

УДК 534.222.2+624.131

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА О ЖЕСТКУЮ СТЕНКУ*

Н. Н. Гердюков, А. Г. Иоилев, С. А. Новиков

ВНИИ экспериментальной физики,
607200 Арзамас-16

При прогнозировании движения сыпучих материалов по жесткому основанию (осыпи, лавины), воздействия взрывных нагрузок на подземные сооружения, трубопроводы и скважины, торможения тел при ударе о грунт необходимо знать динамический коэффициент трения, который может значительно отличаться от найденного в статических и квазистатических условиях. Необходимо отметить, что и определению статического коэффициента трения уделяется не слишком много внимания. Например, данные о значениях статического коэффициента трения сухого песчаного грунта о гладкую металлическую стенку приводятся только в [1-3].

Ниже описывается метод экспериментального определения динамического коэффициента трения k_f песчаного грунта о жесткую стенку, не требующий непосредственного измерения действующего на нее со стороны грунта давления, приводятся некоторые результаты измерений — значения k_f при движении песчаного грунта начальной плотности $1,66 \text{ г/см}^3$ и влажности $4 \div 5 \%$ в гладкой трубе из сплава Д16Т в диапазоне напряжений $0,1 \div 25 \text{ МПа}$ и массовых скоростей $0,9 \div 40 \text{ м/с}$. Методика определения напряжений в песчаном грунте и его массовых скоростей за фронтом ударной волны в экспериментах такого рода изложена в [4].

Схема установки экспериментов приведена на рис. 1. Песок 4 засыпался в отрезки толстостенных труб 3 (внутренний диаметр 26 мм, длина от 8 до 30 см) и 5, вставленных одна в другую с небольшим зазором и установленных на массивной стальной плите 7. Нагружение песка осуществлялось взрывом диска ВВ 1 толщиной 5 мм, инициируемого в центре. Между ВВ и песком помещался стальной диск-ударник 2 толщиной 5 мм. Нормальное напряжение в отраженной от стальной плиты волне σ_r

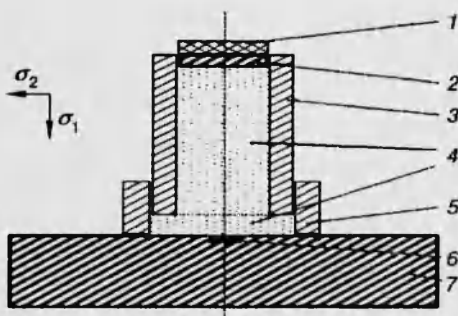


Рис. 1

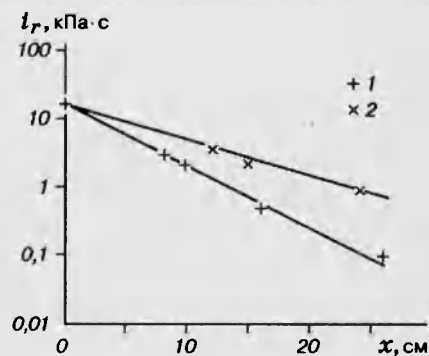


Рис. 2

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-013-16504).

измерялось пьезоэлектрическим датчиком давления 6 [5], установленным в плите заподлицо с ее поверхностью. Относительно тонкий слой песка в трубе 5 используется для того, чтобы снизить результат воздействия ВВ на стальную плиту через стенку трубы 3. Во второй серии опытов для снижения трения между стенкой трубы и песком устанавливалась полиэтиленовая прокладка толщиной 0,05 мм. Результаты измерений приведены на рис. 2, где точки 1 — данные без полиэтиленовой прокладки, 2 — с прокладкой, x — расстояние от диска-ударника до нижнего края трубы 3, импульс нормального напряжения в отраженной волне

$$i_r = \int_0^{\infty} \sigma_r(t) dt$$

определялся численным интегрированием записей напряжения.

