесткие барьеры будут эффективными.



Рис. 6. Передача энергии в грунте с сопротивлением  $Z_1$ , пересечение барьера с переменным сопротивлением  $Z_2$  (см. (5))

# 3. МЕТОД ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ПОДУШЕК

### 3.1. Легкий материал

Не подлежит сомнению, что открытая траншея является самым действенным изоляционным экраном. Однако использование открытых или наполненных жилкостью траншей на строительных площадках связано с большими трудностями. Испытания, в процессе которых легкие пенополистирольные панели помещали в глубокие траншеи, не привели к удовлетворительному изоляционному эффекту. Как только пенополистирол подвергался боковому давлению грунта, он терял упругость, сжимался и становился жестким. Возрастало давление, и материал утрачивал виброизоляционные свойства.

### 3.2. Механизм работы газонаполненных подушек

Цель создания изоляционных барьеров с газовыми подушками – резкое уменьшение изменения сопротивления в грунте. Если поместить вертикальные панели упругих, наполненных газом подушек, сопротивление которых очень невелико, в глубокие траншеи, они не утратят своих динамических свойств. При этом в газовых подушках создается давление, уравновешивающее внешнее давление грунта. R- и S-волны распространяются в подушках с очень низкой скоростью, к тому же плотность газа незначительна по сравнению с плотностью грунта. Таким образом, газовые подушки отвечают всем требованиям эффективного изоляционного барьера, параметры которого представлены на рис. 5. Перед размещением в траншеях подушки накачивают газом, чтобы сбалансировать внутреннее давление и давление грунта. Это позволяет создать долговременные, глубокие траншеи с газовыми подушками даже в очень мягких грунтах. Газовая непроницаемость подушек - важнейший аспект создания перманентных изоляционных барьеров. Подушки изготавливают из тонкой упругой пленки из пластичного слоистого алюминия, использующейся в упаковке продуктов питания.

Покажем на примере значимость давления газа в подушках. Если резиновый шарик наполнить газом, его объем и давление увеличатся (рис.7, а). По прошествии какого-то времени в результате диффузии газ будет выходить из шарика. Если же поместить шарик в воду, то с увеличением внешнего давления его объем уменьшится (рис.7,  $\delta$ ). Со временем шарик примет форму капли воды. Даже если внешнее давление будет расти, с обеих сторон мембраны сохранится равновесие давлений. Заметим, что на шарик не действуют силы растяжения. Поскольку разница между давлением газа внутри шарика и внешним давлением воды незначительна, скорость газовой диффузии будет очень низкой. Чтобы еще больше замедлить диффузию, мембрану можно обернуть металлической фольгой, которая практически не пропускает газ (рис.7, в). При высоком давлении с мембраны и фольги полностью снята нагрузка, и стенки шарика не растягиваются под воздействием силы.

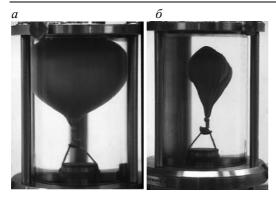




Рис. 7. Основной принцип работы газовых подушек: а — шарик с внутренним избыточным давлением газа: б — баланс внешнего и внутреннего давлений; в — шарик обернут герметичной алюминиевой фольгой, уменьшающей скорость диффузии

### 3.3. Опыты с использованием резиновых панелей

История развития метода газовых подушек насчитывает 20 лет. Уже в первой половине 1980-х гг. начались исследования резиновых подушек, наполненных жидкостью и газом, в глинистом грунте. Металлические рамы с установленными в них резиновыми панелями помещали в мягкую глину на глубину 4,3 м (Massarsch, Ersson, 1985). После этого одни подушки наполняли водой, а другие газом. Вибрацию создавал подвесной молот (весом 63 кг), ударяющий по стальным рамам. Виброизоляционный эффект определяли с помощью специальных датчиков, расположенных вдоль центральной линии, пересекающей экран. Эти полевые измерения подтвердили виброизоляционную эффективность газовых подушек (Massarsch, 1986, Massarsch, Corten, 1998). Изменение частотного спектра после использования резиновых панелей, наполненных газом, показано на рис. 5.

