

Влияние структурных фазовых переходов на упругие свойства гранулированной неконсолидированной среды

Н. В. Ширгина,* А. И. Кокшайский,† А. И. Коробов‡

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
кафедра акустики, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 15.02.2015; Подписана в печать 18.02.2015)

В работе приводятся результаты исследования упругих свойств гранулированной неконсолидированной среды (ГНС) при возникновении в ней структурных фазовых переходов под действием внешних статических воздействий. В качестве модели среды использовалась система металлических шаров диаметром 2 мм и 4 мм. Экспериментально выявлено аномальное поведение нелинейных упругих параметров при под воздействием изменяющегося внешнего статического давления, которое в свою очередь вызывает структурный фазовый переход в системе. Возникновение структурного фазового перехода в образце независимым образом подтверждается путем измерения электрического сопротивления системы в зависимости от внешней статической силы. Результаты анализируются на основании теории Герца.

PACS: 43.25+у, 45.70.-п

УДК: 534.222

Ключевые слова: контакт Герца, гранулированные среды, генерация гармоник, структурные фазовые переходы.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется исследованию физических свойств структурно-неоднородных твердых сред. Наряду с упругой нелинейностью, обусловленной ангармонизмом кристаллической решетки (классическая нелинейность), в этих материалах проявляется структурная (неклассическая) нелинейность, обусловленная дефектами среды. Во многочисленных экспериментах, проведенных как отечественными, так и зарубежными исследователями, показано, что структурная нелинейность может на несколько порядков превышать величину классической нелинейности [1]. Особое место в теоретических и экспериментальных исследованиях структурно-неоднородных материалов занимают гранулированные неконсолидированные среды (ГНС). Несмотря на большое количество научных публикаций, посвященных исследованию физических свойств ГНС [2–4], их линейные и нелинейные свойства полностью не изучены. Дальнейшее изучение упругих и акустических свойств ГНС, подвергаемых внешним воздействиям, является основой для обеспечения контроля над эволюцией их внутренней структуры и представляет научный и практический интерес. Упругие свойства ГНС зависят от состояния контактов между отдельными гранулами. При анализе упругих свойств ГНС мы воспользовались уравнением состояния среды, учитывающим наличие слабо и сильно поджатых контактов между отдельными гранулами [3,4]:

$$\sigma = \left[n \frac{4E^*}{3\pi} \varepsilon^{3/2} + m \frac{4E^*}{3\pi} (\mu\varepsilon)^{3/2} \right] H(\varepsilon_0), \quad (1)$$

$\varepsilon(h/R) = (h_0 + \tilde{h})/R = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\sim}$ — общая деформация, ε_0 — статическая, ε_{\sim} — переменная деформации в системе шаров, $E^* = E/(1-\nu^2)$, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона материала шаров, $(m+n) < 12$, n — число сильных, m — число слабых контактов, приходящихся на шар, $\mu < 1$. $H(P, \varepsilon_0)$ — функция Хевисайда, показывающая, что напряжение появляется, когда система находится под действием статического давления. Учитывая закон контактного взаимодействия Герца [5], получены выражения для нелинейных упругих параметров в ГНС в зависимости от величины внешнего давления P :

$$N_2 = \frac{C_3}{C_2} = \frac{\left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\sqrt{\mu}}\right)}{2 \left(1 + \frac{m}{n} \sqrt{\mu}\right)} \left(\frac{3\pi P}{4E^*}\right)^{-2/3} H(P) \sim \frac{A_2}{A_1^2}, \quad (2)$$

$$N_3 = \frac{C_4}{C_2} = -\frac{\left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\mu^{3/2}}\right)}{4 \left(1 + \frac{m}{n} \sqrt{\mu}\right)} \left(\frac{3\pi P}{4E^*}\right)^{-4/3} H(P) \sim \frac{A_3}{A_1^3}, \quad (3)$$

где C_2, C_3, C_4 — эффективные коэффициенты упругости 2, 3 и 4 порядков системы, A_1, A_2, A_3 — амплитуды первой, второй и третьей упругих гармоник в ГНС.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для исследования упругих свойств ГНС была разработана автоматизированная экспериментальная установка (рис. 1). ГНС моделировалась одинаковыми стальными шарами диаметром 2 мм или 4 мм. Шары помещались в цилиндрическую ячейку из текстолита диаметром 22 мм, высотой 28 мм. К образцу прикладывалось давление, величина которого контролировалась образцовым динамометром. Для проведения из-

