

## Исследование процесса зондирования поверхностного слоя планет с применением измерительных моделей и сред-аналогов

# 11, ноябрь 2014

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

УДК: 539.3; 539.4.019.1; 620.17

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[sm4-2009@mail.ru](mailto:sm4-2009@mail.ru)

### Введение

В представленных ранее публикациях изложены результаты отработки технологии испытаний, включающих регистрацию истории замедления полунатурных физических моделей (измерительных зондов) в процессе действия по изучаемым средам (пластилин, песок, грунт, металл) или моделям характерных мишеней [1, 2]. Эти исследования проведены на лабораторном испытательном комплексе (ЛИК) «Удар» кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (СМ-4) с применением 24 мм баллистической установки и введенной в эксплуатацию в начале 2007 г. 100 мм пневматической установки и высокоскоростной видеорегистрирующей системы. В настоящее время испытательный комплекс проходит глубокую модернизацию с сохранением уникальной 100 мм установки и введением ряда установок других калибров, новейшей контрольно-измерительной аппаратуры и передовых моделей видеорегистрирующих систем.

Изучение динамических механических свойств реологических сред, в том числе составляющих материалы поверхностного слоя планет и малых тел Солнечной системы базируется в основном на проведении фундаментальных расчетных и экспериментальных исследований путем создания различных видов высокоскоростных нагрузок на материалы в лабораторных установках. В настоящей публикации проанализированы имеющиеся исследования, создающие базу для получения данных о динамических механических свойствах материалов путем анализа результатов удара недеформируемых и слабodeформируемых измерительных зондов при проникании в поверхность исследуемого тела Солнечной системы или модельную среду (на примере бетонной среды) – аналог материала его поверхностного слоя.

Известные лабораторные технологии [1, 2] получения зависимостей замедления от времени недеформируемого измерительного зонда при движении в упругопластической

среде реализованы в диапазоне удара со скоростью до 800 м/с. Технологии основаны на осуществлении различных частных вариантов технологии пьезометрии. Непрерывная регистрация отрицательного ускорения (замедления) измерительного зонда в среде-аналоге позволяет получить данные о динамических механических свойствах поверхности исследуемого тела Солнечной системы, произвести идентификацию свойств составляющих поверхностный слой материалов путем согласования данных об изменении во времени процесса расчетных и регистрируемых параметров. Получаемые механические характеристики среды используются при расчетах задач моделирования. Реализованные технологии базируются более, чем на 15 патентах РФ в областях создания способов и средств непрерывной электрической регистрации параметров удара и движения измерительной модели в среде, создания малогабаритных ударостойких конструкций пьезоэлектрических акселерометров, создания устройств для доставки полезного груза в массив небесного тела.

### **Результаты опытов с измерением показателей сопротивления материала при его динамическом нагружении**

В области познания фундаментальных свойств бетонных сред и горных пород выявление влияния динамичности приложения нагрузки к хрупкоразрушающимся средам на проявляемые ими при этом механические свойства является актуальной задачей. Кроме того, что исследуемые среды являются основным конструкционным материалом инфраструктурных объектов, они могут быть использованы в лабораторных исследованиях в качестве сред-аналогов. Объединены эти искусственные и природные структурно неоднородные материалы (среды) принадлежностью к классу разносопротивляющихся материалов [3-5]. Среда с подобными свойствами составляют также материалы поверхности астрономических тел: планет, астероидов [6, 7]. Большое разнообразие материалов, объектов и вариантов динамического воздействия определяет и нарастающую заинтересованность в экспериментальном определении необходимых зависимостей и коэффициентов в инженерных и численных моделях описания и расчета процессов динамического деформирования и разрушения рассматриваемых материалов. Любой частный вариант конструкции объекта динамического воздействия, конкретного конструкционного материала и конкретных характеристик источника динамического воздействия вносит в примененную модель материала или математического описания этого частного процесса свои особенности. Для адекватного и неискаженного описания рассматриваемого частного процесса разработанные для него расчетные модели неизбежно требуют тщательного тестирования и верифицирования.

