

(в выработках выемочного участка) или эндогенного (непосредственно в пределах выработанного пространства) пожара с целью исключения попадания горящей метановоздушной смеси к средствам газоотсоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милетич А.Ф. Утечки воздуха при проветривании шахт / А.Ф. Милетич. – М.: Недра, 1968. – 128с.
2. Лидин Г.Д. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах / Г.Д. Лидин. – М.: Недра, 1961. – 264с.
3. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы / Г.А. Петров. – Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1964. – 201с.
4. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика / Н.Я. Фабрикант. – М.: Наука, 1964. – 816с.
5. Торопчин О.С. Аналитический метод определения линий утечек воздуха через выработанное пространство / О.С. Торопчин, С.А. Головкин, Н.В. Безкровный // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 69. – С. 277-288.
6. Торопчин О.С. Графоаналитический метод определения линий тока утечек воздуха через выработанное пространство / О.С. Торопчин // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 68. – С. 245-258.

УДК 622.7:741.6:532.5:536.2

Канд. физ.-мат. наук В. И. Елисеев,
канд. техн. наук В. И. Луценко,
инженеры С. Г. Кравчина, А. В. Кривокорытов
(ИГТМ НАН Украины)

ВИБРАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВЛАЖНОМ СЫПУЧЕМ СЛОЕ

Описуються різні відомі і нові ефекти, які виникають в насиченою вологою моделі монодисперсної сипучого середовища при впливі вібрацій.

VIBRATION EFFECTS IN A WET LOOSE LAYER

Describes various known and new effects that arise in the model monodisperse granular media saturated with moisture when exposed to vibrations

Известно, что вибрационные воздействия способны оказывать различные, иногда парадоксальные, эффекты на материальные среды. Такие эффекты, возникающие при действии вибраций на системы твердых тел, на частицы и газовые пузырьки в жидкости, на сыпучие среды, описаны в [1-7]. Это устойчивость верхнего положения маятника с вибрирующей осью, изменение эффективной изгибной жесткости стержня, перемещение частиц на вибрирующей поверхности, в том числе подъем твердого тела в вибрирующей трубе с вертикальной осью, расслоение частиц сыпучей среды по удельному весу и плотности (сегрегация), аномальное поведение сыпучей среды в сообщающихся сосудах, интенсивное перемешивание компонент вибрирующей среды, вибротранспортирование сыпучих сред. Для систем многофазных сред экспериментально обнаружено резкое снижение распространения скорости звука в газожидкостной среде, всплытие в жидкости частиц с плотностью большей плотности жидкости и погружение частиц с плотностью меньшей плотности жидкости, в том числе газовых пузырьков, запирание отверстий в баках с жидкостью и вибрационная инжекция газа в жидкость.

Вышеуказанные эффекты оказывают значительное, а иногда и решающее значение на процессы переноса тепла и массы в пористых и сыпучих средах,

поэтому теоретические и экспериментальные исследования условий их возникновения, динамики развития и исчезновения актуальны и практически востребованы. Физическая природа некоторых эффектов достаточно ясна и поэтому они хорошо изучены и даже нашли практическое применение [2], остальные нуждаются в дополнительных исследованиях.

При экспериментальном изучении процесса вибрационного обезвоживания модельного сыпучего слоя визуально нами также наблюдалось несколько интересных эффектов, связанных с действием вибраций. Некоторые особенности этих эффектов удалось зафиксировать с помощью фото- и видеосъемки, а остальные были доступны только зрительно.

Экспериментальный узел (рис. 1) представлял собой стеклянную трубку с внутренним диаметром $16,6 \cdot 10^{-3}$ м и длиной 0,45 м, в нижней части которой была закреплена металлическая сетка.

