

УДК 531.39+621.37

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-283-295

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ В СУХОЙ ПЕСОК*

© 2020 г. **Баландин В.В.¹, Баландин Вл.Вл.¹,
Пархачёв В.В.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 02.09.2020

Для наиболее полного изучения закономерностей ударного взаимодействия твердых тел с грунтовыми преградами необходимо дальнейшее развитие экспериментальных методик регистрации параметров процесса взаимодействия в прямых и обращенных экспериментах. Для определения параметров движения ударника (перемещения и скорости) в прямом эксперименте применен радиоинтерферометр миллиметрового диапазона. Этот метод позволяет вести непрерывную регистрацию перемещения заднего торца ударника с высокой точностью в широком диапазоне перемещений. С использованием предложенной методики проведены эксперименты по регистрации параметров движения цилиндрических ударников из стали и алюминиевого сплава при взаимодействии с преградой из сухого песка. Одновременно перемещение заднего торца ударника также контролировалось с помощью высокоскоростной кино съемки до момента полного погружения ударника. Проведенные эксперименты показали, что результаты измерения, полученные с использованием двух методик, совпадают в пределах погрешности измерений. На основании проведенных экспериментов сделан вывод о том, что методика определения перемещения и скорости ударника в баллистическом эксперименте с использованием радиоинтерферометра миллиметрового диапазона позволяет непрерывно измерять большие перемещения (100 мм и более), в том числе и при полном погружении в мишень, с достаточной для практических целей точностью. По результатам проведенных экспериментов построены зависимости перемещения ударника и его скорости от времени. Обнаружено изменение закона проникания при уменьшении скорости внедрения до значений менее 100 м/с.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, ударник, грунтовая преграда, скорость внедрения.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №19-08-00430 и №19-08-00977).

Введение

Исследование проблем ударного взаимодействия деформируемых твердых тел с преградами различной физической природы имеет важное научное и прикладное значение. Для решения подобных задач чаще всего применяются аналитические и численные методы, основанные на известных математических моделях взаимодействующих сред. В связи со сложностью и разнообразием динамических свойств соударяющихся тел эти методы являются приближенными и требуют верификации результатов в модельных и полномасштабных экспериментах. Существуют две группы экспериментальных методов изучения проникания твердых тел в преграды из грунта: прямые и обращенные. В прямых методах разогнанный до необходимой скорости ударник соударяется с неподвижной мишенью. В обращенных экспериментах разогнанная грунтовая мишень ударяется о неподвижный ударник с головной частью исследуемой формы.

При проведении экспериментальных исследований ударного взаимодействия твердых тел в прямой постановке чаще всего проводят измерения таких параметров процесса, как зависимости перемещения ударника от времени, скорости ударника и его замедления, а также параметров, характеризующих движение материала мишени. Для этого используются различные датчики, размещенные в мишени [1–4], высокоскоростная киносъемка процесса проникания [2, 5–9], многокадровая рентгеноимпульсная съемка [4, 10–12], акселерометрия [13–15] и оптическая интерферометрия [16, 17].

Следует отметить, что методы с использованием датчиков, размещенных в мишени, достаточно трудоемки. К тому же чувствительные элементы могут оказывать влияние на движение ударника и в то же время сами могут испытывать смещение за счет движения материала мишени. Также существует неопределенность в моментах времени срабатывания чувствительных элементов, работающих на разрыв [1, 2]. В подобных экспериментах перемещение ударника регистрируется всего лишь в нескольких точках, что затрудняет дальнейшее определение скоростных и силовых характеристик взаимодействия ударника с преградой.

Использование высокоскоростной киносъемки при изучении проникания и пробивания различных преград в значительной степени упрощает подготовку и проведение эксперимента [2, 5, 6]. Современные цифровые камеры обладают рядом неоспоримых преимуществ: в них отсутствует параллакс между отдельными кадрами, интервалы между кадрами и времена экспозиции регулируются независимо и устанавливаются в широких пределах вплоть до нескольких наносекунд, за счет чего достигается высокая точность регистрации положения объекта, имеется непосредственная связь с компьютером, что существенно упрощает и ускоряет процедуру обработки экспериментальной информации. Однако высокоскоростная киносъемка позволяет регистрировать положение проникающего в преграду тела только дискретно, через определенные интервалы времени.

При съемке процесса проникания в видимом свете существует ограничение: регистрация движения ударника может вестись только до его полного погружения в мишень или в продукты выброса материала мишени. От этого недостатка свободна рентгеноимпульсная фотосъемка процесса соударения [4, 10–12]. Однако рентгеновские методы требуют большого количества сложного и дорогого оборудования, а также применения достаточно серьезных мер защиты персонала от действия рентгеновского излучения. К тому же и оптическая киносъемка, и рентгеноимпульс-

ная съемка позволяют получать относительно небольшое количество кадров, то есть регистрировать положение снаряда только в нескольких точках.

