

ВСПЛЫВАНИЕ ТЯЖЕЛОГО ШАРА В ВИБРИРУЮЩЕМ ПЕСКЕ

Представлены материалы экспериментального исследования процесса движения шара в вибрирующей сыпучей среде, в результате анализа которых установлена линейная зависимость средней скорости всплывания шара от величины его диаметра.

Эффекты движения однородной вибрирующей сыпучей среды в осциллирующем поле ускорений, сравнимых по амплитуде с ускорением силы тяжести (режим виброоживления) или превышающих последнее (режим виброкипения), достаточно хорошо известны и применяются в промышленности [1]. Изучению процессов всплывания тяжелого и погружения легкого тела в вибрирующей жидкости посвящен ряд работ экспериментального [2] и теоретического [3] характера. Закономерности вибрационного разделения (сегрегации) равномерной смеси частиц с диаметрами двух сильно различающихся размеров исследованы в [4] методами численного эксперимента на двумерной модели. Вертикальное движение одиночного шара в горизонтальном слое вибрирующей сыпучей среды ранее экспериментально не изучалось и работы по этому направлению в литературных источниках автором не обнаружены. Однако эта задача представляет интерес для технических приложений и для геофизики в связи с необходимостью изучения отмеченных в литературе аномальных эффектов «всплывания» при землетрясении крупных глыб и валунов, обычно залегающих под слоем мелкозернистых осадочных пород [5].

Эксперименты выполнялись на виброустановке, обеспечивающей движение сыпучей среды в переменном поле силы тяжести, возникающем при вертикальных колебаниях вибратора. Экспериментальная установка представляла собой цилиндрический резервуар диаметром 50 см и высотой 20 см, оборудованный в донной части плоским коаксиальным вибратором диаметром 20 см (рис. 1). Вибратор обеспечивал колебания слоя сухого песка толщиной до 15 см с ускорениями до 25 м/с^2 при постоянной амплитуде колебаний вибратора 0,1 см и изменении частоты f в диапазоне от 1 до 25 Гц. Исследуемый шар устанавливался на дно песчаного слоя и после включения вибратора на фиксированной частоте через некоторое время оказывался на поверхности песка. Толщина слоя песка изменялась в диапазоне от 4 до 10 см и измерялась в каждом опыте до включения вибратора и после всплывания шара. В экспериментах использовались шары диаметром D от 4 до 45 мм, изготовленные из дерева, пробки, глины, парафина, стекла, полистирола, железа, алюминия, свинца.

В основной серии опытов регистрировалась средняя скорость движения шара V как отношение толщины слоя песка к средней продолжительности движения шара от дна к поверхности, измеряемой секундомером. Кроме того, исследовался закон движения шара с помощью системы (рис. 1), включающей тонкую нерастягивающуюся нить, легкую стрелку индикатор и растянутую упругую нить (для поднятия стрелки). Применение системы с упругой нитью позволяло определить значение минимальной частоты, при которой начинается всплывание шара, зафиксировать момент начала движения и изменение скорости на начальном участке движения шара. Общее количество опытов с шарами различного диаметра составило более 200, ошибка в определении скорости в единичном измерении не превышала 5%. Влияние слабо растянутой резиновой нити не вносило дополнительной погрешности в результаты измерений.

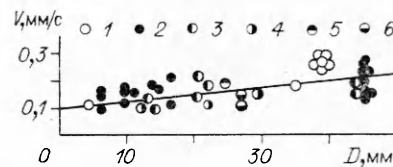
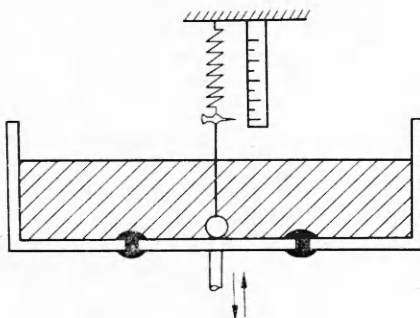


Рис. 2

Рис. 1

Проведенные опыты позволили найти значение пороговой частоты всплывания шара $f_{\min} = 20$ Гц, зафиксировать начальную скорость движения шара при этой частоте $V_{\min} = 0,1$ мм/с и исследовать характер изменения средней скорости подъема шаров различного диаметра из разных материалов в диапазоне частот колебаний вибратора от 20 до 24 Гц, что соответствует средним значениям ускорения $8 \div 11,5$ м/с².