*E-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru

†E-mail: uпер_trouper@mail.ru

‡E-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru

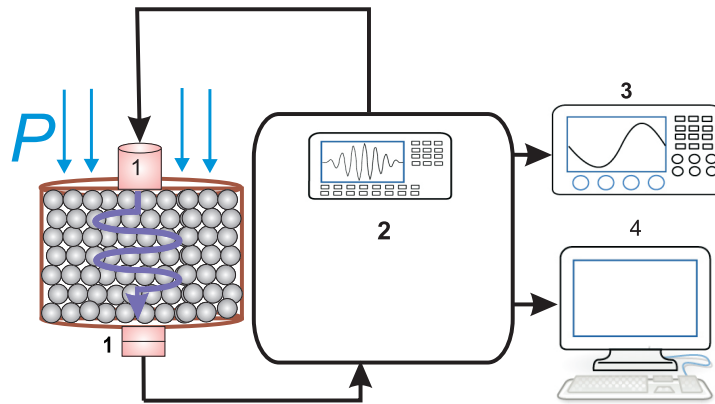


Рис. 1: Схема экспериментальной установки для исследования упругих свойств гранулированных неконсолированных сред. Обозначения на рисунке. 1 — пьезокерамические преобразователи, 2 — генератор импульсов и усилитель RITEC RPR-4000, 3 — цифровой осциллограф DS09104A, 4 — компьютер с АЦП

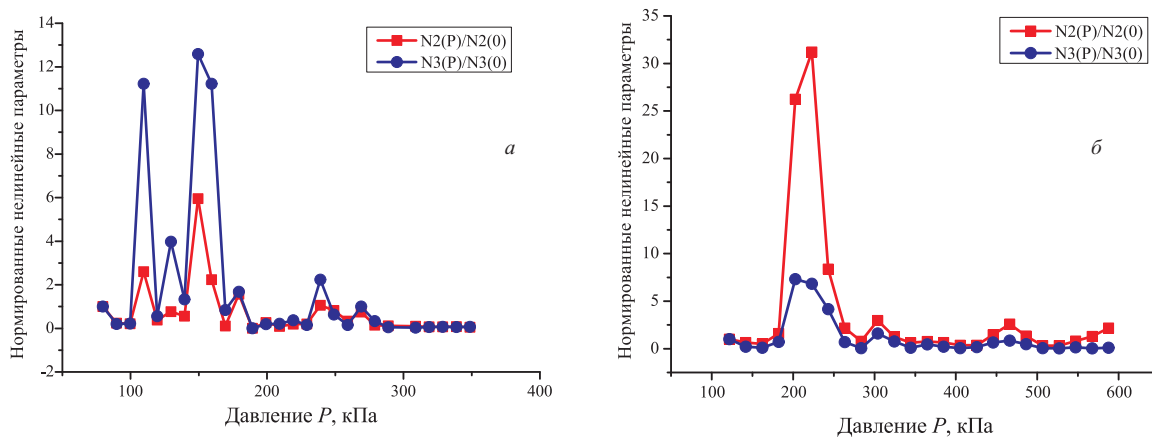


Рис. 2: Зависимость нормированных нелинейных параметров второго и третьего порядков от величины внешнего давления для ГНС из шаров: а — диаметр 2 мм, б — диаметр 4 мм. Значения нелинейных параметров нормированы на их значения при минимальном давлении

мерений применялся автоматизированный ультразвуковой приемо–передающий комплекс RITEC RPR-4000. Для возбуждения продольных упругих волн использовались преобразователи из пьезокерамики. Исследования упругих свойств ГНС проводились спектральным методом.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В спектре упругой волны конечной амплитуды, прошедшей через ГНС наблюдались первая, вторая и третья гармоники. Экспериментально измеренные значения амплитуд гармоник при различных величинах P позволили рассчитать зависимость нелинейных упругих параметров от величины внешнего давления (рис. 2).