В первом приближении (если пренебречь вязкой диссипацией при волновых процессах в грунте и потерями на деформацию металлической трубы в радиальном направлении) можно считать, что полный импульс песка изменяется только за счет кулоновского трения о стенку трубы:

$$R i(x) + \int_0^{\infty} \int_0^x 2k_f \sigma_2(x, t) dx dt = R i(0).$$

Здесь $i(x)$ — удельный импульс песка на расстоянии x от диска-ударника:

$$i(x) = \int_0^{\infty} \sigma_1(x, t) dt;$$

R — радиус трубы; σ_1 и σ_2 — осевое и радиальное напряжения в песке.

Согласно экспериментальным данным [6, 7], при $\sigma_1 < 50$ МПа коэффициент бокового давления $k_{21} = \sigma_2/\sigma_1$ для нарушенного сухого песчаного грунта слабо зависит от σ_1 и скорости нагружения (при статических испытаниях $k_{21} = 0,42$, во взрывных волнах $k_{21} = 0,45$ [6], при испытаниях на копре $k_{21} = 0,44$ [7]). Считая $k_f = \text{const}$ и $k_{21} = \text{const}$, получаем

$$\int_0^{\infty} 2k_f \sigma_2(x, t) dt = 2k_f k_{21} i(x).$$

Тогда

$$\frac{di}{dx} = -\frac{2k_f k_{21}}{R} i(x),$$

т. е.

$$\frac{d(\ln i)}{dx} = -\frac{2k_f k_{21}}{R} = \text{const}.$$

В рассматриваемом приближении, считая стальную плиту жесткой стенкой, имеем $i(x_t) = i_r(x_t)$ (x_t — длина трубы). Экспериментальные значения хорошо аппроксимируются зависимостью вида $i(x) = i(0) \exp(-Ax)$ с $A = 0,21$ 1/см без полиэтиленовой прокладки и $A = 0,12$ 1/см с полиэтиленовой прокладкой (аппроксимирующие прямые нанесены на рис. 2 пунктиром). В этом случае

$$k_f = \frac{AR}{2k_{21}}.$$

Вид нагружения	Материал стенки	k_f	Источник
Динамический	Д16Т	0,31	Данная работа
»	Д16Т с полиэтиленовой прокладкой	0,17	» »
Статический	Нержавеющая сталь	0,38	[1]
»	Алюминиевый сплав	0,47	[1]
»	Сталь	0,22	[2]
»	»	0,28	[3]

Полученные таким образом значения динамических коэффициентов трения приведены в таблице, где для сравнения представлены значения статического коэффициента трения сухого песчаного грунта о гладкую металлическую стенку, полученные в [1–3]. В [2] отмечалось, что коэффициент трения растет с увеличением пути скольжения (при пути скольжения 1 см k_f вырос до 0,3). В целом по результатам экспериментов можно сказать, что при скольжении песчаного грунта вдоль гладкой металлической стенки динамический коэффициент трения незначительно отличается от статического, а полиэтиленовая прокладка снижает коэффициент трения почти в 2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Murfitt R. G., Braushby P. L., Nienow A. W. Flow in core flow hoppers // Particle Technology. Birmingham, 1981.
2. Tejchman A. J. Tarcie miedzy materialem zianistym a stalowa sciana konstrukcji // Arch. Hydrotechn. 1986. V. 33, N 4. P. 517–525.
3. Сковронский В. Я. Исследование сил трения грунта о стенку // Интенсификация использования судоходных и портовых гидротехнических сооружений и повышение качества путевых работ по улучшению судоходства. Л.: ЛИВТ, 1987.
4. Гердюков Н. Н., Иоилев А. Г., Новиков С. А. Исследование воздействия взрывных нагрузок на мягкий грунт // ПМТФ. 1992. № 2. С. 149–152.
5. Бодренко С. И., Гердюков Н. Н., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Применение кварцевых датчиков давления для исследования ударно-волновых процессов // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 146–148.
6. Рыков Г. В., Скобеев А. М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. М.: Наука, 1978.
7. Рахматулин Х. А., Сагомоян А. Я., Алексеев Н. А. Вопросы динамики грунтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1964.

Поступила в редакцию 25/II 1994 г.,
в окончательном варианте — 4/VIII 1994 г.