

УДК 624.131 (575.2)(04)

## ИЗМЕНЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В СЫПУЧИХ СРЕДАХ ПРИ ВИБРАЦИЯХ

*П.В. Ильичёв, Б.Ц. Манжиков, А.В. Гринин*

Исследовалось изменение угла естественного откоса для сыпучей среды под действием вибраций. В качестве модельного материала использовалась мелкозернистая поваренная соль.

*Ключевые слова:* сыпучая среда; естественный откос; внутреннее трение; сцепление; Кулон; сдвиг; сопротивляемость сдвигу; вибрации.

**Введение.** Горные породы содержат множество структурных дефектов в виде трещин и пор. Вследствие этого прочность трещиноватых пород в основном определяется сдвиговыми характеристиками трещин и их заполнителя, свойства которых при многократных подвижках приближаются к свойствам сыпучих сред. Трещиноватость пород снижает устойчивость горных склонов, бортов карьеров, откосов транспортных магистралей. Особенно заметно это снижение становится при воздействии на них вибраций. В связи с этим приобретает актуальность вопрос о влиянии вибраций на сдвиговые характеристики трещиноватых горных пород и грунтов.

В данной работе исследовалось влияние низкочастотных вибраций на изменение угла естественного откоса свободно отсыпанного конуса из зернистого материала. Представляется, что с определенными оговорками результаты эксперимента можно распространить на зоны влияния разломов, в пределах которых порода оказывается сильно трещиноватой, раздробленной и перемятой. В силу чего внешние механические воздействия в виде слабых вибраций могут в большей степени оказывать влияние на эти зоны по сравнению с массивными сплошными породами вне зоны влияния разлома [1].

Как известно, сопротивляемость сдвигу зернистых и сыпучих грунтов определяется силами внутреннего трения и отчасти структурного сцепления [1–3]. Она выражается линейной зависимостью впервые установленной Кулоном для сыпучих грунтов:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

где  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $\varphi$ ,  $c$  – соответственно, сопротивление сдвигу, нормальное напряжение, угол внутреннего трения и структурное сцепление.

Характерное для скальных пород структурное сцепление, обусловленное наличием жестких связей между частицами материала, практически отсутствует в сыпучих средах подобных рыхлому песку, щебню и т.д. В таких зернистых средах оно возникает лишь при их уплотнении и обуславливается, главным образом, взаимным зацеплением зерен. Фактор плотности играет заметную роль лишь при отсутствии разуплотнения грунта в процессе его деформирования. Угол внутреннего трения повышается с увеличением содержания в грунте крупных включений, уменьшением окатанности слагающих породу зерен и увеличением его плотности [1].

В экспериментах рассматривалось изменение формы свободно отсыпанного конуса из сыпучего материала под действием вибраций. При этом учитывалось, что для сыпучих сред, находящихся в рыхлом состоянии, угол свободно отсыпанного откоса (угол естественного откоса) с горизонтальной поверхностью оказывается равен углу внутреннего трения [1].

В качестве модельного материала использовалась выварочная мелкозернистая поваренная соль сорта “Экстра” ГОСТ 13830, ГОСТ Р 51574, имеющая гранулометрический состав: до 0,8 мм включительно – не менее 75 %, от 0,8 мм до 1,2 мм включительно – не более 25 %.

Эксперименты проводились на простейшей установке (рис. 1).

Соль свободно высыпалась на горизонтальную плоскую поверхность с небольшой высоты из воронки через отверстие диаметром 2,5 мм, в результате чего формировалась соляная горка в виде прямого конуса с углом естественного откоса равным углу внутреннего трения. Количе-