При увеличении внешнего статического давления в диапазоне 90–190 кПа было обнаружено anomальное увеличение нелинейных параметров второго и третьего

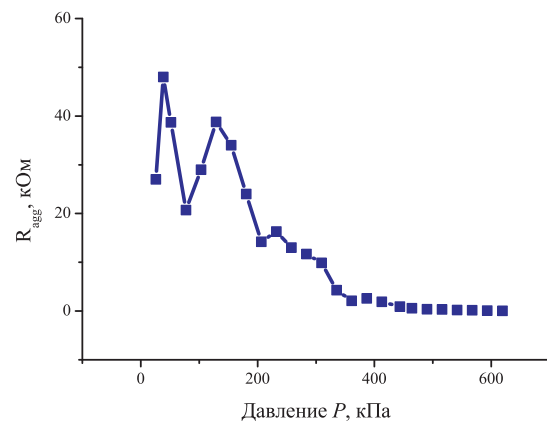


Рис. 3: Зависимость электрического сопротивления ГНС от внешнего давления

порядков. Anomальное поведение нелинейных упругих параметров связано со структурным фазовым перехо-

дом в ГНС, вызванным изменением внешнего давления [6,7]. В результате перехода в ГНС изменились упаковка шаров и общее количество контактов между шарами, величина поджатия отдельных контактов и соотношение между количеством сильно и слабо поджатых контактов. Увеличение количества слабо поджатых контактов привело к увеличению упругой нелинейности ГНС. Для проверки этого предположения была измерена зависимость электрического сопротивления ГНС от внешнего давления (рис. 3). Между электрическим сопротивлением контактов между шарами и внешним давлением существует нелинейная зависимость [7], уменьшение давления на контактах влечет за собой рост сопротивления структуры. Немонотонная зависимость электрического сопротивления R_{agg} от внешнего давления P наблюдалась в том же диапазоне внешнего давления, в котором было обнаружено аномальное увеличение нелинейных упругих

параметров в ГНС (рис. 3).

Это подтверждает предположение, что немонотонное изменение как нелинейных упругих параметров в ГНС, так и ее электрического сопротивления связано со структурным фазовым переходом, вызванным внешним статическим давлением. В результате структурного перехода происходит изменение упаковки шаров в ГНС, а также соотношение между количеством слабо и сильно поджатых контактов. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы: приложение внешнего статического давления к ГНС позволяет практически на порядок изменять величину упругих коэффициентов 2, 3 и 4 порядков; структурный фазовый переход в ГНС может быть вызван внешним воздействием.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-02-31195-мол_а.

- [1] Руденко О.В. УФН. **176**, № 1. С. 77. (2006).
 [2] Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Турна В., Гусев В.Э., Кастаньеде Б. Акуст. журн. **51**, № 5. С. 633. (2005).
 [3] Tournat V., Gusev V.E. Acta Acust. united with Acust. **96**, № 2. P. 208. (2010).
 [4] Korobov A.I., Brazhkin Y.A., Sovetskaya E.S. Acoust. Phys. **56**, № 4. P. 446. (2010).

- [5] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. (М.: Мир, 1989).
 [6] Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Ширгина Н.В. Акуст. журн. **58**, № 1. С. 103. (2012).
 [7] Ширгина Н.В., Коробов А.И., Кокшайский А.И. Акуст. журн. **59**, № 5. С. 552. (2013).

Influence of structural phase transitions on the elastic properties of unconsolidated granular medium

N. V. Shirgina^a, A. I. Kokshayskiy^b, A. I. Korobov^c

Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
 E-mail: ^anatalia.shirgina@physics.msu.ru, ^bsuper_trouper@mail.ru, ^cakor@acs465a.phys.msu.ru

The paper presents the results of investigations of the elastic properties of unconsolidated granular medium (GUM) when the structural phase transitions under the influence of external static effects appear. As a model of the media we used a system of metal balls with a diameter of 2 mm and 4 mm. We experimentally observed anomalous behavior of nonlinear elastic parameters under the influence of changing of external static pressure, which in turn causes structural phase transition in the system. The emergence of a structural phase transition in the sample was independently confirmed by measuring the electrical resistance of the system according to the external static force. The analysis of the results was based on the Hertz theory.

PACS: 43.25+y, 45.70.-n

Keywords: contact Hertz granular medium, harmonic generation, structural phase transitions.

Received 15.02.2015.

Сведения об авторах

- Ширгина Наталья Витальевна — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: natalia.shirgina@physics.msu.ru.
- Кокшайский Алексей Иванович — физик; (495) 939-18-21, e-mail: super_trouper@mail.ru.
- Коробов Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-18-21, e-mail: akor@acs465a.phys.msu.ru.