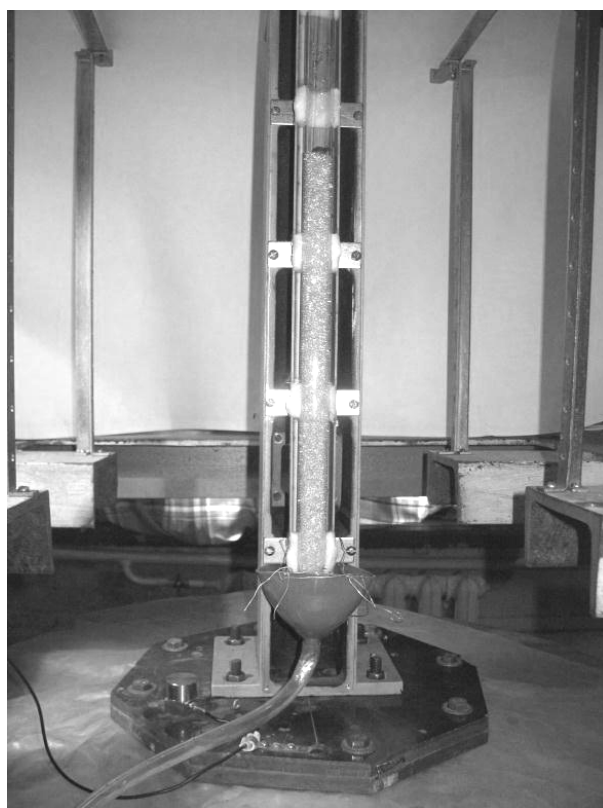


Рис. 1 – Экспериментальный узел

В трубку были засыпаны стеклянные шарики диаметром $(1,95 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ м. Высота слоя шариков равнялась 0,1 м и 0,3 м. Через изолирующие прокладки экспериментальный узел был прикреплен к жесткой пространственной конструкции из алюминиевого сплава, установленной вертикально на столе вибростенда ВЭДС-400А. Под сеткой была установлена воронка, собирающая вытекающую жидкость в измерительный сосуд. В качестве рабочей жидкости во всех опытах использовалась дистиллированная вода. Частота вибраций в экспериментах изменялась в диапазоне 20 – 1000 Гц, виброускорение от 0 до

100 м/с², а время от 30 до 600 с.

Визуальные эффекты

Виброперемешивание. Перемешивание частиц визуально наблюдалось в диапазоне частот 40-70 Гц и виброускорении больше 40 м/с². При частотах 20-40 Гц слой шариков колебался вместе с трубкой как твердое тело. Движения шариков относительно друг друга и относительно трубки на этих частотах не отмечалось. С ростом виброускорения до 100 м/с² интенсивность перемешивания заметно увеличивалась. После достижения частоты 60-70 Гц интенсивность виброперемешивания начинала снижаться и к 80 Гц этот эффект уже не визуализировался.

Эффект вибрационного перемешивания достаточно хорошо известен, изучен, описан в научной и технической литературе и широко применяется в промышленности в различных устройствах для интенсификации процессов массопереноса.

Структурирование дисперсного слоя. В опытах было отмечено, что вибрационное воздействие на слой влажного сыпучего материала приводит к упорядочиванию его структуры практически по всей высоте слоя. Это можно видеть на фотографиях (рис. 2) на примере средней части слоя. Совершенно аналогичная картина наблюдалась и в нижней части слоя. И только в самом верху слоя, структура оставалась неупорядоченной.



Рис. 2 – Структура средней части сыпучего слоя до (левый снимок) и после (снимки в центре и справа) вибровоздействия

Структура, изображенная на центральной фотографии рис. 2, в опытах наблюдалась достаточно часто. Видно, что частицы упакованы довольно плотно, но их центры находятся не на вертикальных линиях. Они смещены относительно друг друга по горизонтали.

Однако, в нескольких экспериментах после воздействия вибраций частицы располагались строго вертикально одна над другой (правая фотография на рис. 2). Какой-либо закономерности в появлении такой строго вертикально ориентированной структуры частиц установлено не было. Вообще говоря, эффекты уплотнения и структурирования полидисперсных сыпучих сред под

действием вибрации известны и также довольно широко применяются в промышленности. Интересным моментом в данном случае является получение именно строго вертикально ориентированного положения частиц в слое. Описание возникновения такой структуры в литературе не было найдено.

Вращательное спиралеобразное движение частиц по стенке сосуда. Этот эффект наблюдался в узком интервале частот 45 ± 2 Гц, при этом проявлялся при подходе к этому интервалу как сверху, так и снизу. Эффект состоял в том, что при приближении к указанной частоте на поверхности сыпучего слоя возникало образование из шариков, по своей природе очень напоминающее смерч. Частицы поднимались с центральной части поверхности слоя и, закручиваясь, начинали быстрое спиралеобразное движение по внутренней окружности трубки. Поскольку движение частиц носило спиралеобразный характер, они один за другим постепенно поднимались по внутренней поверхности трубы и, достигая ее верхнего края, вылетали наружу. Эффект имел явно резонансный характер и сопровождался поперечными колебаниями стойки, на которой была укреплена трубка.