Обработка материалов измерений средней скорости всплывания шара с учетом траектории его движения в песке дала возможность установить эмпирическую зависимость скорости V (мм/с) от диаметра шара D (мм): $V = \alpha + \beta D$, где $\alpha = 0,1 \pm 0,02$, $\beta = 2,5 \cdot 10^{-3}$ — числовые коэффициенты.

Установленная зависимость скорости всплывания шара от его диаметра, проиллюстрированная рис. 2, выполняется в диапазоне частот колебаний вибратора от 20 до 24 Гц и оказывается практически нечувствительной к изменению плотности материала шара, которая варьировалась в опытах от 0,3 до 11,3 г/см³ (точки 1 — свинец, 2 — железо, 3 — стекло, 4 — полистирол, 5 — парафин, 6 — пробка).

В результате проведения дополнительной серии экспериментов обнаружено, что при работе установки в режиме виброкипения ($f \geq 25$ Гц) средняя скорость всплывания шара возрастает почти на порядок. При этом сохраняется общий характер зависимости скорости от диаметра шара, но значительно увеличиваются разброс значений и погрешность измерений. С помощью меток, нанесенных на шаре, установлено, что в процессе подъема шар сохраняет свою пространственную ориентацию (не вращается).

Феноменологическую модель процесса перемещения шара в вибрирующем песке можно представить, используя «принцип храповика». Верх шар смещается под действием силы вибрации, вытесняя некоторый малый объем песка, находящегося в состоянии виброоживления. Движение шара вниз в соседнем полцикле исключено или может быть реализовано лишь частично, так как освободившийся внизу объем заполняется осыпавшимся песком за промежуток времени, меньший продолжительности подъема шара.

Отметим, что если для всплывания тяжелого тела в жидкости [3] необходимо обеспечить скорости вибрации порядка 1 м/с, то всплывание шара в вибрирующем песке реализуется при скоростях около 10 см/с и средних значениях ускорения порядка 8 м/с². Такие значения скорости и ускорения являются типичными для сильных землетрясений.

Отсюда следует, что средняя скорость всплывания глыбы диаметром 1 м при сильных сейсмических колебаниях грунта может достигать 1 и даже 10 см/с в соответствии с установленными экспериментальными зависимостями. Учитывая, что средняя продолжительность землетрясения магнитудой более 7,5 (по шкале Рихтера) составляет приблизительно 100 с, получим реальную величину перемещения глыбы в сыпучем грунте порядка 1—10 м в течение одного сейсмического события.

В течение геологического отрезка времени количество сильных землетрясений в одном регионе могло исчисляться десятками и даже сотнями, что должно было приводить к перемещению крупных глыб на десятки метров вверх. Такого рода аномалии в гранулометрическом составе грунта, когда крупные глыбы располагаются выше мелкообломочного материала, отмечаются в геологической литературе по сейсмоактивным районам [5, с. 146] и получают правдоподобное объяснение в рамках вышеизложенных представлений о всплывании тела в вибрирующем песке.

Автор выражает признательность П. В. Сасорову и В. И. Шпире за стимулирующие обсуждения и А. А. Симонову за помощь в экспериментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаревич И. Ф. Вибрация — нестандартный путь. — М.: Наука, 1986.
2. Челомей В. Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями // ДАН СССР. — 1983. — Т. 270, № 1.
3. Луговцов Б. А., Сенников В. Л. О движении тела в вибрирующей жидкости // ДАН СССР. — 1986. — Т. 289, № 2.

4. Rosato A., Strandburg K. J., Prinz F., Swendsen R. H. Why the Brazil nuts are on top: size segregation of particulate matter by shaking // Phys. Rev. Lett.— 1987.— V. 58, N 10.
5. Геология и сейсмичность зоны БАМ/Под. ред. Н. А. Логачева.— Новосибирск: Наука, 1983.