# 4. ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ГАЗОВЫХ ПОДУШЕК

### 4.1. Проект по виброизоляции Гнарп (Швеция)

Благодаря этим успешным опытам, виброизоляционные панели из слоистого алюминия стали использовать на практике. Начался процесс изготовления подушек, состоявших из множества гибких трубок диаметром 20 мм и длиной 0,6 м. При производстве панелей к их стенкам приваривали отдельные газовые подушки, служившие вертикальными перекрытиями, которые наполняли газом еще на заводе и там же обертывали плотным полиэтиленом.

Первое использование газовых подушек в крупномасштабном проекте связано с защитой жилого дома от воздействия вибрации, вызванной железнодорожным движением. Колебания являлись причиной резонанса пола (в диапазоне 15...20 Гц). Грунт на глубине 7 м был представлен рыхлым илистым песком. Уровень грунтовых вод составлял 2 м, а скорость распространения поперечных волн в песке – приблизительно 120 м/с. Между железнодорожной веткой и зданием установили изоляционный экран длиной 50 м и глубиной 6,5 м. Размеры подбирали таким образом, чтобы глубина экрана соответствовала длине одной волны. Для помещения экрана в траншею, наполненную бентонитовым раствором, использовали деревянную раму (рис. 8).



Рис. 8. Установка экрана в траншею с бентонитовым раствором с помощью деревянной рамы (Гнарп, Швеция, 1984). Первое поколение виброизоляционных систем с использованием газовых подушек

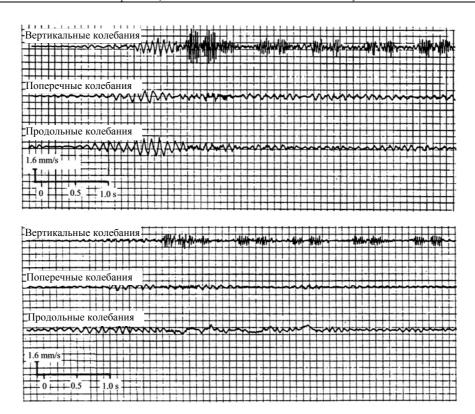


Рис. 9. Регистрация скорости распространения колебаний на уровне 1-го этажа здания до и после установки виброизоляционного экрана

После установки экрана вибрация пола в здании снизилась более чем на 70%. Поскольку другие виброизоляционные проекты были либо неосуществимыми, либо дорогостоящими, этот результат сочли очень успешным. На рис. 9 представлены данные о колебаниях пола жилого здания до и после использования изоляционного экрана.

# 4.2. Проект по виброизоляции замка Мормона (Стокгольм, Швеция)

Вторым случаем использования газовых подушек стала реализация проекта по уменьшению воздействия вибрации (1985) на замок Мормона в Стокгольме. Это здание расположено недалеко от железной дороги, и вибрация связана с движением поездов. Поскольку изменить динамические характеристики здания оказалось невозможным (резонанс варьировал в интервале 30...50 Гц), было решено установить экран с газовыми подуш-

ками. Грунтовое основание состояло из двух слоев: густая морена и над ней песок средней плотности. Скорость распространения поперечных волн в песке на глубине 8 м составляла приблизительно 200 м/с. При этом частота колебаний изменялась в диапазоне 25...60 Гц (Massarsch, Corten, 1988). Для устранения резонанса элементов сооружения, составлявшего примерно 40 Гц, был спроектирован экран, глубина которого удовлетворяла всем вибрационным параметрам. Этот изоляционный экран длиной 95 м установили в жесткую морену на глубину 6,5 м на расстоянии 6 м от ближайшей железнодорожной ветки. После этого неподалеку от железнодорожной ветки (рис. 10) установили отдельные стальные трубки с газовыми подушками.

