

## Применение акселерометрии для исследования динамических механических свойств материалов в усложненных условиях проведения измерений

# 08, август 2012

DOI: 10.7463/0812.0428828

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

УДК. 539.3; 539.4.019.1; 620.17

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[vladislav.veldanov@gmail.com](mailto:vladislav.veldanov@gmail.com)

[mva\\_2805@mail.ru](mailto:mva_2805@mail.ru)

[alikru@nm.ru](mailto:alikru@nm.ru)

[msotsky.bmstu@mail.ru](mailto:msotsky.bmstu@mail.ru)

[sergfed-64@mail.ru](mailto:sergfed-64@mail.ru)

### Введение

Результаты выполненных исследований показали, что использование технологий акселерометрии [1] (в условиях прямого удара) и тензометрии [2] (в условиях обращенного удара) для измерений в процессах высокоскоростного удара позволяет устанавливать значения динамических механических свойств упругопластических сред из анализа историй замедления ударника в мишени. Возникающие сложности поддержания непрерывности электрической связи при прямом проникании ударников в реологические среды с величинами скоростей в десятки и сотни м/с определили выделение разработанных для решения этих задач измерительных технологий в специальное направление – технология акселерометрии терминальной баллистики (ТБА – технология) [3]. На базе разработок и экспериментальных исследований, проведенных сотрудниками кафедры М-5 [1], на кафедре М-4 МВТУ им. Н.Э. Баумана это направление получило развитие в научной группе профессора Ю.В. Хайдина с 1971 г. Становление и дальнейшее развитие технологии традиционно для измерительных технологий. Осуществление измерений и исследования вначале проводились на стационарных лабораторных стендах с применением специально сконструированных измерительных ударников, снабженных специально разработанными ударными акселерометрами. Затем системы обеспечения

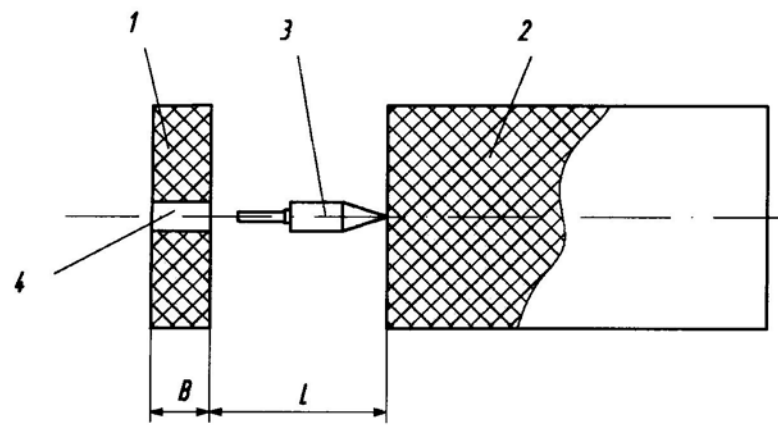
непрерывности электрической связи (НЭС – системы) были сформированы в виде автономного узла, скрепляемого с ударником любой исследуемой конструкции. В настоящее время развитие технологии продолжается в научных коллективах доцентов В.А. Велданова и В.И. Пусева на кафедре СМ-4 «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Развитие ведется в направлении реализации измерений в ударных процессах, начальные условия которых усложнены наличием перед исследуемой средой дополнительных преград, экранов, наклонным положением поверхности среды (мишени). Для решения таких задач разрабатываются новые технические решения НЭС – систем, обеспечивающих многоканальность измерений, применение современных акселерометров пьезорезистивного типа. Обработка регистрируемых в опытах историй замедления ударников в исследуемых средах позволяют в одном опыте с максимальной точностью устанавливать взаимосвязь между текущей скоростью ударника и силой сопротивления прониканию. По этим данным установлены показатели динамических механических свойств для ряда сред: песка, грунта и пластилина, используемого традиционно в качестве среды, моделирующей грунт [3]. Проводится отработка технологии испытаний, включающих регистрацию истории замедления полунатурных физических моделей в процессе действия по моделям характерных мишеней. Эти исследования проводятся на лабораторном испытательном комплексе (ЛИК) «Удар» кафедры СМ-4 с применением введенной в эксплуатацию в начале 2007 г. 100-мм пневматической баллистической установки (БУ) и высокоскоростной видеорегирующей системы.

Известна необходимость применения зондирующих аппаратов для получения данных о механических свойствах грунтов, составляющих поверхность удаленных объектов [4]. В качестве одной из возможных технологий получения данных рассматривается технология регистрации замедления ударника, основанная на применении пьезоакселерометрии. В работах [3, 5] содержится описание и примеры применения этой технологии для получения данных о динамических механических свойствах реологических сред, в том числе грунтов. При проведении экспериментальных исследований и анализе результатов были реализованы и рассмотрены частные варианты начальных условий взаимодействия ударников с исследуемыми средами. Варианты предусматривали совпадение вектора скорости ударника с его продольной осью и с нормалью к поверхности среды, что обеспечивало продольно-поступательное движение измерительного ударника вдоль его оси при внедрении в среду и при глубоком проникании. Такой случай движения ударника обеспечивал надежность функционирования применяемых систем непрерывной электрической регистрации замедления до полной остановки ударника. В то же время, рассматриваемый случай

