

Препринт № 488

**О МЕХАНИЗМАХ ГЕНЕРАЦИИ НИЗКИХ ЧАСТОТ
В СПЕКТРЕ ИМПУЛЬСА
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ
ГРУНТА**

**В.В. Гушин
А.И. Потапов
С.Н. Рубцов**

Н. Новгород 2004

Гущин В.В., Потапов А.И.¹, Рубцов С.Н.

О механизмах генерации низких частот в спектре импульса, распространяющегося в верхнем слое грунта //

Препринт № 488 – Нижний Новгород: НИРФИ, 2004. – 10 с.

УДК 539.374

Проведено измерение скоростей распространения отдельных спектральных составляющих высокочастотного импульса в верхнем слое грунта. Обнаружено, что возникающие в грунте спектральные составляющие импульса, равные $1/3$ частоты его заполнения, распространяются со скоростями, отличными от фазовых скоростей других компонент. Экспериментально найдена зависимость скорости распространения этих спектральных компонент от плотности грунта. Показано, что в рыхлом грунте их скорость меньше, чем скорость распространения колебания на несущей частоте импульса. С ростом плотности грунта скорость распространения субгармоники возрастает и, начиная с некоторого значения плотности, становится больше скорости распространения несущей частоты импульса. Делается вывод о том, что наблюдаемая волна на частоте субгармоники относится не к продольной волне, а к другому типу волн, наиболее вероятным из которых является волна микроповоротов. Полученные экспериментальные данные согласуются с моделью гранулированной среды с вращением частиц.

¹ – Нижегородский филиал Института машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования распространения волн в средах с мезоструктурой [1,2] указывают, что в них при определенных условиях могут распространяться новые типы волн. Скорости распространения этих волн существенно отличаются от скоростей продольных и сдвиговых волн в твердом теле и не могут быть рассчитаны в рамках классической теории упругости. Для объяснения подобных феноменов привлекаются более сложные модели сплошных сред, учитывающие ротационные степени свободы частиц среды [3-6].

Так в работах [3,4] на основе модели континуума Коссера была принята попытка объяснения генерации низких частот (субгармоник), наблюдавшихся в рыхлом грунте [7]. В работе [6] предложена одномерная модель гранулированной среды, в которой показано, что скорости продольной, сдвиговой и ротационной волн в такой среде зависят от пористости (рыхлости) среды и формы гранул.

Для проверки адекватности идеализированных моделей сред сложной структуры реальным материалам, необходимы дальнейшие экспериментальные исследования параметров акустических и сейсмических волн, распространяющихся в естественных условиях.

Типичным примером среды со сложной структурой является верхний слой грунта, в котором наряду с продольными и поперечными волнами могут возбуждаться колебания, связанные с микроповоротами его фрагментов. В работе [8] проведено экспериментальное исследование условий генерации в грунте субгармоник излучаемого колебания. Возникшие субгармоники на основании выводов работы [3] отождествлялись с волнами микроповоротов. Тем не менее, остается вероятность, что они являются продуктом нелинейного преобразования излученного колебания упруговязкой средой. Однако в этом случае их скорость распространения не должна отличаться от скорости других спектральных составляющих импульса, так как дисперсия Р-волн мала.

Для определения природы возникновения субгармоник в настоящей работе предпринята попытка определения скорости распространения низкочастотных (субгармонических) колебаний в грунте и ее зависимости от структуры грунта.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились в геобассейне НИРФИ, представляющем из себя ящик с размерами 3.0 x 2.0 x 1.0 м, засыпанный грунтом (на дне десятисантиметровый слой песка). Стенки бассейна – доски толщиной около 2 см. Все эксперименты проводились на центральной оси бассейна. Расстояние от ближних стенок было около 1 м. Глубина геобассейна – 1 м, грунт – сухой слежавшийся суглинок, в котором размещены акселерометры. Один из них помещен непосредственно под источником сигнала, два других на глубинах 30 ± 1 и 60 ± 1 см на оси источника. Источником сигнала являлся пьезокерамический стержневой вибратор с резонансной частотой 2.9 кГц и шириной полосы 0.1 кГц по уровню 0.7. Вес источника 60 кг. Возбуждение вибратора проводилось высокочастотным импульсом с несущей на резонансной частоте вибратора. Колебания, принятые акселерометрами, усиливались и поступали на цифровой накопитель, где проводилось синхронное суммирование 100 – 200 импульсных посылок. Параметры накопителя: длительность фиксируемой реализации 2048 точек, период квантования сигнала 10 мкс, разрядность входного АЦП – 11, разрядность памяти – 24. Сигнал с накопителя записывался в ПК.