Чтобы увеличить механическое сопротивление экрана, к газовым подушкам добавили пластиковую панель. Перед выемкой стальных трубок по краям траншей были сделаны небольшие насыпи. Вибрационные

измерения показали, что после установки экрана с газовыми подушками уровень вибрации здания снизился на 65%. Изменение колебаний на частотном спектре показано на рис. 3 (скорость вертикальных колебаний измерялась на уровне фундамента). Вибрационные измерения, проведенные в 2003 г., показали, что экран продолжает работать.



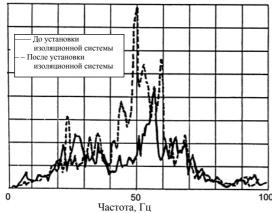


Рис. 10. Частотный спектр колебаний (замок Мормона, Стокгольм, Швеция)

### 4.3. Вибрационные исследования (Упсала)

В 1985 г. на испытательной площадке в Упсале (Швеция) проводились исследования нового метода установки газовых подушек в глубокие залежи пластичной глины. Глубина слоя глины превышала 35 м, уровень грунтовых вод составлял 2 м, скорость распространения поверхностных волн – 72 м/с. Стальную раму с газовыми подушками с помощью

подвесного молота установили на глубину 8 м (Massarsch 1986). Длина изоляционного экрана составляла  $15\,$  м. Колебания создавались ударом молота массой  $4\,$ т по раме при высоте его падения  $0,35\,$  м. Максимальная частота колебаний была  $9\,$  Гц, расстояние от источника вибрации до экрана  $-1,5\,$  м. Анализ результатов опытов (рис. 11) на отрезке, равном длинам пяти волн, показал, что полученные данные соответствуют теоретическим прогнозам, сделанным в двухмерной постановке (Beskos et al, 1986).

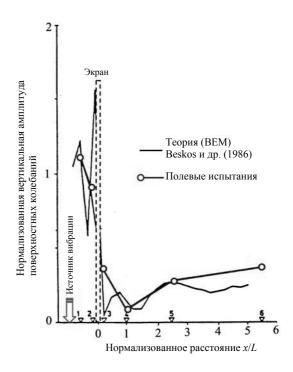


Рис. 11. Сравнение результатов виброизоляционных испытаний в Упсале (Швеция) с теоретическими прогнозами, сделанными в двухмерной постановке

# 4.4. Проект по установке виброизоляционных систем (Saafle)

С учетом результатов, полученных в Упсале, в рамках виброизоляционного проекта проводились работы по установке барьера на большую глубину в залежи пластичной глины. Задача состояла в том, чтобы уменьшить воздействие вибрации, создаваемой движением поездов, на 20 с лишним деревянных зданий. Проходящие поезда являлись источ-

ником мощных горизонтальных колебаний элементов построек. Глубина слоя мягкой глины превышала 40 м, максимальная частота колебаний равнялась приблизительно 4 Гц, скорость распространения поперечных волн на поверхности земли составляла примерно 60 м/с. В связи с отсутствием другого выхода из этой ситуации было решено использовать газовые подушки. Изоляционный экран глубиной 12 м и длиной 200 м с помощью стальной рамы (по примеру опытов в Упсале) был установлен в 10 м от ближайшей железнодорожной ветки. Этот экран находился более чем в 35 м от зданий, подвергавшихся вибрапии.

В процессе установки изоляционной системы возникли серьезные проблемы. При извлечении стальной рамы траншея стала обрушаться, и глина попала на дно открытой камеры. Это усложнило задачу создания сплошного изоляционного экрана. Отметим, что такие случаи уже были в изоляционной практике. Вибрационные измерения после установки экрана показали, что он не уменьшает воздействие горизонтальных колебаний на здание. Ниже приведены причины низкой изоляционной эффективности экрана в порядке уменьшения их значимости: 1) глубина установки экрана превышает 8 м (ниже этого критического уровня скважина при извлечении из нее стальной рамы начинала разрушаться); 2) вибрация всего слоя пластичной глины, инициируемая движением поездов; 3) местоположение экрана, который из практических соображений установили между источником вибрации и зданиями; 4) низкая устойчивость деревянных сооружений, подвергавшихся вибрации, частота которой составляла примерно 4 Гц; 5) недостаточная ширина ячеек, из которых состоят газовые подушки (2 см).