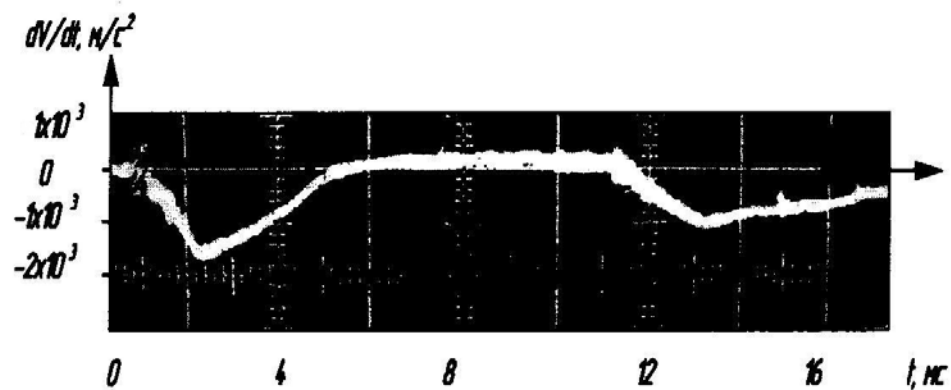
начальных условий подхода ударника к среде и движения в ней обеспечивал применимость разработанных способов определения показателей динамических механических характеристик сред из анализа регистрации истории замедления ударника относительно исследуемой среды [3, 6]. Представлены результаты разработки новых вариантов систем поддержания непрерывной электрической связи с акселерометром в условиях применения ТБА-технологии к процессам удара малодеформируемого тела под углом к поверхности исследуемой среды и при наличии экранирующих среду элементов. Приведены примеры применения алгоритма получения данных о динамических механических свойствах среды при использовании регистраций истории замедления недеформируемого ударника в процессе проникания ударника в исследуемую среду. Показаны варианты применения разработанной технологии для получения данных о динамических механических свойствах грунтовой среды при скоростях удара до 300 м/с.

### **Результаты опытов с двухпреградной мишенью**

Ограниченность размеров мишени в продольном и поперечном направлениях относительно направления полета и проникания ударника требует учета [2] при использовании регистрируемых в опыте данных. Динамические характеристики грунтовых сред, устанавливаемые из обработки истории изменения усилий, действующих на ударник [2], или истории замедления ударника в мишени [3, 4], могут быть искажены за счет влияния на регистрируемые параметры близости свободных поверхностей. В работе [3] исследованы варианты осесимметричного взаимодействия измерительного ударника с единичной массивной мишенью. В опытах варьировалась форма головной части ударника. Дополнительно были проведены исследования возможности использования устройства проводной электрической связи для проведения опытов с мишенями, составленными из нескольких блоков. На рис. 1 представлены начальные условия проведения опыта для одного из реализованных вариантов. Измерительная сборка на рис. 1,а (измерительный ударник с направляющим элементом устройства проводной электрической связи [7]) показана в момент, соответствующий началу проникания во второй блок мишени.



а)



б)

Рис. 1. Схема сложной мишени из двух блоков пластилина: а) 1 – первый блок пластилина, 2 – второй блок пластилина, 3 – измерительная сборка (ударник с направляющим элементом устройства проводной электрической связи [7]), 4 – сквозная каверна, продольный размер первого блока мишени ( $B$ ) – 160 мм, расстояние между первым и вторым блоками ( $L$ ) – 240 мм; б) осциллограмма истории замедления ударника в процессе взаимодействия со сложной мишенью при следующих начальных условиях: диаметр ударника – 40 мм, длина ударника – 140 мм, масса устройства проводной электрической связи – 0,15 кг, масса измерительной сборки – 0,59 кг, угол при вершине конической головной части –  $30^\circ$ , начальная скорость удара – 64 м/с

На осциллограмме истории замедления ударника (см. рис. 1,б) и репродукции с этой осциллограммы на рис. 2 этому моменту соответствует время  $t = 11$  мс. Погрешности определения данных в опытах с применением ТБА-технологий подробно исследованы [8]. Приведенный результат опыта свидетельствует о надежном функционировании устройства проводной электрической связи [7] в составе измерительной сборки на этапе движения сборки за первым блоком, после его пробития.

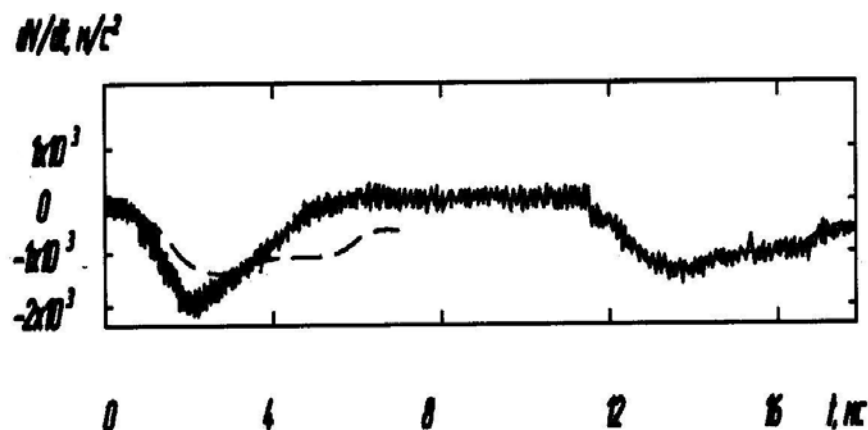


Рис. 2. Репродукция осциллограммы по рис. 1,б с наложением (штриховой линией) истории замедления во втором блоке на историю замедления в первом

При решении задач проникания с использованием инженерной (экспериментально-теоретической) методики нормальные напряжения  $\sigma_n$  в точках на поверхности головной части ударника, контактирующей со средой, принимаются функцией проекции  $v_n$  скорости ударника  $v$  на нормаль к поверхности его головной части в данной точке [3, 6].

Из экспериментов при обработке осциллограмм установлены для пластилина [6] и песчаного грунта [3] значения коэффициентов  $A$ ,  $B$  и  $C$  в трехчленном законе сопротивления прониканию ударника:

$$\sigma_n = Av_n^2 + Bv_n + C,$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  — коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств материала среды.

Суммарная погрешность определения амплитуды замедления при доверительной вероятности 0,95 для условий проведенных опытов не превышает 5%, а границы доверительного интервала результата измерений не выходят за границы следа луча на осциллограмме.