Размещение акселерометров [13–15] для регистрации параметров взаимодействия проникающего тела с преградой непосредственно на ударнике позволяет существенно упростить процедуру обработки данных и повысить точность измерений. При скоростях соударения до 200 м/с достаточно легко обеспечить регистрацию сигналов с датчиков, размещенных на ударяющем в мишень снаряде. Использование акселерометрии с проводной связью [13, 14] позволяет получать замедление ударника во времени и силу сопротивления, действующую на ударник, с высокой точностью. Однако дорогостоящие акселерометры и соединительные кабели часто разрушаются после удара. При больших скоростях удара процесс съема информации сильно усложняется и требует применения достаточно сложной и дорогостоящей аппаратуры [15].

В последние годы для исследования процессов проникания применяют интерферометрические методики, позволяющие бесконтактно получать непрерывную информацию о скорости движущегося тела. С. Блесс и др. [16, 17] использовали интерферометр PDV (Photonic Doppler Velocimeter) для непрерывной записи скорости движения стальной сферы в грунтовых средах. Следует отметить, что проведение подобных экспериментов сопряжено с серьезными методическими трудностями, а время регистрации процесса ограничено моментом перекрытия зондирующего лазерного луча продуктами выброса материала мишени. Тем не менее, методика позволяет получать интересные и важные результаты.

Большой интерес представляет применение для регистрации параметров движения проникающего тела радиоинтерферометра миллиметрового диапазона, хорошо зарекомендовавшего себя в плосковолновых и детонационных экспериментах [18–20]. Близкий по конструкции интерферометр использовал А. Ченг [21] для регистрации скорости движения заднего торца вольфрамового ударника, взаимодействующего с твердой мишенью.

В настоящей статье описана методика регистрации перемещения и скорости заднего торца ударника с использованием радиоинтерферометра миллиметрового диапазона в прямом эксперименте.

Постановка эксперимента

Исследование ударного взаимодействия цилиндрических ударников с оголовками различной формы с преградой из сухого песка проводилось на установке ПГ-20, описанной в [5, 6]. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

Ударник 1 разгоняется с помощью одноступенчатой газовой пушки 2 калибра 20 мм до необходимой скорости V_0 и соударяется с грунтовой преградой 3. Измерение скорости удара производилось двухканальным электромагнитным измерителем скорости 4, размещенным на дульном срезе ствола. Соударение с грунтовой средой происходит в стальной камере 5, предохраняющей оборудование от разлета частиц песка и имеющей окна 6 из оргстекла для проведения киносъемки. Оптическая киносъемка процесса взаимодействия ударника с грунтом осуществляется высокоскоростной камерой HSFCpro 7. Одновременно регистрация перемещения ударника в процессе соударения с преградой производилась радиоинтерферометром. Передающая и приемная антенны 8 располагались по боковым сторонам электромагнитного измерителя скорости в горизонтальной плоскости, проходящей через

ось ствола пушки на одинаковом расстоянии от нее. При измерениях использовались две антенны – излучающая и приемная. Антенная система радиоинтерферометра представляет собой «открытые концы» диэлектрических волноводов 9, по которым зондирующее излучение выводится из интерферометра и отраженный от ударника сигнал возвращается обратно в интерферометр. Такой вариант антенн имеет широкую диаграмму направленности $\pm 30^\circ$ по уровню 0,5 от максимума мощности, что позволяет проводить регистрацию при большом перемещении ударника. Диэлектрические волноводы помещены в гибкую цилиндрическую оболочку из вспененного полиэтилена на всем протяжении от интерферометра. В камеру установки ПГ-20 они вводятся через специальные отверстия.

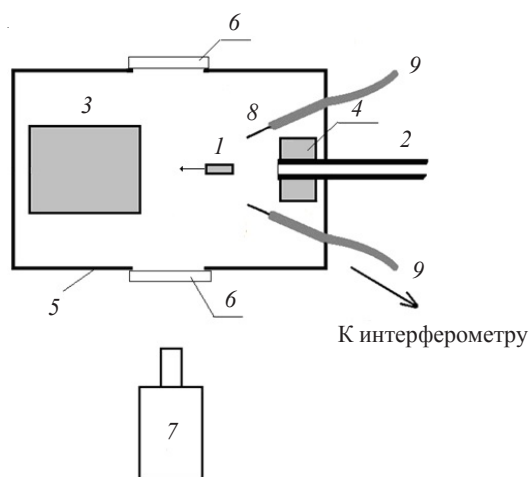


Рис. 1. Схема проведения экспериментов

На рис. 2 приведен общий вид расположения антенн относительно ствола и поверхности мишени. Передающая 1 и приемная 2 антенны размещались под фиксированным углом в 14° к оси ствола в блоке из вспененного полиэтилена в виде прямоугольного параллелепипеда 4, который был закреплен на дульном срезе ствола пушки на расстоянии около 200 мм от поверхности мишени 3. Между антеннами в блоке 4 было просверлено отверстие 5 диаметром 25 мм для вылета ударника из ствола пушки.

