

УДК 539.3

ПОСТРОЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН

И. В. Белинский, канд. физ.-мат. наук, В. В. Гржибовский, канд. техн. наук, В. А. Лемешко, инж. (ОГВ ИГФ НАН Украины)

Обґрунтовано та описано експериментальну фізичну модельну установку структурованого середовища та наведені результати досліджень еволюції нелінійних хвиль у ньому.

Обоснована и описана экспериментальная физическая модельная установка структурированной среды и приведены результаты исследований эволюции нелинейных волн в ней.

Experimental physical model of the structured medium is proved and described and research results of nonlinear wave evolution in it are resulted.

Введение. Представления о горном массиве как о сплошном деформируемом теле позволили достичь успеха при определении зон сейсмобезопасности при ведении взрывных работ. Однако без учета структурных особенностей геофизической среды невозможно описать процесс деформирования реального горного массива при импульсных нагрузках и правильно интерпретировать сейсмические данные [1, 2]. Реальный горный массив состоит из блоков, гранул, разбитых трещинами, которые заполнены материалами со свойствами, существенно отличающимися от свойств структурных элементов. Поэтому возникает проблема исследования волновых процессов в структурированных средах с различными условиями контакта между ее элементами, которые могут быть упругими, упруго-пластическими или пластическими.

Постановка эксперимента. Сформулируем основные требования к экспериментальной установке для моделирования структурированной среды:

элементы среды должны быть такими, чтобы был хороший контакт между ними;

узел генерации возмущения для структурированной среды должен быть управляемым и генерировать повторяемые возмущения с одинаковыми характеристиками;

датчики регистрации возмущения не должны вносить погрешность в прохождение генерированной волны;

конструкция структурированной среды должна обеспечивать возможность установки прокладок из разных материалов между элементами среды. При этом не должно быть зазоров, ухудшающих прохождение возмущений;

информация с датчиков возмущения должна записываться в компьютер, чтобы можно было сравнивать эволюцию возмущения из разных опытов.

При выборе элемента среды предпочтение было отдано стальному шару: в исследованиях нужно идти от простого к сложному, а звено в форме шара является идеальным для передачи энергии в цепочке шаров, так как контакт в цепочке точечный. Это удобно и для математического моделирования процесса. Материал шара выбран упругим для того, чтобы затухание волн в цепочке было минимальным.

Разные исследователи по-разному строили модели среды при помощи шаров: некоторые располагали цепочку шаров вертикально, поместив тензометрический датчик на нижнем основании цепочки [3–5]. При этом возмущение задавалось ударом верхнего шара о цепочку. Другие исследователи [6] располагали цепочку шаров горизонтально, задавая возмущение специальным вибрационным механизмом со штоком, который ударял по шару с частотой, задаваемой специальным генератором. Информация о процессе снималась при помощи четырех датчиков силы фирмы DytranTM, установленных следующим образом: три датчика над шарами №№ 6, 26, 46, один – в конце цепочки. Три датчика чувствительностью 50 mV/LbF измеряли силу, перпендикулярную оси цепочки, а четвертый, чувствительностью 10 mV/LbF, измерял силу параллельно оси цепочки.

Главным недостатком этих моделей была некорректная интерпретация физических величин, измеряемых датчиками.

В отличие от упомянутых публикаций, нами был разработан и всесторонне исследован датчик [7, 8, 9], который одновременно является структурной составляющей среды и измеряет силу, действующую на контакте ее элементов. В качестве датчика использовался шар диаметром 41,25 мм, распиленный пополам электроискровым методом (толщина распила составляла 30...40 мкм). В диаметральной плоскости каждой из половинок шара вытравливалась полость глубиной 0,5 мм и диаметром 10 мм, в которой размещался чувствительный пьезокерамический элемент ЦТС-19 диаметром 9,8 мм и толщиной 1 мм. После этого половинки шара склеивались эпоксидной смолой. Градуирование датчика осуществлялось сравнением его динамической характеристики с соответствующей характеристикой акселерометра фирмы «Брюль и Кьер» типа 4384, который жестко скреплялся с датчиком-шаром. При этом акселерометр, масса которого составляла 3,8 % от массы датчика, размещался таким образом, что вектор ускорения был перпендикулярным плоскости чувствительного элемента датчика.

Вся цепочка состояла из 50 стальных шаров одинакового диаметра $d = 41,25$ мм и массы $m = 286,7$ г. Возмущение в цепочке шаров генерировалось ударом по ее краю грузом различной массы M ($M/m = 0,04...3,5$), скорость движения которого изменялась от 0,1 до 2,8 м/с. Для этого был установлен специальный маятниковый механизм со шкалой отклонения маятника, проградуированной в градусах отклонения и скорости подлета груза. На рис. 1 и 2 показан датчик-шар и общий вид экспериментальной установки.