Длительность задающего электрического импульса составляла два периода частоты заполнения. Начальная фаза заполнения каждого импульса была одной и той же. Частота следования выбиралась в диапазоне 30 – 40 Гц. Форма излучаемого акустического импульса и его спектр представлены на рис. 1а,б.

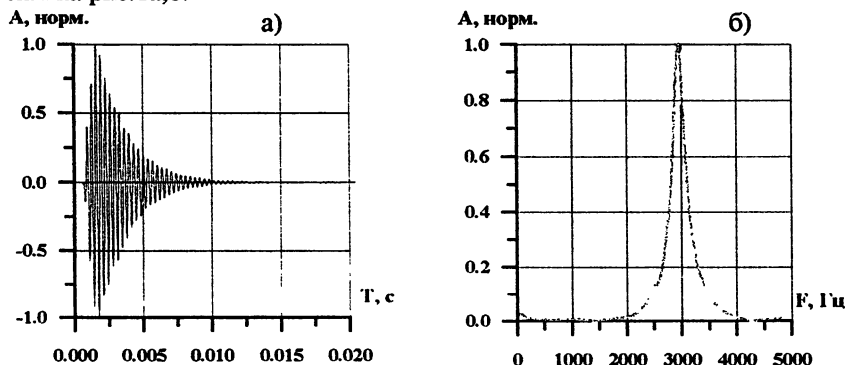


Рис. 1. Импульс принятый под мембраной вибратора; а) – форма импульса, б) – его спектр

Форма и спектр импульса, принятые на глубине 30 см, приведены на рис.2а,б. На рисунке видно, что спектр сигнала обогатился нелинейными составляющими. Отметим, что спектральная линия на частоте субгармоники подобна спектральной линии на частоте заполнения импульса деленной на 3, что согласуется с выводами работы [3].

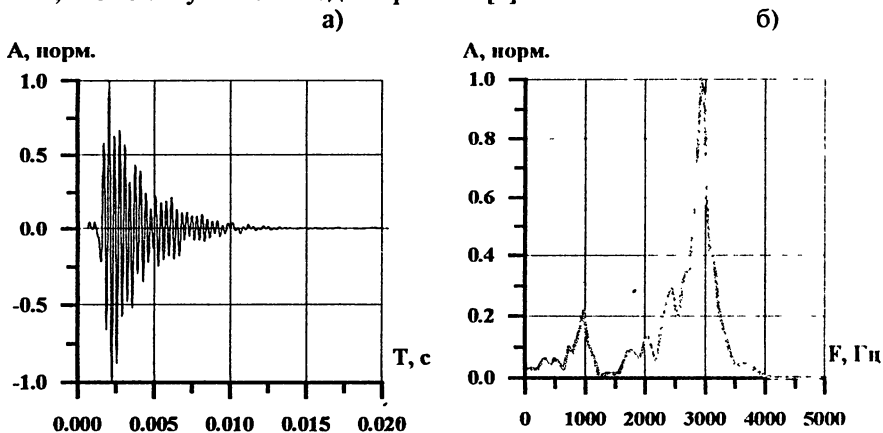


Рис.2. Импульс принятый на глубине 30 см; а) – форма импульса, б) – его спектр

Поскольку эксперименты проводились длительное время, грунт под весом источника со временем уплотнялся, его параметры менялись [9]. Кроме того, как показали измерения, скорость распространения импульса плавно увеличивалась с глубиной (испытываемая среда плавно неоднородная). Таким образом, без изменения блок-схемы установки плавно менялся объект исследования.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Малая глубина геобассейна и, соответственно, малые расстояния между приемниками не позволяли пространственно разделить компоненты импульса, распространяющиеся с разными скоростями. Поэтому для измерения скоростей распространения спектральных компонент импульсного колебания проводилась фильтрация сигналов, принятых на разных глубинах. Определение скорости распространения отфильтрованных компонент проводилось по построенному для каждого случая годографу скорости.

Были опробованы несколько вариантов фильтров и разные полосы пропускания для выделения колебаний. В окончательном варианте фильтрация проводилась полосовым фильтром, образованным ВЧ- и НЧ-

фильтрами Баттерворда 8° порядка. Полоса пропускания фильтра была выбрана равной 100 Гц.

Первоначально для нескольких процессов, зафиксированных в разные моменты времени (при разной плотности грунта), была проведена последовательная фильтрация во всем спектре сигнала. В последующих измерениях проводилось измерение скоростей распространения только для несущей частоты импульса (полоса пропускания 2,9 – 3,0 кГц) и его субгармоники (полоса пропускания 0,9 – 1,0 кГц).

Для того, чтобы исключить влияние отражений от дна и стенок геобассейна, годографы скорости строились по вступлению импульса, а не по достижению им максимального значения. Наименьшее время задержки отраженного сигнала при скорости распространения 800 м/с около 0.001 – 0.002 (отражения от дна) или 0.003-0.004 с (отражения от стенок), при этом отраженный сигнал в основном маскируется сигналом прямого прихода.