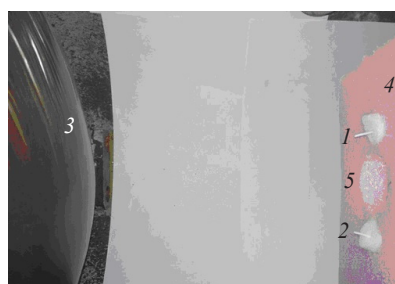


Рис. 2. Расположение контейнера с грунтом и антенн в камере установки ПГ-20 (вид сверху)

В качестве мишени использовались цилиндрические контейнеры, изготовленные из полипропилена. В контейнеры засыпался сухой песок, лицевая часть кон-

тейнера затягивалась тонкой полиэтиленовой пленкой толщиной 0,05 мм для предотвращения высыпания песка и имела небольшую выпуклость. Контейнер с грунтом размещался в камере установки горизонтально, соосно со стволом пушки.

Регистрация процесса внедрения ударника в преграду до момента его полного погружения осуществлялась высокоскоростной кинокамерой HSFCpro фирмы PCO, позволяющей получать последовательность из восьми кадров в заданные моменты времени. Подсветка процесса осуществлялась импульсными осветителями с длительностью вспышки ~ 1 мс. По результатам съемки определялось положение заднего торца ударника и строилась зависимость его перемещения от времени.

В экспериментах также непрерывно регистрировалось перемещение заднего торца с помощью радиоинтерферометрии в миллиметровом диапазоне. Для этого использовался радиоинтерферометр, разработанный в НИИ измерительных систем, успешно использующийся в исследованиях процессов детонации [18, 19] и плосковолновых экспериментах [20]. Интерферометр миллиметрового диапазона – устройство, предназначенное для измерения перемещений и скоростей физических объектов, способных отражать радиоволны, он реализует схему Майкельсона в радиодиапазоне. Прибор включает в себя высокостабильный генератор электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона, передающую и приемную антенны, приемное устройство и блок регистрации данных (осциллограф). Высокочастотные элементы схемы соединены волноводным трактом.

Интерферометр работает следующим образом. Создаваемые генератором непрерывные электромагнитные колебания постоянной мощности на фиксированной частоте через элементы волноводного тракта поступают на передающую антенну и излучаются в окружающую среду. Отраженный сигнал от движущегося объекта через приемную антенну и волноводы поступает на вход приемного устройства. На другой вход приемного устройства с генератора подается опорное колебание с частотой, равной частоте излучаемой электромагнитной волны. Далее в устройстве регистрации и обработки выполняется обработка в цифровой форме интерферограммы: определяется текущая фаза и частота в каждый момент времени. Результаты вычислений регистрируются как функции времени. При полной регистрации интерферограммы в процессе измерений ее обработка может выполняться после завершения эксперимента.

Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера. Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы соответственно несут информацию о перемещении и мгновенной скорости исследуемого объекта, от которого произошло отражение излучаемой интерферометром радиоволны.

Зондирующий сигнал имеет длину волны $\lambda = 3,2$ мм в вакууме (частота 93,75 ГГц). Отраженный от заднего торца ударника радиосигнал имеет частоту, меньшую на величину доплеровского сдвига. В радиоинтерферометре принятый сигнал, содержащий доплеровский частотный сдвиг, с помощью гетеродина переносится на промежуточную частоту 2 ГГц, после чего регистрируется осциллографом Tektronix DPO 7254C с частотой дискретизации 20 ГГц. Одновременно регистрируется опорный сигнал (также перенесенный на промежуточную частоту) с генератора интерферометра на несмещенной частоте. Далее обработка полученных сигналов (опорного и отраженного, содержащего информацию о доплеровском сдвиге частоты) производится программно. Это позволяет избежать применения аппаратного де-

тектирования сигналов и вносимых им дополнительных погрешностей. Так как скорость ударника при торможении в процессе эксперимента уменьшается от скорости удара V_0 до нуля и не меняет знак, то нет необходимости в регистрации двух квадратурных сигналов, в которых фазы колебаний интенсивности отличаются на 90° .

Поскольку разместить приемную и передающую антенны на оси ствола пушки позади ударника невозможно, то зондирование заднего торца ударника радиосигналом от антенны проводилось под некоторым углом. Величина этого угла изменяется при перемещении ударника, что необходимо учитывать при обработке сигнала радиоинтерферометра. Чтобы корректно обработать сигнал радиоинтерферометра, необходимо по результатам высокоскоростной киносъемки определить начальное положение ударника в некоторый момент времени и определить начальный угол падения радиоволн на задний торец ударника α в этот момент времени.