Коэффициенты в законе сопротивления были рассчитаны по регистрируемой в опыте зависимости ускорения от скорости с привлечением метода наименьших квадратов из условия близости расчетных значений к полученным обработкой экспериментальных данных на участках, соответствующих второму этапу проникания на глубину, превышающую высоту головной части ударника. Для коэффициента поверхностного трения пластилиновой среды в расчетной зависимости использовалось значение  $\mu = 0,1$ . При этом коэффициент  $A$  при квадрате нормальной составляющей скорости

контактирующей поверхности ударника, определяющий инерционную составляющую сопротивления среды в законе сопротивления, был принят равным  $A = \rho_0/2$ , где  $\rho_0 = 1500 \text{ кг/м}^3$  – плотность пластилина в нормальных условиях. Определив же значение  $A$  указанным выше образом, получаем возможность удобной интерпретации инерционного сопротивления  $\rho_0 v_n^2/2$ , как давления торможения потока материала среды на жесткой границе. Кроме того закон сопротивления пластилиновой мишени с коэффициентом инерционной составляющей  $A = \rho_0/2$  позволяет хорошо описать динамику проникания ударников при более высоких скоростях взаимодействия, когда инерционное сопротивление становится превалирующим.

Что же касается коэффициентов  $B$  и  $C$ , то для них по результатам опытов были получены значения  $B = 1,04 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ ,  $C = 1,44 \text{ МПа}$ . Следует отметить, что значение коэффициента  $C$ , определяющего прочностное сопротивление среды, оказывается близким к сдвиговой прочности пластилина.

### **Результаты опытов с наличием тонкого металлического экрана перед исследуемой средой**

При определении контактных сил и замедлений в зависимости от времени при высокоскоростном проникании недеформируемого ударника в исследуемую мишень (среду) необходимой является оценка влияния на параметры процесса открытой или закрытой элементами конструкции лицевой поверхности мишени. Исследование параметров импульсного воздействия [9] на мишень с учетом наличия экрана является актуальной задачей. В лабораторных технологиях проведения опытов с измерением параметров грунтовых сред и песка лицевую тонкую металлическую стенку контейнера с исследуемой средой можно рассматривать как экран, размещенный перед средой и оказывающий влияние на регистрируемые параметры. Кроме того, стенки контейнера в условиях ограничения объема исследуемой среды вносят коррекцию в результаты измерений. Технологии проведения опытов с приданием ударнику требуемой скорости предусматривают наличие дифракторов, отсекателей газов, отсечек, которые зачастую представляют из себя тонкие металлические элементы или экраны.

Опыты проведены в некотором диапазоне изменения параметров мишеней  $B$  и  $L$  и материалов экранов и сред (рис. 3). В лабораторных условиях применена измерительная сборка, включающая разработанное устройство проводной электрической связи с ударником [7], представленное в работах [3, 5, 6]. Масса измерительной сборки составляла

от 0,53 до 0,59 кг, при этом масса корпуса устройства электрической связи составляла от 0,13 до 0,15 кг. Начальные условия взаимодействия и параметры мишени являются средними для исследованного диапазона их изменения.

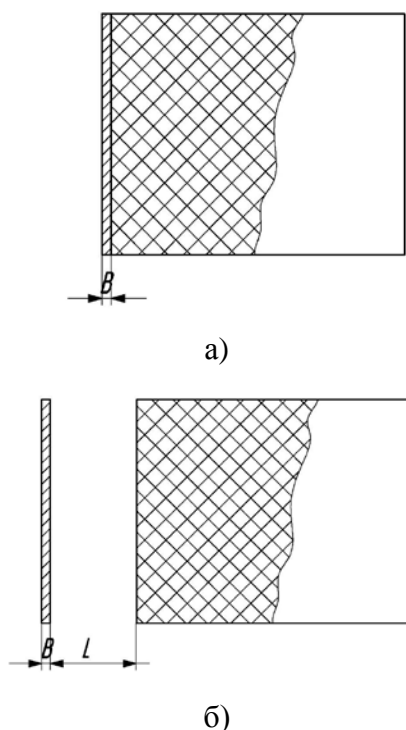
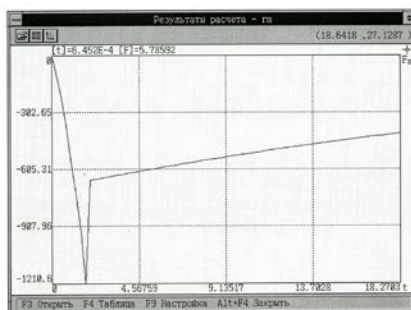


Рис. 3. Схемы исследованных мишеней с лицевым тонким металлическим экраном:  
а – металлический экран толщиной  $B$  закреплен в контакте с лицевой поверхностью блока;  
б – металлический экран толщиной  $B$  закреплен на расстоянии  $L$  от лицевой поверхности блока

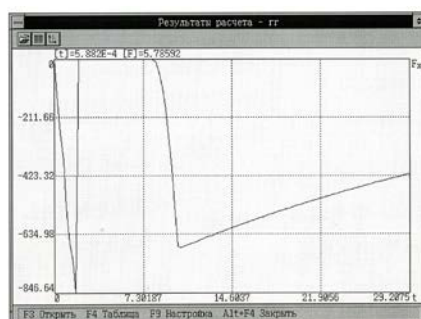
На рис. 4 показаны результаты расчета процесса проникания в мишени с лицевыми тонкими металлическими экранами. Проведен анализ результатов экспериментальной (см. рис. 4,в) и расчетной оценки влияния экрана. Как экспериментально, так и расчетным путем показано существенное влияние экрана на уровень замедления ударника в процессе взаимодействия с закрепленным на лицевой поверхности мишени экраном. Осциллограмма представлена на рис.4,в штриховой линией по границам следа луча, по оси ординат отложено значение замедления ударника. В представленной серии опытов оценено влияние лицевого тонкого металлического экрана на историю замедления ударника в модельной среде.

При установившемся движении ударника в глубоких слоях блока мишени с исследуемой средой характер истории замедления ударника не претерпевает значительных изменений и является общим для всех мишеней в исследованном диапазоне параметров.

