

УДК 531.39+621.37

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-1-118-128

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И СКОРОСТИ УДАРНИКА РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОМ*

© 2019 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 01.11.2018

Изучение ударного взаимодействия твердых и деформируемых тел с преградами различной физической природы требует развития экспериментальных методик регистрации параметров процесса взаимодействия. При проведении экспериментальных исследований ударного взаимодействия твердых тел чаще всего проводят измерения зависимости перемещения ударника от времени, скорости ударника и его замедления. Для определения перемещения и скорости ударника предложена радиоинтерферометрическая методика регистрации перемещения его заднего торца. В отличие от методов регистрации, основанных на высокоскоростной киносъемке и рентгеноимпульсной съемке, метод с использованием радиоинтерферометра миллиметрового диапазона позволяет вести непрерывную регистрацию перемещения заднего торца ударника с высокой точностью в широком диапазоне перемещений. Для проверки работоспособности методики проведены эксперименты по регистрации движения цилиндрического ударника из алюминиевого сплава после выстрела из газовой пушки калибра 20 мм. Перемещение ударника также контролировалось с помощью высокоскоростной киносъемки. Различия результатов измерений, полученных с использованием двух методик, находятся 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 практически непрерывно измерять большие перемещения (100 мм и более) с достаточной для практических целей точностью. Эта методика может быть использована для измерения перемещения и скорости заднего торца ударника, взаимодействующего с преградой различной физической природы (металлы, керамики, грунты, бетоны и др.).

Ключевые слова: ударное взаимодействие, твердые тела, радиоинтерферометрическая методика, регистрация перемещения и скорости, преграды различной физической природы.

*Выполнено при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (соглашение № 14.578.21.0246, уникальный идентификатор RFMEFI57817X0246).

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. Поскольку динамические свойства соударяющихся тел сложны и разнообразны, решения задач этими методами являются приближенными и требуют верификации результатов в модельных и натуральных экспериментах.

При проведении экспериментальных исследований ударного взаимодействия твердых тел чаще всего проводят измерения зависимости перемещения ударника от времени, скорости ударника и его замедления. Для этого используются различные датчики, размещенные в мишени [1–3], высокоскоростная киносъемка процесса проникания [2, 4–9], многокадровая рентгеноимпульсная съемка [10–12], акселерометрия [13–15] и оптическая интерферометрия [16].

Следует отметить, что методы с использованием датчиков, размещенных в мишени, достаточно трудоемки. Кроме того, при использовании разрывающихся проволок [1] и световодов [2] чувствительные элементы могут оказывать влияние на движение ударника и в то же время испытывать смещение за счет движения материала мишени. Также существует неопределенность в моментах времени срабатывания чувствительных элементов. В результате подобных экспериментов 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, 4–9]. В последнее десятилетие широкое распространение в научных исследованиях получили высокоскоростные цифровые кинокамеры [2, 5, 8]. Эти устройства обладают рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с камерами предыдущего поколения с регистрацией изображения на пленку: в них отсутствует параллакс между отдельными кадрами; интервалы между кадрами и время 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.

При съемке процесса проникания в видимом свете существует ограничение: регистрация движения ударника может вестись только до его полного погружения в мишень. От этого недостатка свободна рентгеноимпульсная фотосъемка процесса соударения [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 рентгеноимпульсная съемка позволяют получать относительно небольшое количество кадров (в оптическом диапазоне до нескольких десятков, в рентгеновском – до 10), 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 су-

шественно 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 сведения о замедлении ударника во времени и о силе сопротивления, действующей на ударник, с достаточной высокой точностью. Однако при больших скоростях удара процесс съема информации сильно усложняется и требует применения достаточно сложной и дорогой аппаратуры [15], которая часто разрушается после удара.

В последнее время для исследования процессов проникания используют интерферометрические методики, позволяющие бесконтактно получать непрерывную информацию о скорости движущегося тела. С. Блесс и др. [16] использовали интерферометр PDV (Photonic Doppler Velocimeter) для непрерывной записи скорости движения стальной сферы в грунтовых средах. Однако проведение подобных экспериментов связано с серьезными методическими трудностями при подготовке экспериментов, а время регистрации процесса ограничено моментом перекрытия зондирующего лазерного луча продуктами выброса материала мишени.