Определение величины разности фаз между опорным и отраженным сигналами для каждой точки записи осуществлялось методом численной оптимизации. Обозначим разность фаз для n -й точки через φ_n . Изменение φ_n от точки к точке несет информацию о перемещении отражающей поверхности. Так как зондирование осуществляется под углом α к направлению перемещения и перемещение Δx ударника за время между отсчетами ($5 \cdot 10^{-11}$ с) много меньше, чем расстояние L от объекта до передающей и приемной антенн, то справедливо равенство, связывающее изменение φ_n от точки к точке и перемещение объекта Δx_n :

$$\varphi_n - \varphi_{n-1} = 2k \Delta x_n \cos \alpha_{n-1}, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число (рис. 3).

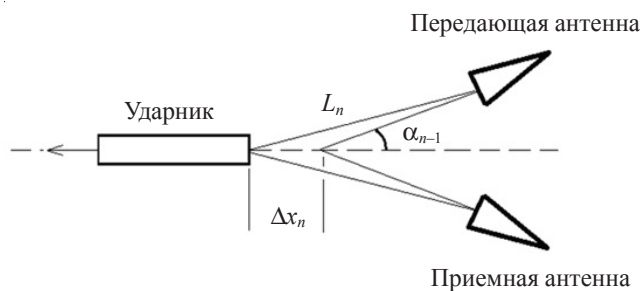


Рис. 3. Схема измерения перемещения заднего торца ударника

Зная расположение антенн и объекта для текущего момента времени и определив приращение Δx_n по данным интерферометра, из геометрических соображений получаем значение величины α_n для следующего момента времени. Для определения смещения заднего торца ударника от начального положения производится суммирование полученных величин Δx_n :

$$X_n = \Sigma \Delta x_n.$$

Результаты экспериментов

В опытах использовались цилиндрические ударники, выполненные из закаленной стали 45 и алюминиевого сплава Д16Т. Для уменьшения массы стальные ударники изготавливались полыми. К заднему торцу таких ударников для лучшего отра-

жения радиоволн приклеивалась стальная пластина толщиной 5 мм. Условия проведения экспериментов приведены в таблице 1. При проведении испытаний ударники не испытывали пластических деформаций. В качестве преграды использовались контейнеры из полипропилена, заполненные сухим песком с плотностью 1750 кг/м³, аналогичным описанному в [6]. Размеры контейнеров приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ эксперимента	Материал ударника	Длина, мм	Масса, г	Скорость удара, м/с	Контейнер		
					Длина, мм	Диаметр, мм	Толщина, мм
582	Сталь	95	115,1	152	400	150	4,6
584	Д16Т	105	88,9	155	400	150	4,6
585	Д16Т	105	88,9	155	500	186	6,8
586	Д16Т	105	88,9	156	500	186	6,8

Данные о перемещении, полученные с помощью фотосъемки, не использовались при обработке данных интерферометра, за исключением одного кадра, который позволяет узнать положение ударника относительно антенн в момент времени, соответствующий началу регистрации и обработки интерферограммы. Это необходимо для правильного вычисления углов в формуле (1).

На рис. 4 приведены кинограммы проникания цилиндрических ударников, изготовленных из алюминиевого сплава Д16Т (рис. 4а) и стали (рис. 4б), в мишень из сухого песка при скоростях удара соответственно 155 м/с и 152 м/с. Интервал между кадрами 100 мкс. Хорошо видно, что в процессе проникания ударник практически не отклоняется от направления движения. По результатам киносъемки определялось перемещение ударника в различные моменты времени до момента его полного погружения в материал мишени.

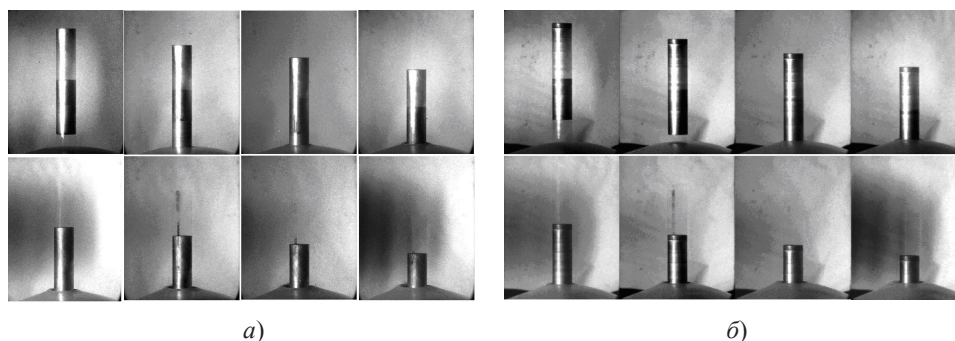


Рис. 4. Кинограммы процесса проникания цилиндрических ударников в мишень из сухого песка в экспериментах №585 (а) и №582 (б)

На рис. 5 приведена зависимость перемещения ударника со скоростью 155 м/с в эксперименте №585 по результатам радиоинтерферометрии. Там же приведены результаты измерения перемещения по данным киносъемки. Отличие данных, полученных разными методами, не превышает 0,2 мм для всех кадров и имеет разный знак, что, скорее, характеризует погрешность обработки изображений. Накопления ошибки перемещения за время кинорегистрации не происходит.

