

УДК 539.3:620.17.254

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ КОНТАКТЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПЕСЧАНЫМ ГРУНТОМ<sup>\*)</sup>

**В.Л. Котов, В.В. Баландин, А.К. Ломунов**

*НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского*

Приведены оценки коэффициента трения скольжения в законе Кулона для стальной обоймы и песчаного грунта на основе разработанной ранее расчетно-экспериментальной методики и экспериментальных данных, полученных с использованием системы разрезных стержней Гопкинсона. Выполнена верификация результатов на задачах определения силы сопротивления внедрению конических ударников в песчаный грунт на базе модифицированной формулы А.Я. Сагомоняна и известных экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* грунтовая среда, нестационарное контактное взаимодействие, обращенный эксперимент, сила сопротивления, проникание, математическое моделирование, трение.

### **Введение**

При экспериментальном изучении динамических свойств грунтовых сред распространение получил модифицированный метод Кольского с использованием системы разрезных стержней Гопкинсона (РСГ) и ограничивающей обоймы [1, 2]. Было показано [3, 4], что регистрируемые в системе РСГ импульсы продольной деформации за счет трения грунта о поверхность обоймы и торцы стержней искажаются незначительно. В большей степени влияние трения сказывается на амплитуде импульса окружной деформации, регистрируемого на поверхности обоймы, причем величина искажения зависит от типа грунта и материала обоймы. В практических расчетах часто используют гипотезу сухого трения Кулона – Амонтона, а в качестве коэффициента трения принимают коэффициент пропорциональности между осевым напряжением и максимальным касательным напряжением – так называемый «угол внутреннего трения». Подобный подход является оценочным, так как не учитывает особенности обработки поверхности контактирующих материалов. Заметим также, что в настоящее время не существует эффективных экспериментальных методик, позволяющих получить значения динамического коэффициента трения при нестационарном контакте элементов конструкций с грунтовыми средами.

---

<sup>\*)</sup> Выполнено в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, Программы государственной поддержки ведущих научных школ России (проект НШ-4807.2010.8), а также при поддержке РФФИ (проекты 10-08-00376-а, 08-08-00883-а).

1. Ранее [4] в численных расчетах задачи, моделирующей волновые процессы в системе РСГ и ограничивающей образец грунта упругой обоймы, было показано, что коэффициент трения  $k$  восстанавливается с погрешностью около 10% по формуле

$$k = \frac{El_0Ra^2}{E_JL(b^2 - a^2)} \cdot \frac{\int_0^t (\epsilon_I^2 - (\epsilon_R - \epsilon_T)^2) dt}{\int_0^t (\epsilon_I - \epsilon_R + \epsilon_T) \epsilon_\theta l dt}, \quad (1)$$

где  $l_0$  – длина образца грунта,  $c$  – скорость распространения волны в мерных стержнях,  $\epsilon_I$  – нагружающий импульс,  $\epsilon_R$  – отраженный импульс осевой деформации в нагружающем стержне;  $\epsilon_T$  – прошедший импульс деформации, регистрируемый в опорном стержне. При выводе (1) использовалось выражение для радиальных напряжений в образце грунта, которое позволяет определить  $\sigma_r$  по значениям окружной деформации  $\epsilon_\theta$  с внешней поверхности обоймы:

$$\sigma_r = -E_J((b^2 - a^2)/(2a^2))\epsilon_\theta,$$

где  $E_J$  – модуль Юнга материала обоймы,  $L$  – длина,  $a$  и  $b$  – внутренний и внешний диаметры обоймы. Зависимость импульсов деформации от времени в формулах опущена.

Далее приводятся результаты испытаний сухой песчаной смеси (влажность менее 0,1%, плотность 1,6 г/см<sup>3</sup>) на установке РСГ методом Кольского. В экспериментах использовались образец грунта и стальная обойма следующих размеров:  $l_0 = L = 9$  мм,  $b = 2a = 40$  мм.

На рис. 1 представлены результаты эксперимента № 391-145. Кривыми 1-4 соответственно показаны нагружающий ( $\epsilon_I$ ), отраженный ( $\epsilon_R$ ), прошедший ( $\epsilon_T$ ) импульсы, зарегистрированные в датчиках на поверхности мерных стержней, а также величина  $\epsilon_T - \epsilon_R$ . Время отнесено к величине  $t^*$ , которая соответствует времени пробега фронта волны по образцу грунта (скорость фронта принималась равной 455 м/с).

На рис. 2 приведено изменение коэффициента  $k$  в зависимости от безразмерного времени  $t^*$ . Полученный результат свидетельствует о близости коэффициента в паре трения «стальная обойма – песчаный грунт» к значению 0,3. С учетом погрешности методики диапазон изменения коэффициента можно принять равным [0,25; 0,35].

