

- Ботов В.Н. Иконников, Н.С. Корнев [и др.] // Информационные системы и технологии. ИСТ – 2017: Материалы XXIII Международной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2017. – С. 1160-1164.
6. Богданов Е.Н. Реализация радиометрического канала в КВЧ интерферометре для диагностики быстропротекающих газодинамических процессов / Е.Н. Богданов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков [и др.] // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Труды Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. – Саров, 2015. – С.442–446.
7. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов / В.М. Бельский, А.Л. Михайлов, А.В. Родионов, А.А. Седов // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 6. – С. 29-41.
8. Фокин С.А. Обработка результатов измерений физических величин. Учебное пособие для лабораторного практикума по физике / С.А. Фокин, А.М. Бармасова, М.А. Мамаев. Под. ред. С.А. Фокина. – Спб.: РГГМУ, 2009. – 58 с.
9. Андреев С.Г. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум [и др.]. Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. Т.1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 832 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЬЕЗОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗОНДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК

М.Ю. Сотский, В.А. Велданов, В.И. Пусев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Введение

Известно множество методов и технологий, используемых при решении задачи исследования кинематики начальной фазы функционирования импульсного устройства, его элементов. Одним из используемых вариантов измерительных технологий является использование инерциальных измерительных зондов, содержащих в корпусе акселерометры, регистрирующие параметры движения зонда в исследуемой среде. Реализуемая комбинация скорости сближения корпуса зонда со средой и прочностных характеристик может вызвать пластические деформации корпуса. Высокая степень деформирования корпуса приводит к погрешностям определения величин действующих на зонд нагрузок и коэффициентов в зависимостях динамического прочностного сопротивления прониканию зонда.

В частности, одной из актуальных задач для создания условий безопасного освоения космического пространства является разработка средств и технологий всестороннего изучения ударных взаимодействий. Эффективная подготовка исследовательских миссий с применением контактных инерциальных зондов осуществляется с помощью испытательных стендов, моделирующих функционирование устройств динамического контактного зондирования с учетом факторов, действующих на изучаемые объекты [1]. Частными прикладными задачами миссий являются:

- исследование динамических механических свойств поверхностных и заглубленных слоев планет и малых небесных космических тел;

- исследование процессов высокоскоростного движения зондов в различных реологических средах, составляющих массив астероидов;
- проникание в малые небесные тела для предотвращения опасности их столкновения с Землей;
- проникание в малые небесные тела для исследования состава массива тел и добычи ценных элементов.

Задача осложняется тем, что область пространства, окружающая исследуемое устройство импульсного действия представляет собой пространство с возмущенными параметрами среды, пространство выделения высокоэнергетических потоков: газодинамических, тепловых, электромагнитных и дисперсных. Наиболее надежными в условиях проведения таких исследований зарекомендовали себя методы интегральной оценки результатов функционирования устройств импульсного действия. Это различного вида баллистические маятники (маятниковый стенд, патент 2237844 RU) или, например, контактные отметчики пути в исследованиях действия импульсных аккумуляторов давления (патент 2106510 RU). Применение оптических технических средств исследования быстропротекающих процессов [2] затруднено или невозможно в силу указанных выше причин. Применимы лазерные [3], рентгеновские [4] и радарные технологии измерения скорости устройств. Наиболее информативными объективно являются технологии пьезометрии [5], так как позволяют получать данные об изменении во времени ускорения устройства или его элементов [6], а затем и другие кинематические параметры исследуемого устройства с применением точных операций интегрирования. Ниже представлены, разрабатываемые нами техника диагностики [7] и один из методов испытаний [8,9], базирующиеся на технологии пьезометрии. Использование метода открывает возможность определять характеристики силового импульса, используя регистрации истории ускорения измерительного стержня (зонда) в области малых времен действия импульса и высоких амплитуд ускорения стержня. Регистрации в испытаниях реализованы в диапазонах амплитуд ускорений до 10^8 м/с², переднего фронта нарастания импульса от 4 мкс и скоростей механического удара металлическим метаемым элементом до 1500 м/с.