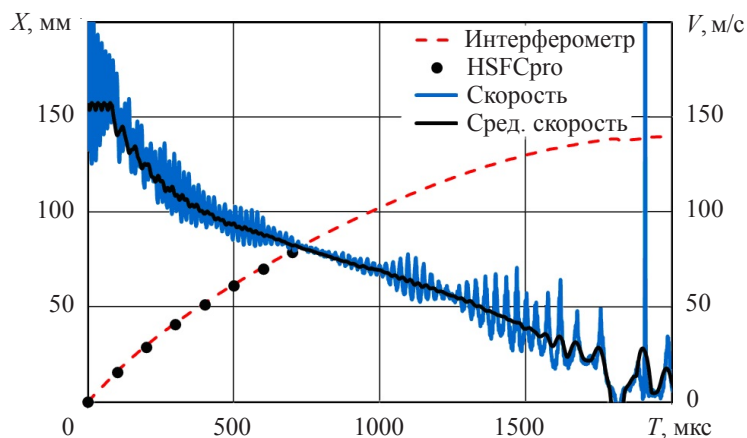


Рис. 5. Зависимость перемещения и скорости ударника от времени в эксперименте №585

Методика измерения перемещения ударника при его проникании в мишень с использованием радиоинтерферометра позволяет проводить регистрацию положения ударника даже после его полного погружения в мишень, в то время как невозможно проводить киносъемку в видимом свете. Непрерывную зависимость глубины внедрения от времени можно численно проинтегрировать для получения скорости проникания (см. рис. 5).

Как видно из рис. 5, на графике скорости имеются квазисинусоидальные колебания, что при радиоинтерферометрических измерениях обычно имеет место, когда кроме полезного сигнала, отраженного от движущегося объекта, в приемную антенну попадает мешающий сигнал от неподвижного объекта с несмещенной частотой и произвольной фазой. В рассматриваемом случае причиной мешающего сигнала может служить отражение сигнала от стенок вакуумной камеры, выполненных из стали. Для снижения влияния этого эффекта можно размещать в камере радиопоглощающий материал.

Амплитуда колебаний на графике скорости зависит от соотношения величин полезного сигнала и паразитного сигнала, отраженного от конструктивных элементов вакуумной камеры установки ПГ-20 (отношение сигнал–шум). Паразитный сигнал помехи, по всей видимости, мало меняется в процессе регистрации. Однако за счет формы диаграммы направленности антенн достаточно сильно меняется амплитуда полезного сигнала, что приводит к уменьшению отношения сигнал–шум и увеличению размаха паразитных колебаний в начале регистрации и затем к плавному их уменьшению с ростом времени. Минимальная амплитуда паразитных колебаний достигается в интервале времени 500–1000 мкс после начала регистрации. В этом интервале времени амплитуда полезного сигнала максимальна. Далее с ростом времени размах паразитных колебаний снова растет, так как убывает амплитуда полезного сигнала.

Поскольку паразитные колебания имеют период 10–20 мкс и не несут полезной информации о перемещении и скорости ударника, для устранения их влияния на результаты измерения скорости можно провести скользящее усреднение полученных результатов на интервале 20 мкс, что позволяет практически полностью их устранить.

Обработанные зависимости скорости для экспериментов №582 (стальной ударник, скорость удара 152 м/с) и №584 (ударник из алюминиевого сплава, скорость удара 155 м/с) приведены на рис. 6.