г. Люберцы

Поступила 26/1 1989 г.,
в окончательном варианте — 10/XI 1989 г.

УДК 532.529.6

П. К. Волков

ДВИЖЕНИЕ ЦЕПОЧКИ ПУЗЫРЬКОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ С ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТЬЮ

В барботажных аппаратах или при равномерном пропускании пузырьков газа через трубку, заполненную жидкостью, наблюдаются регулярные цепочки пузырьков, движущихся друг за другом, практически одинаковых по форме. Очевидно, что скорость всплытия их в этом случае отличается от скорости одиночного пузырька такого же размера, а картина течения существенно зависит от расстояния между ними. Теоретическое и экспериментальное исследование представляет значительные трудности и в настоящее время. Пожалуй, только [1], где получены продольные компоненты вектора скорости по сечению трубы за пузырьком и измерено трение на стенке трубы, дает некоторое количественное представление о гидродинамике процесса.

В данной работе предложен алгоритм численного решения задачи о стационарном движении цепочки пузырьков в вязкой жидкости в вертикальной трубе под действием силы Архимеда. Получены результаты для случаев, когда стенки трубы практически не оказывают влияния на процесс всплытия и когда оно является определяющим.

1. Постановка задачи. В системе координат, связанной с центром масс какого-нибудь пузырька, труба движется вниз с постоянной скоростью u , равной скорости всплытия пузырька, а жидкость обтекает эту цепочку. Теперь для описания движения всей цепочки достаточно рассмотреть обтекание одного пузырька. Поскольку задача периодическая, на расстоянии L вверх и вниз от центра масс пузырька картина течения одна и та же; величина периода равна $2L$.

Введем сферическую систему координат (r, θ, φ) с началом O , совпадающим с центром масс пузырька (рис. 1). Пусть $r = R(\theta)$ ($\theta \in [0, \pi]$) — уравнение поверхности пузыря. R_k — радиус трубы. Уравнения Навье — Стокса вязкой несжимаемой жидкости в переменных вихрь ω — функция тока ψ с учетом осевой симметрии имеют тот же вид, что и в [2, 3].

Краевые условия отличаются от описанных в [3] только на сечениях Γ_1 ($r = L/\cos \theta$, $\theta \in [0, \theta^*]$) и Γ_2 ($r = -L/\cos \theta$, $\theta \in [\pi - \theta^*, \pi]$), $\text{tg } \theta^* = R_k/L$, где задаются условия периодичности, отражающие тот факт, что значения функций скорости и их производных по нормали к границам Γ_1 и Γ_2 совпадают. Как следует из [4], в терминах вихрь ω — функция тока ψ они имеют вид (z — направление вдоль оси трубы)

$$(1.1) \quad \psi|_{\Gamma_1} = \psi|_{\Gamma_2}, \quad \partial\psi/\partial z|_{\Gamma_1} = \partial\psi/\partial z|_{\Gamma_2}, \\ \omega|_{\Gamma_1} = \omega|_{\Gamma_2}, \quad \partial\omega/\partial z|_{\Gamma_1} = \partial\omega/\partial z|_{\Gamma_2}.$$

Задача с условиями (1.1), очевидно, отличается от решаемой в [3], где на входе и выходе задан вектор скорости. Условия (1.1) означают, что профиль вектора скорости на границах Γ_1, Γ_2 должен быть найден одновременно с функциями течения.

2. Алгоритм решения. Поскольку усложнение задачи касается только краевых условий, для решения ее используем тот же метод, что и в [3]. Замена переменных $\eta = (r - G(\theta))/(R(\theta) - G(\theta))$,

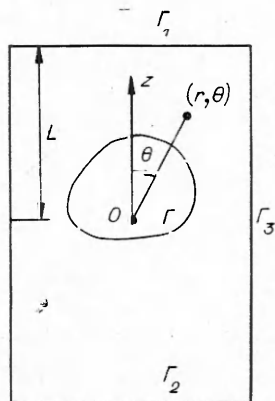


Рис. 1