

СПОСОБЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ АСТЕРОИДОВ ПРИ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЯХ

Д.В. Петров, В.А. Симоненко, О.Н. Шубин

Российский федеральный ядерный центр —ВНИИИ технической физики, г. Снежинск, Россия

1. Постановка задачи

Основным результатом и целью экспериментальных исследований свойств астероидов и комет при космических миссиях должно быть построение адекватной физико–математической модели астероида или кометы. Модель должна быть такова, чтобы на ее основе можно было уверенно прогнозировать как последствия столкновения с Землей, так и результат воздействия на него с целью предотвратить столкновение.

В данной работе мы хотели бы приблизительно очертить тот круг физических задач по исследованию астероидов и комет, которые можно поставить при планировании полета к астероиду или комете. Поскольку авторы настоящего доклада не являются специалистами в области ракетно–космической техники, то мы бы хотели отвлечься от реальной осуществимости того или иного способа полета и сосредоточить внимание на той физической информации, которую можно было бы получить при организации соответствующих условий. Таким образом, мы бы переформулировали задачу в следующем аспекте: “Что мы можем узнать нового об астероиде при обеспечении соответствующих условий его взаимодействия с космическим зондом?” К этим условиям относятся:

1. Столкновение космического зонда с астероидом.
2. Посадка космического аппарата на астероид.

Соответственно, для исследования природы астероидов и комет, определения возможных способов и средств воздействия на представляющий угрозу астероид, а также прогнозирования последствий столкновения с Землей необходимы исследования их физических свойств. К этим данным относятся:

1. Размеры, масса и форма астероида.
2. Плотность материала астероида и ее распределение по глубине. Плотность зерна (или пористость).
3. Химический состав астероида (весовое содержание элементов).
4. Данные по ударной сжимаемости материала астероида.
5. Данные по упругим характеристикам материала астероида:
 - модуль сжатия K ;
 - модуль сдвига μ или любая другая эквивалентная пара параметров (коэффициент Пуассона, скорости продольной и поперечной волны и т. п.).
6. Упруго–пластические и прочностные параметры:
 - прочность на сжатие (быстрые и медленные деформации);
 - прочность на растяжение (быстрые и медленные деформации);
 - условие пластичности в разрушенном материале (быстрые и медленные деформации).

Указанные параметры могут быть определены тем или иным способом в случае осуществления космической миссии к астероиду.

Для расчетной оценки последствий воздействия не все параметры являются одинаково важными. По отношению к различным параметрам могут быть выдвинуты различные требования по точности определения. Приоритеты могут также изменяться в зависимости от типа предполагаемого воздействия (кинетический удар; ядерный взрыв: заглубленный, контактный или взрыв на некотором расстоянии от поверхности астероида).

В настоящее время представляется, что наиболее важными являются такие параметры, как плотность, химический состав и прочностные характеристики (предполагается, что в случае осуществления миссии к астероиду его размеры, масса и форма будут заведомо определены).

Мы остановимся на неядерных экспериментах, так как по нашему убеждению подготовка ядерного эксперимента должна опираться на некоторый объем информации, которую вначале необходимо получить из “обычных” экспериментов в космосе.

В случае проведения неядерного эксперимента, по-видимому, можно выделить три основных типа постановки исследований, в зависимости от скорости столкновения V исследовательского зонда с поверхностью астероида:

- при $V > 10$ км/сек происходит “взрыв” зонда;
 - при $1,5$ км/сек $< V < 10$ км/сек происходит высокоскоростное проникание зонда в астероид в гидродинамическом режиме (если он имеет удлиненную форму);
 - при $V < 1$ км/сек происходит низкоскоростное проникание зонда в астероид.
- Рассмотрим физическую информативность каждого из этих режимов.

2. Скорость столкновения больше 10 км/сек

Скорости столкновения больше 10 км/сек весьма характерны для космических объектов. Однако, этот диапазон скоростей столкновения весьма мало изучен с экспериментальной точки зрения. Объясняется это прежде всего очень большими техническими трудностями получения таких скоростей для заметных масс вещества. Поэтому, исследование поведения веществ при столкновении с такими скоростями представляет самостоятельный интерес.