Характеристики модели среды менялись при помощи прослоек из разных материалов (упругих, упруго-пластичных и пластичных), установленных между основными стальными шарами цепочки.

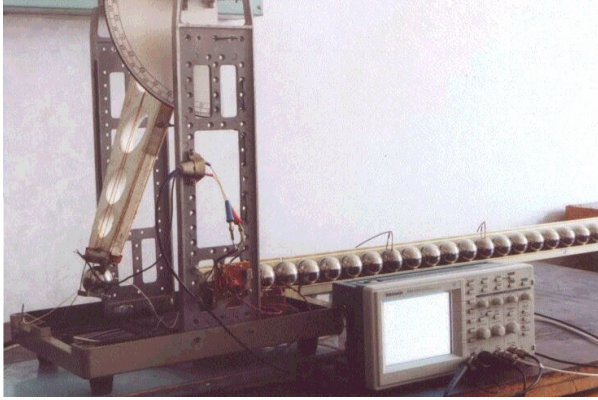


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки



Рис. 2 Датчик-шар с установленным для тарировки датчиком ускорения 4384 фирмы V&K

При проведении экспериментов использовались датчик элемента среды и специальный датчик скорости движения маятникового механизма, который представлял собой эталонную полосу из токопроводящего материала, по которой двигался копир, соединенный с маятником. Скорость вычислялась как частное от деления длины эталонной полосы на длительность импульса, полученного с датчика скорости. Кроме того, вместо первого элемента цепочки устанавливался шар с датчиком. Второй шар с датчиком менял свое положение в цепочке и, поскольку данные с датчиков поступали сначала в согласующий усилитель заряда, затем в цифровой осциллограф с запоминанием TDS-210 и ПК, удалось отобразить эволюцию нелинейной волны, генерируемой после удара грузом механизма маятника.

Результаты эксперимента. Особенности распространения нелинейных волн в одномерной гранулированной среде с упругим контактом между ее элементами моделировались изучением распространения возмущения в цепочке стальных шаров при ударе по ее краю грузом различной массы.

На рис. 3 приведены характерные осциллограммы трансформации возмущения в цепочке 50 стальных шаров диаметром 41,25 мм при ударе по ее краю одним и тремя шарами со скоростью соответственно 1,0 м/с и 0,7 м/с.

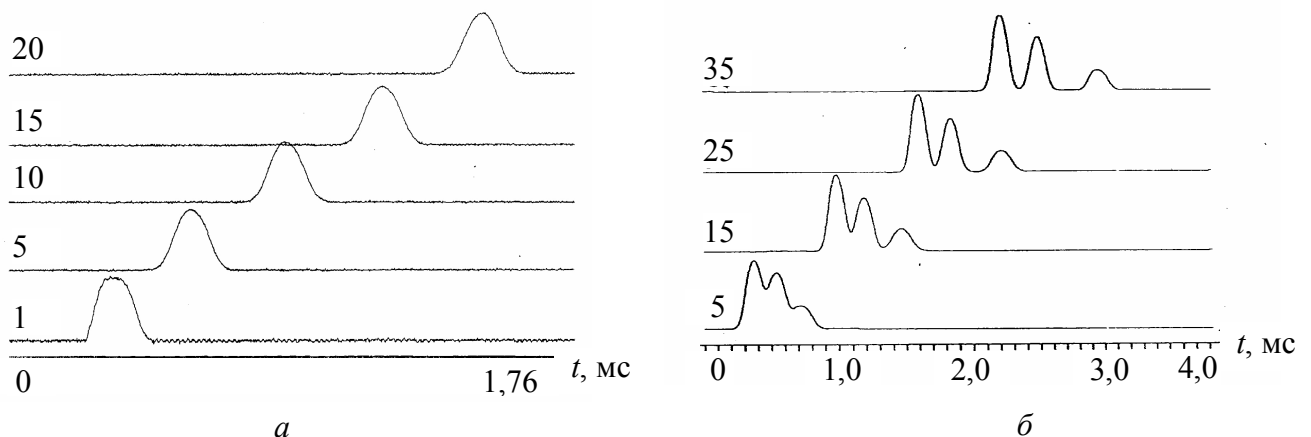


Рис. 3. Эволюция возмущения в цепочке 50 стальных шаров при ударе одним (а) и тремя (б) шарами со скоростью соответственно 1,0 и 0,7 м/с (цифрами на осциллограммах помечено положение датчика в цепочке шаров)

Из данных [8] и рис. 3 следует, что при упругом контакте между элементами структурированной среды массой, равной или меньшей массы элемента, в ней уже на третьей позиции формируется уединенная волна солитоноподобного типа, то есть нелинейное возмущение куполообразной формы, амплитуда и фазовая скорость которого остаются постоянными по мере распространения.