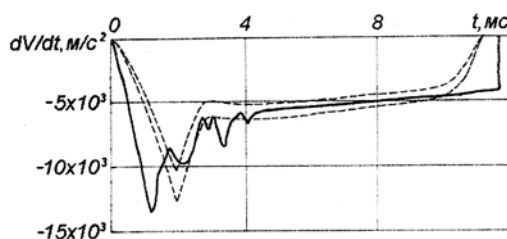
Следовательно, наличие тонкого лицевого металлического экрана не оказывает существенного влияния на определяемые из эксперимента данные о свойствах грунтовых сред.



а)



б)



в)

Рис. 4. Результаты сравнения расчета по программе [3] и экспериментальных данных: а) – экран из Д16,  $B=1,5$  мм по схеме на рис. 3,а, начальная скорость удара – 62 м/с; б) – экран из Д16,  $B=1,5$  мм,  $L=300$  мм по схеме на рис. 3,б; в) – сравнение с экспериментом (для начальных условий рис. 3,а), в расчете задан наклон оси ударника относительно вектора скорости  $2^\circ$ ; начальная скорость удара – 68 м/с



## Результаты опытов с реализацией наклонного подхода ударника к поверхности исследуемой среды

Изучение процесса наклонного проникания тел в среду вызвано необходимостью получения информации о динамических механических свойствах сред, исследуемых с применением зондирующих комплексов [4].

В первую очередь производился анализ и доработка апробированных устройств [7], обеспечивающих функционирование системы при ударе по нормали к поверхности в диапазоне скоростей встречи до 300 м/с и основанных на использовании проводных элементов измерительной цепи. С применением разработанной проводной системы обеспечивается регистрация параметров до полного завершения процесса взаимодействия в случаях проникания тела в среду даже после пробития тонких металлических экранов [9] и при уровне замедлений тела до  $-1,5 \times 10^7$  м/с<sup>2</sup> и выше [3, 5, 6].

На рис. 5 приведена картина процесса наклонного проникания недеформируемого тела в упругопластическую среду (мишень), установленная в опытах. Приведенная картина типична для частного варианта начальных условий удара, когда направление скорости ударника совпадает с нормалью к поверхности мишени.

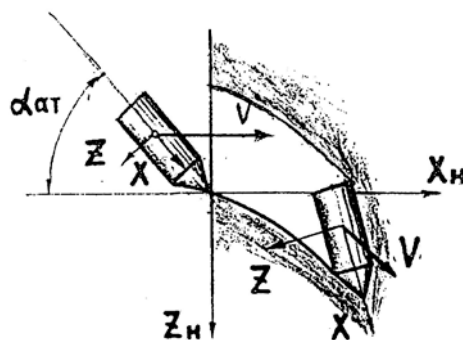


Рис. 5. Схематическое представление процесса проникания ударника в среду при подходе к ней с углом атаки

Реализуется подобная картина и в более сложном случае, когда в момент начала соударения с мишенью направление оси симметрии ударника и вектора скорости ударника не совпадают. Этот угол  $\alpha_{ат}$ , определяемый как угол атаки, приводит к искривлению траектории и развороту ударника в мишени. Значительное влияние на результат проникания оказывает и наличие у ударника в момент начала проникания угловой

скорости  $\omega$  в плоскости его движения.

Представленные результаты серии опытов направлены на выявление роли искривления траектории и изменения ориентации ударника на характер изменения и величину силы сопротивления прониканию. В серии опытов была осуществлена одновременная регистрация истории замедления ударника в осевом X и боковом Z направлениях. Реализован процесс прямого взаимодействия недеформируемого цилиндрикоконического ударника с мишенью, выполненной в виде блока из пластилина, моделирующего грунт [3, 6]. Опыты были поставлены так, что в процессе проникания центр масс ударника перемещался в плоскости движения, описывая в ней криволинейную траекторию. Угол  $\alpha$  при этом увеличивался вслед за касательной к траектории. На ударник воздействовали осевая и боковая силы сопротивления прониканию, которые регистрировались двумя пьезоакселерометрами серии А1М [3, 5, 6], закрепленными в корпусе ударника. Чувствительные оси пьезоакселерометров устанавливались, соответственно, в осевом и поперечном направлениях. Для удобства расшифровки осциллограмм направленность отклонения лучей, фиксирующих боковую и осевую составляющие силы сопротивления, выбиралась полярной. Лучи отклонялись в разные стороны (осевая вниз и боковая вверх). Такая направленность соответствует и системам координат, использованным в дальнейшем при обработке результатов опытов.

На рис. 6 представлена репродукция и результаты обработки характерной осциллограммы, полученной при следующих начальных условиях: диаметр ударника 0,04 м, масса 0,6 кг, угол при вершине конической головной части ударника  $30^\circ$ , скорость  $V = 30$  м/с,  $\alpha_{ат} = 27^\circ$ .

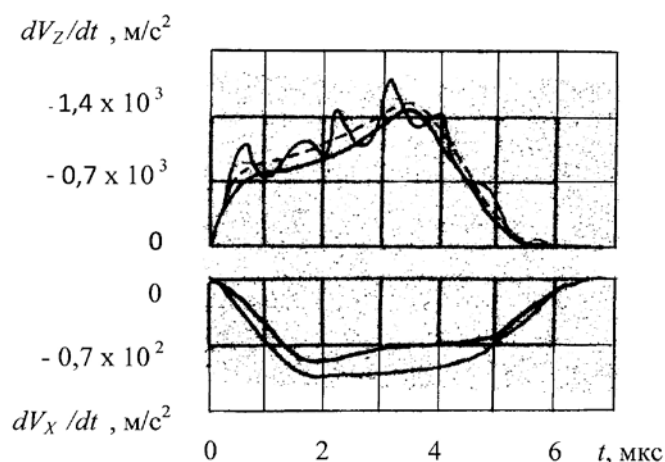


Рис. 6. История замедления ударника в осевом (нижняя кривая) и боковом направлениях при наклонном проникании в мишень

Сплошной тонкой линией показана репродукция осциллограммы, проведенная по лучу с экрана осциллографа. Штриховой линией проведена кривая, осредняющая волновые наложения на регистрации замедления ударника в боковом направлении. Пьезоакселерометры обладают поперечной чувствительностью относительно своей рабочей оси. Сплошные утолщенные линии проведены по результатам пересчета данных с учетом чувствительности пьезоакселерометров в осевом и боковом направлениях.