### 5. ВТОРОЕ ПОКОЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИ-ОННЫХ ЭКРАНОВ

5.1. Использование геотекстильного материала при производстве изоляционных экранов с газовыми подушками

Шведские изоляционные проекты послужили толчком к изменению методов произ-

водства газовых подушек. Цель новаций создание виброизоляционной системы, работоспособной в любом грунте на большой глубине. Для производства подушек использовался упоминавшийся выше слоистый пластик, ширина ячеек газовых подушек была увеличена с 2 до 15 см. Из геотекстильного материала были изготовлены также специальные матрасы, содержащие множество цилиндрических отсеков. После помешения в эти отсеки подушки были наполнены газом (рис. 12). В каждой трубке был сделан клапан для регулировки давления газа в подушках в зависимости от глубины установки панели. Затем панели с газовыми подушками опускали в траншеи с бентонитовым раствором. Метод установки был немного изменен: чтобы зафиксировать панели, их крепили ко дну траншей, используя противовес. После этого жидкий бентонитовый раствор был заменен самотвердеющим бентонитовым цементом. Его тонкий глинистый слой (0,25 м) обеспечивает химическую защиту экрана и гарантирует долговременную эффективную эксплуатацию.

# 5.2. Виброизоляционный проект (Дюссельдорф)

В 1991 г. изоляционный экран использовался в проекте по уменьшению воздействия на двухэтажные жилые здания вибрации, вызванной движением на высокоскоростной железнодорожной магистрали. После обсуждения различных вариантов решения проблемы железнодорожники Германии остановились на методе газовых подушек. Впоследствии были проведены тщательные вибрационные измерения: определяли скорость распространения волн и максимальные частоты колебаний (для каждого типа поезда, скорости его движения и железнодорожной ветки). Вибрацию измеряли в зданиях на уровне подвала, 1-го и 2-го этажей. При этом необходимо было определить частотный интервал колебаний. При выборе параметров проектирования за основу были приняты расчеты Хота (Наирt, 1981), ср. с рис. 8. Скорость распространения поверхностных волн в песке средней плотности составляла приблизительно 120...150 м/c, уровень грунтовых вод -3 м, максимальные частоты колебаний – 15...30 Гц, что соответствовало частотам резонанса полов

зданий. Глубина экрана (12 м) приблизительно равнялась длине одной волны, толщина определялась в соответствии с результатами вибрационных измерений. Длина экрана вместе с боковыми крыльями, служащими для уменьшения колебаний, распространявшихся параллельно железнодорожной ветке, составляла 75 м. Особенности практического применения метода газовых подушек описаны Шифером (Schiffer, 1991). Установка изоляционного экрана показана на рис. 12. После откопки траншеи и ее наполнения бентонитовым раствором, выполняющим стабилизирующую функцию, газовые подушки были заанкерованы на дне траншеи (бетонные анкеры служили противовесом).





Рис. 12. Установка изоляционного экрана около железной дороги в Дюссельдорфе в 1990 г.: вверху — установка экрана с газовыми подушками; внизу — местоположение изоляционного экрана

Как уже отмечалось, давление газа внутри трубок было ниже давления грунта, таким образом достигался баланс. Обычный бентонитовый раствор в траншее был заменен самотвердеющим раствором, аналогичным тому, который используется при установке барьеров для грунтовых вод. Упругий газо- и водонепроницаемый слой цементно-бентонитового раствора, в который был погружен экран, создает дополнительную защиту газовых подушек. После установки барьера на поверхность траншеи над экраном помещали пенопласт (см. рис. 12), отделяющий экран от поверхности земли и защищающий подушки от температурных перепадов.

На рис. 13 данные вибрационных измерений представлены в виде диаграммы на шкале коэффициента уменьшения амплитуды  $A_r$ . Изоляционный эффект экрана соответствует уменьшению амплитуды колебаний, которого удалось достичь при полевых испытаниях (см. рис. 4). Было выявлено, что при внешнем источнике вибрации (длинные поезда) из-за небольшой длины изоляционного экрана колебания все же воздействуют на здания в поперечном направлении. В течение последних 11 лет изоляционный экран функционировал в соответствии с более ранними прогнозами.

