

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОНИКАНИЯ МОДУЛЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В АСТЕРОИДЫ

В.А. Велданов

НИИ специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Астероиды, орбиты которых приближаются к орбите Земли или проникают внутрь ее (их число около 50), имеют размеры от нескольких сотен метров до нескольких километров [1]. Разрушение их или изменение траектории движения возможно с помощью взрыва ядерных зарядов на глубине 50–75 метров от лицевой поверхности.

Проблема доставки ядерного заряда на такую глубину с помощью проникающих модулей космических аппаратов требует выполнения двух условий:

- 1) по ограничению перегрузок при проникании, не выше допустимых, и
- 2) по виду траекторий внутри астероида.

Выполнение первого условия обеспечивается ограничением скоростей встречи, выбором форм головных частей проникающих модулей и выполнением в них различного рода демпфирующих устройств, уменьшающих действующие перегрузки (рис. 1).

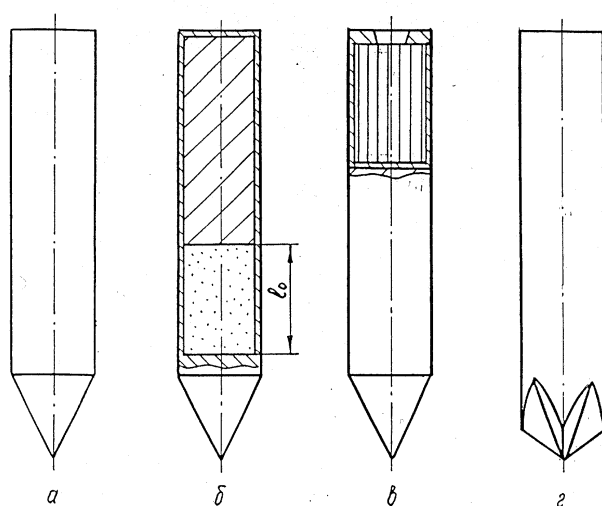


Рис. 1. Проникающие модули:

a — сплошной, с заостренной головной частью, *б* — с газовым демпфером перегрузок, *в* — с маршевым реактивным двигателем, *г* — со звездообразной головной частью.

Второе условие предусматривает возможность управления траекторией модуля путем выполнения его с определенными конструктивными характеристиками (формой корпуса, центровкой, моментами инерции и т. п.), а также заданием необходимых условий встречи с поверхностью астероида (скорости, углов подхода и атаки, соответствующих угловых скоростей).

Характер движения тел в сопротивляющейся среде, ввиду несовпадения в большинстве случаев взаимодействия вектора результирующей силы сопротивления среды с осью симметрии тела, представляет собой, как правило, пространственную кривую [2].

Разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана методика [3, 4] и комплекс программ расчета движения тел в сопротивляющейся среде, которые легли в основу формирующегося в нашей стране раздела баллистики — конечной баллистики, — учитывают это.

Расчет проникания по разработанному алгоритму сводится к параллельному ведению двух численных процессов: интегрированию уравнений пространственного движения по времени и интегрированию нормального и касательного удельного сопротивлений по поверхности контакта тела со средой. Поверхность контакта определяется по полноте его нахождения в преграде и возможностью отрыва материала преграды от поверхности тела с учетом инерционного расширения кавитационной полости. Уравнения его движения представляют собой, уравнения движения центра масс и вращательного движения вокруг него, образуют систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть решена численным интегрированием, например, методом Рунге–Кутты. При этом силовые факторы, вызванные сопротивлением среды, и представляю-

щие правые части этих уравнений, определяются интегрированием выражений нормального σ_n и касательного τ_n удельных сопротивлений прониканию [4] по всей поверхности тела с учетом возможности отсутствия контакта части его поверхности со средой.