При скорости столкновения исследовательского зонда с поверхностью астероида $V > 10$ км/сек происходит “взрыв” зонда. При этом на поверхности астероида возникает кратер. Размеры кратера являются интегральными характеристиками свойств материала астероида и в качестве таковых могут служить для калибровки расчетов воздействия как кинетического удара, так и ядерного взрыва.

Полуэмпирические значения времени образования кратера и его размеров даются следующими формулами:

- характерное время образования кратера $t(\text{сек}) = 0,05(mV^2)^{1/3}$;
- характерный радиус R и глубина H кратера $R = 5(mV^2)^{1/3}$, $H = 2(mV^2)^{1/3}$.

В этих формулах масса измеряется в сотнях кг, скорость в десятках километров в секунду.

Таким образом, для скорости столкновения 30 км/сек и массе 100 кг, имеем следующие значения характерных величин: время образования $t = 0,1$ сек, радиус кратера $R = 10$ м, глубина кратера $H = 4$ м.

Возможно, по спектральным характеристикам свечения при взрыве удастся определить химический состав материала астероида.

Отметим, что исходя из размеров кратера, пользуясь экспериментальными данными по взрывам и ударам, можно будет попытаться подобрать аналоговую земную породу для, которой размеры кратера при тех же условиях близки. При этом неизвестные параметры для астероида будут считаться теми же самыми, что и для материала аналога, которые определяются в земных условиях.

Кроме этого, такой опыт был бы прямым экспериментом по исследованию кинетического удара.

3. Скорость столкновения между 1,5 км/сек и 10 км/сек

В этом случае будет происходить проникание зонда в астероид в гидродинамическом режиме. Если оформить головную часть зонда в виде стержня заданной формы (в простейшем случае цилиндр) и организовать столкновение без угла атаки, то можно получить следующую информацию:

1. Зависимость скорости расхоживания стержня от времени, которая позволит определить плотность поверхности материала астероида:

$$\rho_a = \rho_r \left(1 - \frac{V}{u}\right)^2,$$

$$\rho_a = \rho_r \left(1 - \frac{V}{u}\right)^2,$$

где ρ_a , ρ_a — плотность поверхности астероида,

ρ_r , ρ_r — плотность стержня,

V — скорость столкновения,

u — измеренная скорость расхоживания.

Характерное время проникания составит 1 ... 10 мсек.

Этот эксперимент позволит дать ответ на важный вопрос об однородности астероида путем сравнения полученной плотности с плотностью, измеренной дистанционными методами по форме и массе.

2. Данные о диаметре и динамике образующейся каверны, по которым можно будет судить об упруго-пластических и прочностных параметрах материала астероида. Размеры каверны также являются интегральными характеристиками свойств материала астероида и в качестве таковых могут служить для выбора соответствующих параметров. Так же, как в п. 2, можно подобрать соответствующий “земной аналог” материала астероида для которого определить нужные параметры и принять их в качестве таковых для исследуемого объекта. Кроме этого, мы будем иметь некоторые данные по динамике каверны, которые позволят уточнить модель.

В данной постановке зонд при проникании уничтожается. Поэтому, в частности, невозможно определение химического состава астероида.

4. Скорости меньше 1 км/сек

При скорости столкновения $V < 1$ км/сек будет происходить низкоскоростное проникание зонда в астероид. При этом возможно сохранение как корпуса зонда при оформлении его в виде снаряда, так и аппаратуры, если она выполнена в ударостойком варианте. В этом случае возможно получение следующей информации:

1. Характеристики процесса проникания (скорость, перегрузки, глубина), которым можно оценить упруго-пластические и прочностные параметры материала астероида;
2. Измерение плотности с помощью гамма-гамма метода после остановки зонда (необходимое время измерения 10 сек);
3. Определение химического состава с помощью гамма-гамма спектрометрии (необходимое время измерения 100 сек);
4. Измерение скоростей продольной и поперечной упругих волн с помощью акустического зондирования (необходимое время измерений от 1 мсек до 0,1 сек).

Характерное время проникания составит до 0,1 сек.

Вышеперечисленные возможности значительно расширяются в случае использования нескольких зондов, часть из которых содержит взрывчатое вещество, а часть исследовательскую аппаратуру. Те зонды, которые содержат взрывчатое вещество подрываются, а зонды с аппаратурой отслеживают приход сигналов. При этом масса ВВ может варьироваться в очень широких пределах.

