

УДК 531.552

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА В ПЕСЧАНОЙ СРЕДЕ БЕСКОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

С. И. Герасимов^{*,**,***,****}, А. В. Зубанков^{*,**},
В. И. Ерофеев^{****}, В. А. Кикеев^{***,****}, Н. А. Трепалов^{*},
А. П. Калмыков^{*}, С. А. Капинос^{*}, А. Г. Сироткина^{**}

* Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров, Россия

** Саровский физико-технический институт (НИЯУ “МИФИ”), 607190 Саров, Россия

*** Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева, 603950 Нижний Новгород, Россия

**** Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН, 603024 Нижний Новгород, Россия

E-mails: s.i.gerasimov@mail.ru, alex-zub@yandex.ru, erf04@mts-nn.ru, vkikeev@mail.ru, natrepalov@ya.ru, apkalm@gmail.com, kapinoss@gmail.com, sag@sarfti.ru

Представлены экспериментальные данные о параметрах движения стального сферического ударника диаметром 13,5 мм в песчаной среде при скорости ударника 1470 м/с. Для регистрации движения ударника вблизи песчаной преграды и в песчаной среде применялись индукционные датчики и метод PIV (particle image velocimetry), позволяющий на основе высокоскоростной видеорегистрации поверхности песка визуализировать поверхностную волну. Получены значения параметров, характеризующих движение ударника в песчаной среде и распространение поверхностной волны.

Ключевые слова: высокоскоростная видеорегистрация, бесконтактное хронографическое сечение, песок, метод PIV.

DOI: 10.15372/PMTF20210117

Введение. Исследование проблем взаимодействия ударников различного типа с грунтовыми средами имеет большое научное и прикладное значение. Для решения задач проникания применяются экспериментальные, аналитические и численные методы. В настоящее время широко используются численные методы изучения грунтов с помощью моделей, построенных на основе экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования процесса проникания ударника в грунт проводятся начиная с 50-х гг. XX в. [1]. Для измерения перемещения во времени ударника, проникающего в сухой песок, в работах [1, 2] впервые использован метод рам-мишеней. Аналогичный метод применялся в работе [3] при исследовании наклонного проникания ударника в преграду. В работе [4] для определения перемещения ударника внутри песчаной мишени

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 18-08-00715, 18-29-10073).

© Герасимов С. И., Зубанков А. В., Ерофеев В. И., Кикеев В. А., Трепалов Н. А., Калмыков А. П., Капинос С. А., Сироткина А. Г., 2021

использовались фольговые контактные датчики, замыкающиеся при прохождении через них острия ударника.

Известно, что тонкий слой грунта на границе области контакта с головной частью ударника должен вовлекаться им в движение и двигаться без проскальзывания вместе с ударником [5]. Поэтому применение контактных датчиков для хронографирования процесса может оказывать существенное влияние как на условия взаимодействия ударника с мишенью, так и на характер движения ударника в целом вплоть до потери его устойчивости.

Для бесконтактной регистрации движения ударника в грунтовой среде может применяться высокоскоростная видеорегистрация [4, 6–10]. В экспериментах, описанных в работе [6], при изучении ударного взаимодействия цилиндрических ударников с мишенью из сухого песка использовалась камера ВСК-5 с оптико-механической коммутацией. Определялись зависимости глубины внедрения от времени до момента полного погружения ударников в материал преграды. В работе [7] с помощью высокоскоростной многокадровой цифровой камеры фиксировались начальная стадия проникания (до момента полного погружения ударника в мишень) и формирование выброса. В [4] с использованием высокоскоростной съемки определялись скорости входа ударников в мишень из влажного песка и выхода из нее. С помощью цифровой камеры Photron RS CMOS и метода PIV проведена серия экспериментов по внедрению ударников различной формы в сухой песок [8–10]. Выстрел осуществлялся вдоль прозрачной стенки контейнера, так чтобы ударник попадал в объектив камеры.

Каждый из указанных выше методов экспериментальных исследований имеет ряд преимуществ и недостатков. Более предпочтительными являются бесконтактные методы. В данной работе представлен один из методов бесконтактной регистрации движения ударника в песчаной среде. В эксперименте использовался кварцевый песок с плотностью $1,7 \text{ г/см}^3$ и влажностью $W = 10 \%$.