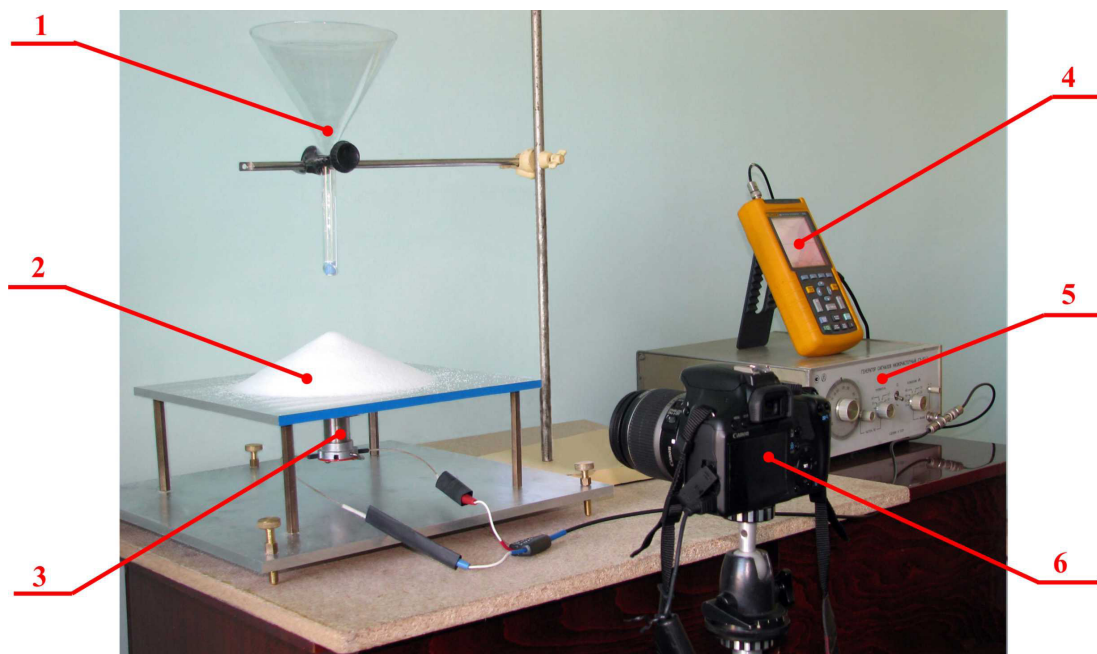


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – стеклянная воронка для соли; 2 – соляной конус; 3 – вибратор; 4 – осциллограф; 5 – генератор ГЗ-112; 6 – цифровая фотокамера.

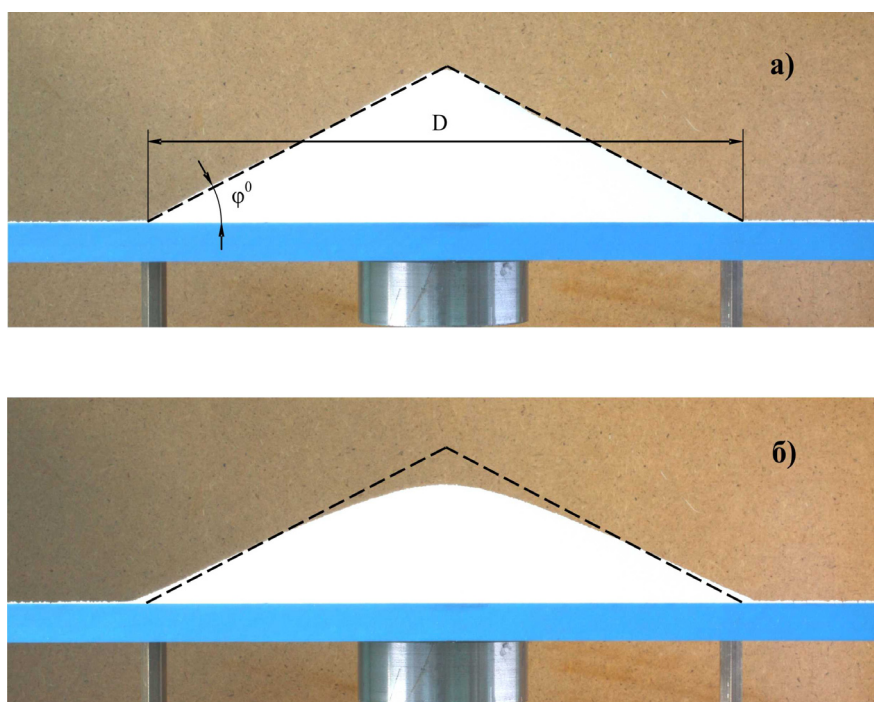


Рис. 2. Соляной конус: а – до подачи вибраций, б – через 30 минут после включения вибраций.