Эффект был зафиксирован с помощью видеосъемки. К сожалению, с помощью статических фотографий нельзя показать динамику возникновения, реализации и исчезновения этого эффекта, а видеофайл разместить в рамках данной публикации не представляется возможным.

Физическая природа этого эффекта достаточно ясна, хотя и отличается от природы эффектов, описанных в [1, 2]. Возможны даже его количественные оценки. Эффект может найти разнообразные практические применения. Например, известно, что при вибрационном обезвоживании часть жидкости остается в капиллярах в нижней части слоя, а часть в перетяжках между частицами. Используя описанный выше эффект, в определенных специальных случаях, можно осуществлять отбор частиц сверху слоя, через отверстия в боковой стенке трубки. В результате, в конечном продукте будет полностью отсутствовать капиллярная влага. А за счет того, что будут разрушены перетяжки, не будет и стыковой жидкости. Таким образом, относительная влажность будет снижена по сравнению с классическим случаем. Возможно, одновременно с обезвоживанием, можно будет осуществлять и классификацию по размерам. А учитывая резонансную природу эффекта, дополнительных затрат внешней энергии не потребуется.

Подъем влажных частиц по стенке сосуда. Самым интересным среди наблюдавшихся визуальных эффектов проявления действия вибраций на сыпучий слой был эффект движения отдельных частиц и целых групп частиц вверх по внутренней стенке трубки против действия сил тяжести (рис. 3).

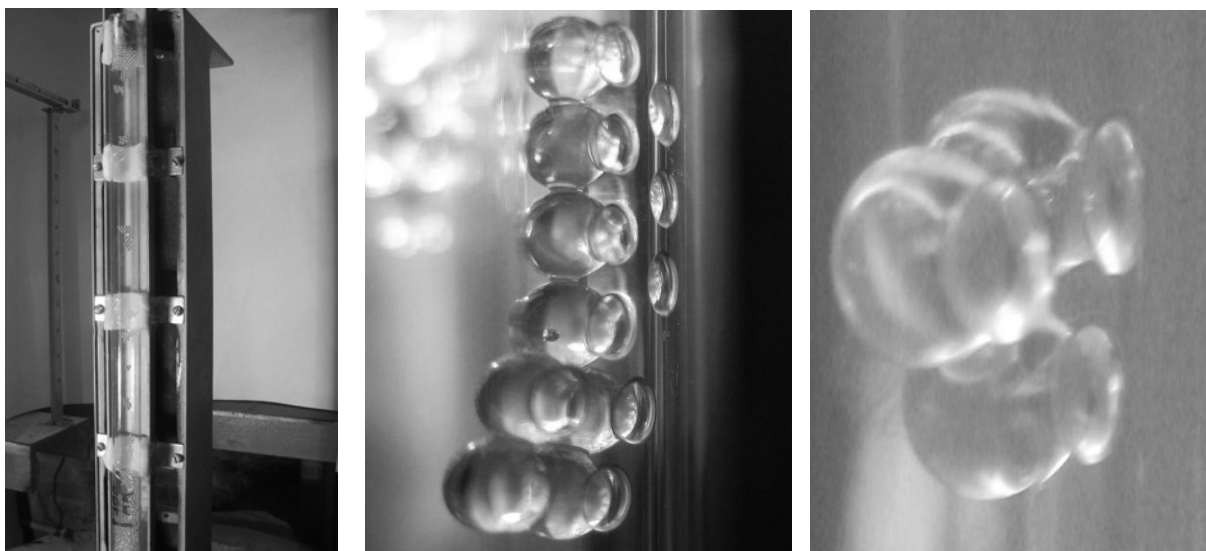


Рис. 3 – Вертикальное перемещение влажных стеклянных шариков против силы тяжести в вибрационном поле