1. Постановка эксперимента. В эксперименте осуществлялось высокоскоростное метание в песчаную преграду стального ударника сферической формы, диаметр которого равен 13,5 мм. В качестве метательной установки (МУ) использовалась гладкоствольная пороховая баллистическая установка со стволом калибром 14,5 мм, в качестве контейнера для песка — картонная коробка с размерами $300 \times 210 \times 230$ мм. Толщина слоя песка в контейнере составляла 155 мм.

Точка прицеливания располагалась на высоте 105 мм от дна контейнера. При проведении эксперимента использовался влажный песок. Контейнер располагался на расстоянии 1200 мм от среза ствола МУ.

На рис. 1 приведена схема эксперимента, в котором осуществлялись высокоскоростная видеорегистрация поверхности песка и фиксация моментов прохождения ударника через четыре бесконтактных хронографических сечения [11].

Скоростная видеокамера устанавливалась таким образом, чтобы обеспечивалось получение контрастных кадров поверхности песка в отраженном свете. Для этого использовалась импульсная подсветка, а зона регистрации фиксировалась с помощью зеркала. Траектория полета ударника после выстрела из МУ проходила через четыре бесконтактных хронографических сечения, создаваемые постоянными магнитами и соосно установленными катушками индуктивности, в зоне действия которых находился контейнер с песком. Бесконтактные сечения 1–4 располагались на расстояниях от среза ствола МУ, равных 1130, 1180, 1230 и 1280 мм соответственно. Индуцированный сигнал регистрировался многоканальным регистрирующим устройством при пролете ударника через каждое сечение.

Видеорегистрация осуществлялась с частотой 20 000 кадр/с, время экспозиции кадра составляло 11 мкс, пространственное разрешение — $2,1 \text{ мм}^{-1}$. Запуск высокоскоростной

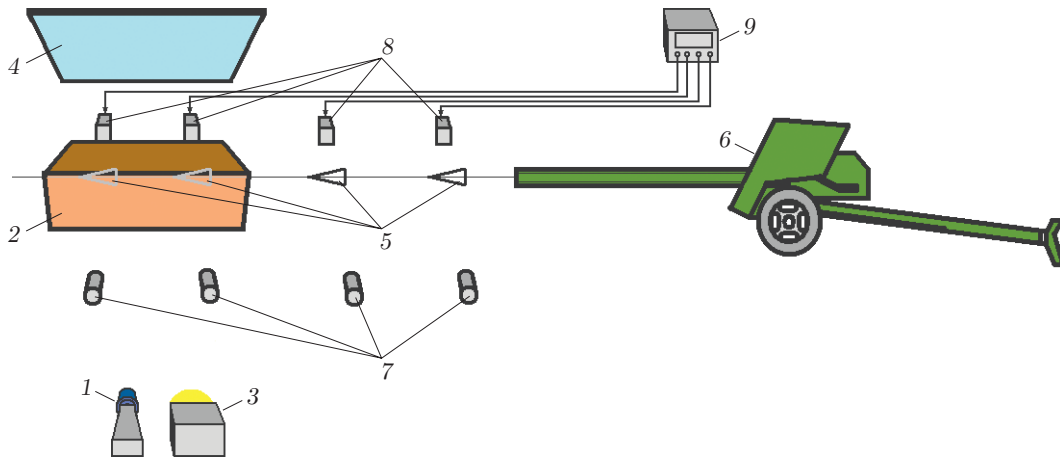


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — высокоскоростная видеокамера, 2 — контейнер с песком, 3 — импульсный источник света, 4 — зеркало, 5 — ударник, 6 — МУ, 7 — постоянные магниты, 8 — катушки индуктивности, 9 — регистратор

видеокамеры и регистратора осуществлялся синхронно с запуском МУ (время отсчитывалось с момента запуска МУ).