Обработка данных показывает несколько большую величину замедления ударника в боковом направлении (боковой силы сопротивления прониканию) по отношению к замедлению в осевом. Типичен для опытов, проведенных с подобными начальными условиями, и тот факт, что максимум величины боковой составляющей силы сопротивления достигается позже по времени и на большей глубине, чем максимум осевой. Результаты расчетов по инженерной (экспериментально-теоретической) методике [3, 6], проведенные при начальных условиях, соответствующих условиям опыта, показаны на рис. 7.

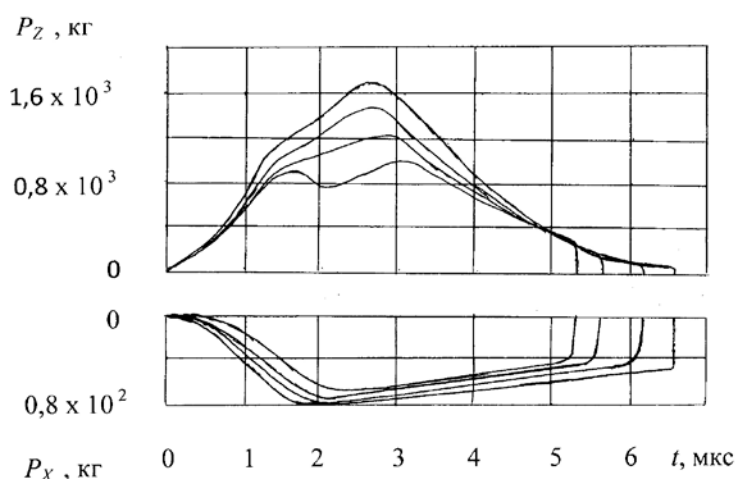


Рис. 7. Расчетные истории нагружения ударников в осевом (нижние кривые) и боковом направлениях при наклонном проникании

Расчетные кривые демонстрируют качественное соответствие результатам опытов по величинам и временам достижения максимумов сил сопротивления прониканию ударника в осевом и боковом направлениях. Дополнительно были сделаны оценки степени влияния на тенденции в характере поведения сил сопротивления величины угловой скорости ударника  $\omega$  в плоскости его движения в момент начала проникания. На рис. 7 приведены результаты расчетов при отсутствии угловой скорости ( $\omega = 0$  1/с, минимальные значения максимумов сил сопротивления) и при значениях  $\omega = 50$  1/с,  $\omega = 100$  1/с, и  $\omega = 150$  1/с.

Выявлено увеличение силы сопротивления прониканию ударника с ростом начальной величины угловой скорости ударника  $\omega$  в плоскости его движения. Соответственно уменьшается глубина проникания ударника в мишень с ростом начальной величины угловой скорости ударника. Отмечено в ходе проведения исследований влияние направляющего элемента устройства проводной электрической связи [7] на процесс проникания и регистрацию истории замедления ударника в мишени. При наклонном проникании в мишень этот элемент контактирует с каверной в мишени, что обуславливает появление дополнительных сил и моментов.

Представлены результаты экспериментальных исследований, целью которых является разработка способов получения данных об истории замедления тела в среде и поддержания непрерывной электрической связи с акселерометром в условиях применения ТБА-технологий к процессам удара исследуемого тела под углом к поверхности среды. Эти разработки предполагается использовать при проведении опытов с применением ТБА-технологий в условиях взаимодействия тела со средой под углом к ее поверхности.

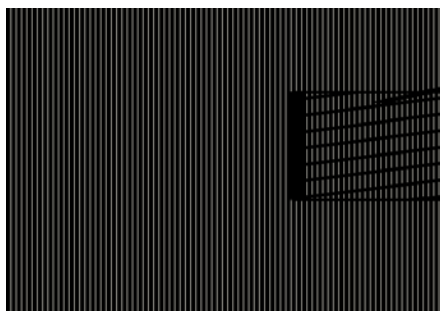
### **Результаты отработки варианта ТБА-технологии для условий наклонного удара**

Реализована серия опытов с применением высокоскоростной оптической и видеосъемки, позволившие выработать рекомендации по управлению движением и формой провода, перемещающегося в пространстве за телом, и предложить соответствующие технические решения [10].

Расположение зонда на поверхности удаленного исследуемого объекта не всегда может быть обеспечено строго определенным. Более вероятен случай произвольного расположения зонда и несовпадения продольной оси измерительного ударника с нормалью к поверхности среды. В этом случае реализуется вариант наклонного подхода ударника к поверхности среды, что приводит к искривлению траектории движения ударника в среде [11, 12], появлению нагрузок на ударник в направлении, ортогональном его продольной оси. Затрудняется и анализ регистраций замедления ударника в среде, а определение действующих на поверхности ударника давлений невозможно без знания величины поверхности контакта ударника со средой. Кроме того, для исследования грунтов нами применялся преимущественно проводной вариант технологии непрерывной регистрации замедления тел по патенту [3, 7]. В этом варианте измерительный ударник скрепляется с устройством проводной электрической связи для измеряемого тела, которое содержит направляющий элемент устройства [7], монтируемый на ударнике. При пространственном движении ударника в среде этот элемент входит в контакт с

поверхностью каверны, образуемой ударником в исследуемой среде. Возникающие нагрузки на направляющий элемент добавляются к регистрируемым нагрузкам на ударник, что увеличивает значение погрешности результата измерений, а следовательно увеличивается и погрешность определяемых из опыта показателей динамических механических свойств исследуемых сред.