Этот эффект отличался от описанного выше тем, что скорости движения частиц были значительно меньше, а их траектории движения близки к прямолинейным и направлены практически вертикально вверх. Следует сразу отметить, что в данном случае видимые поперечные колебания трубки с сыпучим слоем полностью отсутствовали. Об этом же свидетельствовали четкие очертания контуров трубки на видео- и фотосъемке. Эффект проявлялся в широком диапазоне частот, при этом на одних частотах поднимались отдельные частицы, на других группы из 3–5 частиц, на третьих целые ансамбли. Высота поднятия достигала 0,35 м, т. е. до верхнего края трубки. Это при том, что плотность частиц была 2500–2600 кг/м³. Аналогичный эффект наблюдался и для частиц из гранита произвольной формы. Для частиц из полистирола, плотность которого чуть больше плотности воды, эффект был еще более разительным. В этом случае частицы поднимались вверх по стенке сплошным потоком до верхнего края трубки и при отсутствии ограничивающей вставки высыпались наружу.

При увеличении фотографий поднимающихся частиц было замечено, что между частицами и поверхностью трубки находится жидкостной слой круговой формы в сечении, а между самими частицами имеются перетяжки стыковой жидкости (рис. 4, центральный и правый снимки). Очевидно, что присутствие жидкости играло определяющую роль в существовании этого явления.

Обнаруженный в экспериментах эффект, по-видимому, самым непосредственным образом связан со сравнительно недавно открытым явлением “прыгающей” капли жидкости, поднимающейся вверх по почти вертикальной стенке. (Brunet, Eggers & Deegan. *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, 2007, p. 144501 и *Eur. Phys. J.*, vol. 166, 2009. - P. 11-14) [8]. Однако, в нашем случае капля жидкости обременена грузом, в виде частицы, и характер движения здесь, в отличие от “прыжков”, можно назвать “ползущим”. Объяснение этого

эффекта наталкивается на ряд еще недостаточно изученных и, соответственно, плохо поддающихся вычислениям таких явлений, как расклинивающее давление и гистерезис смачивания [9, 10], в данном случае еще и находящихся в поле вибрационных сил [11 - 13]. К этому необходимо добавить и математические трудности, связанные с общей постановкой задачи [14]. В настоящее время известно, что на поверхностях висящих капель жидкости, на линии контактов жидкости и твердого тела, образуются углы смачивания, различающиеся друг от друга в зависимости от угла наклона этой поверхности к горизонту [15]. В сравнительно недавней работе [16] были измерены углы менисков, как в равновесном состоянии, так и при некотором статическом нагружении и было показано, что максимальные и минимальные углы довольно существенно отличаются друг от друга. При движении капли в [14] введены понятия углов натекания и оттекания. В качественной математической модели при объяснении эффекта “прыгающей капли” в [17] использованы понятия предельных углов смачивания. Таким образом, в основе замеченного нами эффекта также присутствует этот элемент физической закономерности взаимодействия жидкости с твердым телом. Кроме этого, для превышения предельных углов смачивания при движении необходимы сильные возмущения поверхности жидкости. В обнаруженном эффекте они создаются как колеблющимся твердым телом, так и самой поверхностью жидкости с образованием капиллярных волн. Здесь также возможно некоторое резонансное самосинхронизирующееся взаимодействие твердого тела с волновым движением поверхности жидкости.

