

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ УПРУГИЕ СВОЙСТВА ФЛЮИДОНА- СЫЩЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ СРЕД

А.И. Коробов, Н.В. Ширгина, А.И. Кокшайский
Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,
Natalia.shirgina@physics.msu.ru

Упругие свойства гранулированных неконсолидированных сред (ГНС) существенно отличаются от свойств сплошных тел из того же материала [1]. Линейные и нелинейные свойства ГНС во многом зависят от состояния контактов между отдельными гранулами [2]. Значительное внимание уделяется исследованию влияния внешнего воздействия на линейные и нелинейные упругие свойства ГНС. Актуальность этой задачи вызвана тем, что природные зернистые среды в реальных условиях находятся под действием одноосного сжатия, вызванного силой тяжести [3]. Внешнее воздействие приводит к появлению новых интересных физических эффектов в зернистых материалах, например, появляется возможность наблюдения структурного фазового перехода в ГНС, вызванного внешним статическим давлением [4]. Не менее интересной и важной задачей является исследование флюидонасыщенных гранулированных неконсолидированных сред (ФГНС), когда пространство между гранулами заполняется жидкостью. Примером подобной среды может послужить рыхлый грунт, пропитанный водой или углеводородами. В этом случае на упругие свойства среды оказывает значительное влияние плотность упаковки, количество насыщающей жидкости, а также величина внешнего давления на среду [5]. Целью данной работы является исследование влияния статических (внешнее давление) и динамических (амплитуда зондирующей акустической волны) воздействий на упругие линейные и нелинейные свойства ГНС и ФГНС, а также оценка влияния типа заполняющей жидкости и материала гранул на упругие свойства ФГНС.

В качестве объекта исследования была выбрана среда, состоящая из стальных либо стеклянных шаров одинакового диаметра. Для получения ФГНС пространство между шарами заполнялось жидкостями с различными упругими и вязкими свойствами – этанолом, водой, глицерином и минеральным моторным маслом SAE 10W-30.

Теоретическое описание упругих свойств ГНС основывается на законе контактного взаимодействия Герца. В случае трехмерной структуры уравнение состояния будет зависеть от числа контактов каждого шара с его соседями. В зависимости от упаковки число таких контактов может изменяться от 6 до 12. При этом величина статической деформации ϵ_0 у отдельных контактов одной гранулы может быть различной [6]. Для анализа рассматриваемой ГНС будем считать, что в ней имеется два сорта контактов – сильно и слабо поджатые, при этом общая деформация сильно

поджатых контактов будет равна ε , а слабо поджатых контактов – $\mu\varepsilon$. Уравнение состояния для ГНС в этом случае запишется следующим образом [7]:

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

где $(m+n)<12$, n – число сильных, m – число слабых контактов, приходящихся на один шар, $\mu<1$, $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\sim}$ – общая деформация, ε_0 – статическая (появляющаяся за счет внешнего поджатия) и ε_{\sim} – переменная (появляющаяся при распространении акустической волны в ГНС) деформации в системе шаров. $H(\varepsilon)$ – функция Хевисайда, показывающая, что деформация в системе появляется лишь тогда, когда среда подвергается внешнему давлению ($P, \varepsilon>0$). При этом рассматривается случай, когда $\varepsilon_0 > \varepsilon_{\sim}$. Пользуясь законом Герца, можно выразить статическую деформацию ε_0 через внешнее давление P : $\varepsilon_0(P) = [9P^2 \pi^2 / 16(E^*)^2]^{1/3}$. Из уравнения состояния (1) можно получить выражения для коэффициентов упругости второго, третьего, четвертого порядков:

$$C_2 = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_{\sim}} \right)_{(\varepsilon=\varepsilon_0)} = \frac{2E^*}{\pi} \sqrt{\varepsilon_0} n \left(1 + \frac{m}{n} \sqrt{\mu} \right) = \frac{2E^*}{\pi} n \left(1 + \frac{m}{n} \sqrt{\mu} \right) \left(\frac{3\pi P}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$C_3 = \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \varepsilon_{\sim}^2} \right)_{(\varepsilon=\varepsilon_0)} = \frac{E^*}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0}} n \left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) = \frac{E^*}{\pi} n \left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \left(\frac{3\pi P}{4E^*} \right)^{-1/3} \quad (3)$$

$$C_4 = \left(\frac{\partial^3 \sigma}{\partial \varepsilon_{\sim}^3} \right)_{(\varepsilon=\varepsilon_0)} = -\frac{E^*}{2\pi} \frac{1}{\varepsilon_0^{3/2}} n \left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\mu^{3/2}} \right) = -\frac{E^*}{2\pi} n \left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\mu^{3/2}} \right) \left(\frac{3\pi P}{4E^*} \right)^{-1} \quad (4)$$

Зависимость скорости продольных волн от внешнего давления запишется следующим образом:

$$V = \sqrt{\frac{C_2}{\rho}} = \left(\frac{E^*}{\pi} \right)^{1/3} \left(\frac{n}{\rho} \left(1 + \frac{m}{n} \sqrt{\mu} \right) \right)^{1/2} (6P)^{1/6} \quad (5)$$