Для регистрации истории замедления ударника относительно исследуемой среды в условиях наклонного подхода ударника к среде использован проводной вариант технологии непрерывной регистрации замедления тел, реализующий способ придания ударнику требуемой скорости в БУ с применением направляющего элемента, примыкающего к измерительному ударнику и отделяемого от него до взаимодействия со средой [10]. На рис.8,а представлен обобщенный эскиз устройства. Частный вариант измерительной технологии с применением этого устройства реализован на пневматической БУ калибра 100 мм и с длиной ствола 6 м. Изображение одного из вариантов исполнения измерительной сборки представлено на рис. 8,б. Размер направляющего элемента в радиальном направлении превышает максимальный размер метаемого ударника на величину, превышающую два диаметра провода канала электрической связи. Контур ударника, снабженного акселерометром, показан штриховой линией. Акселерометр подсоединен элементами электрического подключения к проводу и к стационарной аппаратуре соответственно, при этом провод скреплен с фиксирующим элементом.



а)

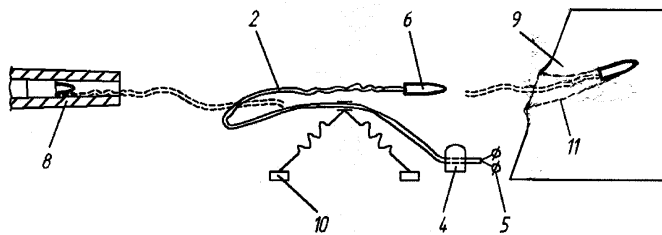


б)

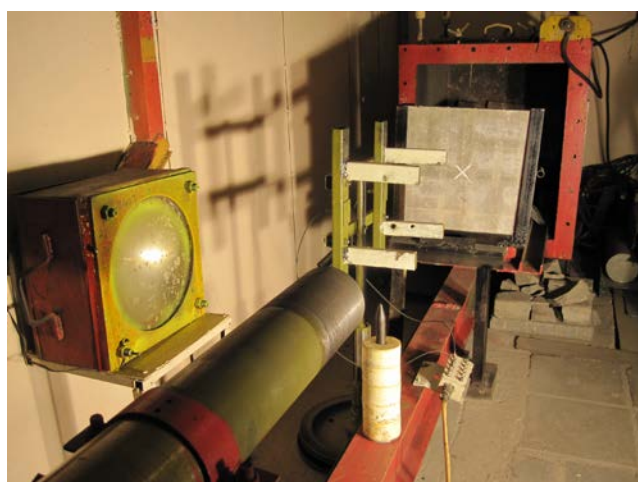
Рис. 8. Размещение варианта устройства [10] в составе измерительной сборки:  
а) 1 - направляющий элемент, 2- - провод канала электрической связи, 3 - элементы электрического подключения к проводу, 4 - фиксирующий элемент, 5 - элементы электрического подключения к стационарной аппаратуре, 6 – ударник, 7 – акселерометр; б) внешний вид измерительной сборки

В направляющем элементе выполнена полость по форме донной части ударника, паз в радиальном направлении на поверхности направляющего элемента, обращенной к дну ударника, и сообщающийся с ним паз вдоль образующей на поверхности направляющего элемента. Минимальный размер полости в поперечном ее сечении превышает диаметр провода. В соединенном виде устройство [10] и ударник представляют собой измерительную сборку.

Показанная на рис.9,а схема обобщает результаты опытов с контролем функционирования устройства [10]., проведенных на ЛИК «Удар» кафедры СМ-4 «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Измерительной сборке придавалась скорость до 250 м/с. В опытах применен акселерометр серии А1М [3, 5], доработанный из пьезоакселерометра промышленного производства [6] для возможности его многократного использования.



а)



б)

Рис. 9. Условия функционирования варианта устройства при проведении измерений на траектории перемещения к мишени и в каверне: а) 8 – ствол БУ, 9 – мишень, 10 - элементы задания формы петли, 11 – каверна, (остальные позиции с рис. 8,а); б) вид баллистической трассы

Планируется применение акселерометров пьезорезистивного типа. С целью управления формой провода и задания условий для реализации конкретного варианта формы на этапе промежуточной и внешней баллистики ударника установка была снабжена скрепляемыми с проводом элементами задания формы петли при перемещении провода за дульным срезом ствола. Электрическая связь с акселерометром осуществлялась на всех этапах баллистического цикла: от начала движения по каналу ствола и до полной остановки в мишени. Изображение баллистической трассы в направлении от дульного среза ствола приведено на рис. 9,б. За дульным срезом установлены системы подсветки, синхронизации, регистрации скорости ударника, блок коммутации каналов электрической связи, дефлекторы, контейнер с исследуемой средой, уловитель. Для осуществления

измерений вводят провод в канал ствола со стороны камеры высокого давления БУ, выводят его через дульное отверстие, размещают измерительную сборку в канале ствола, перекрывают входное отверстие ствола разрушаемой диафрагмой, создают в камере заданное давление (до 15 МПа) и производят ускорение сборки до заданной начальной скорости взаимодействия со средой.