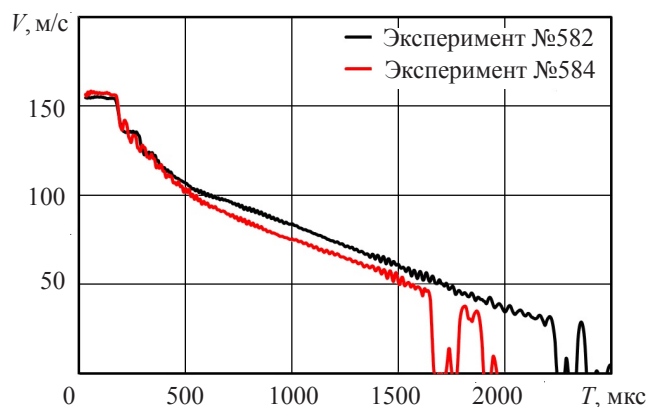


Рис. 6. Зависимости скорости движения ударника от времени

На графике хорошо видно несколько участков, соответствующих различным стадиям движения ударника. На начальном этапе скорость движения ударника постоянна и практически точно соответствует скорости вылета из ствола пушки, что свидетельствует о достоверности измерения скорости. Далее следует участок, характеризующийся резким изменением скорости движения ударника, соответствующий начальной нестационарной стадии внедрения, на которой силы сопротивления внедрению максимальны. В течение 20–30 мкс скорость ударника уменьшается примерно на 20 м/с. Затем следует участок нелинейного уменьшения скорости, на котором видны затухающие колебания. Для стального ударника, имеющего более сложную конструкцию (выполнен полым), эти колебания имеют достаточно большой период – 70–80 мкс. Для сплошного ударника из сплава колебания имеют период около 40 мкс, что соответствует времени двойного пробега упругих волн вдоль ударника. При уменьшении скорости движения ударника до 100 м/с в обоих случаях зависимость скорости от времени становится линейной, что соответствует движению ударника при постоянной силе сопротивления. Через 1500 мкс после начала соударения в большинстве экспериментов отраженный от заднего торца ударника сигнал начинал прерываться, и регистрация перемещения прекращалась. Однако это уже соответствовало полному погружению ударника в материал мишени и уменьшению его скорости до величины около 30 м/с.

На рис. 7 приведены результаты измерения скорости движения ударника в экспериментах №584 со скоростью удара 155 м/с и №586 со скоростью удара 156 м/с, отличающихся только размерами использованных в качестве мишеней контейнеров с песком. Сравнение результатов показало их практически полную идентичность, то есть влияния размеров контейнера на зависимость скорости от времени в интервале до 2000 мкс после начала соударения не обнаруживается.

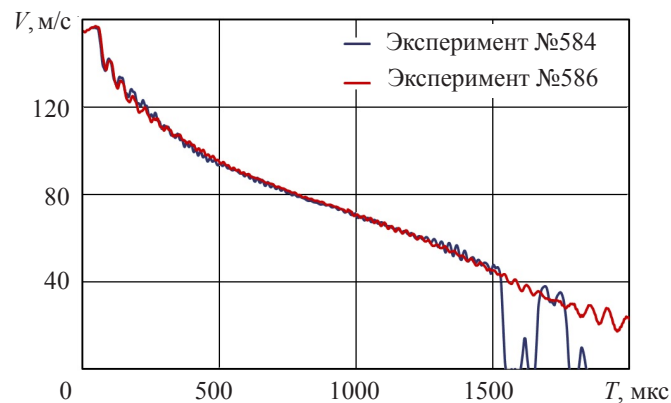


Рис. 7. Зависимости скорости движения ударника от времени

Заключение

С использованием перспективного радиоинтерферометрического метода проведено исследование проникания цилиндрических ударников в сухой песок. Сравнение данных по перемещению ударника, полученных с использованием высокоскоростной киносъемки и радиоинтерферометра, показывает, что они совпадают в пределах погрешности. Получено, что этот метод позволяет регистрировать перемещение и скорость ударника, проникающего в грунтовую преграду, на длительном временном интервале, в том числе при полном погружении ударника в материал мишени. Метод позволяет идентифицировать все основные этапы движения ударника: свободный полет, начальную нестационарную стадию внедрения, уменьшение скорости по нелинейному закону, движение с постоянным замедлением при уменьшении скорости проникания до значений менее 100 м/с.

Список литературы

1. Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L. Dynamics of a projectile penetrating sand. *Journal of Applied Physics*. 1957. Vol. 28. Iss. 3. P. 370–376. <https://doi.org/10.1063/1.1722750>.
2. Watanabe K., Tanaka K., Iwane K., Fukuma S., Takayama K., Kobayashi H. Sand behavior induced by high-speed penetration of projectile. *AFOSR. Rep. AOARD-094011*. Tokyo, Japan. 2011.
3. Maynard D.K. Projectile impact and penetration dynamics – correlation of analytical and experimental results. *Proceedings of International Conference on Fracture Mechanics and Technology*. Hong Kong. 1977. Vol. 2. P. 1329–1342.
4. Park H., Chen W.W. Stress variations and particle movements during penetration into granular materials. In: *Dynamic Behavior of Materials*. Vol. 1. Ed. T. Proulx. New York–Dordrecht–Heidelberg–London: Springer, 2011. P. 85–92. DOI: 10.1007/978-1-4614-0216-9.
5. Баландин Вл. Вл. Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 3. С. 232–237.
6. Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду. *ЖТФ*. 2016. Т. 86. Вып. 6. С. 62–70.
7. Бивин Ю.К. Движение тела вблизи свободной поверхности жидкости или пластической среды. *Изв. РАН. МТТ*. 2001. №3. С. 112–122.
8. Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях. *ПМТФ*. 1963. №1. С. 88–96.
9. Borg J., Vogler T. An experimental investigation of the high velocity projectile penetrating

sand. *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition. June 2–5, 2008*. Orlando, Florida, USA. 2008. 6 p.