Если же масса удара превышает массу элемента в цепочке (см. рис. 3, б), то в ней формируется несколько солитонов, количество которых зависит от соотношения массы ударника к массе элемента в среде. Длина всех формируемых солитонов составляет четыре элемента среды [7–10] вне зависимости от амплитудно-временных параметров импульсного воздействия.

Особенности распространения нелинейных волн в одномерной гранулированной среде с упруго-пластическим контактом между ее элементами исследовались на модели цепочки стальных шаров диаметром 41,25 мм, между которыми размещались прослойки толщиной 1 мм, изготовленные из дюралюминия Д 16 Т.

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы эволюции возмущения в упруго-пластической цепочке шаров при ударе по ней одним шаром со скоростью 1,0 м/с (а) и 0,1 м/с (б).

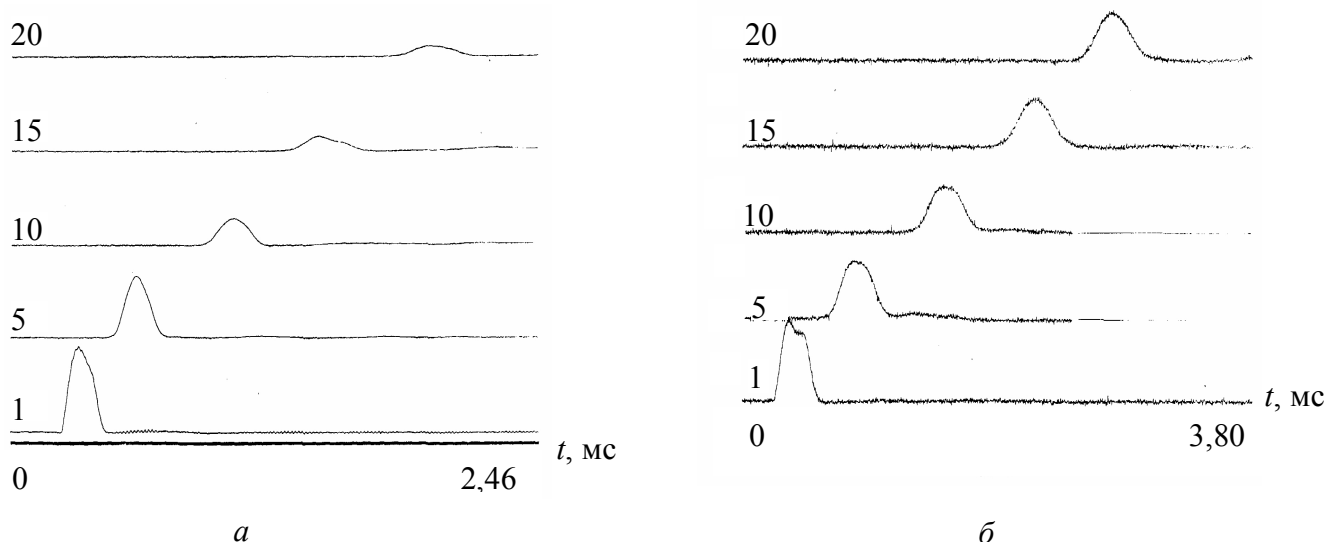


Рис. 4. Эволюция возмущения в цепочке стальных шаров с прослойками дюралюминия Д16Т при ударе одним шаром со скоростью 1,0 м/с (а) и 0,1 м/с (б)

Анализ приведенных результатов показывает, что при ударе по упруго-пластической цепочке со скоростью 1,0 м/с (см. рис. 4, а) в ней возникает затухающее возмущение, амплитуда которого на двадцатом шаре в 10 раз меньше его амплитуды на первом шаре. Это обстоятельство указывает на то, что в упруго-пластической цепочке при ударе со скоростью 1,0 м/с солитон не формируется.

При ударе одним шаром по упруго-пластической цепочке со скоростью 0,1 м/с (см. рис. 4, б) амплитуда возмущения уменьшается до 5-й позиции и при дальнейшем распространении сохраняет свою форму и фазовую скорость.

Таким образом, уже после 10 позиции в упруго-пластической цепочке формируется солитон. Оценка напряжений между элементами цепочки, которые возникают при этом, показывает, что формирование солитона происходит при значениях напряжений между элементами, сравнимых с прочностью материала прослойки.

Особенности распространения нелинейных волн в одномерной гранулированной среде с пластическим контактом между ее элементами исследовались на модели цепочки стальных шаров диаметром 41,25 мм, между которыми размещались прослойки из свинца толщиной 0,5 мм.