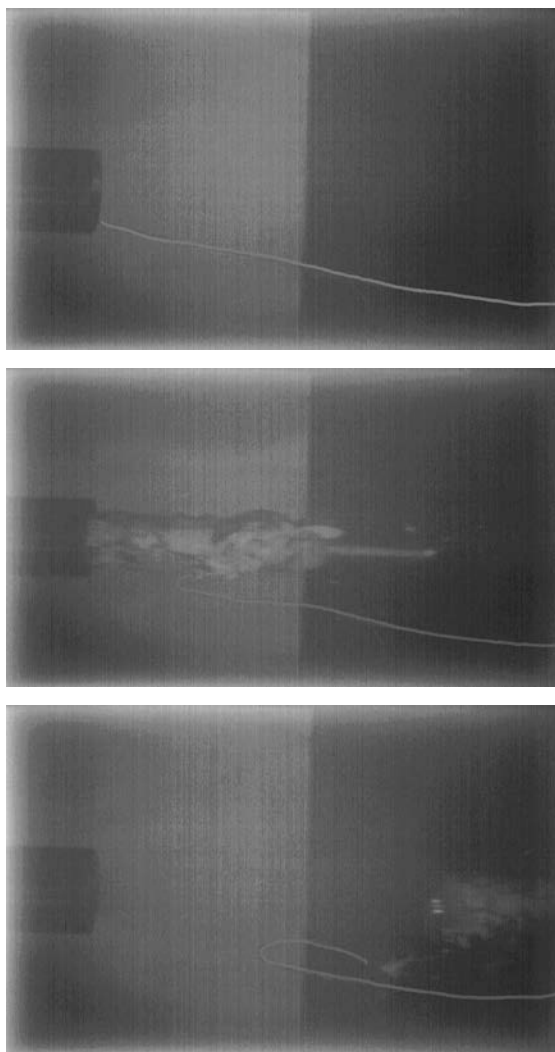
На рис. 10 изображен ударник, установленный на отделяемой от него толкающей части направляющего элемента. Параметры примененной БУ позволяют обеспечить для данного ударника проведение опытов в диапазоне скоростей до 800 м/с.



Рис. 10. Донная часть ведущего устройства (диаметр 100 мм) и вариант измерительного ударника (диаметр 24 мм)

На рис.11,а представлены данные серии опытов с применением высокоскоростной видеосъемки регистратором «ВидеоСпринт».





а)



б)

Рис. 11. Контроль функционирования варианта устройства: а) с применением высокоскоростной видеосъемки; б) по состоянию провода канала электрической связи после проведения регистрации

Анализ результатов проведенных опытов позволил контролировать движение и форму провода канала электрической связи при перемещении провода в пространстве за измерительной сборкой и конечное состояние (рис. 11,б) провода.

### **Заключение**

Таким образом, разработан и представлен частный вариант ТБА – технологии (технологии акселерометрии терминальной баллистики), используемой в опытах для исследования динамических механических свойств грунтовых тел путем определения коэффициентов в законе сопротивления материала среды прониканию. Технология впервые позволила при прямом взаимодействии ударника с мишенью определить для грунтовых сред значения коэффициентов в выражении, связывающем скорость проникания ударника в исследуемую среду с величиной удельного сопротивления среды прониканию. Полученные для ряда сред данные применены в новых программах инженерных и численных решений задач пространственного движения ударников в исследованных средах. Используемый ранее [3, 5] способ тестирования решений задач осесимметричного удара может быть применен и для тестирования решений задач наклонного проникания ударников в среду. Однако, при планировании опытов с получением данных о сопротивлении среды при наклонном проникании ударника, следует выполнять измерительный ударник с конструктивными характеристиками, обеспечивающими его движение в среде с направлением вектора скорости, совпадающим с осью симметрии ударника. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-08-01038-а).

### **Список литературы**

1. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов, А.А. Федосов. М.: Машиностроение, 1977. 240 с.
2. Баженов В.Г., Котов В.Л. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 208 с.
3. Исследование динамических механических свойств песчаного грунта методом акселерометрии / В.А. Велданов, А.В. Жарикова, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, С.В. Федоров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение.- 2008.- Спец. вып.-1. - С.79-87.
4. Geological and geochemical complex Moon investigation / V.A. Veldanov [ets.]

// Abstracts European Planetary Science Congress. Vol. 5. Rome (Italy), 2010. Режим доступа: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-795.pdf> (дата обращения: 15.06.2010).

5. Deceleration – Time Measured Projectile Penetration Tendency in Qualitatively Different Terminal Ballistics Processes / M. Ju. Sotsky [ets.] // Proceedings 25th International Symposium on Ballistics. Vol. 2. Beijing: China Science and Technology Press, 2010. P.1070 - 1077.

6. 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.

7. Устройство проводной электрической связи для метаемого тела и способ испытаний метаемых тел с непрерывной регистрацией баллистических параметров: Патент 2287756 РФ / А.Ю. Васильев [и др.]. Заявл. 07.04.05; опубл. 20.11.06. Бюлл.№32.

8. Сотский М.Ю. Оценка погрешностей регистрации замедления ударника в различных средах по технологии акселерометрии при высокоскоростном ударе // Материалы XVI Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 2010. Т.2. С.225-229.

9. Особенности применения технологии акселерометрии терминальной баллистики при исследовании закрытых лицевым тонким металлическим экраном грунтовых сред / В.А. Велданов [и др.] // Материалы Всероссийской научной конференции "Современная баллистика и смежные вопросы механики", посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова - основателя Томской школы баллистики. Томск, 2009. С. 177-178.

10. 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.

11. Реализация технологии акселерометрии терминальной баллистики для условий удара тела под углом к поверхности среды / М.Ю. Сотский [и др.] // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. М.: ООО «ТР-Принт», 2011. С.142-147.

12. Технология регистрации замедления тел при наклонном проникании для получения данных о динамических свойствах грунтовой среды / М.Ю. Сотский [и др.] // Материалы XVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. М.: ООО «ТР-Принт», 2012. С.144-149.

## Application of accelerometry for research of dynamic mechanical properties of materials in complicated environments of measuring

# 08, August 2012

DOI: [10.7463/0812.0428828](https://doi.org/10.7463/0812.0428828)

Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.A., Ruchko A.M., Selivanov V.V.,  
Sotskii M.Yu., Fedorov S.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

[vladislav.veldanov@gmail.com](mailto:vladislav.veldanov@gmail.com)

[mva\\_2805@mail.ru](mailto:mva_2805@mail.ru)

[alikru@nm.ru](mailto:alikru@nm.ru)

[msotsky.bmstu@mail.ru](mailto:msotsky.bmstu@mail.ru)

[sergfed-64@mail.ru](mailto:sergfed-64@mail.ru)

The authors carried out experimental studies aimed at development of variants of systems of continuous electric communication with the accelerometer under the conditions of application of terminal ballistics accelerometry (TBA-technology) to impact of a rigid body at an angle to the surface of the medium under test. A particular case of TBA-technology was tested under laboratory conditions for the case of inclined impact of soil medium along with defending screens. The algorithm of retrieving data on dynamic mechanical properties of soil medium using registrations of deceleration history of a rigid projectile during the penetration process into the medium under test was debugged. The developed technology is suitable for obtaining data on dynamic mechanical properties of soil medium in the range of sub-sound impact velocities.