Кафедра СМ-4 обладает продолжительным опытом проведения фундаментальных и прикладных исследований в области определения динамических механических свойств реологических материалов и использовании полученных данных для решения прикладных задач. Диапазон исследований охватывает как классические задачи терминальной (конечной) баллистики, так и возникающие варианты задач исследования свойств поверхности космических объектов или предотвращения астероидной опасности [6, 7]. Кафедра

обладает также приоритетом в разработке технологий акселерометрии терминальной баллистики (ТБА-технологий), модернизированных [8 - 10] для проведения исследований динамических механических свойств бетонов, горных пород, материалов планет и астероидов. Обзор имеющихся публикаций по результатам исследований по теме данной публикации, в том числе по исследованию свойств бетонных сред и горных пород, и разработке измерительных технологий представлен в ряде работ, например [11 - 13]. Начальные условия опытов и основные результаты приведены на Рис.1-3.

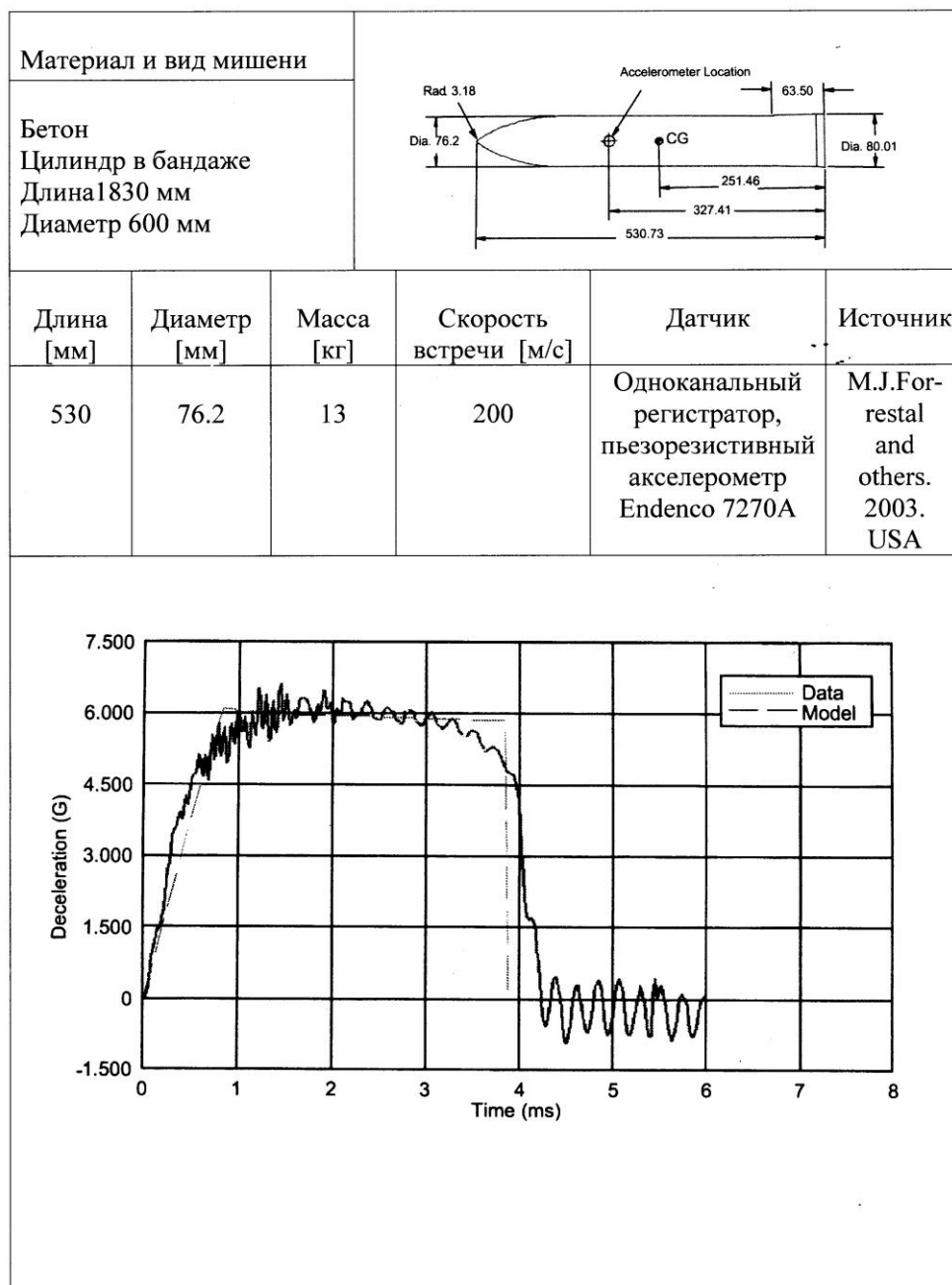


Рис. 1. Данные исследования [11]

