

## РАДИАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ В ВИБРИРУЕМОМ ГРАНУЛИРОВАННОМ СЛОЕ

*И.А. Лазаревич*

В работе изложены результаты экспериментального исследования возникновения динамических структур в гранулированном слое, подверженном вертикальной вибрации. Обнаружены радиальные структуры, экспериментальные наблюдения которых ранее не были описаны в научной литературе. Установлена зависимость формы и масштаба данных структур от толщины слоя, частоты и амплитуды колебаний контейнера.

*Ключевые слова:* Динамические структуры, гранулированная среда, нелинейность, вертикальная вибрация, радиальные структуры.

Гранулированные и сыпучие среды широко распространены в природе и промышленности (например, пищевая, аграрная и строительная промышленности). Подобные среды являются постоянным объектом исследования геологов, ведь именно гранулированные среды принимают участие во многих геологических и тектонических процессах. Таким образом, понимание динамического поведения вышеуказанных сред при различных воздействиях является важной задачей как для ученых, так и для инженеров. Гранулированные материалы способны проявлять свойства как твердых тел, так и жидкостей [1]. Интенсивные исследования свойств подобных материалов привели к открытию многих эффектов, таких как гранулированная конвекция [2], кластеризация и неупругий коллапс [3], формирование периодических и локализованных структур в вертикально вибрируемом слое [4–6]. Вибрируемые гранулированные среды часто проявляют поведение, аналогичное поведению жидкостей. Экспериментальные исследования в этой области продемонстрировали множество видов коллективного поведения частиц, например, формирование гексагональных и квадратных структур [5] и формирование локализованных объектов (так называемых «осциллонов» [4] и одномерных «червеобразных» структур, см. [1]). Теоретическое описание подобных структур в гранулированных средах является довольно сложным. Существуют феноменологические и гидродинамические модели, хорошо описывающие структуры, наблюдаемые в экспериментах [7–9]. Также довольно распространенным способом исследования подобных сред является моделирование множества взаимодействующих частиц в гравитационном поле [10,11]. Одна из феноменологических моделей [8], основанная на параметрическом уравнении

Гинзбурга–Ландау, показала множество мод, способных возникнуть из единичного осциллона. Одной из таких мод является множество «червеобразных» структур, радиально исходящих из единого центра. Таким образом, данная модель предсказала формирование локализованного объекта радиальной природы.

Целью данной работы является экспериментальное исследование условий, при которых происходит образование радиальных структур, а также динамики данных объектов.

## 1. Экспериментальная методика и результаты

Экспериментальная установка (рис. 1) состояла из вибрационного стенда Brüel&Kjær, анализатора сигналов, усилителя и акселерометров. Амплитуда  $A$  и частота  $f$  вибрации, а также форма входного сигнала регулировались. Эксперименты проводились в квадратном контейнере  $12 \times 12 \text{ см}^2$  и округлом контейнере радиусом 15 см. В качестве сыпучей среды был использован речной песок (средний диаметр песчинки – 0.5 мм). Контейнер с песком подвергался вертикальной вибрации. Частота вибрации изменялась от 0 до 70 Гц; амплитуда – от 0 до 2 см. В качестве формы сигнала была использована синусоида (в импульсном и случайно-шумовом режимах структуры, полученные при использовании синусоидального сигнала, не наблюдались). Визуальные данные о поверхности вещества регистрировались с помощью цифровой видеокамеры (JVC Everio). Дно контейнеров укреплялось при помощи эпоксидной смолы слоем в 1 см, для того чтобы снизить влияние мод колебаний контейнера на общую картину поверхности. В противном случае при большом градиенте вибрационного давления частицы стремились бы переместиться из областей с большими флуктуациями в области с меньшими (то есть в системе произошло бы слияние двух проявившихся эффектов – фигур Хладни [12] и исследуемых структур). В ходе экспериментов было установлено, что при таком укреплении дна

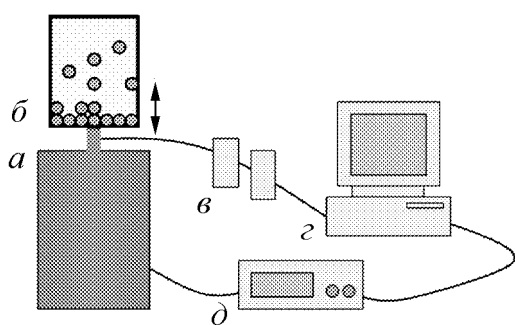


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *а* – вибрационный стенд, *б* – контейнер с материалом, *в* – акселерометры, *г* – анализатор сигналов, *д* – усилитель сигналов