---

Publications with keywords: [impact](#), [mechanical properties](#), [terminal ballistics](#), [piezoelectric accelerometer](#), [deceleration history](#)

Publications with words: [impact](#), [mechanical properties](#), [terminal ballistics](#), [piezoelectric accelerometer](#), [deceleration history](#)

---

### References

1. Batuev G.S., Golubkov Iu.V., Efremov A.K., Fedosov A.A. *Inzhenernye metody issledovaniia udarnykh protsessov* [Engineering methods of investigation of impact processes]. Moscow, Mashinostroenie, 1977. 240 p.
2. Bazhenov V.G., Kotov V.L. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov udara i pronikaniia osesimmetrichnykh tel i identifikatsiia svoistv gruntovykh sred* [Mathematical modelling of non-stationary processes of impact and penetration of axisymmetric bodies and the identification of the properties of the ground environments]. Moscow, FIZMATLIT, 2011. 208 p.

3. Veldanov V.A., Zharikova A.V., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskii M.Iu., Fedorov S.V. Issledovanie dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv peschanogo grunta metodom akselerometrii [Study of Dynamical Mechanical Properties of Sandy Soil by Method of Accelerometry]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 2008, Spec. iss.-1, pp. 79-87.
4. Veldanov V.A., et. al. Geological and geochemical complex Moon investigation. *Abstracts European Planetary Science Congress*, Italy, Rome, 2010, vol. 5. Available at: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-795.pdf> , accessed 15.06.2010.
5. Sotsky M. Ju., et. al. Deceleration – Time Measured Projectile Penetration Tendency in Qualitatively Different Terminal Ballistics Processes. *Proc. 25th International Symposium on Ballistics*. Vol. 2. Beijing, China Science and Technology Press, 2010, pp. 1070-1077.
6. Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskii M.Iu., Fedorov S.V. Raschet pronikaniia nedeformiruemykh udarnikov v maloprochnye pregrady s ispol'zovaniem dannykh p'ezoakselerometrii [Calculation of the penetration of rigid hammer into low-durable obstacles using data of piezoaccelerometers]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 2011, vol. 81, no. 7, pp. 94-104.
7. Vasil'ev A.Iu., et. al. *Ustroistvo provodnoi elektricheskoi svyazi dlia metaemogo tela i sposob ispytaniia metaemykh tel s nepreryvnoi registratsiei ballisticheskikh parametrov* [Wired telecommunications device for the thrown object and the way tests of thrown objects with continuous recording of the ballistic parameters]. Patent RF no. 2287756, 2006.
8. Sotskii M.Iu. Otsenka pogreshnosti registratsii zamedleniia udarnika v razlichnykh sredakh po tekhnologii akselerometrii pri vysokoskorostnom udare [Evaluation of errors of registration of the deceleration of the hammer in various environments by technology of accelerometry at the high-velocity impact]. *Materialy 16 Mezhdunarodnogo simpoziuma "Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred" im. A.G. Gorshkova* [Proc. of 16 International Symposium "Dynamic and technological problems of mechanics of constructions and continuous media" them.A.G. Gorshkov], Iaropolets, 2010, vol. 2, pp. 225-229.
9. Veldanov V.A., et. al. Osobennosti primeneniia tekhnologii akselerometrii terminal'noi ballistiki pri issledovanii zakrytykh litsevym tonkim metallicheskim ekranom gruntovykh sred [Features of application of technology of accelerometer of terminal ballistics in the study of the closed with a facial thin metal shield of ground environments]. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Sovremennaiia ballistika i smezhnye voprosy mekhaniki", posviashchennoi 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora M.S. Gorokhova - osnovatel'ia Tomskoi shkoly ballistiki* [Materials of all-Russian scientific conference "Modern ballistics and related problems of mechanics", devoted to 100 anniversary from the birthday of Professor M.S. Gorokhov - the founder of the Tomsk school of ballistics]. Tomsk, 2009, pp. 177-178.
10. Veldanov V.A., et. al. *Ustroistvo i sposob provodnoi elektricheskoi svyazi dlia registratsii parametrov funkcionirovaniia metaemogo tela v polnom ballisticheskome tsikle* [The device and method of the wired electric communication for the registration of parameters of the functioning of the thrown body in the full ballistic cycle]. Patent RF no. 2413917 RF, 2011.
11. Sotskii M.Iu., et. al. Realizatsiia tekhnologii akselerometrii terminal'noi ballistiki dlia uslovii udara tela pod uglom k poverkhnosti sredy [The implementation of technology of accelerometry of terminal ballistics for conditions of strike of the body at an angle to the surface of the

medium]. *Materialy 17 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred» im. A.G. Gorshkova* [Proc. of 17 International Symposium “Dynamic and technological problems of mechanics of constructions and continuous media” them. A.G. Gorshkov]. Vol. 2. Moscow, OOO «TR- Print», 2011, pp. 142-147.

12. Sotsky M. Ju., et. al. Tekhnologiiia registratsii zamedleniia tel pri naklonnom pronikanii dlia polucheniia dannykh o dinamicheskikh svoistvakh gruntovoi sredy [The technology of registration of the deceleration of bodies at the inclined penetration to obtain data on the dynamic properties of ground environment]. *Materialy 18 Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred» im. A.G. Gorshkova* [Proc. of 18 International Symposium “Dynamic and technological problems of mechanics of constructions and continuous media” them. A.G. Gorshkov]. Vol. 2. Moscow, OOO «TR- Print», 2012, pp. 144-149.