Максимальная погрешность единичного измерения скорости распространения волн составляла 7%. В результате усреднения точность измерения среднего значения скорости составили приблизительно 2 – 3%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведенные по описанной выше методике измерения показали, что скорость распространения в грунте колебаний с частотами в диапазоне 0.9 – 1.0 кГц отличается от скорости распространения колебаний других частот, что позволяет с большой вероятностью идентифицировать рассматриваемый диапазон частот с волнами микроповоротов (ротационными волнами). В качестве иллюстрации на рис.3 приведены фрагменты годографов скорости для колебаний на несущей частоте импульса (кривые 1) и на частоте субгармоники (кривые 2). Из рисунка видно, что скорость распространения ротационных волн отличается от скорости волны на несущей частоте.

Типичные зависимости распределения фазовых скоростей отдельных спектральных составляющих импульса от частоты представлены на рис.4. Кривая 1 соответствует рыхлому грунту, а кривая 2 более позднему моменту проведения эксперимента, когда грунт слежался под весом вибратора. Обращает на себя внимание резкое падение скорости в районе частот субгармоники. Отметим, что подобная немонотонная зависимость фазовой скорости от частоты характерна для волн в среде с внутренними колеба-

тельными степенями свободы. К ним относятся упругие среды с порами заполненными газом или жидкостью [10] и жидкости с пузырьками газа.

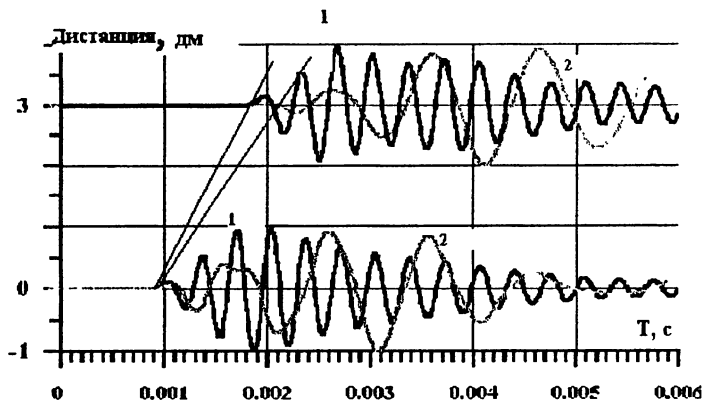


Рис.3. Годографы скорости, построенные для колебания на несущей частоте импульса (кривые 1) и на субгармонике (кривые 2)

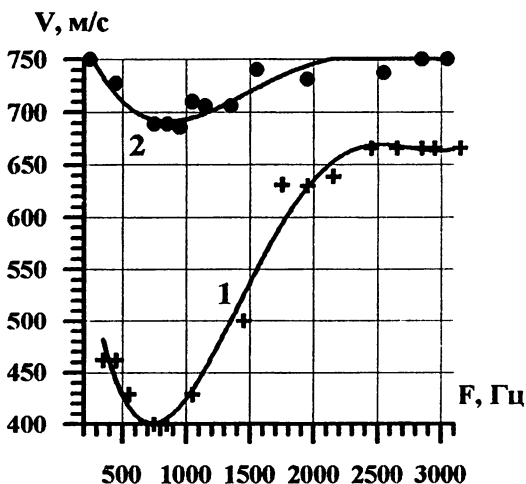


Рис.4. Распределения фазовых скоростей спектральных составляющих высокочастотного импульса, полученные для импульсных колебаний зарегистрированных в разное время. Кривая 1 соответствует более рыхлому грунту. Заглубление приемника – 60 см. Полоса фильтрации 100 Гц

Рис.5 иллюстрирует изменение соотношений скоростей сейсмических колебаний на частоте субгармоники и несущей частоте импульса в зависимости от плотности грунта. Из графика видно, что с ростом уплотнения грунта (ростом скорости распространения Р-волн) растет относительная величина скорости распространения ротационных колебаний. Начиная с некоторого значения плотности грунта, скорость распространения ротационных волн превышает скорость распространения Р-волн.