Индукционные датчики являются датчиками генераторного типа. Такие датчики могут использоваться для определения параметров переменных и стационарных магнитных полей. Полезный сигнал характеризуется функцией отклика $\varepsilon_i(t)$, регистрируемой датчиком в соответствии с законом электромагнитной индукции при изменении магнитного поля. Функция $\varepsilon_i(t)$ зависит от скорости изменения магнитного потока и размера зазора между магнитом и датчиком. При прохождении ударника через измерительные сечения датчик — магнит в датчиках вырабатывается электрический импульсный сигнал. Датчики выполнены в виде многослойной катушки индуктивности со стальным сердечником и плотно прилегающими друг к другу витками проволоки. Преимуществами датчиков данного типа являются простота и прочность конструкции, отсутствие скользящих контактов, возможность работы без источника питания и значительная чувствительность.

2. Анализ экспериментальных данных. С помощью многоканального регистрирующего устройства зарегистрированы четыре сигнала, характеризующие прохождение стальным ударником бесконтактных хронографических сечений индукционного типа (рис. 2). Анализ моментов перехода через ноль полученных кривых позволяет построить зависимость $x_1(t)$, описывающую движение ударника вблизи песчаной преграды и в песчаной среде.

Кросскорреляционная обработка кадров, полученных при видеорегистрации поверхности песка, позволяет визуализировать возмущения, выходящие на поверхность и сопровождающие движение ударника в среде (рис. 3).

Обработка проводилась с помощью программы PIVview. Использовался многопроходный кросскорреляционный алгоритм обработки [12] с квадратным окном опроса и 50 %-м перекрытием. Размер окна опроса итерационно уменьшался со 128 до 12 пикселей. Аппроксимация корреляционной функции проводилась с помощью трехточечной гауссовой интерполяции без предварительной обработки изображений. Между итерациями, используемыми в кросскорреляционном методе, к результирующему полю смещений w применялся медианный фильтр с размером маски 3×3 . Полученные данные позволяют определить зависимость $x_2(t)$ для поверхностной волны. Зависимости $x_1(t)$, $x_2(t)$ приведены на рис. 4. На рис. 5 представлены зависимости скорости ударника v от времени, определенные по зависимостям $x_1(t)$, $x_2(t)$.

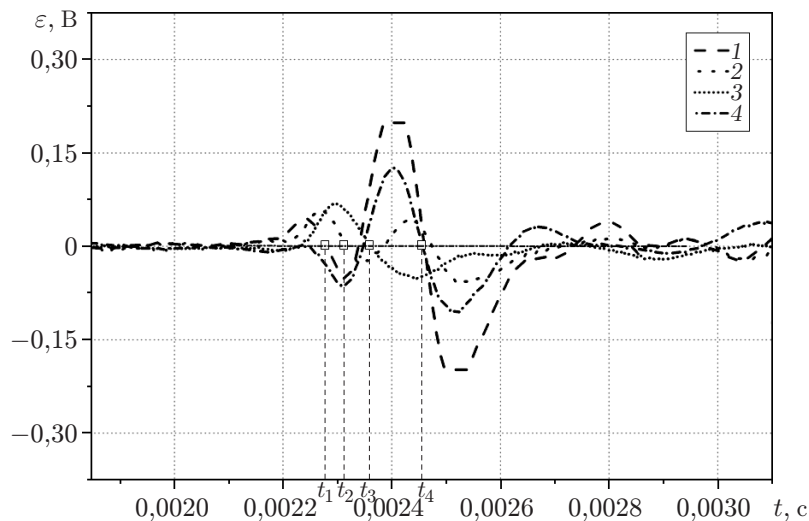


Рис. 2. Зависимости $\varepsilon_i(t)$, регистрируемые датчиками, расположенными в индукционных сечениях:

1 — сечение 1, 2 — сечение 2, 3 — сечение 3, 4 — сечение 4

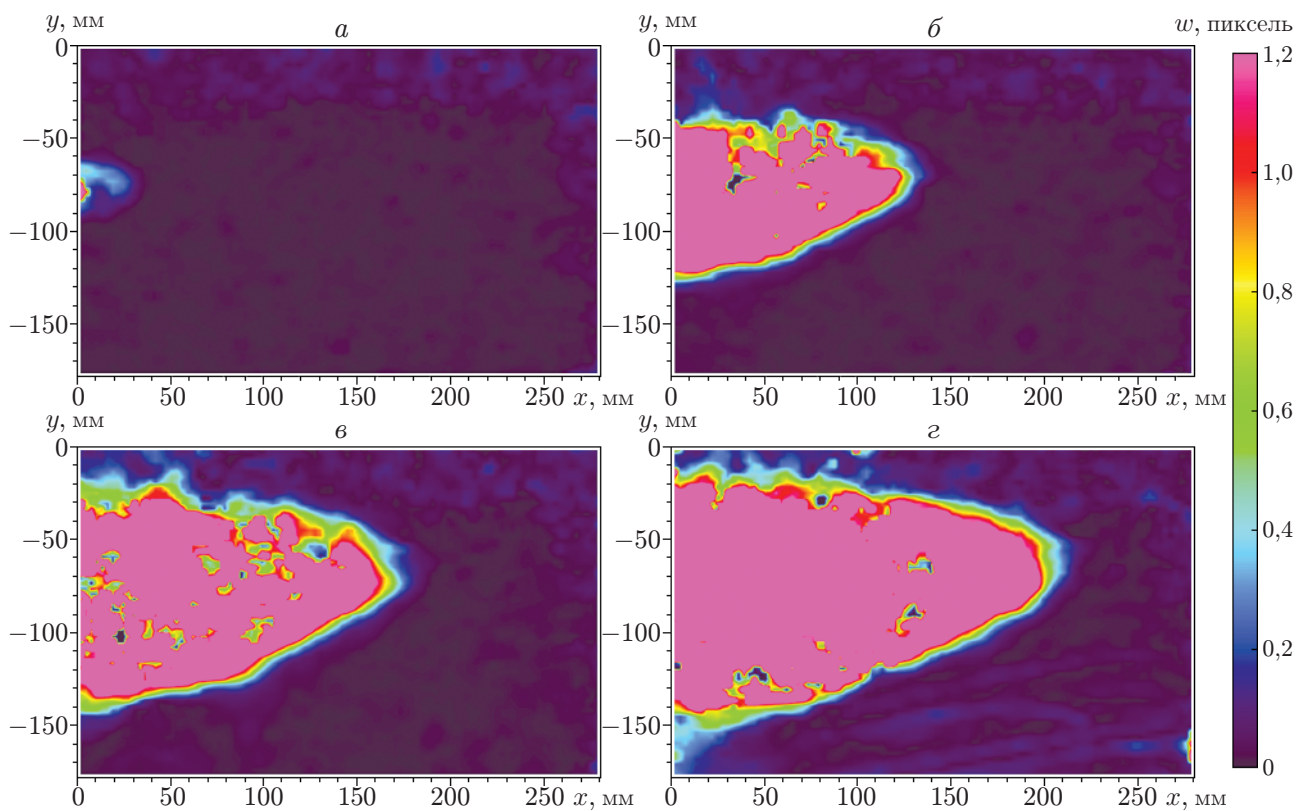


Рис. 3. Результаты визуализации волновых процессов на поверхности песка:

a — $t = 2,3$ мс, *б* — $t = 2,55$ мс, *в* — $t = 2,8$ мс, *г* — $t = 3,05$ мс

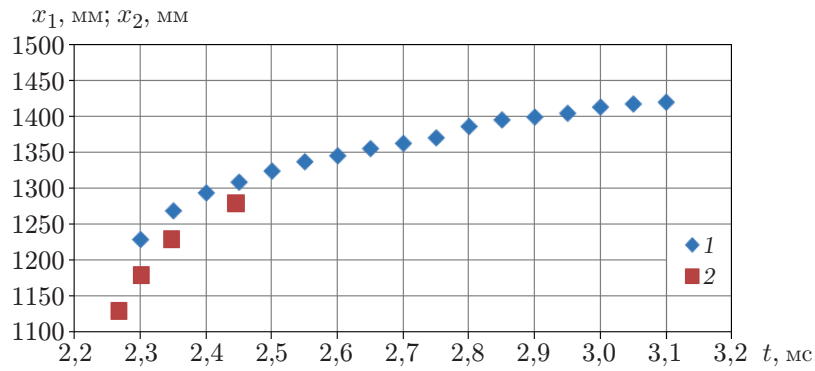


Рис. 4. Экспериментальные зависимости $x_1(t)$ (1) и $x_2(t)$ (2), описывающие перемещение ударника относительно среза ствола МУ

