И. В. БЕЛИНСКИЙ, В.В. ГРЖИБОВСКИЙ, В.А. ЛЕМЕШКО
Отделение геодинамики взрыва ИГФ НАНУ,
Киев, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ И РЕГИСТРАЦИЯ СОЛИТОНОВ В ГРАНУЛИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Введение. В окружающем нас мире встречается множество примеров сред, сложенных из одинаковых элементов. К ним относятся биологические структуры [3], электрические цепи [6], зернистые искусственные материалы [4]. Подобные структуры, сложенные из отдельных гранул и блоков, встречаются и в горном массиве. Все эти среды обладают нелинейными свойствами и являются протяженными. Нас интересует способ переноса энергии через среды периодической структуры.

В отличие от сплошных сред, где переносу энергии и информации на большие расстояния препятствуют их дисперсионные и диссипативные свойства, в средах периодической структуры идеальным способом трансформации на большие расстояния являются солитоны. В отличие от обычных волн, солитоны представляют собой локализованные возбуждения, перемещающиеся с постоянной скоростью без изменения формы.

Теоретическое предсказание существования таких волн в зернистых средах было описано в [4]. Экспериментальное исследование распространения солитонов в однородных зернистых средах было описано в [5,9] по результатам измерения их параметров либо в конце цепочки [5], либо в перпендикулярных к распространению солитона направлениях [9]. В отличие от указанных экспериментальных исследований ниже обсуждаются результаты исследований распространения солитонов в гранулированных средах по специально разработанной методике, исключающей указанные недостатки.

Основной целью представленных исследований было определение условий формирования, границ существования и способов регистрации солитонов в протяженных гранулированных средах.

Постановка эксперимента. Частично методика указанных исследований описана в [1,2,8]. Изложим более детально ее суть. Для моделирования распространения солитонов в гранулированной среде была создана специальная экспериментальная установка. На дюралюминиевой направляющей устанавливались стальные шары диаметром $d = 41{,}25$ мм. Физико-технические характеристики материала шаров: плотность $\rho = 7800$ кг/м^3, модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м^2, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}29$. Два шара были разрезаны электроискровым методом (толщина распила составляла 30-40 мкм), при этом в разрезанных половинках вытравливались углубления для установки пьезокристаллов диаметром 9,8 мм и толщиной 1 мм. Половинки склеивались эпоксидным клеем, полученные датчики тарировались и занимали свое место в цепочке неразрезанных шаров. Для получения полной картины прохождения волны датчик-шар последовательно занимал положение с 1 по 50 при одинаковом возмущении, подаваемом на цепочку. Это возмущение задавалось при помощи специального маятникового механизма, на свободном конце которого размещался груз. Грузом могли служить такие же шары, как и шары расположенные в цепочке, и любые другие тела, масса которых не превышала тройную массу шара, находящегося в цепочке. В наших экспериментах использовались грузы, при которых соотношение масс груза и шара было в пределах от 0,04 до 3,0, и скорость удара выбиралась в пределах от 0,16 до 2,8 м/с. Надежный механический контакт между шарами цепочки осуществлялся ее статическим поджатием силой ≅3-5 Н.

Схема измерения показана на рис.1, причем для согласования выхода датчика со входом усилителя осциллографа использовался специальный усилитель заряда с входным сопротивлением 100 ГОм. В качестве осциллографа использовался прибор TDS-210 фирмы «Tektronix» с коммутационным модулем TDS-2CM, что позволило при помощи программы WSTRO, входящей в расширенный комплект осциллографа, записывать данные в персональ-

ный компьютер. Далее данные обрабатывались пакетом «Mathematica-4», разработаным фирмой «Wolfram Research, Inc».

Градуирование согласующих усилителей заряда осуществлялось разрядом на их вход предварительно заряженной до 1-8 В емкости 1000 пФ. Коэффициент передачи и постоянная времени соответственно составляли 0,03-1,0 мВ/пКл; 13-205 с.

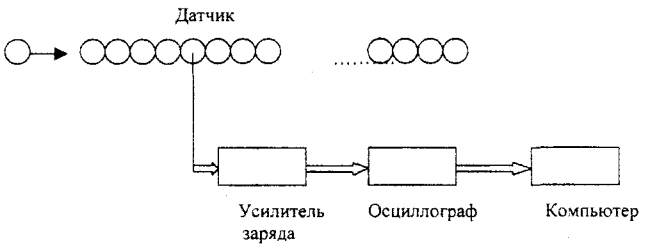


Рис.1. Измерительный канал экспериментальной установки

Градуирование датчиков осуществлялось сравнением их динамических характеристик с соответствующими характеристиками акселерометра фирмы «Брюль и Къер» типа 4384, который жестко скреплялся с датчиком-шаром. При этом акселерометр, масса которого составляла 3,8 % от массы датчика, размещался так, что вектор ускорения был перпендикулярен плоскости чувствительного элемента датчика.