1. Методика эксперимента

Пьезоэлектрический акселерометр, соединенный кабельными линиями с регистратором, не всегда может быть установлен на исследуемом устройстве или в возмущенной области перемещения движущегося под воздействием энергетического материала элемента импульсного устройства. Схематично может быть представлена картина функционирования устройства в начальной фазе его движения в направлении X от точки начала движения X_0 (в момент времени t_0) к точке X_m (в момент времени t_m), в которой элемент устройства приобретает заданную максимальную скорость движения V_m . На рисунке 1 энергетический материал 1 нестационарно воздействует с переменным усилием $P(t)$ на подвижный элемент устройства 2. В точке X_0 на элементе закреплен пьезоэлектрический акселерометр 3. В точке X_m элемент приобретает заданную максимальную скорость перемещения в направлении X . Перемещение участка с закрепленным пьезоэлектрическим акселерометром происходит в возмущенной области 4, прилегающей к элементу. Технической задачей исследования является получение данных о величине и изменении во времени кинематических параметров элемента: ускорения $dV/dt(t)$, скорости $V(t)$ и перемещения $X(t)$ на пути от точки X_0 до точки X_m .

Частный вариант измерительной технологии пьезометрии осуществлен в условиях метания элемента из газодинамического импульсного устройства на измерительный зонд, выполненный в виде стержня [8,9].

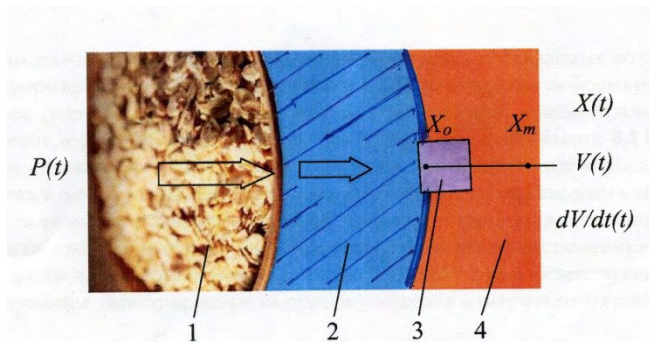


Рисунок 1. Схема функционирования устройства импульсного действия в начальной фазе движения

2. Развитие методики

Технической основой метода экспериментального исследования кинематических параметров элементов газодинамических устройств являются малогабаритный высокочастотный пьезоэлектрический акселерометр АСМ-4 по патенту 1741082 RU и способ монтажа пьезоэлектрического акселерометра по патенту 1799744 RU. Методической основой проведения испытаний является методика испытаний по патенту 1741082 RU. Возможность регистрации и анализа экстремальных ударных импульсов была установлена в серии испытаний в широком диапазоне скоростей соударения и вариантов материалов, примененных в паре «ударник - измерительный стержень». Измерительный стержень снабжен пьезоэлектрическим акселерометром АСМ-4. Акселерометр в собранном состоянии содержит основание с узлом крепления, съемный корпус, пьезоэлектрический элемент, инерционный элемент, провода связи, съемную втулку. Вариант конструкции пьезоакселерометра и вариант его закрепления на измерительном стержне представлены в публикации [8].

В зависимости от конкретных материалов пары, вида и степени деформирования элемента и стержня реализуется и большое разнообразие физических картин в зоне контакта (таблица 1).

Таблица 1. Начальные условия опытов

Вид деформирования	Номер серии опытов	Материал корпуса стержня	Удлинение стержня l_0 / d	Материал ударника (элемента)	Скорость соударения v , м/с
I	173	Армко-железо	4	Сталь 35ХГСА	218
	166	Сталь 30	6	Сталь 35ХГСА	430
II	84	Сталь У10	15.2	Сплав Д16	524
	126	Сталь 30	15	Сталь 30	680
III	156	Сталь 30	20	Сталь 30	1320
	128	Сталь 30	10	Сталь 30	1400
	127	Сталь 30	15	Сталь 30	1078

Условно выделены нами несколько характерных случаев, определяемых по преобладающим в них видам деформирования элемента и стержня: ВД I - пластически деформируемый стержень без потери массы (упруго деформируемая «жесткая» поверхность метаемого элемента-мишени); ВД II - пластически деформируемые стержень (без потери массы) и элемент; ВД III - пластически деформируемые стержень (с эрозией материала) и элемент. Выделенные виды деформирования воспроизводились в сериях испытаний, начальные условия которых приведены в таблице 1.

На рисунке 2 показаны типичные для каждого вида деформирования остаточные пластические деформации метаемых элементов и измерительных стержней, представленные

фотографиями продольных разрезов элементов. На рисунке 3 представлена предложенная схема координирования регистрируемых осциллограмм на примере данных, соответствующих виду деформирования II, приведенных в таблице 1. В правой части на рисунке 2 показаны соответствующие выделенным видам деформирования регистрируемые импульсы ускорения измерительных стержней.