ство соли ( $\approx 0,4$  кг) было одинаковым во всех экспериментах. Это обеспечивало идентичность условий при каждом эксперименте и повышало точность вычисления угла естественного откоса при обработке и анализе результатов эксперимента. Вибрационные воздействия осуществлялись после того как вся соль высыпалась из воронки и завершалось формирование соляного конуса.

С нижней стороны стального листа, на который насыпалась соль, с помощью магнита закреплялся вибратор, в качестве которого использовался сейсмодатчик электродинамического типа СВ-30, работающий в режиме излучателя. Датчик возбуждался синусоидальным сигналом от низкочастотного генератора ГЗ-112. Амплитуда сигнала на выходе генератора выбиралась максимально возможной ( $\approx 15$  В), при которой еще сохранялась неискаженная синусоидальная форма сигнала.

Изменения формы соляного конуса, происходившие под действием вибраций, через каждые 30 секунд фотографировались в автоматическом режиме с помощью установленной неподвижно цифровой фотокамеры, подключенной к персональному компьютеру. Вибровоздействие продолжалось до тех пор, пока визуально наблюдалось изменение формы соляного конуса. Это время составляло около 30 минут. Эксперименты повторялись при постоянной амплитуде и различной частоте вибраций: 10, 20, 25, 30, 40 и 50 Гц. В общей сложности было зарегистрировано и обработано около 1400 фотографий.

**Экспериментальные результаты.** Общий вид конуса, сформированного путем свободной отсыпки соли в отсутствии вибраций, приведен на рис. 2а, на рис. 2б представлена форма соляного конуса через 30 минут после включения вибратора. Пунктиром показаны контуры эквивалентного конуса, сформированного до подачи вибраций, размеры которого определялись в процессе цифровой обработки его фотоизображения.

Под действием вибраций уменьшалась высота, и увеличивался диаметр соляного конуса (рис. 2б). При этом из-за неравномерной усадки соли конус нередко утрачивал правильную форму, что затрудняло определение его высоты геометрически с помощью построения касательных к образующим. По этой причине угол естественного откоса конуса определялся расчетным путем как угол при основании эквивалентного прямого конуса.

С помощью цифровой обработки полученных изображений определялись диаметр основания конуса  $D$  и площадь его сечения  $S$

вертикальной плоскостью, проходящей через его вершину (рис. 2а). За площадь сечения конуса принималась площадь контрастной белой фигуры его изображения на фотографии. Считалось, что указанная площадь равна площади сечения эквивалентного прямого конуса. Диаметр основания эквивалентного конуса определялся также программно как ширина описанного прямоугольника для указанной выше контрастной белой фигуры. Угол естественного откоса соляного конуса  $\varphi$  вычислялся как угол при основании эквивалентного конуса. Высота эквивалентного конуса  $H_3$  определялась из равенства измеренной площади сечения конуса и площади сечения эквивалентного конуса  $S_3$ :

$$S = S_3 = H_3 \cdot D/2; H_3 = 2S/D.$$

Тогда тангенс угла естественного откоса конуса вычисляется из измеренных значений  $D$  и  $H_3$ , являющихся основанием и высотой равнобедренного треугольника, представляющего собой сечение эквивалентного конуса по формуле:

$$\operatorname{tg} \varphi = 2H_3/D.$$

Подставив в эту формулу значение для  $H_3$ , получим:

$$\operatorname{tg} \varphi = 4S/D^2. \quad (2)$$

Временные зависимости изменения диаметра соляного конуса и угла откоса, происходящие под действием вибраций показаны на рис. 3.

Как можно видеть из графиков, в начале вибровоздействий происходят наиболее резкие изменения формы конуса, которые со временем постепенно затухают. Это свидетельствует о кумулятивном характере вибровоздействий, которые они оказывают на сыпучую среду.