Для определения силовых факторов необходимо знать распределение нормального и касательного удельных сопротивлений среды по поверхности проникающего тела. Независимо от его формы удельные сопротивления в какой-либо точке его поверхности, находящейся в контакте с преградой, являются функциями физико-механических свойств среды и V_n — проекции скорости V (рис. 2) рассматриваемой точки на вектор нормали к поверхности тела в этой точке. В общем виде эти функции для большинства сред записываются одинаково [4]:

$$\sigma_n = AV_n^2 + BV_n + C, \quad \tau_n = \mu\sigma_n, \quad (1)$$

где A, B, C — коэффициенты, характеризующие свойства среды оказывать сопротивление прониканию, μ — коэффициент трения материала преграды о корпус тела.

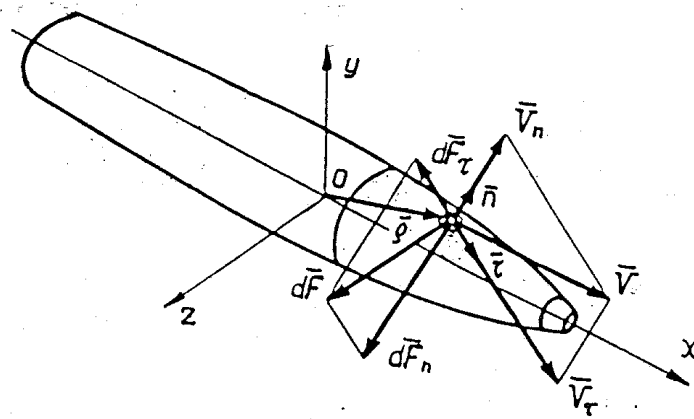


Рис. 2. Сопротивление среды.

Сила сопротивления и ее момент в окрестности рассматриваемой точки находятся через удельные сопротивления:

$$d\vec{F}_n = \sigma_n \vec{n} ds, \quad (2)$$

$$d\vec{F}_\tau = \tau_n \vec{\tau} ds, \quad (3)$$

$$d\vec{M} = [\vec{\rho}, (\sigma_n \vec{n} + \tau_n \vec{\tau})] ds, \quad (4)$$

где $\vec{n}, \vec{\tau}$ — единичные векторы нормали и касательной в рассматриваемой точке поверхности тела; ds — элементарная площадка в окрестности рассматриваемой точки; $\vec{\rho}$ — радиус-вектор рассматриваемой точки поверхности тела относительно его центра масс O .

В отличие от известных подходов [5, 6], определяющих суммарную силу сопротивления в виде функции от скорости проникания, коэффициенты A, B, C в (1) не зависят от формы проникающего тела, а форма тела при определении сопротивления в каждой точке поверхности тела учитывается через проекцию V_n ее скорости на нормаль. Коэффициенты находятся на основании обработки экспериментальных [5, 7] или расчетных [8, 9, 10] данных об удельном сопротивлении для различных скоростей V_n и их аппроксимации квадратным трехчленом.

При вычислении сил на боковой поверхности, которая при проникании на глубины, превышающие высоту головной части, взаимодействует с инерционно расширяющейся средой, приведенной в движение головной частью, считается [11], что частицы среды после отрыва от поверхности головной части движутся по траекториям, нормальным к поверхности головной части.

Методика позволяет получать полную информацию о траектории и положении проникающего модуля, осевой и боковой перегрузках и моменте сил сопротивления, угловой и линейной скорости как при проникании в глубь преграды, так и при рикошете.

Расчеты пространственного проникания позволили выявить получивший в дальнейшем экспериментальное подтверждение [12] феномен возможности значительного превышения боковой

перегрузкой на глубине проникания до нескольких десятков калибров осевой перегрузки, испытываемой телом в момент полного внедрения его головной части. Показано, что увеличение коэффициента трения материала преграды о поверхность тела оказывает на проникание двойственный характер, с одной стороны увеличивая силу сопротивления, с другой — уменьшая его разворот в преграде и приводя в некоторых случаях к увеличению глубины проникания.