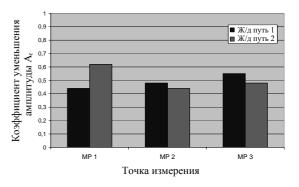


Рис. 13. Средние значения коэффициента уменьшения амплитуды (Дюссельдорф)

### 6. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗОЛЯЦИОННОГО ЭКРАНА

Результаты измерения вибрации после установки экранов с газовыми подушками (1-го и 2-го поколения) в песчаные, илистые и глинистые грунты подробно освещены в литературе (Cock, Legrand, 1990, 1992, Legrand

1989, Massarsch, 1991). Исследования виброизоляционной эффективности экрана в различных грунтах (рис. 14) показали, что изоляционный эффект соответствует результатам, полученным Хотом (Haupt, 1981) и Вудса (Woods, 1968) в опытах с открытыми траншеями.

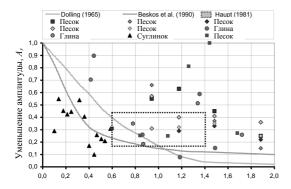


Рис. 14. Изоляционный эффект газовых подушек в различных грунтах с разными источниками вибрации. Изменение значков обусловлено неустойчивостью частотного спектра, по которому определяли коэффициенты уменьшения амплитуды

Уменьшение амплитуды (коэффициент скорости распространения волн до и после установки экрана) представлено как функция относительной глубины. Глубина экрана соответствует длине волны. Для сравнительного анализа даны зависимости, предложенные Бескосом (Beskos, 1990) и Долингом (Dolling, 1995). Графики (см. рис. 14) отражают некоторые недостатки изоляционных систем, причиной которых являются изгиб волны, небольшая длина экрана по сравнению с длиной виброисточника и др. Форма экрана приобретает особую значимость, если проходящие поезда вызывают сильные колебания грунта. Несмотря на то что коэффициент уменьшения амплитуды колебаний (изоляционный фактор) полностью соответствует данным Хота (Haupt, 1981) и Вудса (Woods, 1968), он ниже прогнозируемого значения. Если глубина экрана хотя бы приблизительно будет равна длине одной волны, то после установки барьера предполагаемый изоляционный эффект составит 50...80% ( $A_r \sim 0.5...0.8$ ). При определении изоляционного фактора на частотном интервале фиксируется также и его изменение, что проявляется в некоторых числовых показателях. Данные изменения появляются на частотном спектре при коротковолновых колебаниях, частота и амплитуда которых имеют большие значения. Чтобы увеличить виброизоляционный эффект для больших частот (при небольшой относительной глубине), рекомендуется использовать небольшую траншею, предотвращающую передачу энергии вибрации твердым слоям грунта над экраном. Рассматриваемый метод, который ранее не применялся, позволяет значительно увеличить виброизоляционный эффект при большом коэффициенте относительной глубины Т/L. Полевые исследования и лабораторные опыты показали, что панели с газовыми подушками при их правильном конструировании и установке могут прослужить более 20 лет.

### 7. ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ЭКРАНОВ

Последние модификации экранов разработаны с учетом анализа результатов прошлых проектов. Основная задача всех модификаций — упростить подготовительные процессы, производство и установку изоляционных барьеров. Одним из важнейших событий в области виброизоляции стало появление метода наполнения подушек газом без использования клапанов.