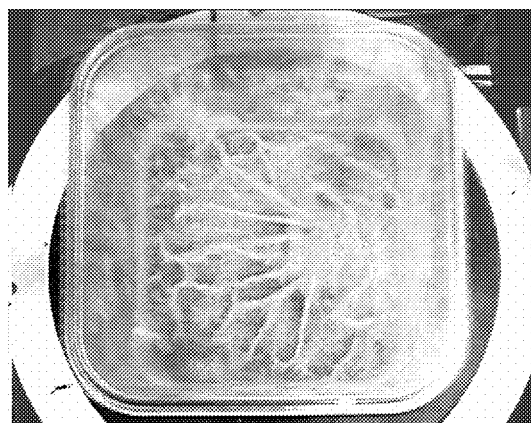


Рис. 2. Образование радиальной структуры (частота вибрации – 18 Гц, амплитуда – 6.0 мм). Толщина слоя – 2.3 см

отчетливая картина аксиальных мод колебаний контейнера видна лишь при частотах выше 75 Гц (с изменением частоты их характерные размеры изменяются). Таким образом, все наблюдаемые в экспериментах картины поверхности являются результатом коллективной динамики частиц.

При проведении экспериментов толщина слоя изменялась, чтобы исследовать зависимость формы возникающих структур от этого параметра. В экспериментах с толщиной слоя порядка 1–1.5 см при различных параметрах вибрации наблюдались исследованные ранее структуры (например, квадратные и лабиринтные структуры). Однако при увеличении толщины слоя до 2–2.5 см характер структур заметно менялся, в частности было обнаружено формирование не наблюдавшихся ранее локализованных радиальных структур (рис. 2). Их формирование происходило при частоте вибрации выше 12 Гц, причем при увеличении частоты масштаб данных структур уменьшался, при этом росло их количество (рис. 3). Постепенно рельеф материала становился неоднородным, на поверхности появлялись выпуклости и впадины, причем впадины имели лабиринтную структуру. Радиальные объекты покрывали образующиеся выпуклости, происходила «конкуренция» между структурами.

При увеличении частоты колебаний до 40 Гц радиальные структуры исчезали, на поверхности вещества оставался лишь лабиринтный рельеф (рис. 4). При увеличении частоты колебаний до 70–75 Гц данный рельеф сглаживался и на поверхности оставалась лишь аксиальная структура мод колебаний контейнера.

В рамках анализа экспериментальных результатов была построена фазовая диаграмма, демонстрирующая

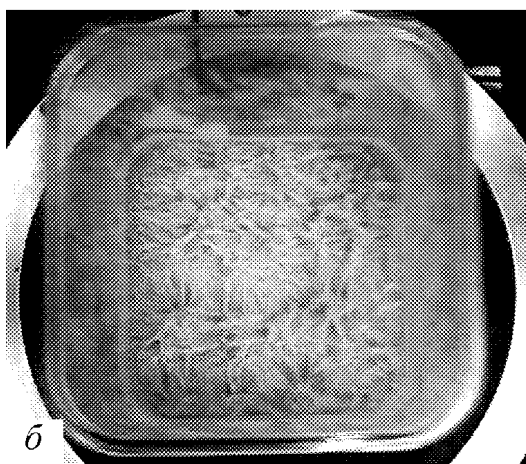
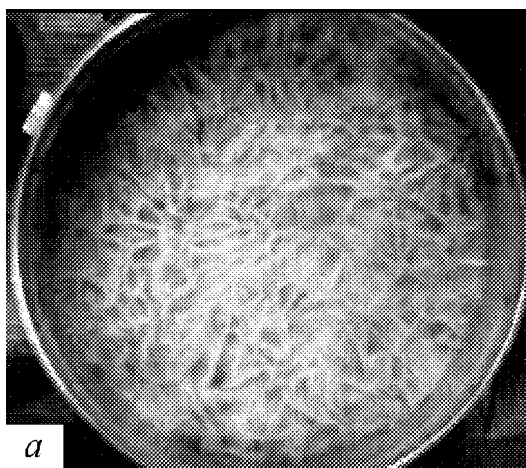


Рис. 3. Рост количества и уменьшение масштабов радиальных структур при увеличении частоты (*а*: частота – 28 Гц, амплитуда – 7.5 мм, толщина слоя – 2 см; *б*: частота – 30 Гц, амплитуда – 6.0 мм, толщина слоя – 2.3 см)

