

Данные об истории замедления тела в реологической среде как основа для верификации расчетных задач

© М.Ю. Сотский, В.А. Велданов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Приведен обзор результатов получения и использования данных об истории замедления тел при высокоскоростном проникании в мишень, которые были опубликованы по докладам авторов, представленным на 23–31-м Международных симпозиумах по баллистике. Эти результаты, относящиеся к области терминальной баллистики — изучению действия тела на мишень, представляют собой данные об истории замедления ударника в материале мишени. Прослежен полувековой путь развития данной технологии как нового научного направления, основанного на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. В измерительной технологии ударники оснащены ударными акселерометрами и оригинальными системами электрической связи с регистратором. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выявить новый закон сопротивления среды прониканию, который допускает применение инженерных методов для решения задач. С помощью этого закона стало возможным решать пространственные задачи проникания. Регистрируемые опытные данные об истории замедления измерительного ударника предоставили дополнительные возможности для верификации моделей и результатов виртуального моделирования процессов пространственного проникания. Приведены результаты исследований, выполненных авторами в широком диапазоне вариантов начальных условий соударения и конструкций ударников и мишеней, а также разработанные в последнее время новые технические решения в измерительной технологии.

Ключевые слова: ударник, пространственное проникание, закон сопротивления, история замедления, верификация, моделирование

Введение. Задача определения динамики высокоскоростного проникания тел (ударников, зондов) в различные мишени (преграды, среды) имеет большое прикладное значение. Такие ударники используются во многих областях техники, к примеру устройство для доставки полезного груза в массив небесного тела (по патенту RU 2349514, 2007, В.А. Велданов и др.). Следует отметить и проект применения ударников, оснащенных разного рода датчиками, для исследования строения поверхности Луны и планет Солнечной системы [1, 2]. Проникая на определенную глубину в поверхностный слой планеты, такие исследовательские зонды-ударники могут передавать информацию о свойствах пород, слагающих кору, причем в процессе проникания должна быть обеспечена сохранность приборных устройств, входящих в их состав. Однако для функционирования таких зондов необходимо определять перегрузки, воздейству-

ющие на проникающий модуль зонда. Давно установлено [3], что при проникании металлических ударников в грунтовые преграды вплоть до скорости взаимодействия 1000 м/с их деформации малы.

В процессе движения ударники можно рассматривать как абсолютно жесткие тела. Динамика проникания недеформируемого ударника в преграду зависит от распределения нормальных и касательных механических напряжений на поверхности его контакта с преградой, которые определяют силовое воздействие на ударник. При расчете проникания недеформируемых ударников в грунтовые преграды используются различные подходы для определения напряжений на контактной границе. В простых (инженерных) методиках расчета контактные напряжения часто вычисляются с помощью эмпирических соотношений [4], которые включают набор коэффициентов, характеризующих динамические механические свойства конкретной рассматриваемой преграды, и учитывают зависимость контактных напряжений от текущей скорости ударника.

В расчетных методиках более высокого уровня силовое воздействие на ударник при его движении в преграде определяется на основе численного моделирования с позиций механики сплошных сред. Экспериментальные и теоретические исследования динамики пространственного проникания для множества вариантов и скоростей взаимодействия ударников с мишенью представлены в [5–11].

Цель настоящего исследования — ретроспективный анализ развития и взаимодействия новой измерительной технологии акселерометрии терминальной баллистики, используемый для решения практических задач, при виртуальном моделировании процессов пространственного проникания ударников в реологические среды.

Развитие исследований процессов проникания. В 1969 г. научная группа будущего профессора Ю.В. Хайдина приступила к исследованию пространственного взаимодействия ударников с реологическими средами. С этого времени и началось развитие на кафедре М4 Машиностроительного факультета МВТУ им. Н.Э. Баумана современной научно-педагогической школы, получившей впоследствии название «Школа конечной (терминальной) баллистики» [12]. Тогда же, начиная 1970-х годов, приступили к разработке экспериментально-теоретической методики и проведению экспериментов по пространственному прониканию ударников в грунты на вакуумируемой баллистической установке.

Методы оценки параметров движения ударников в преграде и определения нагрузок требуются при выборе конструктивных параметров и расчете эффективности. Они должны быть максимально быстрыми и простыми, но в то же время должны учитывать значимые для формирования облика проникающих ударников особенности физики процесса. Были отработаны методы киносъемки условий

встречи ударников с преградой, а также методы замера их максимальных перегрузок с помощью упругих контактных датчиков. Анализ и обработка экспериментальных результатов, полученных отечественными и зарубежными исследователями, процессов проникания в грунты ударников различных форм позволили выявить новый закон удельного сопротивления прониканию. При использовании этого закона стало возможным решать пространственные задачи проникания ударника. В 1974 г. мл. науч. сотрудник В.А. Велданов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук, в которой и изложил разработанную экспериментально-теоретическую методику.

Величина силы сопротивления среды прониканию ударника в каждый момент времени зависит от создающихся при текущей скорости удельного давления среды и площади поверхности ударника, контактирующей со средой. Метод расчета проникания недеформируемых ударников в плотные и прочные преграды, основанный на известной гипотезе [4] о полиномиальной зависимости нормального удельного сопротивления σ_n , возникающего в области контакта ударника со средой, от нормальной составляющей скорости проникания ударника V_n , можно представить следующим выражением:

$$\sigma_n = aV_n^2 + bV_n + c.$$

В более простом виде при внедрении в прочные преграды, оно имеет вид

$$\sigma_n = a V_n^2 + c.$$

Полагается, что в любой точке контакта ударника со средой действует сопротивление трения τ_n , зависящее от коэффициента трения μ и нормального удельного сопротивления σ_n :

$$\tau_n = \mu\sigma_n.$$

Здесь под a подразумевается некий аналог плотности среды, а под c — величина, обобщенно характеризующая прочность среды. При этом значения a , c , μ выбирают из условий сходимости с имеющимися экспериментальными данными.

В 1971 г. были проведены пионерные исследования уникальных экспериментальных методик непрерывной электрической регистрации перегрузок ударников при проникании в преграды и составлен научно-технический отчет об их разработке. Наличие данных об уровне и истории изменения действующих при проникании сил дает возможность усовершенствовать экспериментально-теоретическую методику оценки пространственного проникания ударников в преграды на качественно новом уровне. Кроме того, по данным об истории замедления был предложен способ определения зависимости $\sigma_n(V_n)$ непосредственно путем эксперимента. Это позволяет уточнять коэффициенты