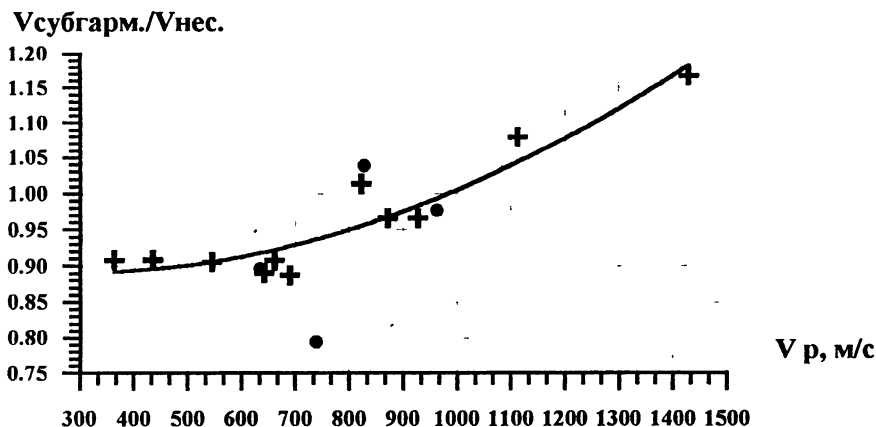


Рис. 5. Отношение величин скоростей распространения на частоте субгармоники и несущей частоты импульса в грунте в зависимости от скорости распространения колебаний на несущей частоте (плотности грунта)

Подобный же эффект наблюдался в экспериментах в искусственно созданных гранулированных материалах (алюминиевая дробь в эпоксидной матрице) [11]. Это согласуется и с теоретическими данными работы [6], где отмечается, что переупаковка частиц в гранулированных материалах может приводить к существенному увеличению скорости волны микровращений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение динамического отклика материалов с микронеоднородностями на внешнее воздействие не может быть в полной мере проведено в рамках классической модели сплошной среды, игнорирующей структуру материала. Учет микроповоротов отдельных фрагментов в гранулированной среде, примером которой является рыхлый грунт, ведет к возникновению моментных взаимодействий между частицами, которые порождают новые свойства материала, в частности, генерацию волн микроповоротов

(или спиновых волн). В средах с микроструктурой и, в частности, в гранулированных материалах возможны два различных механизма возбуждения волн микровращений: трехволновое резонансное взаимодействие, в котором участвует интенсивная высокочастотная продольная волна и две низкочастотных ротационных волны [12] и генерация субгармоник за счет кубической связи между продольной и ротационными волнами [3]. По-видимому, в проведенных экспериментах был реализован один из названных механизмов, приведший к генерации волн микровыворотов на частоте $F_n/3$. Более детальный анализ ситуации требует проведения дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Работа проведена при финансовой поддержке ФЦП «Интеграция» и гранта Минобразования РФ Е02-3.5-224.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов А.И., Родюшкин В.М. Экспериментальное исследование волн деформации в материалах с микроструктурой // Акустический журнал. 2001, т.47, №3, с.347– 352.
2. Гик Л.Д. Аномальные эффекты при распространении сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах // Физическая мезомеханика. 1998, т.1, №2, с.101– 107.
3. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. Нелинейная математическая модель генерации низких частот в спектре сейсмического сигнала // Докл. РАН. 1997, т.352, №5, с.676– 679.
4. Dinariev O.Yu., Nikolaevskii V.N. The nonlinear viscoelastic Cosserat model for wave propagation with generation of subharmonics // Int. J. Solids Structures. 1998, v.35, Nos34– 35, p.4547– 4586.
5. Eringen A.C. Microcontinuum Field Theories. 1: Foundation and solids. Springer Verlag, New York Inc. 1999. – 342 p.
6. Лисина С.А., Потапов А.И., Нестеренко В.Ф. Нелинейная гранулированная среда с вращением частиц. Одномерная модель // Акустический журнал. 2001, т.47, №5, с.685– 693.
7. Гущин В.В., Заславский Ю.М., Рубцов С.Н. Трансформация спектра высокочастотного импульса при распространении в поверхностном слое грунта. // Препринт №395 – Н.Новгород: НИРФИ. 1994. – 20 с.

8. **Гущин В.В., Кудрявцев В.А., Рубцов С.Н.** Экспериментальное исследование одного из механизмов нелинейной генерации низких частот в спектре сейсмического сигнала // *Физика Земли*. 2001, №10, с. 56– 62.
9. **Гущин В.В., Заславский Ю.М., Рубцов С.Н.** Активный сейсмоакустический мониторинг состояния искусственного грунта // *Физика Земли*. 1997, №12, с.68– 70.
10. **Наугольных К.А., Островский Л.А.** Нелинейные волновые процессы в акустике. – М: Наука. 1990. – 237с.
11. **Gauthier R.D.** Experimental investigations on micropolar media // *Mechanics of Micropolar media*. World Scientific, Singapore. 1982, p.395– 463.
12. **Драгунов Т.Н., Павлов И.С., Потапов А.И.** Ангармонические взаимодействия упругих и ориентационных волн в одномерных кристаллах // *Физика твердого тела*. 1997, т.39, №1.с.137– 144.