Пространственное проникание модулей звездообразной формы (рис. 1,з) в некоторых случаях имеет преимущество [13, 14] перед эквивалентными по массе цилиндрическими модулями, заключающееся в увеличении глубины проникания и уменьшении испытываемых ими перегрузок.

Устойчивость движения тел как звездообразных, так и цилиндрических может быть повышена выполнением притупления на головной части или смещением центра масс к ее вершине. Так, размещение центра масс на расстоянии 0,2–0,3 длины ударника позволяет получить прямолинейные траектории даже при подходе к преграде под углом. В этом случае реализуются преимущества звездообразных тел, связанные с уменьшением сил сопротивления по сравнению с эквивалентными цилиндрическими ударниками. Глубина проникания звездообразного ударника при этом может значительно превышать глубину проникания цилиндрического ударника.

Другими возможными путями уменьшения перегрузок и увеличения глубины проникания является применение газовых демпферов (рис. 1,б) и реактивных разгонных двигателей (рис. 1,в), работающих в процессе проникания.

Модуль с газовым демпфером содержит корпус (рис. 1,б) с расположенным у его дна полезным отсеком с ядерным зарядом, перед которым имеется рабочая полость, заполненная газом под давлением. Для улучшения центровки модуля и уменьшения его габаритов при старте и полете к астероиду полезный отсек может находиться у головной части, а перед встречей со средой грунтом смещаться к дну корпуса в исходное для функционирования демпфера положение. При этом корпус модуля для увеличения хода l_0 полезного отсека может быть выполнен телескопическим.

При торможении корпуса модуля в момент встречи со средой полезный отсек имеет возможность перемещаться вдоль корпуса, сжимая газ в рабочей полости, демпфируя таким образом резкое нарастание перегрузки при внедрении головной части.

Модуль с реактивным двигателем, расположенным сзади полезного отсека (рис. 1,в), с одной стороны за счет тяги, направленной против силы сопротивления среды, уменьшает действующую перегрузку, с другой стороны использование дополнительной энергии топлива позволяет увеличить глубину проникания.

Разрушение астероидов или изменение их траектории путем максимальной передачи импульса от взрыва ядерного заряда возможно при заглублении модуля с ядерным зарядом на глубину не менее 50 м. Рассмотрим с помощью рассмотренной расчетной методики возможности достижения такой глубины модулями общей массой 450 кг, массой полезного отсека 300 кг, диаметром 0,23 м, длиной головной части 0,27 м [8] и удлинением порядка 10 диаметров. В качестве сред для расчета проникания возьмем лед (рис. 3) и каменный массив (рис. 4).

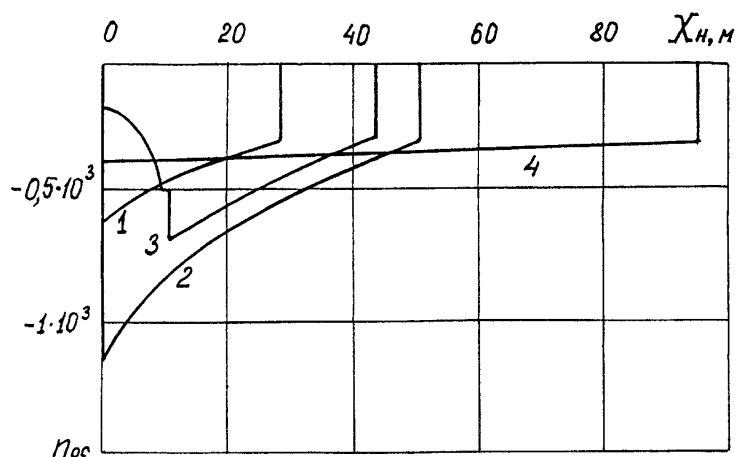


Рис. 3. Проникание в лед:

1—500 м/с, “а”; 2—800 м/с, “а”; 3—900 м/с, “б”, $l_0 = 3$ м, 4—800 м/с, “з” — 8 ребер.