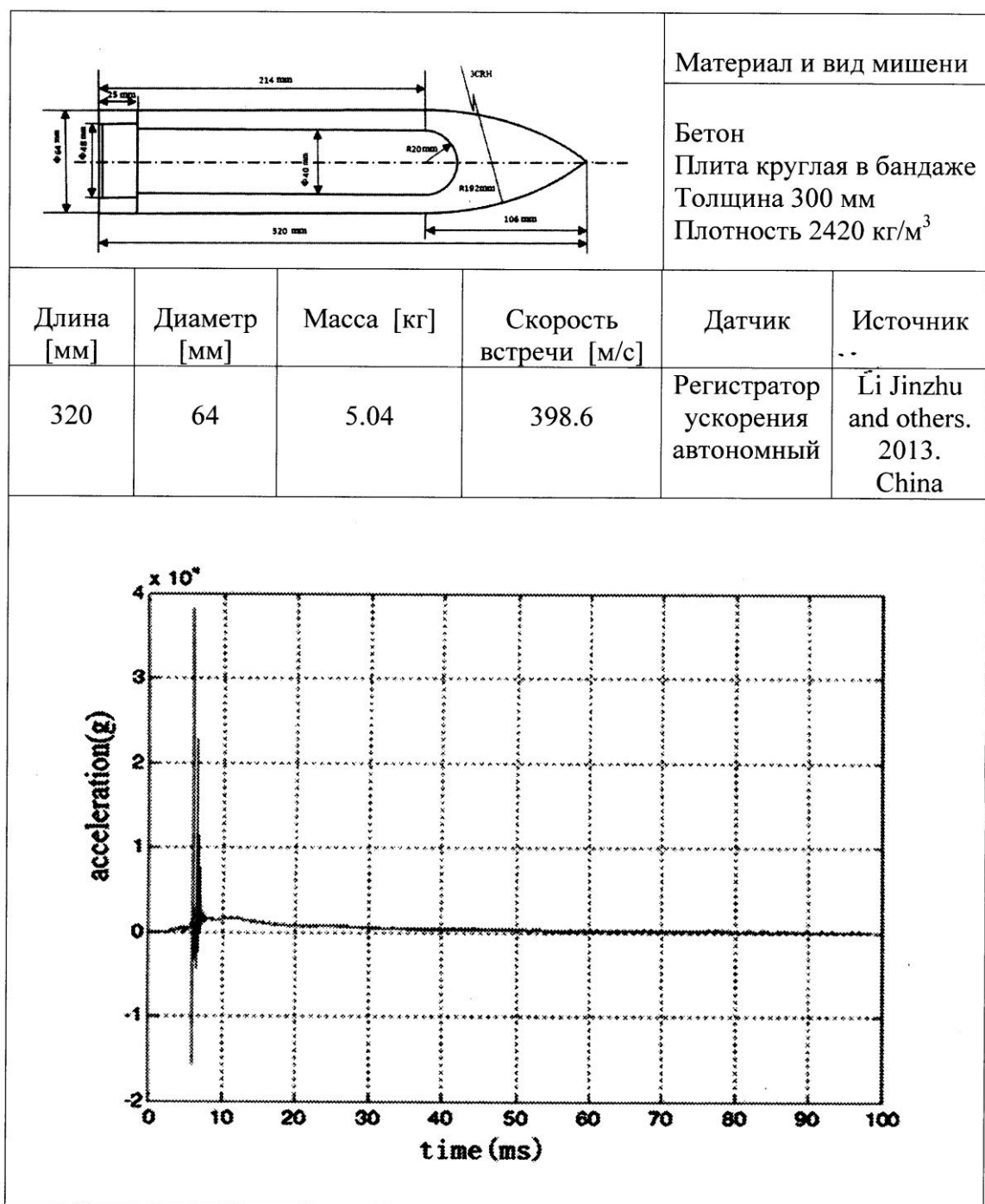


Рис. 2. Данные исследования [12]

Известные результаты регистрации замедлений ударников в бетонных мишенях изложенные в исследованиях[11 - 13] используют измерительные технологии, базирующиеся на размещении в ударниках автономных регистраторов данных об отрицательных ускорениях ударника при проникании в мишень.