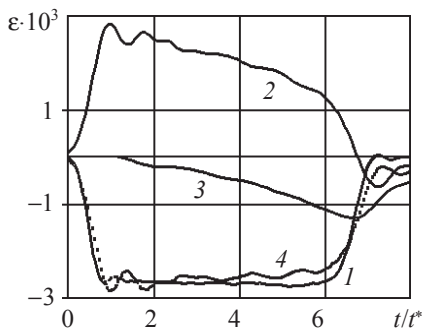


Рис. 1

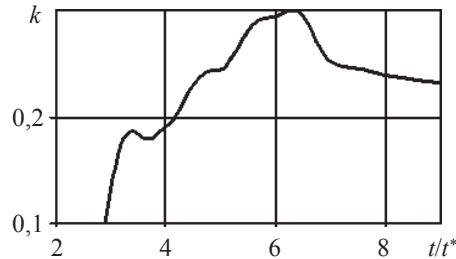


Рис. 2

2. Для верификации полученных оценок коэффициента трения были выполнены расчеты силы сопротивления внедрению конических ударников в песчаный грунт,

так как максимум силы сопротивления конических ударников более чувствителен к значению коэффициента поверхностного трения, чем таковой для ударников с плоским или с полусферическими оголовками [3]. Параметры песчаного грунта были определены ранее [5, 6].

Для расчета давления на боковой поверхности конуса, проникающего в сжимаемую пластическую среду, механические свойства которой выражаются соотношениями

$$b = \frac{\rho_0}{\rho} = \text{const}, \quad \sigma_r - \sigma_\theta = Y + \sin\varphi(\sigma_r + \sigma_\theta),$$

где  $\rho$  – плотность за фронтом ударной волны (УВ), использовалось известное выражение [7]. Принималось также, что частицы грунта в области между УВ и проникающим конусом двигаются по траекториям, совпадающим с нормальными к поверхности конуса.

Рассмотрим приближенное решение [7], в котором напряжение на боковой поверхности проникающего конуса постоянно и зависит только от величины нормальной компоненты вектора скорости:

$$\sigma = \frac{\sigma_n}{0,5\rho_0 u^2} = \frac{2}{b} \left[ bz^{\gamma/2} - \frac{z^{\gamma/2-1} - 1}{\gamma - 2} + \frac{z^{\gamma/2} - 1}{\gamma} \right]. \quad (2)$$

Здесь  $z = (1-b)^{-1}$ ,  $\gamma = 2\sin\varphi/(1 + \sin\varphi)$ ,  $\beta$  – угол полураствора конуса. Связь угла внутреннего трения  $\varphi$  и параметра  $\mu$  в условии пластичности Мизеса–Шлейхера грунта задается выражением  $\sin\varphi = 3\mu/(\mu + 6)$ , при этом  $\gamma = \mu/(1 + 2/3\mu)$ .

Как было показано ранее [4, 7], при расчете плотности на ударной волне из решения нелинейной задачи о распаде разрыва полученные решения лучше согласуются с результатами двумерных численных расчетов. При линейной ударной адиабате  $D(u) = A + \lambda u$ , где  $D$  и  $u$  – соответственно скорость ударной волны и массовая скорость за фронтом ударной волны, это решение выражается формулой:

$$\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho = 1 - b = u/D,$$

где  $u = V \sin\beta$  – скорость, направленная по нормали к поверхности конического ударника.

Результаты [5, 8] подтверждают выводы [7] о том, что давление, действующее на боковую поверхность конуса, можно считать постоянной величиной с погрешностью 10–20% для углов раствора конуса не более 120 градусов. Влияние трения приблизительно оценивается множителем  $1 + k \operatorname{ctg}\beta$ .

Результаты расчетов по формуле (2) в сравнении с данными обращенного эксперимента [5] приведены на рис. 3. Максимумы силы сопротивления представлены в зависимости от нормальной скорости удара  $u = V \sin\beta$  и отнесены к величине  $F^* = 0,5\rho_0 u^2 S$ , где  $S$  – максимальная площадь миделя поперечного сечения ударника. Расчеты выполнены при значениях  $A = 455$  м/с,  $\lambda = 2,3$  [9],  $\mu = 1,14$  [5],  $\rho_0 = 1,8$  г/см<sup>3</sup>,  $k = 0,25$  и  $0,35$ . В представленном виде силы сопротивления внедрению конусов с углами полураствора  $\beta$ , равными 30° (рис. 3,а) и 50° (рис. 3,б), оказываются близкими по величине.

Представленные результаты верификации подтверждают, что значения коэффициента трения в паре «сталь–сухой песок» лежат в диапазоне 0,25–0,35. Отметим, что результаты расчетов лучше согласуются с экспериментальными данными для

конуса с углом раствора  $60^\circ$ . Это можно объяснить наличием области уплотненного измельченного песка вблизи острия конуса с углом раствора  $100^\circ$ , наблюдаемой в экспериментах. В этой области скольжения песка по поверхности контакта не происходит, закон трения в форме Кулона становится неприменим, необходимо применять более сложные законы трения [10, 11].