Расчеты показывают (рис. 3), что при скорости встречи 500 м/с модуль типа “а” (рис. 1) проникает в лед на глубину около 30 м. Увеличение глубины его проникания до 50 м возможно при

увеличении скорости встречи до 800 м/с , однако, при этом будет иметь место рост перегрузок n_{oc} до 1100. Применение газового демпфера (тип “б”) с исходным давлением газа 15 МПа , длиной хода l_0 полезного отсека 3 м позволяет увеличить глубину проникания до 44 м и снизить максимальную перегрузку до 700. Наибольший эффект дает применение головной части звездообразного (поликлинового) типа (модуль “з”). При выполнении ее в виде 8 клиньев длиной $0,4 \text{ м}$ (угол наклона плоскости клина к оси симметрии равен $6,5$ градусов) глубина проникания в лед при скорости встречи 800 м/с достигает 95 м при максимальной перегрузке 400.

Следует отметить, что расчет проникания звездообразных модулей в каменный массив не дал никаких преимуществ перед цилиндрическими ввиду значительного увеличения сил трения среды по увеличенной по сравнению с конусом поверхности звездообразной головной части.

Проникание модуля типа “а” в каменный массив (рис. 4,а) со скоростью встречи 500 м/с позволяет достигнуть глубины 12 м при перегрузке 1400. Глубина 50 м достигается только при скорости 2300 м/с при перегрузке 18000. Отметим, что сохранение прочности корпуса модуля при такой скорости встречи представляет серьезнейшую техническую проблему.

Применение реактивного двигателя (тип “в”) с массой топлива 100 кг , временем работы с момента встречи со средой $0,08 \text{ с}$, с постоянной тягой $3,12 \text{ МН}$ позволяет снизить скорость встречи до 1200 м/с с уменьшением перегрузки до 5200 при глубине проникания 50 м . Выполнение тяги переменной по времени работы двигателя с максимумом в момент контакта со средой позволяет уменьшить перегрузку до 4500 без уменьшения глубины проникания.

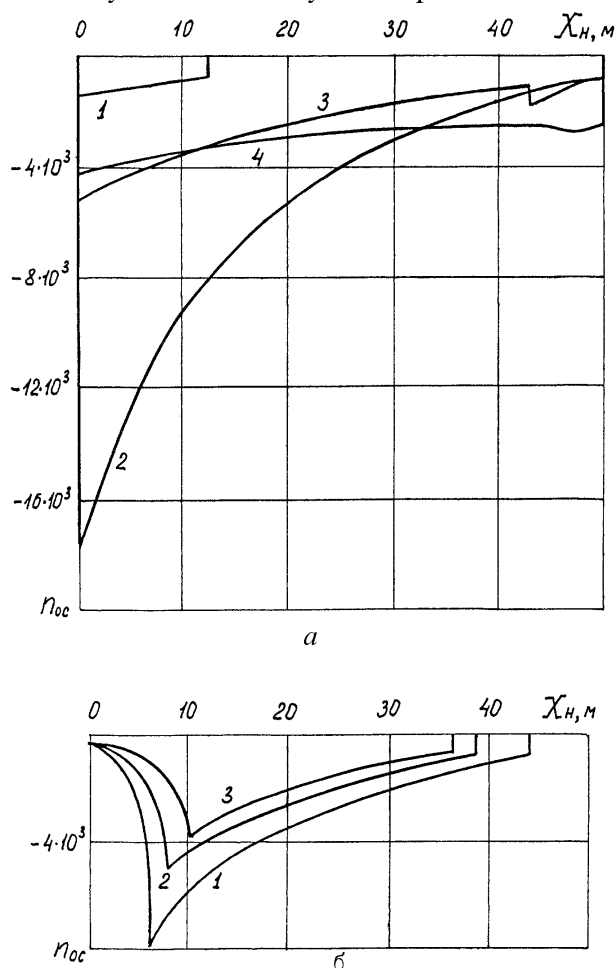


Рис. 4. Проникание в каменный массив:

а — сплошной и с реактивным двигателем 1— 500 м/с , “а”; 2— 2300 м/с , “а”; 3— 1200 м/с , “в”, постоянная тяга; 4— 1200 м/с , “в”, убывающая тяга; б — с газовым демпфером “в” 1— 2300 м/с , $l_0 = 1 \text{ м}$; 2— 2300 м/с , $l_0 = 3 \text{ м}$; 3— 2300 м/с , $l_0 = 5 \text{ м}$.

Эффективность газового демпфера (модуль типа “б”) с исходным давлением газа 30 МПа существенно повышается с увеличением длины хода l_0 полезного отсека (рис. 4,б). Так, его увеличение с 1 м до 5 м позволяет уменьшить максимальную перегрузку с 8000 до 3700, приводя при этом к некоторому уменьшению глубины проникания с 44 м до 36 м . Если удастся решить проблему соз-

дания раздвижного телескопического устройства такой длины, обладающего при этом достаточной прочностью, такие демпферы могут быть использованы для уменьшения перегрузок.

Таким образом, показана принципиальная возможность увеличения глубины проникания до 50 и более метров и снижения осевых перегрузок полезного отсека с помощью газовых демпферов, разгонных реактивных двигателей для проникающих модулей в каменные массивы и лед. Что касается звездообразного выполнения головных частей с этой целью, то оно имеет смысл только для проникания в относительно ма-лопрочные среды, обладающие незначительным коэффициентом трения о корпус проникающего модуля.

Литература

1. Очерки сравнительной планетологии. — М.: Наука, 1981. с. 193.
2. Майевский Н.В. О влиянии вращательного движения продолговатых снарядов на углубление их в твердые среды // Артиллерийский журнал, 1866, № 5, с. 1–100.
3. Хайдин Ю.В., Велданов В.А., Арапов М.М. Влияние условий встречи пули с обсадной трубой на эффективность действия пулевого перфоратора // Труды МВТУ, 1980, № 312, с. 84–92.
4. Велданов В.А. и др. Программа расчета на ПЭВМ параметров процесса взаимодействия ударников с преградами. // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Материалы XII Всесоюзной конференции / Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1992. с. 65–72.
5. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снарядов в песок // Сб. переводов “Механика”, 1957, № 6.
6. Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets// Intern. Journal of Engineering Science, 1978, vol 16, № 1, p. 1–99.
7. Garcia N.B., Farrell D., Mellor M. Ice penetration tests// Cold Region Science and Technology, 1985, № 11, p. 223–236 .
8. Башуров В.В., Степанов В.Ф., Скоркин Н.А. Расчет сопротивления деформируемых сред прониканию в них твердых тел. Челябинск–70: ВНИИТФ, 1994, 20 с..
9. Велданов В.А., Исаев А.Л. Решение задачи о вдавлении жесткого индентора в бетон // Труды МВТУ, 1987, № 478, с. 36–41.
10. Велданов В.А., Исаев А.Л. Разрушение бетонной плиты при пробитии жестким индентором. // Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов / Киев: КВТИУ, 1988. 312 с..
11. Сагомоян А.Я. Проникание. — М.: МГУ, 1976, 299 с..
12. Ручко А.М. Влияние угловой скорости на перегрузку при движении пули перфоратора в продуктивных слоях // Труды МВТУ, 1982, № 387, с. 48–54.
13. Бондарчук В.С., Ведерников Ю.А., Дулов В.Г., Минин В.Ф. К оптимизации звездообразных ударников// Изв. СО АН СССР. Сер. технических наук, 1982, Вып. 3, с. 60–65.
14. Велданов В.А. Проникание в грунт ударников нетрадиционных форм //Труды МВТУ, 1989, № 530, с. 85–97.