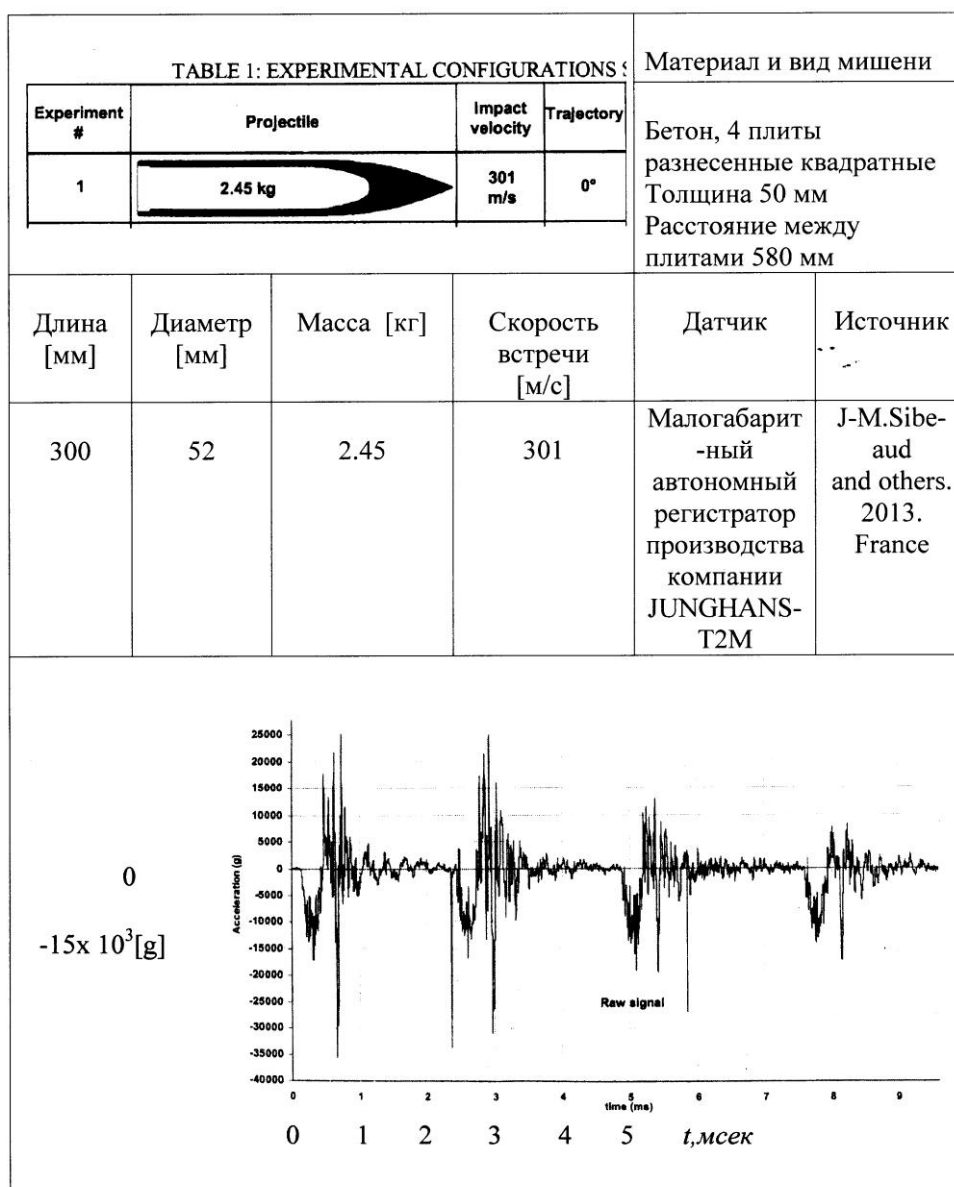


Рис. 3. Данные исследования [13]

## Результаты опытов с использованием инновационной регистрирующей установки и среды-аналога

Развиваемые нами ТБА-технологии базируются на использовании различных вариантов систем обеспечения непрерывной электрической связи стационарной регистрирующей аппаратуры с малогабаритным пьезоакселерометром, размещаемым в ударнике (НЭС-систем [8, 14]). В варианте, примененном нами (Рис.4) для исследования сил сопротивления бетонной мишени внедрению ударника [8], в качестве метательного устройства



использована пневматическая баллистическая установка [15], снабженная инновационным узлом герметизации [16] камеры высокого давления.