В случае распространения в ГНС гармонической упругой волны конечной амплитуды, деформация в которой равна $\varepsilon_x = \varepsilon_{x0} \sin(\omega t)$, эффективный коэффициент упругости второго порядка C_2^* с точностью до членов второго порядка малости можно записать в следующем виде:

$$C_2^* = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon_x} = C_2 + C_3 \varepsilon_x + \frac{1}{2} C_4 \varepsilon_x^2 \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет определить зависимость скорости упругих волн в ГНС от амплитуды волны и приложенного к ГНС внешнего давления:

$$V(P, \varepsilon_\chi) = \langle V \rangle = \sqrt{\frac{\langle C_2^* \rangle}{\rho}} = \sqrt{\frac{C_2}{\rho}} \left(1 + \frac{1}{4} C_4 \varepsilon_{\chi 0}^2 \right)^{1/2} = V_0 \left(1 + \frac{C_4 \varepsilon_{\chi 0}^2}{8C_2} \right) =$$

$$= V_0 \left[1 - \left\{ \frac{1}{32} \left(\frac{4\pi E^*}{3P} \right)^{4/3} * \left(1 + \frac{m}{n} \frac{1}{\mu^{3/2}} \right) / \left(1 + \frac{m}{n} \sqrt{\mu} \right) \right\} \varepsilon_{\chi 0}^2 \right] \quad , \quad (7)$$

где $V_0 = \sqrt{\frac{C_2}{\rho}}$.

Для исследования упругих свойств ГНС и ФГНС была разработана автоматизированная экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. ГНС или ФГНС помещались в цилиндрическую ячейку из текстолита диаметром 22 мм, высотой 28 мм. К системе шаров с помощью домкрата прикладывалась сила, величина которой контролировалась образцовым динамометром. Для проведения измерений использовался автоматизированный ультразвуковой приемо-передающий комплекс RITEC RPR-4000, в котором реализован импульсный метод измерений. Для возбуждения продольных волн упругих волн использовались преобразователи из пьезокерамики. Прошедшая через среду упругая волна регистрировалась широкополосным пьезоэлектрическим преобразователем фирмы МАТЕС, сигнал с которого поступал для анализа в двухлучевой цифровой осциллограф HP 54810a и в автоматизированный ультразвуковой приемо-передающий комплекс RITEC RPR-4000. Исследования нелинейных свойств ГНС и ФГНС проводились двумя методами: спектральным методом, который заключается в измерении спектральных компонент акустической волны конечной амплитуды, прошедшей через исследуемый образец, и путем исследования зависимости скорости волны от ее амплитуды.

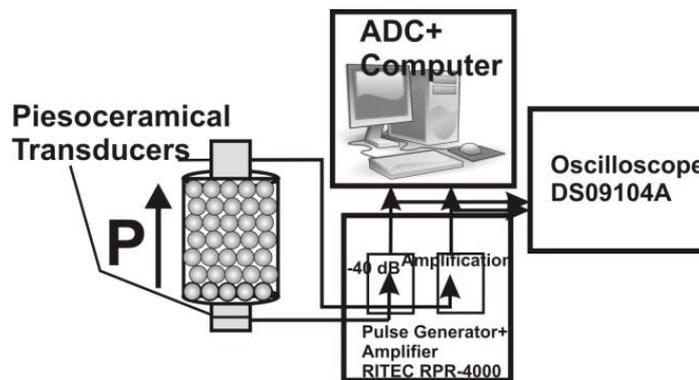


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

При экспериментальных исследованиях мы ограничились интервалом изменения внешней статической силы $P < 600$ кПа. При этих давлени-

ях деформации в области контактов остаются упругими, и можно пользоваться теорией Герца для контактного взаимодействия. Нами были исследованы зависимости скорости и нелинейного упругого параметра второго порядка от внешнего давления и амплитуды зондирующего сигнала. Проведен сравнительный анализ упругих свойств ФГНС и зернистой неконсолидированной среды без насыщения флюидом. Исследовано влияние свойств насыщающей жидкости на упругие свойства ФГНС. Скорость продольных волн увеличивалась с ростом давления, относительное увеличение скорости при изменении давления от 0 до 600 кПа в ФГНС не превышало 2%, в то время как для ГНС увеличение составляло около 15%. Скорость упругих волн в ФГНС была выше, чем в ГНС, но меньше, чем в материале шаров и в жидкости, заполняющей поры. При увеличении амплитуды зондирующего сигнала значение скорости упругих волн в среде уменьшалось, что находится в соответствии с теоретическим рассмотрением. При увеличении давления в ФГНС, насыщенной глицерином, так же, как в ЗНС, наблюдалось немонотонное изменение нелинейных параметров, что может быть связано с перестройкой упаковки шаров – изменением количества сильно и слабо поджатых контактов. Результаты работы показали, что на линейные свойства ФГНС (скорость) оказывает влияние, как вид заполняющей жидкости, так и упаковка шаров. Нелинейные свойства ФГНС определяются главным образом контактной нелинейностью, но значения нелинейного параметра в ФГНС меньше, чем в ГНС, за счет влияния жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руденко О.В. // Успехи физ. наук. Т. 176. №1. 2006. С. 77-95.
2. Tournat V., Gusev V.E. // Acta Acustica united with Acustica. 2010. V. 96. P. 208-224.
3. Johnson P. A., Jia X. // Nature. 2005. Vol. 437. P. 871-874.
4. Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Ширгина Н.В. // Акустический журнал. 2012. Т. 58, № 1, с. 103-111.
5. Акуленко Л.Д., Нестеров С.В. // Механика твердого тела. 2008. № 1. С. 1-16.
6. Беляева И.Ю., Зайцев В.Ю., Островский Л.А. // Акустический журнал, 1993, Т.39, №1, с. 25-32.
7. Зайцев В.Ю., Назаров В.Е., Турна В., Гусев В.Э., Кастаньеде Б. // Акустический журнал. 2005. Т. 51. № 5. с. 633-644.