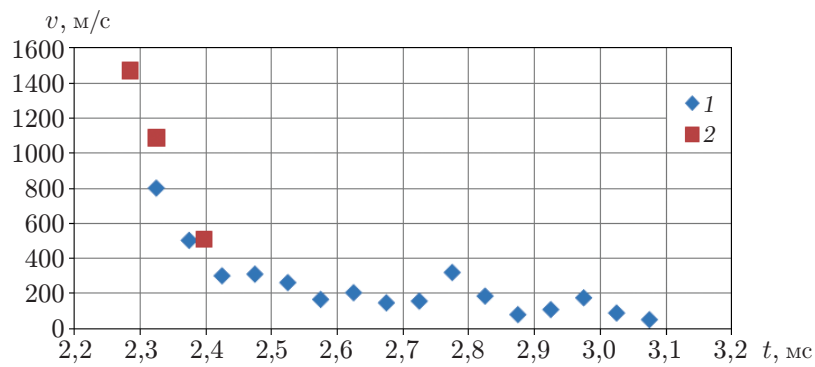


Рис. 5. Экспериментальные зависимости скорости ударника от времени, определенные по зависимостям $x_1(t)$ (1) и $x_2(t)$ (2)



Рис. 6. Ударник после проведения эксперимента

На рис. 6 показан ударник (стальной шарик) после проведения эксперимента. Фронтальная поверхность ударника на расстоянии от экватора, равном 1,5 мм, подвергнута эрозии. В результате адгезии на ней имеется грунтовое образование. После разборки преграды вдоль траектории, пройденной стальным шариком, обнаружен прокаленный песок белого цвета. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в данном эксперименте в процессе теплообмена между ударником и грунтом определяющим является механизм внутреннего трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок // Механика. 1957. № 6. С. 125–137.
2. Allen W. A., Mayfield E. B., Morrison H. L. Dynamics of a projectile penetrating sand // J. Appl. Phys. 1957. V. 28, N 3. P. 370–376.
3. Maynard D. K. Projectile impact and penetration dynamics. Correlation of analytical and experimental results // Proc. of the Intern. conf. on fracture mechanics and technology, Hong Kong (China), Mar. 21–25, 1977. Hong Kong: Convent. Centre, 1977. V. 1. P. 1329–1341.
4. Бердников В. А., Каминский М. В., Копытов Г.Ф. и др. Экспериментальное исследование движения конусов и цилиндра в песчаной среде // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. 2-й Науч. конф. Волж. регион. центра РАН, Саров, 29 мая — 1 июня 2001 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2003. С. 276–279.
5. Велданов В. А., Федоров С. В. Особенности поведения грунта на границе контакта с недеформируемым ударником при проникании // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 6. С. 116–127.
6. Баландин В. В. Экспериментальное изучение процессов проникания осесимметричных тел в мягкие грунтовые среды: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород, 2001.
7. Warren T. L., Hanchak S. J., Poormon K. L. Penetration of limestone targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: experiments and simulations // Intern. J. Impact Engng. 2004. V. 30. P. 1307–1331.
8. Borg J. P., Fraser A., Van Vooren A. Ballistic penetration of sand with small caliber projectiles // AIP Conf. 2012. V. 1426. P. 48–51.
9. Borg J. P., Morrissey M. P., Perich C. A., et al. In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: experimental measurements and continuum simulations // Intern. J. Impact Engng. 2013. V. 51. P. 23–35.
10. Van Vooren A., Borg J., Sandusky H., Felts J. Sand penetration: a near nose investigation of a sand penetration event // Procedia Engng. 2013. V. 58. P. 601–607.
11. Пат. 2720258 РФ, МПК F 42 B 35/00, G 03 B 42/08. Способ комбинированного бесконтактного регистрирования движения тела в сплошной среде / С. И. Герасимов, А. В. Зубанков, Н. А. Трепалов. № 2019101542; Заявл. 21.01.2019; Опубл. 28.04.2020, Бюл. № 13.
12. Adrian R. J. Particle image velocimetry / R. J. Adrian, J. Westerweel. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010.

*Поступила в редакцию 8/XI 2019 г.,
после доработки — 13/II 2020 г.
Принята к публикации 2/III 2020 г.*