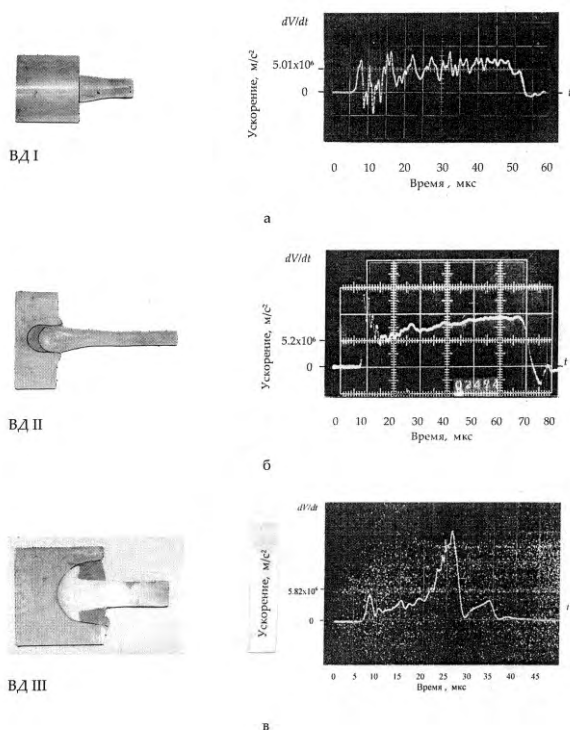


Рисунок 2. Результаты опытов для выделенных видов деформирования измерительного стержня

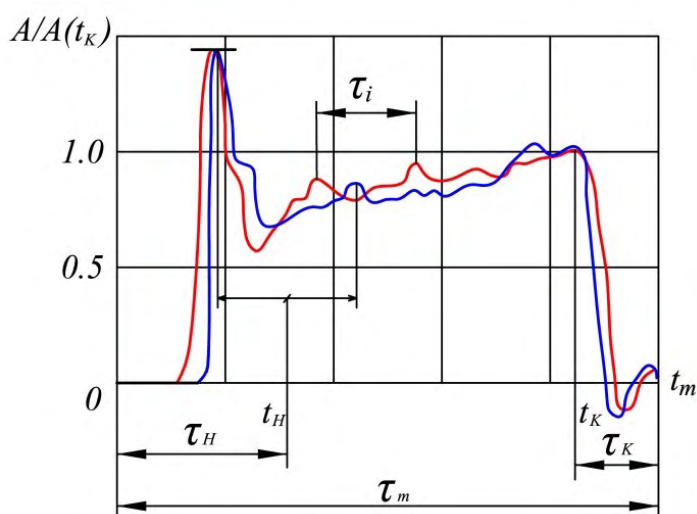


Рисунок 3. Схема анализа типовой регистрации

Кроме указанных в таблице имеются также результаты регистрации в сериях испытаний со стержнями, выполненными из других материалов: меди М1, М2, М14, стали 40Х.

Предложено перестраивать историю ускорения стержня, представляя ее в безразмерных координатах, где за единицу по оси ординат принимают значение ускорения на конечном участке осциллограммы $A(t_k) = dV/dt(t_k) = 1$. По оси абсцисс откладывается в безразмерных единицах время процесса, где за единицу принимают значение времени, регистрируемого в момент выхода амплитуды ускорения к нулевому значению.

3. Обсуждение

Анализ результатов, представленных на рисунке 3, показывает, что для вида деформирования I характерно почти монотонное изменение ускорения в преобладающей части времени процесса. Некоторые из коэффициентов взаимосвязи для двух реализованных в опытах видов деформирования стержня представлены ниже. Найденные их значения при анализе всех серий опытов сведены в таблице 2 с указанием интервала значений.

Таблица 2. Коэффициенты взаимосвязи кинематических параметров модели

Участки регистрации	Коэффициенты взаимосвязи	Диапазон значений, % для рассмотренных видов деформирования		
		I	II	III
Начальный участок	$K_1 = \frac{\tau_n}{\tau}$	19±7	25±5	25±5
Конечный участок	$K_2 = \frac{\tau_k}{\tau}$	30±5	18±3	35±3
Среднее ускорение (замедление) на начальном участке	$K_3 = \frac{A(\tau_n)}{A(t_k)}$	35±9	79±5	14±3
Падение (увеличение) скорости на начальном участке	$K_4 = \frac{v_m - v(t_n)}{v_m}$	9±3	16±3	7±2
Падение (увеличение) скорости на конечном участке	$K_5 = \frac{v(t_n)}{v_m}$	19±2	7±1	13±2
Длина недеформированной части стержня	$K_6 = \frac{l_{ex}(t_n)}{l_0}$	35±5	29±3	45±3
Перемещение заднего торца стержня относительно мишени	$K_7 = \frac{S(t_n)}{l_0}$	10±5	18±3	50±5