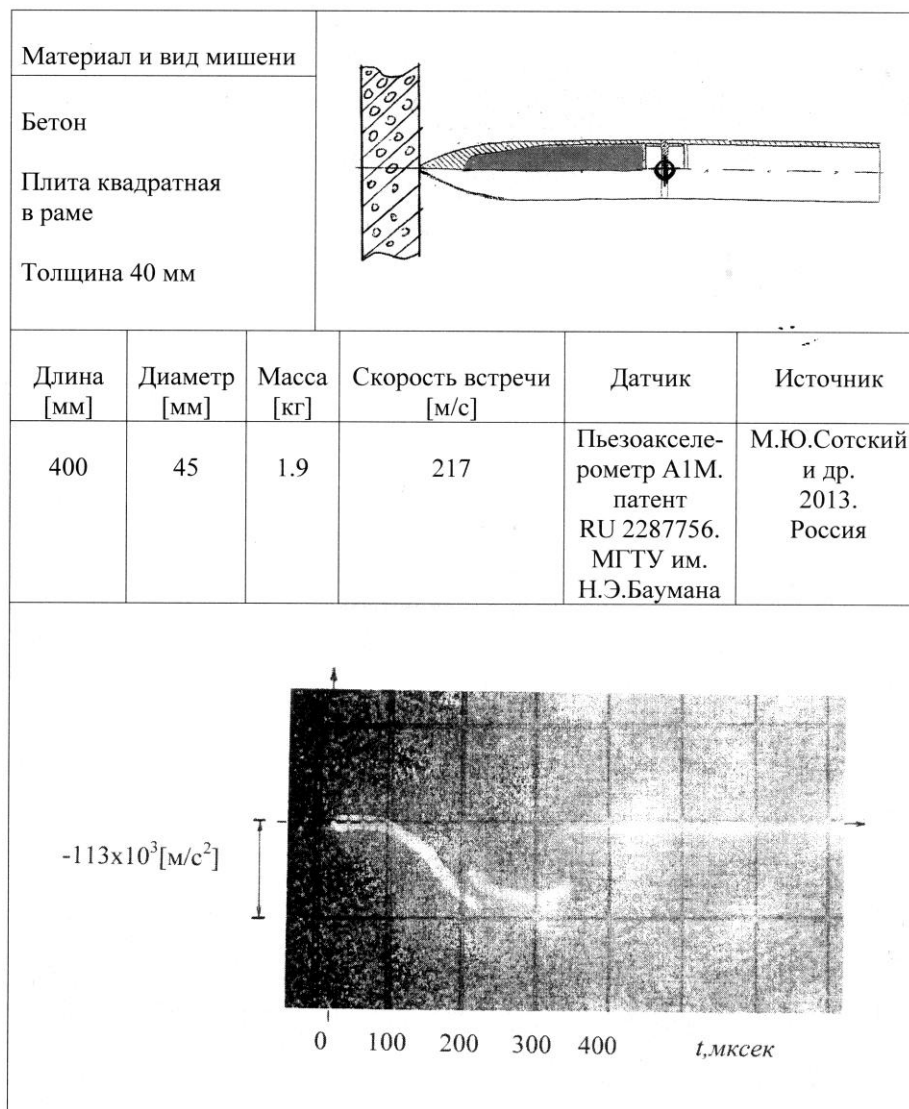


Рис. 4. Данные исследования [10]

Методика и особенности проведения испытаний с регистрацией замедления измерительных ударников в процессе удара по бетонной мишени, первоначальные данные регистрации, изложены в работах [8 - 10].