В плосковолновых и детонационных экспериментах хорошо зарекомендовал себя радиоинтерферометр миллиметрового диапазона [17–20]. Близкий по конструкции интерферометр использовал А. Ченг [21] для регистрации скорости движения заднего торца ударника, взаимодействующего с мишенью.

В настоящей статье предложена методика регистрации перемещения и скорости заднего торца ударника с использованием радиоинтерферометра миллиметрового диапазона.

Постановка эксперимента

Измерение перемещения и скорости полета цилиндрического ударника из сплава Д16Т диаметром 19,7 мм и длиной 75 мм с помощью радиоинтерферометра производилось на установке ПГ-20 [5]. Для этого использовался радиоинтерферометр, описанный в [17, 18]. Эксперимент имел целью отработку методики длительного получения информации о перемещении ударника на протяжении нескольких сотен или даже тысяч микросекунд. Двигаясь со скоростью около 200 м/с, ударник за это время преодолевает расстояние несколько десятков или сотен миллиметров. Поскольку в последующих экспериментах планируется изучать взаимодействие ударника с преградами, когда передний торец ударника будет недоступен для радиоизлучения, методика должна позволять измерять перемещение и скорость ударника по отражению радиоизлучения от заднего торца.

Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1: 1 – ударник, вылетающий из ствола пушки со скоростью V ; 2 – вакуумная камера; 3 – ствол пушки; 4 – электромагнитный измеритель скорости; 5 – высокоскоростная восьмикадровая кинокамера; 6 – открытые концы волноводов (антенны); 7 – диэлектрические волноводы. Передающая и приемная антенны 6 располагаются по боковым сторонам электромагнитного измерителя скорости 4 в плоскости, проходящей через ось ствола пушки. Так как поместить антенную систему на оси ствола пушки 3 позади ударника невозможно, то зондирование заднего торца ударника радиосигналом от антенны можно проводить только под некоторым углом. Величина этого угла будет изменяться при перемещении ударника, что необходимо учитывать при обработке сигнала радиоинтерферометра.

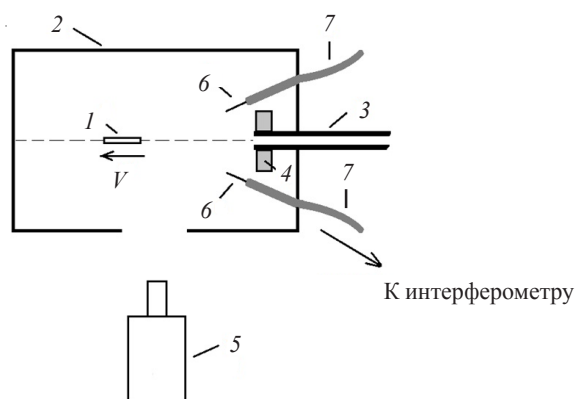


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Скорость вылета ударника из ствола пушки регистрируется электромагнитным измерителем скорости 4 с погрешностью не более 2%. Для сравнения с результатами, полученными с использованием интерферометрии, в эксперименте осуществлялась высокоскоростная съемка кинокамерой 5 через окно в боковой поверхности вакуумной камеры. В условиях, когда угол падения зондирующего излучения на торец ударника постоянно меняется, для корректной обработки сигнала радиоинтерферометра необходимо получить от кинокамеры по крайней мере один кадр для определения начального положения ударника.

При измерениях используются две антенны 6: одна излучает, другая принимает сигнал. Антенная система радиоинтерферометра представляет собой «открытые концы» диэлектрических волноводов 7, по которым зондирующее излучение выводится из интерферометра и отраженный от ударника сигнал возвращается обратно в интерферометр. Такой вариант антенн позволяет получить широкую диаграмму направленности $\pm 30^\circ$ по уровню 0,5 от максимума мощности. Широкая диаграмма направленности позволяет перекрыть большую длину перемещения ударника. Диэлектрические волноводы помещены в гибкую цилиндрическую оболочку из вспененного полиэтилена на всем протяжении от интерферометра. В вакуумную камеру они вводятся через специальные отверстия.