Последние зависимости (рис. 3б), построенные в полулогарифмических координатах (рис. 4), достаточно хорошо описываются линейным уравнением:

$$\varphi = \varphi_0 - k \cdot \lg t, \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  – первоначальный угол естественного откоса соляного конуса сформированного до вибровоздействий;  $k$  – угловой коэффициент графика в полулогарифмических координатах, зависящий от параметров вибрации (частоты, амплитуды), имеющий смысл скорости изменения угла внутреннего трения под действием вибраций,  $t$  – время.

Числовые значения величин, входящих в уравнение (3) для некоторых частот вибровоздействий, приведены в таблице.

С учетом последней формулы зависимость (1) можно записать как:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}(\varphi_0 - k \cdot \lg t) + c, \quad (4)$$

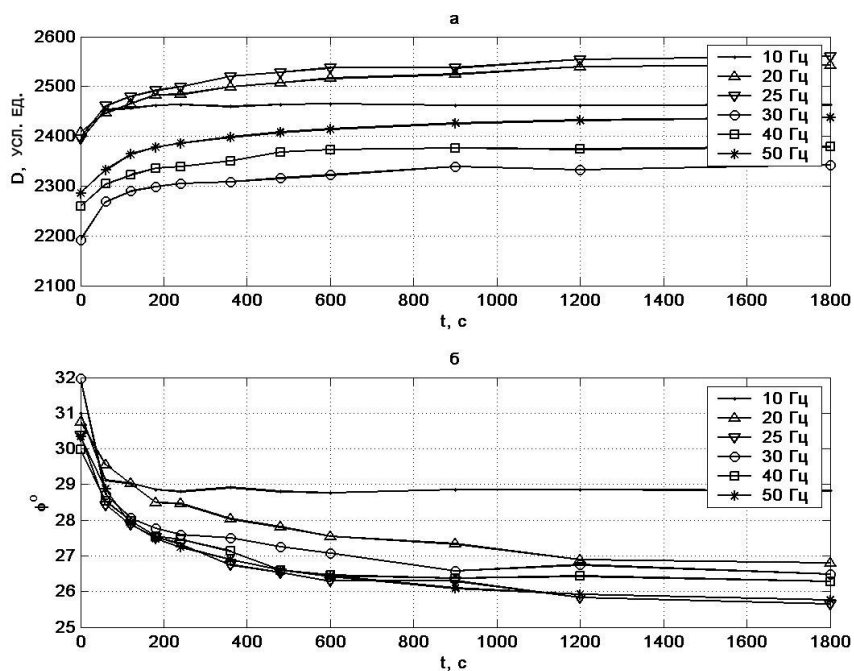


Рис. 3. Изменение диаметра (а) и угла откоса соляного конуса (б) во время вибрации.