На рис. 5 приведены характерные осциллограммы эволюции возмущения в цепочке стальных шаров с пластическими прослойками между ними при ударе со скоростью 0,1 м/с. При этом (см. рис. 5) в цепочке шаров наблюдается затухающее возмущение, амплитуда которого уменьшается почти в 35 раз от 1-й до 7-й позиции, а ее временная ширина увеличивается. В данном случае солитон не формируется.

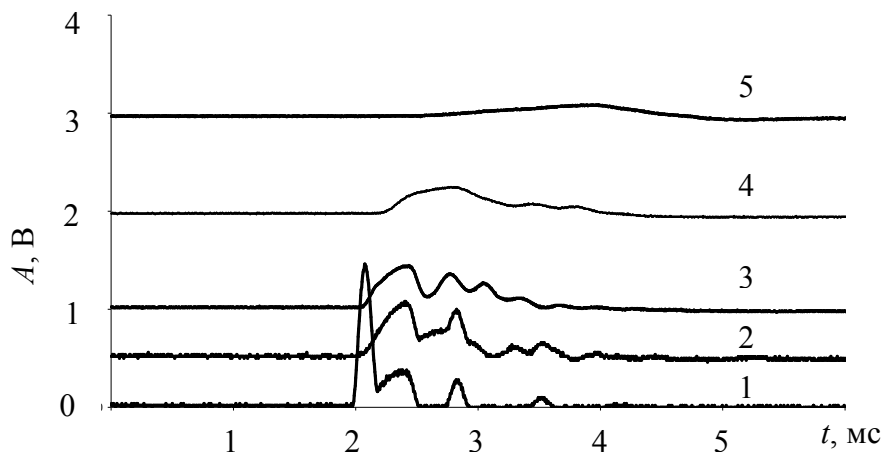


Рис. 5. Эволюция возмущения в цепочке стальных шаров с прослойками свинца при ударе одним шаром со скоростью 0,1 м/с

Таким образом, исследованиями установлено, что в структурированных средах с упругими или упруго-пластическими связями между их элементами формируется солитон в случае, когда при импульсном нагружении напряжения между элементами среды сравнимы с прочностью материала прослойки. В случае пластического контакта между элементами структурированной среды в ней при ударе не зарегистрировано формирование солитона.

Выводы

1. Обоснована и построена лабораторная физическая модель структурированной среды.
2. При помощи модели исследована эволюция нелинейных акустических волн в структурированной среде с разными физическими свойствами.
3. Физическая модель структурированной среды позволяет не только исследовать эволюцию нелинейных волн в структурированной среде с разными физическими свойствами, но и выполнить исследования по обоснованию методов диагностики структурированных сред солитоноподобными волнами.

1. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В.М. Основы геомеханики. – М.: Недра. – 1986. – 301 с.
2. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко Г. П. Деформируемость геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.
3. Лазариди А. Н., Нестеренко В. Ф. Обнаружение уединенных волн нового типа в одномерной зернистой среде // ПМТФ. – 1985. – № 3. – С. 115–118.
4. Нестеренко В. Ф., Лазариди А. Н. Особенности волновых процессов в периодических системах частиц разных масс // Обработка материалов импульсными нагрузками. – Новосибирск. – 1990. – С. 30–41.
5. Нестеренко В. Ф. Импульсное нагружение гетерогенных материалов // Новосибирск: Наука, 1992. – 200 с.
6. Coste C., Falcon E., Fauve S. Solitary waves in a chain of beads under Hertz contact // Phys. Rev. – E 56(5), Part B Nov. – 1997. – P. 6104–6117.
7. Особенности волновых процессов в геофизических средах с учетом их структуры // В. А. Даниленко, И. В. Белинский, Д. Б. Венгрович, В. В. Гржибовский, В. А. Лемешко // Докл. НАН Украины – 1996, № 12. – С. 124–129.
8. Белинский И. В., Гржибовский В. В., Лемешко В. А. Экспериментальное исследование особенностей распространения импульсных возмущений в гранулированных средах // Сб. трудов международной научной конференции «Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород». – М., 1999. – С. 185–189.
9. Пат. України № 37308. Спосіб вимірювання контактних сил між елементами зразка структурованого середовища // І. В. Белінський, В. А. Даниленко, В. В. Гржибовський, В. А. Лемешко. – Заявл. 15.05.2001.
10. Пат. України № 37309. Пристрій для формування і реєстрації солітонів для діагностики середовищ періодичної структури і спосіб діагностики структурованих середовищ // І. В. Белінський, В. А. Даниленко, В. В. Гржибовський, В. А. Лемешко. – Заявл. 15.05.2001.