Реализованные в исследованиях с данными о непрерывной регистрации замедлений ударников в бетонных мишенях скоростной диапазон, масса ударников, форма оголовков и габаритные размеры отличаются от 5% до 15% от условий проведенных нами испытаний. Следовательно, можно сопоставить и данные об истории замедления ударников, регистрируемые в испытаниях. На рис.1 обобщены условия и результаты проведения испы-

таний с регистрацией истории замедления измерительного ударника в одном из опытов при глубоком проникании в бетонную преграду [11]. На рис.2 обобщены условия и результаты проведения испытаний с регистрацией истории замедления измерительного ударника в одном из опытов при пробитии бетонной мишени [12]. На рис.3 обобщены условия и результаты проведения испытаний с регистрацией истории замедления измерительного ударника в одном из опытов при пробитии сложной бетонной мишени [13]. На рис.4 приведены условия и результаты проведения испытаний с регистрацией истории замедления измерительного ударника в одном из реализованных нами в серии испытаний опытов при пробитии бетонной мишени [10].

Приведенные данные выявляют лишь одинаковый вид регистрируемой в разных случаях истории замедления, характерный для процессов пробития мишеней ограниченной толщины из бетона или горной породы. При внедрении в мишень заостренного оголовка ударника в материале мишени, выполненной из хрупко разрушающегося материала, накапливаются повреждения [3], увеличивается сопротивление прониканию ударника. Отражающаяся от тыльной поверхности мишени волна разгрузки обуславливает преобладание в тыльной области мишени растягивающих напряжений. В момент встречи фронта волны разгрузки и сжатой области поврежденного материала происходит откол с тыльной стороны мишени [10]. Вид регистрируемой истории замедления отражает особенности процесса удара заостренным ударником по мишени из разносопротивляющегося материала. Вначале происходит закономерное увеличение степени замедления ударника до максимальной величины в момент встречи поврежденной области мишени с волной разгрузки. Затем регистрации фиксируют резкое падение уровня замедления ударника с последующим участком регистрации при уровне замедлений, меньшем чем фиксируемый максимальный уровень. На конечном участке регистрации наблюдается спад уровня замедлений до нуля и далее регистрируется колебательный процесс в свободно перемещающемся (по траектории в воздушной среде) ударнике с затухающей амплитудой попеременных продольных ускорений и замедлений ударника.

Проведенное в данной работе исследование и сопоставление получаемых по разработанной технологии [10] результатов с опубликованными на настоящий момент [11 - 13] показало применимость технологии (по реализации непрерывности регистрации в процессах соударения и уровням регистрируемых замедлений) для определения динамических механических свойств бетонных сред и горных пород. При условии выполнения ударника с коническим оголовком и из материала, обеспечивающего его деформирования в упругой зоне при ударе по протяженной в направлении удара мишени из бетона со скоростью до 330 м/с, имеется возможность применения представленной ранее [14] методики обработки регистраций истории замедления. Участок регистрации на этапе квазистационарного движения измерительного ударника (после этапа его внедрения в исследуемую среду на высоту конического оголовка) в бетонной среде или горной породе используется для установления взаимосвязи регистрируемых в опыте нормальных напряжений на поверхности контакта ударника со средой с регистрируемой в тот же момент нормальной составляющей

щей скорости перемещения поверхности ударника в среде. Установленная из испытаний взаимосвязь определяет искомые коэффициенты в законе сопротивления исследуемой среды, а регистрируемая в опыте история замедления ударника используется для верифицирования решений численных задач, корректировки уравнений математической модели и уточнения входящих в нее материальных функций и констант [14]. Для экспериментально-расчетной методики расчета пространственного движения недеформируемых тел в среде эти коэффициенты являются динамическими механическими показателями свойств среды, определяющие возможность и точность расчета траектории тела в среде после удара.

## **Заключение**

Произведены оценки состояния расчетно-экспериментальных исследований динамических механических свойств реологических сред, которые в мировой науке развиваются по двум направлениям: получение характеристик сопротивления образца исследуемого материала динамическому приложению калиброванных нагрузок в лабораторных установках и регистрация истории изменения кинематических параметров измерительных зондов в процессе их движения в исследуемой среде от начала удара и до окончания движения в среде. В условиях реализации специальных прикладных исследований, результаты работы могут быть использованы при исследовании планет с помощью посадочных модулей и при разработке методов противоастероидной защиты Земли. Данные направления исследований находятся в прямой связи с основной направленностью деятельности академика В.Н. Челомея – обеспечением национальной безопасности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-08-00274-а и 13-08-00383-а).