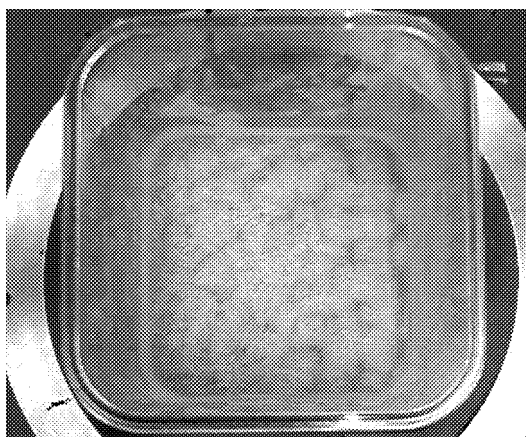


Рис. 4. Радиальные структуры исчезают, на поверхности вещества остается лишь лабиринтный рельеф (частота вибрации – 40 Гц, амплитуда – 6.0 мм) Толщина слоя – 2.3 см

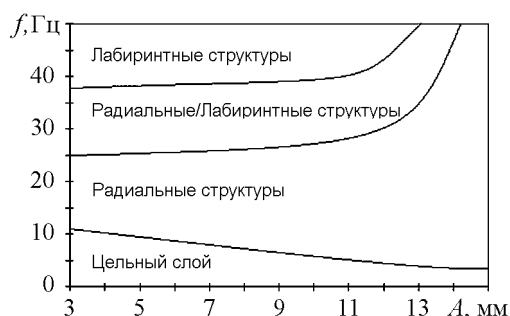


Рис. 5. Фазовая диаграмма, отражающая зависимость наблюдаемых структур от параметров вибрации. Толщина слоя – 2,3 см

характерные структуры, возникающие на поверхности вещества, в зависимости от параметров вибрации (рис. 5).

Фазовая диаграмма демонстрирует, что образование лабиринтного рельефа может происходить только при малых амплитудах. При больших амплитудах колебаний контейнера на поверхности вещества остаются лишь радиальные структуры. И наконец, при амплитуде в 2 см и более, коллективное поведение частиц становится хаотическим (рис. 6).

В некоторых экспериментах в контейнер с речным песком добавлялась пищевая крупа (диаметр частицы крупы – 1 мм) для наблюдения влияния образующихся структур на смешивание и сепарацию двухкомпонентной смеси. В областях фазовой диаграммы, где присутствуют радиальные структуры, процессы смешивания и сепарации проходят менее равномерно. Для более равномерного перемешивания или сепарации стоит использовать режимы с формированием лабиринтных структур (рис. 7). Такие результаты могут иметь прикладное значение, например в аграрной или пищевой промышленности.

В рамках проведенной работы было также выполнено компьютерное моделирование системы, которое продемонстрировало некоторые эффекты, наблюдавшиеся в экспериментах. Система моделировалась как множество сталкивающихся твердых частиц, находящихся на вибрирующей платформе (подобные моделирования были проведены в работах [10,11]). Координаты дна контейнера подчиняются синусоидальной зависимости. При столкновении частиц часть их механической энергии диссипирует, степень диссипации определяется коэффициентом диссипации  $\alpha$ . Между частицами также присутствует кулоновское трение. Проведенные модельные эксперименты демонстрируют некоторые эффекты, например сепарацию частиц по площади поверхности вещества (в случае многокомпонентной смеси) и возникновение конвекционных потоков в объеме вещества. Моделирование также продемонстриро-

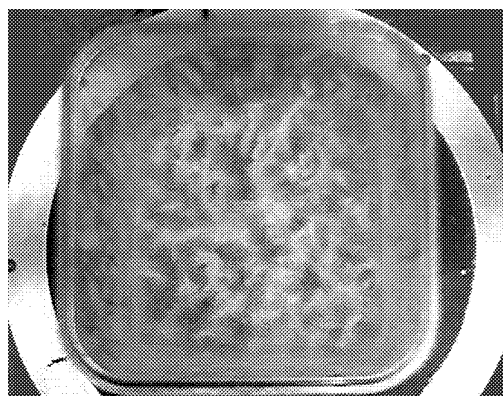


Рис. 6. Движение частиц песка становится хаотическим

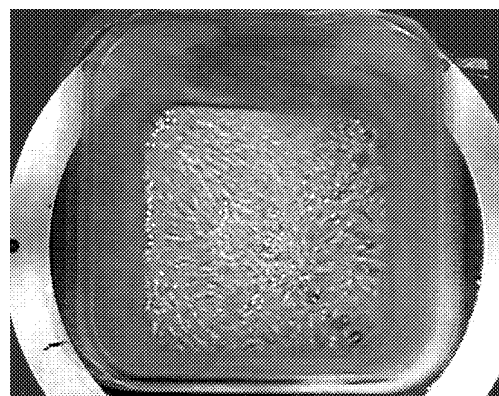


Рис. 7. Влияние лабиринтных структур на смешивание двухкомпонентной среды

вало формирование некоторых структур (аналогичные результаты получены в работе [5]), однако обнаруженные в экспериментах радиальные структуры в численном эксперименте не наблюдались. Возможно, радиальные моды колебаний можно пронаблюдать, изменяя характерные размеры моделируемой системы.