В эксперименте была установлена полная тождественность осциллограмм датчика и акселерометра. Это позволило нам утверждать, что датчики-шары регистрируют силу, действующую на контакте шаров. Определенная таким образом чувствительность датчиков-шаров $S_{1д} = 10{,}59$ пКл/Н; $S_{2д} = 11{,}16$ пКл/Н.

Указанная методика защищена патентом Украины [7].

Таким образом, разработанная методика позволяет регистрировать силу, действующую на контакте двух шаров, в диапазоне от 1 до 10^5 Н при частоте процесса от 1 до 10^5 Гц с погрешностью 2 %.

Обсуждение результатов. В работах [2,8] проанализирована эволюция возмущения в длинной цепочке шаров при ударе по ней массой M, изменяющейся от 4 до 300 % от массы m шара в цепочке. Здесь анализируются условия формирования, границы существования и параметры солитонов в таких средах.

В результате проведенных экспериментов зарегистрировано формирование солитонов в цепочке шаров. При этом впервые экспериментально доказано, что при ударе по одномерной гранулированной среде, составленной из n одинаковых элементов, массой, $M/m = 0{,}04 \div 1{,}0$ формируется один солитон, который существует в диапазоне от 3 до $(n - 2)$ элементов.

При массе удара $M/m = 2$ на 21 шаре начальное возмущение распадается на два солитона, которые существуют на протяжении всей цепочки за исключением трех последних шаров. Соотношение между амплитудой первого F_{m1} и второго F_{m2} солитонов описывается соотношением

$$F_{m1} / F_{m2} = (2{,}33 \div 0{,}33)V, \qquad (1)$$

где V – скорость удара, м/с.

При массе удара $M/m = 3$ вначале на 15-17-м шаре от общего возмущения выделяется третий солитон, а на 35-38-м шаре выделяется второй солитон. В дальнейшем по цепочке шаров, за исключением четырех последних шаров, распространяется три солитона.

Соотношение между амплитудами трех сформированных солитонов при различных скоростях удара иллюстрируется рис.2.

Как видно из данных, представленных на рис.3, указанные соотношения описываются следующими эмпирическими соотношениями:

$$F_{m1} / F_{m2} = 1{,}42\ (V)^{-0{,}05}; \qquad F_{m1} / F_{m3} = 3{,}22\ (V)^{-0{,}18},$$

где F_m в ньютонах.

Таким образом, при ударе цепочкой из N шаров по длинной горизонтальной цепочке таких же шаров в последней формируется N солитонов, которые существуют на протяжении всей цепочки, за исключением $(N + 1)$-го шара.

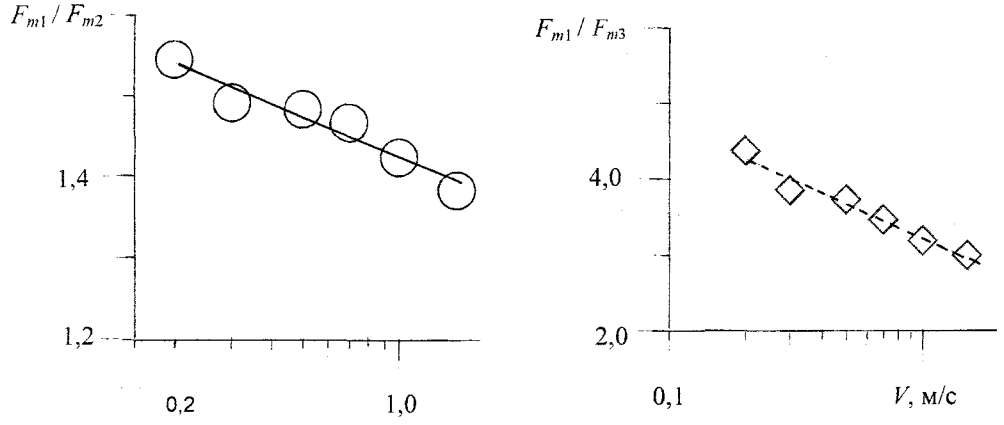


Рис.2. Зависимость отношения амплитуд, сформированных в длинной цепочке шаров солитонов, от скорости удара по ней цепочкой трех таких же шаров