10. Collins J.A., Sierakowski R.L. Studies on the penetration mechanics of Eglin sand. *Air Force Frument Laboratory. TR-76-122. Final Report*. Florida, USA. 1976. 30 p.

11. Sierakowski R.L., Malvern L.E., Collins J.A., Milton J.E., Ross C.A. Penetrator impact studies of soil/concrete. *Report no AFOSR-78-0164*. Washington, DC: US Air Force Office of Scientific Research, Bolling AFB, 1977. 244 p.

12. Collins A.L., Addiss J.W., Walley S.M., Promratana K., Bobaru F., Proud W.G. et al. The effect of rod nose shape on the internal flow fields during the ballistic penetration of sand. *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38. Iss. 12. P. 951–963. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.08.002.

13. Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. *International Journal of Impact Engineering*. 2006. Vol. 32. P. 1584–1594. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.012.

14. Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И. и др. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием пьезоакселерометрии. *ЖТФ*. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 94–104.

15. Бухарев Ю.Н., Гандурин В.П., Кораблев А.Е., Морозов В.А., Хаймович М.И. Экспериментальное исследование проникания недеформируемого ударника в глинистую среду и снег. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация конструкций*. 1991. Вып. 48. С. 99–106.

16. Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M. Poncelet coefficients of granular media. In: *Dynamic Behavior of Materials*. Eds. B. Song, D. Casem, J. Kimberley. Vol. 1. Lombard, IL: Springer, 2014. P. 373–380.

17. Omidvar M., Bless S., Iskander M. Global observations and post mortem analysis of penetration in sand. In: *Rapid Penetration into Granular Media: Visualizing the Fundamental Physics of Rapid Earth Penetration*. Elsevier Inc. 2015. P. 145–186. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800868-3.00005-5>.

18. Канаков В.А., Лупов С.Ю., Орехов Ю.И., Родионов А.В. Методы извлечения информации о перемещении границ раздела в газодинамических экспериментах с использованием радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51. №3. С. 234–246.

19. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов. *Физика горения и взрыва*. 2011. Т. 47. №6. С. 29–41.

20. Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Пархачёв В.В., Ламзин Д.А. Применение радиоинтерферометра для измерения скорости свободной поверхности в плосковолновом эксперименте. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №1. С. 118–126.

21. Chang A.L. In-situ measurement of penetrator erosion rate and dynamic flow stress during long-rod penetration. *Rep. ARL-TR-1187*. August 1996. 56 p.

References

1. Allen W.A., Mayfield E.B., Morrison H.L. Dynamics of a projectile penetrating sand. *J. Appl. Phys.* 1957. Vol. 28. Iss. 3. P. 370–376. <https://doi.org/10.1063/1.1722750>.

2. Watanabe K., Tanaka K., Iwane K., Fukuma S., Takayama K., Kobayashi H. Sand behavior induced by high-speed penetration of projectile. *AFOSR. Rep. AOARD-094011*. Tokyo, Japan. 2011.

3. Maynard D.K. Projectile impact and penetration dynamics – correlation of analytical and experimental results. *Proceedings of International Conference on Fracture Mechanics and Technology*. Hong Kong. 1977. Vol. 2. P. 1329–1342.

4. Park H., Chen W.W. Stress variations and particle movements during penetration into granular materials. In: *Dynamic Behavior of Materials*. Vol. 1. Ed. T. Proulx. New York. Dordrecht. Heidelberg. London. Springer. 2011. P. 85–92. DOI 10.1007/978-1-4614-0216-9.

5. Balandin V.I. Ustanovka dlya issledovaniya protsessov vysokoskorostnogo soudareniya

[A stand for studying high-velocity impact]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2013. Iss. 75. Pt. 3. P. 232–237 (In Russian).

6. Balandin V.I., Balandin V.I., Bragov A.M., Kotov V.L. Experimental study of the dynamics of penetration of a solid body into a soil medium. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2016. Vol. 61. No 6. P. 860–868.

7. Bivin Yu.K. Motion of a body near a free surface of a fluid or plastic medium. *Mechanics of Solids*. 2001. Vol. 36. No 3. P. 95–104.

8. Lagunov V.A., Stepanov V.A. Izmerenie dinamicheskoy szhimaemosti peska pri vysokikh davleniyakh [Measurements of the dynamic compressibility of sand under high pressures]. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika [J. Appl. Mech. Tech. Phys.]*. 1963. No 1. P. 88–96 (In Russian).