По мнению автора, наиболее действенным методом исследования таких структур может быть подбор феноменологических колебательных или гидродинамических моделей, которые могли бы давать решения, удовлетворяющие всем экспериментальным наблюдениям.

### Заключение и выводы

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования радиальных структур в вертикально вибрируемом гранулированном слое. Подобные структуры не были описаны ранее в научной литературе. Проведен анализ зависимости структурного рельефа вещества от толщины слоя и параметров вибрации. В настоящее время необходим поиск теоретической модели, которая полностью описывала бы множество обнаруженных в данной работе динамических структур.

Автор признателен А.М. Рейману, В.А. Рекшинскому и Е.М. Тиманину за поддержку и полезные обсуждения результатов работы.

### Библиографический список

1. *Jaeger H.M., Nagel S.R., and Behringer R.P.* Granular solids, liquids, and gases // *Rev. Mod. Phys.* 1996. Vol. 68. P. 1259.
2. *Knight J.B., Jaeger H.M., and Nagel S.R.* Vibration-induced size separation in granular media: The convection connection // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. 3728.
3. *Goldhirsh I. and Zanetti G.* Clustering instability in dissipative gases // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. 1619; *Du Y., Hao L., and Kadanoff L.P.* Recent numerical studies of a one dimensional system of inelastic particles // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 74. 1268.
4. *Umbanhowar P., Melo F., and Swinney H.L.* Localized excitations in a vertically vibrated granular layer // *Nature (London).* 1996. Vol. 382. 793.
5. *Bizon C., Shattuck M.D., Swift J.B., McCormick W.D., and Swinney H.L.* Patterns in 3D vertically oscillated granular layers: Simulation and experiment // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 80. P. 57.
6. *Clement E. et al.* Pattern formation in a vibrated two-dimensional granular layer // *Phys. Rev. E.* 1996, Vol. 53. 2972.
7. *Shinbrot T.* Competition between randomizing impacts and inelastic collisions in granular pattern formation // *Nature (London).* 1997. Vol. 389. 574.
8. *Tsimring L.S. and Aranson I.S.* Cellular and localized structures in a vibrated granular layer // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 79. 213.
9. *Crawford C. and Riecke H.* Oscillon-type structures and their interaction in a Swift-Hohenberg model // *Physica D.* 1999. Vol. 129. P. 83.

10. *Ristow G.H. and Herrmann H.J.* Density patterns in two-dimensional hoppers // *Phys. Rev. E.* 1994. Vol. 50. R5.
11. *Aoki K.M. and Akiyama T.* Spontaneous wave pattern formation in vibrated granular materials // *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 77. 4166.
12. *Rossing T.D.* Chladni's law for vibrating plates // *American Journal of Physics.* 1982. Vol. 50. P. 271.

*Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского*

*Поступила в редакцию 23.08.2010  
После доработки 3.11.2010*

## **RADIAL PATTERNS IN A VIBRATED GRANULAR LAYER**

*I.A. Lazarevich*

Laboratory experiments were conducted for a sand layer placed in the vertically-oscillated containers of various shapes. Radial patterns on the sand surface were observed; experimental investigations of such structures have never been described in scientific literature. The waveform, amplitude and frequency of vibrations and the depth of the vibrated layer could be varied, allowing study the dependence of the shape and scale of radial structures upon these parameters.

*Keywords:* Dynamic structures, granular matter, nonlinearity, vertical vibration, radial patterns.



*Лазаревич Иван Александрович* – родился в Нижнем Новгороде. Учился в средней общеобразовательной школе № 49, затем в физико-математическом лицее № 40 в профильном физическом классе при Институте прикладной физики РАН. В настоящее время учится на 1-м курсе факультета «Высшая школа общей и прикладной физики» Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. В мае 2010 года участвовал с проектом по настоящей работе на Международной научно-инженерной ярмарке (Intel ISEF) в городе Сан-Хосе, Калифорния. Работа была поддержана грантами Общества геофизиков-исследователей (Society of Exploration Geophysicists), Американской ассоциации по патентам и торговым маркам (Patent and Trademark Office Society) и корпорации Intel.

603950 Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: vanya.lzr@gmail.com.