

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С АТМОСФЕРАМИ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

Г. А. ТИРСКИЙ

Московский физико-технический институт, Долгопрудный Московской обл.

AN INTERACTION OF SPACE BODIES AND EARTH'S AND PLANETS' ATMOSPHERES

G. A. TIRSKII

Qualitative and quantitative analysis of the interaction of cosmic bodies – meteoroids moving with meteoric velocities (from 11 to 72 km/s) through the Earth and other planetary atmospheres are examined. A quantitative theory for deceleration, loss of kinetic energy and beginning of an in-flight break up for meteoroids have been deduced. An explanation of the “explosion” of cosmic bodies in the planetary atmosphere is given.

Качественно и количественно рассмотрено взаимодействие космических тел – метеороидов, движущихся с метеорными скоростями (от 11 до 72 км/с), с атмосферами Земли и планет. Приводятся количественная теория торможения, потери кинетической энергии и начала дробления метеороидов. Дается объяснение явлению “взрыва” космических тел в атмосфере планеты.

www.issep.rssi.ru

С неба упала звезда,
Видишь, летит над тобой!
Друг мой, она никогда
Не была там звездой.
Слушай небесную быль,
Тайну далеких миров –
Это межзвездная пыль,
Иней кометных миров.

*Николай Морозов
“Звездные песни”*

ВВЕДЕНИЕ

Ежедневно в атмосферу Земли влетают с метеорными скоростями (более 11,2 км/с) около 70 млн космических тел – твердых объектов размером примерно от 5×10^{-6} см и более – метеороидов, интенсивно взаимодействующих с ней [1]. Малые тела размером до 10^{-2} см порождают явление метеора (“падающей звезды”), то есть создают при быстром движении в атмосфере достаточно сильное свечение и ионизационный след такой интенсивности, что становится возможным их наблюдение визуальным, фотографическим или радиолокационным методами.

Метеороиды влетают в атмосферу Земли со скоростями от 11,2 до ~72 км/с в любом направлении, в любое время суток и года и в любом месте земного шара, появляются всегда неожиданно, и нельзя заранее предсказать, где и когда они упадут и вообще долетят ли они до Земли и превратятся ли в метеориты.

Слово “метеорон” в переводе с греческого означает “явление”. На французском языке слово “метеор” означает не только падающую звезду, но также радугу, гало, молнию, некоторые виды осадков. Наука о явлениях в атмосфере поэтому и называется метеорологией.

Атмосфера является газовым щитом и сепаратором проникающих к поверхности планеты космических тел. Поэтому из этого большого количества космических пришельцев выживает после весьма интенсивного комбинированного конвективно-радиационного нагрева

(и как следствие — их плавления и испарения), а также вследствие больших перегрузок (достигающих нескольких тысяч g), приводящих к их механическому разрушению и дальнейшему (на последнем этапе) быстрому плавлению и испарению дополнительно раздробленных за счет термонапряжений мелких кусков, только, вероятно, около 1000 кг (1%) метеорного материала и достигает поверхности Земли в виде отдельных (макро-)фрагментов — метеоритов [1].

После падения крупнейших из них на Землю образуются кратеры, а на море или океане — большие волны и цунами (цунами — японское название морских волн, возникающих от подводных землетрясений, а также иногда при взрывных извержениях подводных или островных вулканов). Оценки ежесуточного привноса космической материи на Землю, полученные с помощью различных методик, различаются примерно на четыре порядка величины, но большинство из них попадают в интервал от 100 до 1000 т в день [2].

Таким образом, ежесуточно на поверхность Земли более или менее равномерно высыпается с разными скоростями несколько десятков самосвалов космической пыли, песка, гравия и булыжников (теплых и горячих), создающих перед этим в небе захватывающее природное явление, сопровождаемое эффективными световыми, звуковыми и даже взрывными явлениями. У наиболее крупных экземпляров (более 1 кг), образующих явление болида (от греч. “болидос” — метательное копье), видимый поперечник достигает и даже превосходит видимый диаметр полной Луны или Солнца. За болидом тянется огненный хвост и с треском сыплются искры. В целом же масса Земли от такого не прекращающегося ни днем ни ночью метеорного “душа” увеличивается за год примерно на 10^7 т. Хотя эта величина и представляется внушительной, масса Земли при этом увеличивается всего примерно на $4 \cdot 10^{-6}$ % за 1 млрд лет.

Изучением метеорных явлений занимаются исследователи весьма широкого круга специальностей: астрономы, специалисты по гиперзвуковой аэродинамике, тепло- и массообмену, молекулярной физике, радиофизике, спектроскопии, плазме, геологии и др. Исследование метеоров и метеоритов (мировые коллекции насчитывают сейчас не менее 2000 видов метеоритов) приносит ученым ценные сведения о веществе космического пространства (эти тела приходят к нам порой из чрезвычайно удаленных областей Солнечной системы). Понимание процессов взаимодействия крупных космических тел с атмосферами планет тесно связано с теорией образования кратеров на планете; это понимание важно также для правильной интерпретации различных наблюдений в атмосфере. Спутники с помощью

оптической аппаратуры довольно часто регистрируют яркие вспышки в атмосфере Земли на высотах 20–40 км.