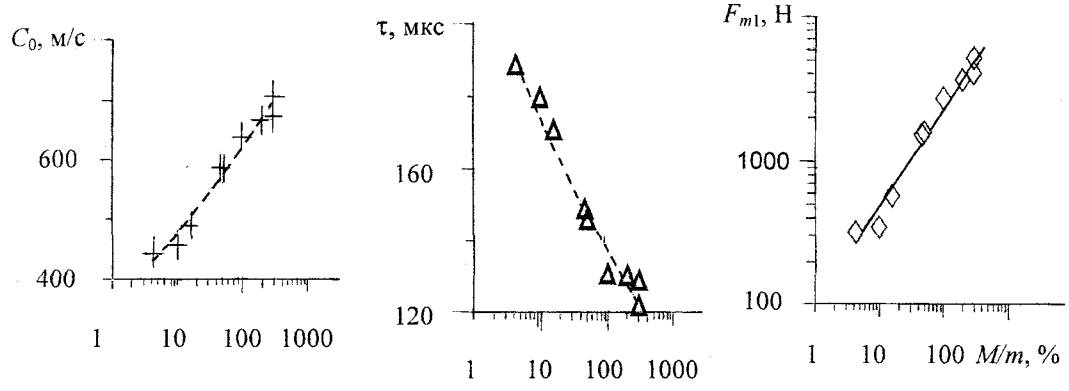


Рис.3. Зависимости фазовой скорости распространения C_0, временной полуширины τ и максимальной амплитуды F_m первого солитона в длинной цепочке шаров от относительной массы удара M/m

Данные, представленные на рис.3, иллюстрируют зависимости основных параметров первого солитона (максимальной силы F_{m1}, фазовой скорости распространения C_0 и временной полуширины τ) от относительной массы удара с постоянной скоростью. Эти зависимости при $V = 0{,}7$ м/с удовлетворительно описываются следующими эмпирическими формулами:

$$C_0 = 371{,}5\ (M/m)^{0{,}11};\quad C_0 = 371{,}5\ (M/m)^{0{,}11};\qquad \tau = 220{,}3\ (M/m)^{-0{,}1}.$$

Анализ экспериментальных данных показал, что пространственная полуширина всех без исключения солитонов, которые формируются в длинной цепочке шаров при ударе с различными амплитудно-временными параметрами, равна 2 шарам.

Заключение. На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

• В результате физического моделирования установлены характерные параметры солитонов, которые возникают в длинной цепочке шариков (амплитуда, фазовая скорость, силовые характеристики взаимодействия шариков).

• Удар N шарами по длинной горизонтальной цепочке таких же шаров приводит к формированию серии N солитонов, которые существуют на протяжении всей цепочки, за исключением $(N+1)$-го шара.

• Пространственная полуширина всех без исключения солитонов, которые формируются в длинной цепочке шаров при ударе с разными амплитудно-временными параметрами, не зависит от амплитуды и равна 2 шарам.

• Для регистрации солитонов и дальнейшей обработки необходимо использовать цифровые запоминающие осциллографы с минимальным шагом квантования 50 нс, подключенные к персональному компьютеру.

Исследования проводились при финансовой поддержке Научно-технологического центра в Украине (Science and Technology Center in Ukraine), проект № 1255.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белинский И.В.* Отклик одномерной цепочки упругих шаров на импульсное воздействие / И.В.Белинский, В.В.Гржибовский, В.А.Лемешко // Импульсные процессы в механике сплошных сред. Николаев, 1996. С.84-85.

2. *Белинский И.В.* Экспериментальное исследование особенностей распространения импульсных возмущений в гранулированных средах / И.В.Белинский, В.В.Гржибовский, В.А.Лемешко // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород. М., 1999. С. 185-189.

3. *Давыдов А.С.* Нелинейная биофизика // Математическое моделирование. Процессы в нелинейных средах. М.: Наука, 1986. С. 223-260.

4. *Нестеренко В.Ф.* Распространение нелинейных импульсов сжатия в зернистых средах // Журнал прикладной механики и технической физики. 1983. № 5. С. 136-148.

5. *Нестеренко В.Ф.* Солитоны и ударные волны в одномерных зернистых средах / В.Ф.Нестеренко, А.Н.Лазариди // Проблемы нелинейной акустики. Новосибирск, 1987. Ч.1 С. 309-313.

6. Солитоны в действии: Сборник / Под ред. К.Лангрена, Э.Скотта. М.: Мир. 1981.

7. *Белінський І.В.* Спосіб вимірювання контактних сил між елементами зразка структурованого середовища / І.В.Белінський, В.А.Даниленко, В.В.Гржибовський, В.А.Лемешко. Патент України, № 2000010360 від 21.01.2000 року.

8. *Belinsky I.V.* Peculiarities of dynamics of granular and block media / I.V.Belinsky, V.A.Danilenko and other. Deformed media and impulse loads; Kiev: Naukova Dumka, 1992. P.3-11(Russ).

9. *Coste C.* Solitery waves in a chain of beaus under Hertz contact / C.Coste, E.Falcon, S.Fauve // Physical Review E. Volume 56. Number 5. Noveember 1997 y. P. 6104-6117.