### 7.1. Материал газовых подушек

Газовые подушки производят из пятислойной пластиковой фольги, обладающей высоким сопротивлением и газонепроницаемостью (рис. 15). Чтобы оценить прочность и газонепроницаемость различных полимерных многослойных пластиков, проводилось множество исследований (Gedde, Bereket, 2004). Испытывали четыре вида полимерных слоистых пластиков, предназначенных для использования в виброизоляционных системах. Эксперименты повторяли более 10 раз, а затем их результаты подвергали статистической обработке. Все типы пластиков показали отличные эксплутационные качества. Предел натяжения одной многослойной пленки находится в интервале 40...70 МПа, а деформация при ее разрыве составляет 41...78%. Предел

прочности сварного шва, выражающийся в силе разрыва пластика, колеблется в пределах 5,6...13,0 Н, что соответствует примерно 15...20 МПа (это не намного меньше прочности слоистого пластика при нормальных условиях). Высокая механическая прочность пленки снижает возможность прокола алюминиевого слоя, обеспечивающего нормальное функционирование экрана. Размер газовых подушек в зависимости от проекта может колебаться в интервале 0,15...0,25 м. Поскольку экраны состоят из множества слоев и о балансе внутреннего и внешнего давлений можно говорить только после установки барьера, отдельные трубки остаются газонепроницаемыми на протяжении длительного времени.

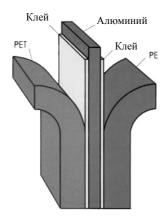


Рис. 15. Многослойная оболочка газовых подушек. Компоненты мембраны: РТЕ (активизированный и ориентированный полиэфир + полиэтилен), слой клея, алюминиевая фольга, слой клея, РЕ (полиэтилен, полиэтилен низкой плотности)

Чтобы изоляционные экраны сохраняли эффективность в течение продолжительного времени, их устанавливают в траншеи, наполненные самотвердеющим бентонитовым раствором. Этот упругий глинистый слой, в который погружен барьер, защищает газовые подушки в любых условиях, даже если экран установлен в загрязненной местности. Отметим, что все материалы, использующиеся в производстве изоляционных систем, безопасны для окружающей среды.

#### 7.2. Наполнение газом подушек

Новый метод наполнения подушек газом предполагает помещение в них специальных гранул. При этом объем газа внутри подушек зависит от веса и химического состава этих гранул. Подушки начинают надуваться после запаивания трубок. Наполнение их газом без использования клапанов существенно облегчает процесс производства, подготовки и установки изоляционных экранов. Кроме того, метод безопасен для окружающей среды.

### 7.3. Процесс установки изоляционных экранов

Процесс установки экранов также сильно изменился. К рамам, в которые устанавливали экраны, стали прикреплять сборные бетонные панели (рис. 16). Таким образом, составными частями экрана являются: 1) бентонитовый раствор, защищающий газовые подушки от химических и механических воздействий; 2) два слоя газовых подушек (поддерживают баланс внутреннего давления газа и внешнего давления грунта), которые состоят из пятислойного пластика (алюминиево-пластиковой фольги); 3) бетонные панели. Изоляционный экран имеет значительное преимущество перед открытыми траншеями, так как его помещают под землю. Использование бетонной панели, прикрепляемой к стальной раме с подушками, имеет свои достоинства: 1) с ее помощью при установке экрана в траншею с бентонитовым раствором удается устранить плавучесть подушек; 2) панель обеспечивает вертикальный жесткий барьер с дополнительным сопротивлением колебаниям; 3) она может выдерживать вертикальную нагрузку, что особенно важно при установке изоляционных систем в районах с интенсивным движением; 4) на панель можно установить разметочную плиту. Чтобы избежать передачи энергии волн в верхние слои грунта, на экран, глубина установки которого 1 м, крепят специальный температурный и изоляционный барьер. Анализ предыдущих виброизоляционных проектов показал, что после установки экрана вибрационная энергия частично распространялась над ним, что снижало изоляционный эффект.

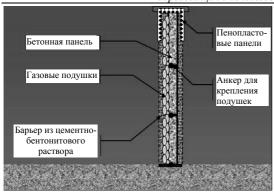


Рис. 16. Изоляционная система, состоящая из упругих подушек, прикрепленных к жесткой бетонной панели

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитых странах решение проблем вибрационного воздействия приобретает все большую значимость. В прошлые годы основные исследовательские работы носили теоретический характер, в связи с чем у нас недостаточно информации о крупномасштабных проектах, в которых используются изоляционные барьеры. Барьеры рекомендуется устанавливать около источника вибрации, чтобы исключить возможность изгиба волны. В качестве альтернативы предлагается установка изоляционной системы рядом с сооружением, подвергающимся вибрации.