Зондирующий сигнал имеет длину волны $\lambda = 3,2$ мм в вакууме (частота 93,75 ГГц). Радиоинтерферометр с помощью гетеродина переносит принятый сигнал, содержащий доплеровский частотный сдвиг от перемещения ударника, на частоту 2 ГГц, после чего регистрация сигнала осуществляется осциллографом Tektronix DPO 7254C с частотой дискретизации 20 ГГц в режиме Fast Frame (регистрация отдельных фрагментов записи интерферограммы). Частота следования фреймов 200 кГц, длительность каждого фрейма 0,1 мкс (2000 отсчетов). Всего регистрируется 500 фреймов, то есть 2,5 мс. Применение режима Fast Frame обусловлено большой протяженностью регистрируемого процесса, а частота следования фреймов выбрана такой, чтобы между записью фреймов объект успевал переместиться менее чем на половину длины волны зондирующего излучения. Такой способ регистрации позволил избежать потери информации и неоднозначности в интерпретации результата.

Алгоритм обработки данных

На протяжении каждого фрейма записывался опорный сигнал с генератора интерферометра, а также сигнал, отраженный от объекта. Определение величины разности фаз между опорным и отраженным сигналами для каждого фрейма осуществлялось методом численной оптимизации. Изменение разности фаз на n -м фрейме φ_n от фрейма к фрейму несет информацию о перемещении отражающей поверхности.

Так как зондирование осуществляется под углом α к направлению перемещения и поскольку перемещение Δx ударника за время между фреймами много меньше, чем расстояние L от объекта до передающей и приемной антенн (рис. 2), то справедливо следующее равенство, связывающее изменение φ_n от фрейма к фрейму и перемещение объекта Δx_n :

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

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

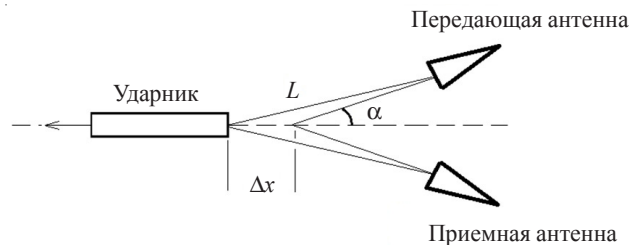


Рис. 2. Схема измерения перемещения заднего торца ударника

При значительном смещении объекта изменением угла α пренебрегать нельзя. Зная расположение антенн и объекта для текущего фрейма и определив приращение Δx_n по данным интерферометра, из геометрических соображений получаем значение величины α для следующего фрейма.

Результаты экспериментов

Для проверки пригодности предлагаемой методики для регистрации больших перемещений, а также для проверки устойчивости результата к различным вариантам угла наклона антенн была проведена серия опытов, в которых вместо ударника вручную пошагово с малой скоростью перемещался стальной цилиндрический стержень с плоским задним торцом диаметром 19,85 мм. Стержень закреплялся и перемещался в специально изготовленной диэлектрической направляющей вдоль оси ствола.

На каждом шаге эксперимента стержень перемещался на 1 мм вручную, контроль перемещения осуществлялся по линейке с ценой деления 1 мм. Начальное положение торца стержня было в 25 мм от линии, соединяющей фазовые центры антенн, а конечное – в 125 мм. Расстояние между фазовыми центрами антенн составляло 110 мм. Ста шагам перемещения соответствует сто одна запись интерферограмм, где первая соответствует начальному положению. Фазы интерферограмм были вычислены, а затем обработаны по формуле (1) с учетом изменяющегося угла. Во всем диапазоне перемещение стержня, измеренное интерферометром, не отли-

чалось от действительного перемещения больше, чем на 0,5 мм. Это расхождение объясняется достаточно большой погрешностью измерения действительного перемещения с помощью линейки, а не погрешностью интерферометра. Конечное перемещение совпало с ожидаемым результатом с такой же точностью, накопления ошибки не происходило.

Тестовый эксперимент показал, что разработанная экспериментальная методика и предложенный алгоритм обработки данных позволяют измерять большие перемещения с высокой точностью.