В этом случае можно определить:

1. Скорости распространения сейсмических волн и ударных волн.
2. Размеры кратеров в зависимости от заглубления зарядов.

По этим данным уже с достаточно большой точностью можно будет прогнозировать результат воздействия на астероид вплоть до размеров зон разрушения.

5. Посадка на астероид

Сама по себе посадка (без возвращения) особых преимуществ, по сравнению с низкоскоростным прониканием, не дает, за исключением, по-видимому, облегчения передачи информации. Большие преимущества можно получить при возврате космического аппарата на Землю с достаточно большой ~ 10 кг массой грунта. В этом случае в земных условиях с хорошей точностью можно будет определить уравнение состояния астероида и структуру его вещества. Кроме этого, если бы удалось получить вертикальный керн начиная с поверхности, то мы бы узнали структуру приповерхностного слоя: наличие пыли и распределение плотности. Эта информация является достаточно важной для прогнозирования результатов воздействия при проведении ядерного взрыва.

6. Обеспечение получения информации

Все описанные выше способы требуют, как минимум, двух космических аппаратов. Первый — это активный исследовательский зонд, который взаимодействует с астероидом (сталкивается, проникает, садится и т. п). Второй — пассивный, который наблюдает за результатом взаимодействия. Ко второму аппарату также предъявляются достаточно жесткие, а зачастую и взаимопротиворечивые требования:

1. В случае соударения зонда со скоростью больше 10 км/сек , он должен зарегистрировать свечение (порядка 1 мсек), быть не поражен осколками из кратера, надежно зарегистрировать форму кратера (время образования $\sim 0,1 \text{ сек}$).
2. В случае соударения со скоростями от $1,5 \text{ км/сек}$ до 10 км/сек , зарегистрировать информацию о быстро протекающем процессе проникания длительностью от 1 мсек до 10 мсек .
3. В случае низкоскоростного проникания или при посадке, он должен взаимодействовать с активным аппаратом достаточно долгое время $\sim 100 \text{ сек}$ и при этом регистрировать как сам процесс проникания, так и результаты измерения плотности и состава. В случае же использования ВВ и нескольких зондов, необходимо так же регистрировать формы кратеров от нескольких взрывов, а также информацию о времени прихода на другие зонды сейсмических или ударных волн.

Заключение

Резюме вышеизложенному удобнее подвести с помощью следующей таблицы, в которой представлены относительные скорости астероида и исследовательского зонда, а также список интересных физических параметров. В клетках перекрестий показано качество и возможность получения той или иной информации.

В ряде позиций представлено “косвенно”. Это означает, что прямо соответствующие параметры не определяются. Определить их можно, решая некорректную задачу, которая, вообще говоря, может иметь и не единственное решение. Способ решения следующий: исходя, например, из окончательных размеров кратера подбирается земная порода для которой экспериментальная или расчетная форма кратера близка. Параметры астероидного материала при этом принимаются такими же, как и для соответствующей земной породы. Если такой породы подобрать нельзя, то ситуация усложняется: необходимо проведение большого цикла расчетов по математическому моделированию конкретного эксперимента с изменением различных параметров и привлечением дополнительной информации (например, по уравнениям состояния метеоритов, упавших на Землю). Путем описания эксперимента можно попытаться определить наиболее вероятное значение неизвестных параметров.

В любом случае, после проведения эксперимента, для выдачи исходных данных по прогнозированию воздействия должна быть проведена достаточно большая расчетно–теоретическая работа, целью которой будет создание физико–математической модели астероида, непротиворечивым образом описывающей результаты экспериментов при космических миссиях.

	$V > 10 \text{ км/сек}$	$1,5 \text{ км/сек} < V < 10 \text{ км/сек}$	$V < 1 \text{ км/сек}$	$V = 0 \text{ км/сек}$ возвратом зонда
Плотность астероида	нет	да	да	да
Химический состав	возможно	нет	да	да
Ударная сжимаемость	косвенно	возможно	возможно	да
Упругие характеристики	нет	нет	да	да
Упруго–пластические и прочностные параметры	косвенно	да	косвенно	да