Обнаруженный эффект вертикального перемещения смоченных тяжелых твердых частиц под действием вибраций в направлении противоположном действию силы тяжести нуждается в дальнейшем изучении механизмов его возникновения и возможностей практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах. - М.: Машиностроение, 1978-1981.
- 2 Блехман И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. - М: Физматлит, 1994. - 400 с. (Англ. перевод: *Vibrational Mechanics*. - World Scientific, Singapore et al, 2000. - 509 p.).
- 3 Нелинейные эффекты при истечении жидкости из вибрирующих сосудов / И.И. Блехман, Л.И. Блехман, Л.А. Вайсберг [и др.] // Доклады Российской Академии наук. - 2003. - Т. 391. - № 2. - С. 185-188.
- 4 “Аномальные” явления в жидкости при действии вибрации / И.И. Блехман, Л.И. Блехман, Л.А. Вайсберг [и др.] // Доклады Российской Академии наук – 2008. - Т. 422. - № 4. - С. 470–474.
- 5 Челомей В.Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями / В.Н. Челомей // ДАН СССР. Механика. - 1983. - Т. 270. - № 1. - С. 62-67.
- 6 Динамика упругогазожидкостных систем при вибрационных воздействиях / В.Д. Кубенко, В.Д. Лакиза, В.С. Павловский, Н.А. Пелых. – Киев: Наукова Думка, 1988. – 256 с.
- 7 Тепломассообмен и вибрация / Под общ. ред. Приснякова В. - Одесса: «Нептун-Технология», 2001. - 208 с.
- 8 Brunet P. Motion of a drop driven by substrate vibrations / P. Brunet, J. Eggers, R. D. Deegan // *The European Physical Journal. Special Topics*. – 2009. – V. 166. – P. 11-14.
- 9 Сумм Б.Д. Гистерезис смачивания / Б.Д. Сумм // Соровский образовательный журнал. – 1999. - № 7. - С. 98-102.
- 10 Елисейев В. И. Статические гистерезисные явления в капиллярах / В. И. Елисейев, В. И. Луценко // Геотехническая механика : Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 66. – С. 157-163.
- 11 Elisayev V. I. The phenomena of the hysteresis in capillaries / V. I. Elisayev, V. I. Lutsenko, V. F. Prisniakov // *Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources: VII Minsk International Seminar*. – Minsk : ITMP, 2008. – P. 388-394.

- 12 Влияние вибраций на статическое положение мениска движущейся в капилляре жидкости / В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко, И. П. Хмеленко // Вісник Національного технічного університету ХПІ : зб. наук. праць / ХПІ. – Харків, 2011. – № 59. – С. 104-111.
- 13 Елисеев В. И. Экспериментальное изучение влияния вибраций на устойчивость перетяжки жидкости между двумя сферическими частицами / В. И. Елисеев, В. И. Луценко, Н. П. Анфимова // Дисперсные системы : Материалы междунаро. конф., 17-21 сентября 2012 г. – Одесса : ОНУ, 2012. – С. 87-88.
- 14 Dong L. Lateral vibration of a water drop and its motion on a vibrating surface / L. Dong, A. Chaudhury, M. K. Chaudhury // European Physical Journal. E. – 2006. – № 21. – P 231-242.
- 15 Сумм Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
- 16 Волков В. И. Экспериментальное исследование гистерезиса смачивания / В. И. Волков, С. С. Лескова, Е. Р. Кирколуп // Известия Алтайского гос. ун-та. – Барнаул : АлтГУ, 2006. – Вып. 49, № 1. – С. 106-111.
- 17 Benilov E. S. Drops climbing uphill on a slowly oscillating substrate / E. S. Benilov // Physical Review E. – 2010. – № 82. – P. 1-8.

УДК 622.273.217.2

Д-р техн. наук П.Н. Должиков,
инж. П.Г. Фурдей
(ДонГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ТРУБАХ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ТАМПОНАЖНО- ЗАКЛАДОЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Експериментально досліджено залежність гідравлічного опору від швидкості руху та концентрації золошлакових суспензій при течії по трубах. Встановлена критична швидкість руху концентрованих гідросумішей.

THE RESEARCH OF HYDRAULIC RESISTANCES OF TAMPONADE LAYING OF ASH-SLAG SUSPENSIONS AT MOTION IN PIPES

Dependence of hydraulic resistance is experimentally set from the rate of movement of ash-slag suspensions at a flow on pipes. The critical speed of motion of the concentrated slurries is set.

В последние годы в мировой практике проводятся широкомасштабные исследования параметров технологии и выбор оборудования для решения вопросов захоронения в технологическом пространстве шахт как собственных твердых отходов обогатительных фабрик, так и золы электростанций [1, 2].

К настоящему времени в промышленных условиях опробованы и дали положительные результаты технологические решения по утилизации мелкодисперсных отходов ТЭС посредством трубопроводного транспорта на основе использования энергии сжатого воздуха или использования высококонцентрированных гидросмесей с последующим тампонирующим ими обрушенного выработанного пространства очистных забоев.

На поверхности шахты готовится золошлаковая суспензия: эта смесь подается в трубопровод, проложенный по стволу или по скважине. Далее гидросмесь транспортируется по трубам к очистному забою, где поступает в изгибающийся распределительный трубопровод, проложенный по очистному забою и прикрепленный к забойному конвейеру. К распределительному трубопроводу присоединены через определенный интервал патрубки длиной 10...15 м, по которым гидро-