Далее был проведен эксперимент по схеме, описанной в разделе «Постановка эксперимента» (см. рис. 1). Скорость ударника, измеренная электромагнитным измерителем, составила 182 м/с. В опыте осуществлялась одновременная регистрация перемещения вылетевшего из ствола пушки ударника с помощью радиоинтерферометра и высокоскоростная кинорегистрация процесса. Запуск измерительной системы радиоинтерферометра и кинорегистрации процесса производился от сигнала второго канала электромагнитного измерителя скорости. Ударник длиной 75 мм и диаметром 19,7 мм был изготовлен из сплава Д16Т. Интервал между последовательными кадрами составлял 100 мкс, время экспозиции – 0,1 мкс. По результатам киносъемки определялось перемещение заднего торца ударника.

Данные радиоинтерферометра о перемещении и скорости ударника записывались каждые 5 мкс. На рис. 3 приведен график перемещения заднего торца ударника, восстановленный по данным интерферометра (сплошная линия), и квадратами показаны точки, соответствующие данным высокоскоростной киносъемки. На графике показан интервал времени 2 мс, когда ударник уже вылетел из ствола и был виден для сигнала интерферометра. Первые 0,5 мс данных интерферометра не содержат полезной информации и не показаны.

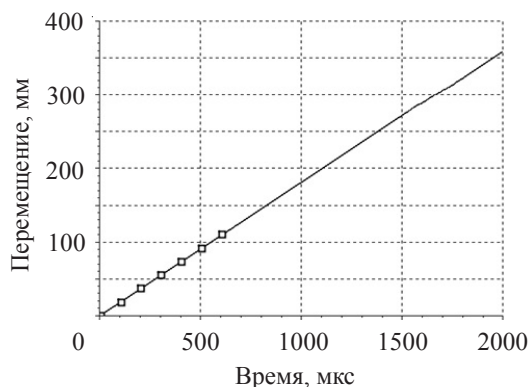


Рис. 3. Зависимость перемещения ударника от времени

Данные о перемещении, полученные с помощью фотосъемки, не использовались при обработке данных интерферометра, за исключением второго кадра, который позволяет узнать положение ударника относительно антенн в начальный момент времени (с которого начинается обработка интерферограммы), чтобы можно было правильно вычислять углы для формулы (1).

Отличие данных фотосъемки от данных интерферометра не превышает 0,2 мм для всех кадров и имеет разный знак, что, скорее, характеризует погрешность сопоставления фотоснимков. Накопления ошибки перемещения за время 600 мкс не произошло, то есть говорить о статистически значимом различии в данных нельзя.

На рис. 4 приведен график скорости, полученный численным дифференцированием графика перемещения.

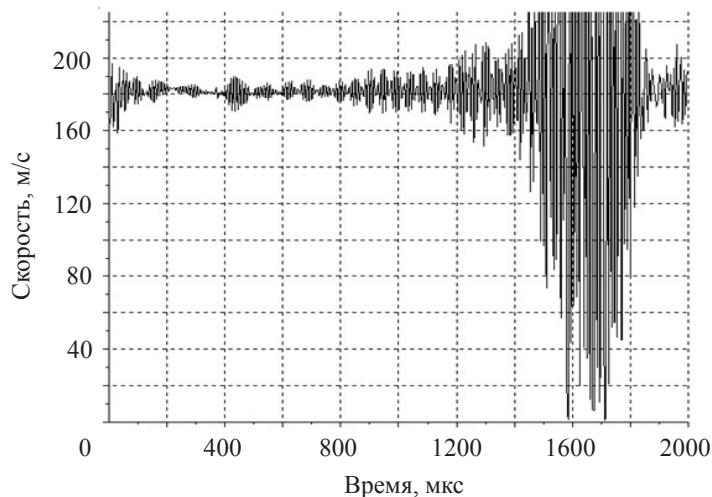


Рис. 4. Зависимость скорости ударника от времени

Среднее значение скорости ударника в течение первой миллисекунды составило 181,4 м/с, что отличается от значения, измеренного электромагнитным измерителем скорости, всего на 0,6 м/с или 0,3%. Это отличие существенно меньше погрешности измерения скорости. Среднеквадратическое отклонение значений оценки скорости на этом интервале составило 6 м/с или 3,3%. Как видно из рис. 4, разброс скорости имеет пульсирующий характер. Это обычно наблюдается при радиоинтерферометрических измерениях, когда кроме полезного сигнала, отраженного от движущегося объекта, в приемную антенну попадает мешающий сигнал от неподвижного объекта. В нашем 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. Можно уменьшить разброс до 2 м/с на интервале от 200 до 400 мкс (см. рис. 4). Этот участок соответствует пересечению ударником максимума диаграммы направленности антенн, и поэтому отношение амплитуды полезного сигнала к помехе становится максимальным.