## **Список литературы**

1. Сотский М.Ю. О фундаментальных задачах исследования динамических механических свойств материалов с применением технологий акселерометрии. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4. Часть 4. С.1783-1786.
2. Применение акселерометрии для исследования динамических механических свойств материалов в усложненных условиях проведения измерений / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, В.В. Селиванов, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №8. DOI: 10.7463/0812.0428828.
3. Садырин А.И., Пирогов С.А. Внедрение жестких ударников в малопластичные хрупко разрушающиеся среды // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. №4. Часть 4. С. 1747-1749.
4. Пирогов С.А. Модель динамического деформирования и разрушения разнсопротивляющихся материалов при интенсивных динамических нагрузках / Проблемы прочности и пластичности. 2012. Вып. 74. С. 40-48.



5. Модель динамического поведения хрупких структурно неоднородных сред / А.И. Садырин, С.В. Зефирин, С.В. Крылов, С.А. Пирогов // электронный сайт [ru.convdocs.org](http://ru.convdocs.org). Режим доступа: <http://www.pamag.ru/prensa/issledovanie-dph-betona>. (дата обращения 21.02.2014).
6. E. M. Galimov, V. A. Veldanov, O. B. Khavroshkin. Cosmogonic researches - change of the paradigm: high-velocity penetrator. Penetrometry in the Solar System II // Proc. of the Int. Workshop held in Graz (Austria, September 25-28, 2006). Austrian Academy of Sciences Press, Vienna. 2009. P. 233-250.
7. Geological and geochemical complex Moon investigation / Veldanov V. A., Dauriskikh A. Yu., Khavroshkin O.B., Tsyplakov V.V. // Abstracts European Planetary Science Congress. Vol. 5. Rome (Italy), 2010. // [meetings.copernicus.org](http://meetings.copernicus.org): European Planetary Science Congress. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-795.pdf> (дата обращения: 15.06.2010).
8. Лабораторный стенд для метания измерительных ударников диаметром до 100 мм / М.Ю. Сотский, В.В. Селиванов, В.А. Велданов, В.И. Пусев, В.А. Марков, Ю.М. Сотский // Материалы XIX Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г.Горшкова (Ярополец, 18-22 февраля 2013 г.). Т.2. М.: ООО «ТР- Принт». 2013. С.130-137.
9. Отладка приборного и технологического интерфейса для регистрации истории замедления ударников при проникании в бетонные среды и соударении с жесткой стенкой / М.Ю. Сотский, В.В. Селиванов, В.А. Велданов, В.И. Пусев, В.А. Ручко А.М., В.А. Марков, Ю.М. Сотский // Там же. С. 137-142.
10. Экспериментальное обоснование возможности использования технологии акселерометрии для определения силы сопротивления бетонной преграды прониканию ударника / М.Ю. Сотский, В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев, Ю.М. Сотский // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Том 56. № 7/9. С. 95-97.
11. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurement / M.J. Forrestal, D.J. Frew, B.D. Hickerson, T.A. Rohwer // Int. J. Impact Engng. 2003. Vol. 28 P. 479 – 497.
12. Perforation experiments of concrete targets with residual velocity measurements / Li Jinzhu, Lv Zhongjie, Zhang Hongsong, Huang Fenglei // Int. J. Impact Engng. 2013. Vol. 57 P. 1–6.
13. Kinetic energy perforation of concrete slabs: investigation of embedded high G-load sensing / J-M. Sibeaud, A. Delmas, A. Hottelet and D-P. Zappa // Proceedings 27-th International Symposium on Ballistics. Freiburg. Germany. April 22-26. 2013. Vol. 2. DEStech Publications. P.1557-1567.
14. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии / В.А. Велданов, В.А.Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // Журнал технической физики. 2011. Том 81. Вып.7. С.94-104.

15. Устройство и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемого тела в полном баллистическом цикле: Патент 2413917 РФ / В.А.Велданов [и др.]. Заявл. 28.12.09; опубл. 10.03.11. Бюлл.№7.
16. Патент 2465568 Российской федерации, МПК<sup>7</sup> G01N3/30, F41A1/00 . Устройство и способ герметизации камеры высокого давления баллистической установки / В.А.Велданов, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, А.Н.Сообщиков, Г.В. Сотская, М.Ю.Сотский, Ю.М. Сотский/ Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана". Заявка № 2010152962 от 24.12.2010. Оpubл. 27.10. 2012. Бюл. №30.