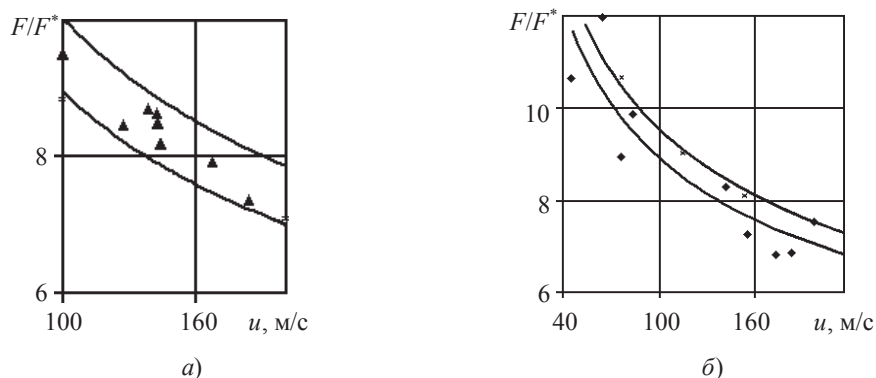


Рис. 3

### Заключение

Проведенная оценка коэффициента трения достоверна лишь в ограниченном диапазоне скоростей удара и углов конусности. Для сухого песка и стального конического ударника закон трения скольжения в форме Кулона справедлив при значениях компоненты вектора скорости, нормальной к конической образующей ударника, не превышающих 150 м/с. Расширение скоростного диапазона, а также уточнение значений коэффициента трения и исследование его возможной зависимости от скорости внедрения требует проведения дополнительных экспериментальных исследований и использования более полных математических моделей.

### Литература

1. Новые возможности метода Кольского для исследования динамических свойств мягких грунтов / А.М. Брагов [и др.] // ПМТФ. – 1995. – Т. 36, №3. – С. 179–186.
2. *Bragov, A.M.* Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils / А.М. Bragov, G.M. Grushevsky, A.K. Lomunov // *Exper. Mech.* – 1996. – V. 36, №3. – P. 237–242.
3. Анализ особенностей измерения динамических характеристик мягких грунтов методом Кольского / А.М. Брагов [и др.] // ПМТФ. – 2004. – Т. 45, № 4. – С. 147–153.
4. *Баженов, В.Г.* Экспериментально-теоретическая методика определения параметров уравнения состояния грунтов / В.Г. Баженов, С.В. Зефилов, В.Л. Котов // ПМТФ. – 2004. – Т. 45, № 5. – С. 140–150.
5. Исследование удара и проникания тел вращения в мягкий грунт / В.Г. Баженов [и др.] // ПММ. – 2003. – № 4. – С. 686–697.
6. *Баженов, В.Г.* Экспериментально-теоретическое исследование процессов проникания жестких ударников и идентификация свойств грунтовых сред / В.Г. Баженов, А.М. Брагов, В.Л. Котов // ПМТФ. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 115–125.
7. *Сагомоян, А.Я.* Проникание / А.Я. Сагомоян. – М.: МГУ, 1974. – 299 с.
8. *Котов, В.Л.* Исследование применимости автомодельного решения задачи о расширении сферической полости в сжимаемой среде для определения давления на поверхности контакта «ударник – грунт» / В.Л. Котов // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – 2008. – Вып. 70. – С. 123–131.
9. Методика определения ударной адиабаты мягких грунтов по результатам обращенных

экспериментов / А.М. Брагов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, вып. 11. – С. 52–55.

10. Григорян, С.С. Новый закон трения и механизм крупномасштабных обвалов и оползней / С.С. Григорян // ДАН. – 1979. – Т. 244, № 4. – С. 846–849.

11. Якунина, Г.Е. Оптимальные формы движущихся в среде тел при учете трения / Г.Е. Якунина // ПММ. – 2005. – Т. 69, вып. 5. – С. 759–774.

[15.09.2010]

#### **ASSESSING THE EFFECTS OF SURFACE FRICTION IN NON-STATIONARY CONTACT OF STRUCTURAL ELEMENTS WITH SAND SOIL**

**V.L. Kotov, V.V. Balandin, A.K. Lomunov**

The sliding friction coefficient in Coulomb's law for a steel casing and a sand soil is assessed based on the earlier developed computational-experimental methodology and the experimental data obtained using a system of split Hopkinson bars. The values obtained are verified in the problems of determining the force resisting the penetration of conical strikers into a sand soil based on modified Sagamonyan's formula and the available experimental data.

*Key words:* soil medium, non-stationary contact interaction, inverse experiment, resistance force, penetration, mathematical modeling, friction.