В настоящей работе содержится информация об опытах по уменьшению колебаний грунта с помощью открытых траншей. Анализ работ по изучению эффекта изоляции открытых траншей позволяет сделать следующие выводы:

- 1. Важнейшим фактором виброизоляции открытых траншей является их глубина, которая должна соответствовать примерно одной длине волны максимальной частоты.
- 2. Так как в воде поперечная сила не действует, использование траншей, наполненных жидкостью, позволяет значительно уменьшить распространение вертикальных волн. Однако горизонтальные колебания предаются через траншеи как волны сжатия.
- 3. Ширина траншеи не оказывает на виброизоляцию большого значения.

4. Перед траншеей часть энергии волны отражается, что может привести к увеличению уровней вибрации.

Виброизоляционный эффект можно выразить как коэффициент уменьшения амплитуды. Изоляционную эффективность целесообразнее определять на частотном спектре, чем использовать вибрационные записи. Как правило, прогнозируемая величина превышает значение изоляционного эффекта, получаемого на практике. Результаты опытов Хаупта (Наирt, 1981) важны для решения задач, связанных с проектированием. Когда глубина траншеи соответствует длине одной волны, изоляционный эффект составляет примерно 0,3...0,5 (т. е. вибрация уменьшается на 50...70%).

Изоляционные экраны первого и второго поколений успешно применяются в Европе. Соотношение изоляционной эффективности экрана и открытой траншеи соответствует соотношению эффектов, достигнутых в модельных испытаниях в полевых условиях и в лаборатории.

Результаты виброизоляционных проектов с использованием газовых подушек свидетельствуют о том, что вибрационная энергия проходит через жесткие поверхностные слои грунта над экраном, вследствие чего уменьшается изоляционная эффективность барьера. Для увеличения виброизоляционного эффекта для больших частот рекомендуется откопка отдельной траншеи глубиной примерно 2 м (это позволяет избежать контакта с жесткими элементами).

Одним из важнейших аспектов функционирования виброизоляционных систем, который трудно спрогнозировать, является длина источника вибрации. Этот фактор приобретает особое значение, если необходимо уменьшить вибрацию, создаваемую железнодорожным транспортом.

Одно из важнейших достижений в области виброизоляционных систем — появление способа наполнения подушек газом без использования клапанов. Теперь трубки можно закрывать до их заполнения газом, что позволяет добиться высокой герметичности газовых подушек и значительно упростить производство, подготовку и установку экранов.

#### Благодарности

За последние 30 лет многие организации и ученые внесли свой вклад в исследования системы газовых подушек и проекты по ее применению. Первые исследования были представлены в Королевском технологическом институте (КТН) в Стокгольме Управлением железных дорог Швеции (Banverket). Господин Г. Валмарк из Банверкета сделал очень много для осуществления первых виброизоляционных проектов с использованием газовых подушек. Начало второму этапу развития метода газовых подушек было положено компанией «Франки Интернешенл» в Бельгии при поддержке бельгийского Института исследования здания и Университета г. Гент. Широкомасштабные полевые исследования проводились при поддержке бельгийской исследовательской организации CSTC и профессора У. Ван Импе (Университет Гента, Бельгия).

#### Список литературы

Ahmad, S., and Al-Hussaini, T. M. (1991). "Simplified design for vibration screening by open and in-filled trenches", *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 117, Nr 1, pp. 67-88.

Barkan, D. D., (1962), "Dynamics of Bases and Foundations", *MacGraw-Hill Book Company, Inc.* pp. 374 - 406.

Beskos, D. E, Dasgupta, B. and Vardoulakis, I. G. (1986). "Vibration isolation using open or filled trenches; Part 1: 2-D homogeneous soil". *Computational Mech. 1990*, No. 6, Springer, pp. 43-63.