За первую миллисекунду ударник преодолел около 180 мм, что перекрывает весь потенциально интересующий диапазон расстояний в экспериментах по взаимодействию ударника с преградами. При интервалах времени более 1,5 мс разброс оценки скорости становится очень большим, поскольку амплитуда полезного сигнала сильно уменьшается. На рис. 5 приведен график амплитуды сигнала, принятого интерферометром, в условных единицах. Можно отметить, что хорошая точность определения скорости сохраняется даже при уменьшении амплитуды сигнала, отраженного от заднего торца ударника, в 10 раз по сравнению с максимальной амплитудой.

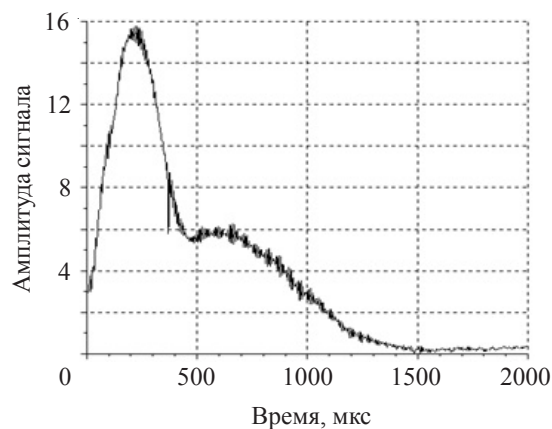


Рис. 5. Безразмерная амплитуда принятого сигнала

Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что методика определения перемещения и скорости ударника в баллистическом эксперименте с использованием радиointерферометра миллиметрового диапазона позволяет практически непрерывно измерять большие перемещения (100 мм и более) с достаточной для практических целей точностью. Отличие скорости ударника, измеренной радиointерферометром, от скорости, измеренной по кинограмме процесса и измерителем скорости, не превосходит 3% на временном интервале до нескольких сот микросекунд. Это позволяет в дальнейшем использовать представленную методику для измерения перемещения и скорости заднего торца ударника, взаимодействующего с преградой.

Список литературы

1. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок. *Механика. Сб. переводов*. М.: ИЛ, 1957. №6. С. 125–137.
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. Бердников В.А., Каминский М.В., Копытов Г.Ф., Могилев В.А., Травов Ю.Ф., Файков Ю.И., Фатеев Ю.А. Экспериментальное исследование движения конусов и цилиндра в песчаной среде. *II науч. конф. Волжского регионального центра РАН: Сб. докл.* Саров. 2003. С. 276–279.
4. Баландин В.В., Брагов А.М. Лабораторная установка для изучения процессов соударения. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов*. 1990. Вып. 46. С. 112–115.
5. Баландин Вл.Вл. Установка для исследования процессов высокоскоростного соударения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 3. С. 232–237.
6. Бивин Ю.К. Движение тела вблизи свободной поверхности жидкости или пластической среды. *Изв. РАН. МТТ*. 2001. №3. С. 112–122.
7. Златин Н.А., Козачук А.И., Пугачев Г.С., Синани А.Б. Универсальная 9-кадровая установка для высокочастотной фотографии. *ЖТФ*. 1983. Т. 58. №6. С. 1154–1159.
8. Waley S.M., Church P.D., Townsley R., Field J.E. Validation of path-dependent constitutive model for FCC and BCC metals using “symmetric” Taylor impact. *Proc. 6th Int. Conf. on Mech. and Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load*. Krakov. 2000. P. 69–74.

9. Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях. *ПМТФ*. 1963. №1. С. 88–96.
10. Borg J.P., Vogler J.T. An experimental investigation of high velocity projectile penetrating sand. *XIth International Congress and Exposition*. Orlando, Florida, USA. Society of Experimental Mechanics Inc. 2008.
11. Collins J.A., Sierakowski R.L. *Studies on the Penetration Mechanics of Eglin Sand*. AFATL rep. TR-76-122. 1976.
12. Gooch W.A., Burkins M.S., Hauver G., Netherwood P., Benck R. Dynamic X-ray imaging of penetration of boron carbide. *Proc. 6th Int. Conf. on Mech. and Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load*. Krakov. 2000. P. 583–588. DOI: 10.105/jp4: 2000997.
13. Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. *Int. J. Imp. Eng.* 2006. Vol. 32. P. 1584–1594.
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. 97–104.
15. Бухарев Ю.Н., Гандурин В.П., Кораблев А.Е., Моротов В.А., Хаймович М.И. Экспериментальное исследование проникания недеформируемого ударника в глинистую среду и снег. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация*. 1991. Вып. 48. С. 99–106.
16. Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M. Poncelet coefficients of granular media. *Dynamic Behavior of Materials. Vol. 1. Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Lombard, IL: Springer, 2014. P. 373–380.
17. 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.
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. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008. Т. 51. №3. С. 234–246.
19. Канаков В.А., Лупов С.Ю., Пархачёв В.В., Родионов А.В. Многомодовая радиоинтерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров ВВ. *9 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тр. Междунар. конф. 12–16 мар. 2007*. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 665–670.
20. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов. *ФГВ*. 2011. №6. С. 29–41.
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. 42 p.

References

1. Allen W., Mayfield E., Morrison H. Dynamics of a projectile penetrating sand. *J. Appl. Phys.* 1957. Vol. 28. No 11. P. 1331–1335.
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. Berdnikov V.A., Kaminskii M.V., Kopytov G.F., Mogilev V.A., Travov Yu. F., Faikov Yu.I., Fateev Yu.A. Eksperimentalnoe issledovanie dvizheniya konusov i tsilindra v peschanoy srede [Pilot study of the movement of cones and cylinder in the sandy environment]. *II nauchnaya konferentsiya Volzhskogo regionalnogo tsentra RARAN. Sb. dokl. [The 2nd Scientific Conference of the RARAN Volga Regional Center. Collection of Reports]*. Sarov. 2003. P. 276–279 (In Russian).
4. Balandin V.V., Bragov A.M. Laboratornaya ustanovka dlya izucheniya protsessov soudareniya [Laboratory installation for studying of processes of impact]. *Prikladnye problmy prochnosti i plastichnosti. Chislennoe modelirovanie phisiko-mekhanicheskikh protsessov [Applied Problems of Strength and Plasticity. Numerical modeling of physicomechanical processes]*. 1990. Iss. 46. P. 112–115 (In Russian).