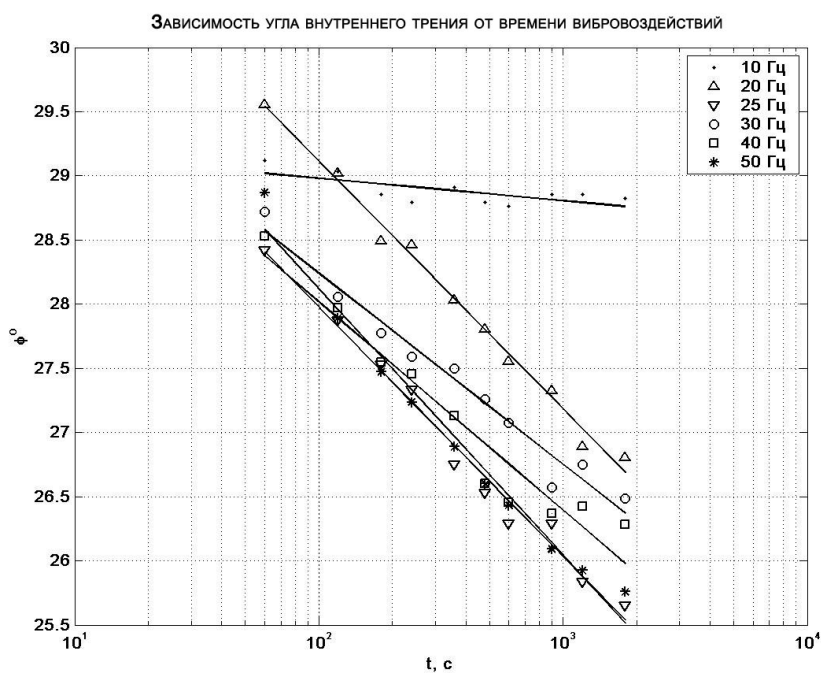


Рис. 4. Временные зависимости изменения угла естественного откоса соляного конуса при разных частотах вибровоздействий.

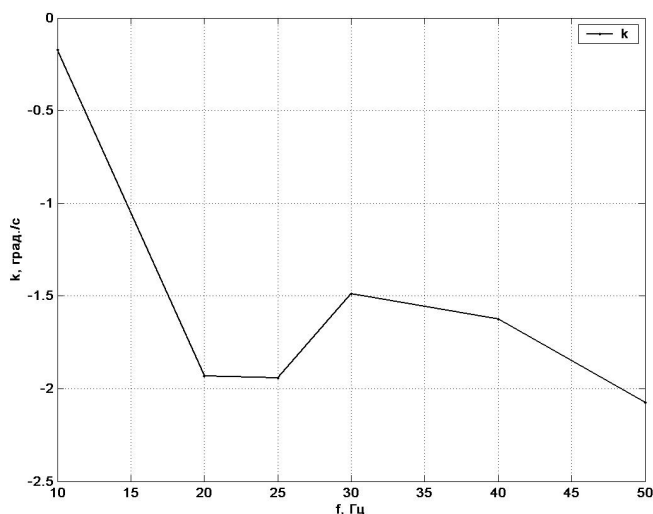


Рис. 5. Зависимость скорости изменения угла естественного откоса от частоты вибровоздействий.

где, как и прежде  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $\varphi_0$ ,  $c$  – соответственно, сопротивление сдвигу, нормальное напряжение, угол (начальный) внутреннего трения и структурное сцепление.

Частота вибровоздействий, Гц	$\varphi_0$ , град.	$k$ , град./с
10	29,3	-0,17
20	32,9	-1,93
25	31,9	-1,94
30	31,2	-1,49
40	31,3	-1,62
50	32,3	-2,07

Как можно видеть, под действием вибраций угол естественного откоса претерпевает заметные изменения для вибраций, имеющих частоту выше 10 Гц. Наиболее сильное воздействие на изменение формы соляного конуса оказывают вибрации с частотой 20, 25 и 50 Гц. Это хорошо видно из зависимости углового коэффициента  $k$  от частоты вибровоздействий, приведенной на рис. 5. Исходя из пропорционально возрастающего с частотой числа периодов вибровоздействий в единицу времени, можно было ожидать линейный характер этой зависимости. Однако зависимость оказалась существенно нелинейной в области 20–25 Гц. Подобный характер зависимости можно объяснить, если предположить, что на частотах 20–25 Гц мелкозернистая соль,

подобно морскому песку [4, 5], проявляет резонансные свойства.

Таким образом, как показали полученные результаты, под влиянием вибраций в сыпучих средах уменьшается угол внутреннего трения. Действие вибраций носит кумулятивный характер.

Можно ожидать, что благодаря данному эффекту, повышенной виброчувствительностью будут обладать трещиноватые породы и зоны разломов в земной коре. Это обстоятельство может оказывать дополнительное негативное воздействие на устойчивость геотехнических объектов и сооружений, расположенных вблизи источников повышенной вибрации, например, откосов оживленных транспортных магистралей и горных склонов, расположенных вблизи мощных ГЭС.

#### Литература

1. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Высшая школа, 1968. 630 с.
2. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. М.: Недра, 1964.
3. Падуков В.А. Прогнозирование устойчивости бортов карьеров: Учебное пособие. Л., 1981. 52 с.
4. Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
5. Gomes L., Graves L. Stabilization of beach sand by vibrations // Highway Research Board Bull. № 325. Wash. D.C., 1962. P.44–54.