Beskos, D. E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I. G. (1990). "Vibration isolation using open or filled trenches; Part 2: 3-D homogeneous soil". *Computational Mech. 1990*, No. 6, Springer.

de Cock F. and Legrand, C., (1990), "Ground Vibration Isolation using Gas Cushions", Proceedings, 4<sup>th</sup> International Conference on Geotextiles and Membranes, the Hague, pp. 807-812

de Cock F. and Legrand, C (1992), "Influence of Underground Gas Cushions on the Wave Propagation of Ground Vibrations", *Proceedings, 4<sup>th</sup> International Conference on* 

the Application of Stress Wave Theory to Piles, the Hague, pp. 77 - 84.

Dolling, H. J. (1965). "Schwingungsisolierung von Bauwerken durch tiefe, auf geeignete Weise stabilisierte Schlitz" (Vibration isolation of buildings by means of deep, suitably stabilized trenches). *VDI Bericht Nr.* 88.

Dolling, H. J. (1970). "Abschirmung von Erschutterungen durch Bodenschlitze" (Isolation of vibrations by trenches), *Die Bautechnik No.* 6, pp. 193-204.

Gedde, U and Bereket, N. (2003). "Mechanical tests of polymer laminates used for vibration isolation". *Research report, Dept. Fibre and Polymer Technology*, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 9p.

Haupt, W. A. (1978a). "Surface-waves in non-homogeneous half-space", *Proc. Dyn. Meth. In Soil and Rock Mech. DMSR 77*, Vol. I, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 335-367.

Haupt, W. A. (1978b). "Verhalten von Oberflachenwellen im inhomogenen Halbraum mit besonderer Berucksichtigung der Wellenabschirmung" (Behaviour of surface waves in inhomogeneous halfspace with special consideration of wave isolation), *Dr.-Ing. Thesis*, Univ. of Karlsruhe, No. 74, pp. 84–94.

Haupt, W. A. (1981). "Model tests on screening of surface waves". *Proceedings, X<sup>th</sup> Intern. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1981, Stockholm, Vol. 3, pp.215–222.* 

Haupt, W. A. (1995). "Wave propagation in the ground and isolation measures." Proceedings, 3<sup>rd</sup> Int. Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, State of the art paper. Vol. 3, 985 - 1016.

Legrand, C (1989). "Etudes experimentales condernant les sols et foundations" (Experimental studies regarding soils and foundations). Volume 2 - 5. Convention IRSIA, no. 5070.

Massarsch, K. R. and Ersson, L-E. (1985). "Vibrationsisolering i jord" (Vibration Isolation in Soils). *Royal Institute of Technology KTH*, Stockholm, Job Report 1985, No. 20, 32 p.

Massarsch, K. R., (1986). "Isolation of Traffic Vibrations in Soil", ABTUS Confer., Brussels, *Journl. Tunnels et Ouvrages Souterrains*, No. 74, pp. 67-72.

Massarsch K. R. and Corten, F. C., (1988). "Bodenvibrationsabschirmung mittels Gasmatten" (Ground Vibration Isolation using Gas Cush-

ions). *Deutsche Baugrund Tagung, Hamburg,* Proceedings pp. 161 - 192.

Massarsch, K. R. (1991). "Ground Vibration Isolation using Gas Cushions", *Proceedings Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, March 11 - 15, 1991, Vol. 2, pp 1461 - 1470.

Massarsch, K. R. (1993). "Man-made Vibrations and Solutions", State-of-the-Art Lecture, *Proceedings Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering,* St. Louis, Missouri, June 1 - 6, 1993, Vol. II, pp. 1393 - 1405.

Prange, B. (1985). "Screening mattress System Massarsch and screening efficiency", *Internal report Franki* International, Liege, Belgium, 35 p.

Richart F. E. (1970). "Vibrations of soils and foundations." *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, NJ. Pp. 244–262.

Schiffer, W. (1991). "Schlitzwandbauweise mit Gasmatten-Elementen zur Abschirmung von Erschutterungen" (Slurry wall method for installation of gas cushion elements), *STUVA-Symposium at Dusseldorf*1991 Koln, Germany. Woods, R. D., (1968), "Screening of Surface Waves in Soils", *Journal, Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* Vol. 94, SM4, July, pp. 951–979.