5. Balandin V.I. Ustanovka dlya issledovaniya protsessov vysokoskorostnogo soudareniya [A stand for studying high-velocity impact]. *Problmy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2013. Is. 75. Pt. 3. P. 232–237 (In Russian).
6. Bivin Yu.K. Dvizhenie tela vblizi svobodnoy poverkhnosti zhidkosti ili plasticheskoy sredy [The movement of a body near the free surface of liquid or the plastic environment]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 2001. No 3. P. 112–122 (In Russian).
7. Zlatin N.A., Kozachuk A.I., Pugachev G.S., Sinani A.B. Universalnaya 9-kadrovaya ustanovka dlya vysokochastotnoy fotografii [Universal 9-personnel installation for the high-frequency photo]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics]*. 1983. Vol. 58. No 6. P. 1154–1159 (In Russian).
8. Waley S.M., Church P.D., Townsley R., Field J.E. Validation of path-dependent constitutive model for FCC and BCC metals using “symmetric” Taylor impact. *Proc. 6th Int. Conf. on Mech. and Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load*. Krakov. 2000. P. 69–74.
9. Lagunov V.A., Stepanov V.A. Izmereniye dinamicheskoy szhimayemosti peska pri vysokikh davleniyakh [Measurement of the dynamic compressibility of sand at high pressures]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [J. Appl. Mech. Tech. Phys.]*. 1963. No 1. P. 88–96 (In Russian).
10. Borg J.P., Vogler J.T. An experimental investigation of high velocity projectile penetrating sand. *XIth International Congress and Exposition*. Orlando. Florida. USA. Society of Experimental Mechanics Inc. 2008.
11. Collins J.A., Sierakowski R.L. *Studies on the Penetration Mechanics of Eglin Sand*. AFATL rep. TR-76-122. 1976.
12. Gooch W.A., Burkins M.S., Hauver G., Netherwood P., Benck R. Dynamic X-ray imaging of penetration of boron carbide. *Proc. 6th Int. Conf. on Mech. and Phys. Behavior of Materials under Dyn. Load*. Krakov. 2000. P. 583–588. DOI: 10.105/jp4: 2000997.
13. Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. *Int. J. Imp. Eng.* 2006. Vol. 32. P. 1584–1594.
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. Bukharev Yu.N., Gandurin V.P., Korablev A.E., Morovov V.A., Khaimovich M.I. Eksperimentalnoye issledovaniye pronikaniya nedeformiruyemogo udarnika v glinistuyu sredu i sneg [An experimental study of the penetration of an undeformable drummer into clay and snow]. *Prikladnye problmy prochnosti i plastichnosti. Analiz i optimizatsiya [Applied Problems of Strength and Plasticity. Analysis and Optimization]*. 1991. Iss. 48. P. 99–106 (In Russian).
16. Bless S., Peden B., Guzman I., Omidvar M., Iskander M. Poncelet coefficients of granular media. *Dynamic Behavior of Materials. Vol. 1. Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Lombard, IL. Springer. 2014. P. 373–380.
17. Balandin V.V., Balandin V.I., Parkhachev V.V., Lamzin D.A. Primenenie radiointerferometri dlya izmereniya skorosti svobodnoy poverkhnosti v ploskovolnovom eksperimente [Using radiointerferometry 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).
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. Kanakov V.A., Lupov S.Yu., Parkhachev V.V., Rodionov A.V. Mnogomodovaya radiointerferometriya kak sredstvo uvelicheniya chisla opredelyayemykh parametrov VV [Multimode radio interferometry as a means of increasing the number of detectable parameters of explosives]. *9 Kharitonovskiy tematicheskiy nauchnyy chteniya. Ekstremalnyye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnyye volny: Trudy mezhdunar. konf. [Proceedings of the Intern. Conf. 9th Kharitonov's Thematic Scientific Readings. Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves. 12–16 Mar. 2007]*. Sarov. RFNC – VNIIEF. 2007. P. 665–670 (In Russian).
20. 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.

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. 42 p.

MEASURING DISPLACEMENT AND VELOCITY OF A STRIKER USING A RADIO-INTERFEROMETER

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*

Investigating impact interaction of solid and deformed bodies with obstacles of various physical natures requires developing experimental methodologies of registering the parameters of the interaction process. In experimental investigations of impact interaction of solids, it is common practice to measure displacement of strikers as a function of time, as well as their velocity and deceleration. To determine the displacement and velocity of a striker, a radio-interferometric methodology of registering the displacement of its rear end is proposed. In contrast with the registration methods based on high-speed filming and pulsed X-ray photography, the method using a millimeter-range radio-interferometer provides continuous high-accuracy registering of the displacement of the rear end of a striker in a wide range of displacement values. To test the effectiveness of the methodology, a series of experiments have been conducted on registering the motion of a cylindrical striker of an aluminum alloy, fired from a 20mm-dia gas gun. The displacement of the striker was also monitored using high-speed filming. The results of measuring using the two methodologies differ within the limits of the error of measurement. Based on the results of the above experiments, it has been concluded that the methodology of determining the displacement and velocity of strikers in a ballistic experiment using a mm-range radio-interferometer makes it possible to measure practically continuously large displacements (100 mm and larger) to a safe accuracy. The present methodology can be used for measuring the displacement and velocity of the rear end of a striker interacting with obstacles of various physical natures (metals, ceramics, soils, concretes, etc.).

Keywords: impact interaction, solids, radio-interferometric methodology, registering displacement and velocity, obstacles of various physical natures.