9. Borg J., Vogler T. An experimental investigation of the high velocity projectile penetrating sand. *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition. June 2–5, 2008*. Orlando, Florida, USA. 2008. 6 p.

10. Collins J.A., Sierakowski R.L. Studies on the penetration mechanics of Eglin sand. *Air Force Armament Laboratory. TR-76-122. Final Report*. Florida, USA. 1976. 30 p.

11. Sierakowski R.L., Malvern L.E., Collins J.A., Milton J.E., Ross C.A. Penetrator impact studies of soil/concrete. *Report no AFOSR-78-0164*. Washington, DC. US Air Force Office of Scientific Research, Bolling AFB. 1977. 244 p.

12. Collins A.L., Addiss J.W., Walley S.M., Promratana K., Bobaru F., Proud W.G. et. al. The effect of rod nose shape on the internal flow fields during the ballistic penetration of sand. *Int. J. Impact Eng.* 2011. Vol. 38. Iss. 12. P. 951–963. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.08.002.

13. Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. *Int. J. Impact Eng.* 2006. Vol. 32 P. 1584–1594. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.012.

14. Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I. et al. Computation of nondeformable striker penetration into low-strength obstacles using piezoelectric accelerometry data. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 56. Iss 7. P. 992–1002.

15. Buharev Yu.N., Gandurin V.P., Korablev A.E., Morozov V.A., Himovich M.I. Eksperimentalnoe issledovanie pronikaniya nedeformiruemogo udarnika v glinistuyu sredu i sneg [An experimental study of the penetration of an undeformable drummer into clay and snow]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Analiz i optimizatsiya konstruktiv [Applied Problems of Strength and Plasticity. Analysis and Optimization of Structures]*. 1991. Iss. 48. P. 99–106 (In Russian).

16. Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M. Poncelet coefficients of granular media. In: *Dynamic Behavior of Materials*. Eds. B. Song, D. Casem, J. Kimberley. Vol. 1. Lombard, IL. Springer, 2014. P. 373–380.

17. Omidvar M., Bless S., Iskander M. Global observations and post mortem analysis of penetration in sand. In: *Rapid Penetration into Granular Media: Visualizing the Fundamental Physics of Rapid Earth Penetration*. Elsevier Inc. 2015. P. 145–186. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800868-3.00005-5>.

18. Kanakov V.A., Lupov S.Yu., Orekhov Yu.I., Rodionov A.V. Techniques for retrieval of the boundary displacement data in gas-dynamic experiments using millimeter-waveband radio interferometers. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2008. Vol. 51. No 3. P. 210–221.

19. Bel'skii V.M., Mikhailov A.L., Rodionov A.V., Sedov A.A. Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2011. Vol. 47. No 6. P. 639–650.

20. Balandin V.V., Balandin V.I., Parkhachev V.V., Lamzin D.A. Primenenie radiointerferometra dlya izmereniya skorosti svobodnoy poverkhnosti v ploskovolnovom eksperimente [Using radio-interferometry for measuring free surface velocity in plane-wave experiments]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 1. P. 118–126 (In Russian).

21. Chang A.L. In-situ measurement of penetrator erosion rate and dynamic flow stress during long-rod penetration. *Rep. ARL-TR-1187*. August 1996. 56 p.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE PENETRATION OF CYLINDRICAL PROJECTILES INTO DRY SAND

Balandin V.V.¹, Balandin VI.VI.¹, Parkhachev V.V.²

¹*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

For the most complete study of the laws of shock interaction of solids with soil barriers, further development of experimental techniques for recording the parameters of the interaction process in direct and inverse experiments is necessary. In this work, to determine the parameters of the movement of the projectile (displacement and speed) in a direct experiment, a millimeter-wave radio interferometer is used. This method allows continuous recording of the movement of the rear end of the striker with high accuracy over a wide range of movements. Using the proposed technique, experiments were carried out to record the motion parameters of cylindrical impactors made of steel and aluminum alloy when interacting with an obstacle made of dry sand. At the same time, the movement of the rear end of the striker was also controlled using high-speed filming until the full immersion of the striker. The experiments showed that the measurement results obtained using two methods coincide within the measurement error. Based on the experiments, it can be concluded that the methodology for determining the displacement and velocity of a projectile in a ballistic experiment using a millimeter-wave radio interferometer allows continuous measurement of large displacements (100 mm or more), including when completely immersed in a target with sufficient practical goals accuracy. Based on the results of the experiments, the dependences of the movement of the projectile and its speed on time are constructed. A change in the penetration law was found with a decrease in the penetration velocity to values less than 100 m/s.

Keywords: radio interferometer, projectile, soil target, penetration velocity.