Для количественной оценки данные измерений анализировались по следующей методике. Отмечался момент времени t_n (рисунок 3), определяемый, как время между первым и вторым пиковыми значениями амплитуды ускорения. Период времени τ_i используется для нахождения из осциллограммы первого значения средней за этот период длины хвостовой части стержня $l_e(\tau_i)$, находящейся в упругом состоянии. Таким образом, выделялись начальный от нуля до t_n и конечный, от t_k до t_m , участки на регистрируемой осциллограмме с периодами соответственно τ_n и τ_k . Затем находилась их продолжительность по отношению к полному времени процесса τ_{np} . Далее определялись коэффициенты взаимосвязи, представляющие собой безразмерные соотношения значений кинематических и деформационных характеристик процесса на выделенных участках регистрируемой осциллограммы.

В конце процесса движения стержня в элементе (на осциллограмме это участок спада амплитуды ускорения от $A(t_k)$ до нуля) проявляются упругие свойства материалов стержня и элемента, наблюдаемые в виде локальных всплесков амплитуды ускорения стержня, не достигающих обычно значения $A(t_k)$. В тоже время, различие условий деформирования стержней приводит к отличиям не только в характере изменения во времени ускорений стержня или истории ускорения. Отличается также и степень изменения других показателей процессов, в частности, кинематических и деформационных характеристик процессов. Сопоставление результатов, получаемых в опытах для различающихся видов деформирования стержня, подтвердило эти выводы.

Заключение

Теоретические исследования процесса взаимодействия элемента со стержнем, как правило, оперируют экспериментальными данными, относящимся к конечным интегральным результатам взаимодействия. Коэффициенты взаимосвязи позволяют исследовать процесс изнутри. Так, среднее ускорение K_3 и падение (увеличение) скорости K_4 на начальном участке показывают степень замедления упругой части стержня относительно элемента, определяемую на участке от t_n до t_k . Коэффициент K_6 характеризует степень укорочения стержня в реализованном процессе. Каждый комплекс значений коэффициентов определяет тот или иной характер изменения ускорений в процессе, а также позволяет сделать вывод о реализованном в процессе виде пластического деформирования стержня.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00701 а) и с использованием оборудования ГЗ 3.6196.2017/7.8 и ГЗ 3.6257.2017/7.8.

Список литературы

1. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники / А.Г. Галеев, Ю.В. Захаров, В.П. Макаров, В.В. Родченко. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 283 с.: ил.
2. S. Bernhardsson, S. Mousavi, P. Appelgren, S. Leonardsson. Small Calibre Projectiles Perforating Thin Steel Plates, Numerical Calculations and Physical Characterization of Constitutive Models // Proc. of 27th Int. Symposium on Ballistics. 2013. V. 2. P. 1343-1353.
3. E. Strassburger, M. Hanzinger, A. Krell. Fragmentation of Ceramics under Ballistic Impact // Proc. of 25th Int. Symposium on Ballistics. 2010. V. 2. P. 1172-1179.
4. P. Lundberg, R. Renstrom, O Andersson. Influence of Length Scale on the Transition from Interface Defeat to Penetration in Unconfined Ceramic Targets // Proc. of 27th Int. Symposium on Ballistics. 2013. V. 2, P. 992-995.
5. M. Forrestal, L. Lee and B. Jenrette. Gas - Gan Experiments Determine Forces on Penetrators into Geological Targets // J. of Appl. Mechanics. 1984. V. 51 N. 9. P. 602–607.
6. M. Forrestal, D. Frew, J. Hickerson and T. Rohwer. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurement // Int. J. Imp. Engng. 2003. V.28. N. 5. P. 479–497.
7. В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии // Журнал технической физики. 2011.Т. 81. Вып. 7. с.94-104.
8. М.Ю. Сотский, В.А. Велданов. Регистрация истории замедления в мишени геометрически подобных ударников // Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 5. с.1-14.URL: <http://engjournal.ru/cata.../mech/mdsb/1400.html>
9. M. Sotskiy, V. Veldanov. Deceleration-Time data for the verification of calculation models of the penetration with erosion in target // Proc. of the 30th Intern. Symp. on Ballistics. Long Beach, USA. 2017. V. 2. P. 2006-2011.