В последнее время высказывается мнение, что происхождение жизни на Земле связано с органической материей, занесенной на Землю падающими метеоритами [3], а также остро обсуждается проблема астероидной опасности для Земли — падения на Землю крупных космических тел с региональными и даже глобальными катастрофическими последствиями.

И сегодня еще не утихают дискуссии по поводу объяснения Тунгусского события [4] — падения осколка или ядра кометы на Землю (1908 год), оставившего в месте падения заметное количество мелкого (менее 200 мкм) метеорного вещества и огромный вывал частично обгоревшего (в эпицентре) леса в сибирской тайге на площади 2000 км². Кратер в месте падения Тунгусского тела не обнаружен, хотя место падения исследуется с 20-х годов. Все это говорит о сложном многоактовом сценарии взаимодействия крупных космических тел с атмосферами планет, который в настоящее время понят учеными качественно, но количественно до конца не изучен.

В работе излагаются качественно и количественно некоторые аспекты, насколько это можно сделать в краткой статье, взаимодействия влетающих с гиперзвуковой скоростью тел с атмосферой планеты. Сначала приведем основные определяющие параметры метеорных явлений.

МАССЫ, РАЗМЕРЫ

В шкале масс метеороиды охватывают диапазон от 10^{-7} до 10^7 г, включая тела, порождающие наиболее яркие болиды. Однако такой метеороид, как Тунгусский (около $2 \cdot 10^6$ т), расширяет диапазон масс возможных метеорных тел до 10^{12} г, а осколки кометы Шумейкеров–Леви 9, влетевшие в атмосферу Юпитера в июле 1994 года, увеличивают этот диапазон до 10^{16} – 10^{17} г. Кроме того, термозрозия метеорных тел в верхних слоях атмосферы с образованием пылевых хвостов за ними, а также присутствие весьма мелких космических частиц размером менее 10^{-2} см, влетающих и быстро тормозящихся в верхних слоях атмосферы (для Земли на высоте более 100 км) с весьма малой потерей массы и затем оседающих под действием силы тяжести на поверхность Земли (примерно в течение до двух лет), заставляют исследователей рассматривать частички с массой менее 10^{-6} – 10^{-7} г. Более того, использование данных счетчиков метеорных частиц на ракетах и спутниках, анализ микрократеров на поверхности Луны, наблюдение серебристых облаков доводят нижний предел масс до 10^{-13} – 10^{-12} г. Малые частицы с верхним пределом масс, равным 10^{-6} г, называются микрометеороидами. Размер этих частиц настолько мал, что, как

мы увидим далее, они тормозятся в верхних слоях атмосферы раньше, чем нагреются до температуры испарения и смогут начать светиться. Масса в 10^{-6} г примерно соответствует нижнему пределу масс частиц, полет которых регистрируется наиболее чувствительными радиолокаторами. Размеры этих частиц 0,1 мм и менее. Таким образом, диапазон масс метеороидов, реально наблюдавшихся в атмосферах планет Солнечной системы, охватывает около 30 порядков! Однако большая частьвнеземного вещества, прилетающего из космического пространства, состоит из тел с массой менее 100 г. Если принять нижнюю границу плотности равной плотности водяного льда $\delta = 1 \text{ г/см}^3$, то размеры метеороидов в поперечнике будут меняться от 10^{-4} см до 10 км. На самом деле нижний предел можно уменьшить примерно до $5 \cdot 10^{-6}$ см. Этот предел немного перекрывается с коллоидным диапазоном.

СКОРОСТИ, УГЛЫ ВХОДА

Земля обращается по своей орбите вокруг Солнца со средней скоростью (орбитальная скорость) 29,8 км/с, и она движется навстречу одним космическим телам и убегает от других. Минимальная скорость догоняющего или догоняемого космического тела относительно планеты равна второй космической скорости $V_{II} = \sqrt{2}V_1$, где V_1 – первая космическая скорость, соответствующая минимуму необходимой энергии выведения тела (спутника) на круговую орбиту планеты и приближенно равная $V_1 = \sqrt{Rg}$, где R – радиус планеты, g – ускорение силы тяжести. Для Земли $V_1 = 7,9 \text{ км/с}$, $V_{II} = 11,2 \text{ км/с}$. Максимальная скорость космического тела, разогнанного из состояния покоя под действием притяжения Солнца (параболическая скорость на расстоянии Земли), равна 42,2 км/с. Таким образом, если придерживаться установившейся точки зрения, что метеорные тела имеют солнечное происхождение, диапазон скоростей входа метеороидов в атмосферу Земли будет от 11 км/с, если метеороид догоняет Землю с минимальной скоростью и не учитывается притяжение Земли, до 72 км/с (метеороид встречает Землю с параболической скоростью со стороны апекса – точки на небе, указывающей направление движения Земли вокруг Солнца). Скорость входа микрометеороидов за счет дополнительного эффекта притяжения Земли может быть и несколько больше 72 км/с и достигать 72,8 км/с. Метеорный поток Леонидов в ноябре 1998 года влетал в атмосферу Земли со скоростью до 74 км/с. В табл. 1 приведены характерные скорости для планет и диапазон скоростей входа космических тел в атмосферы планет ($V_{II} - V_{\max}$).

Таблица 1

Планеты	V_{orb} , км/с	V_1 , км/с	V_{II} , км/с	$V_{II} - V_{\max}$, км/с	h , км
Венера	35,00	7,25	10,25	10,25–84,5	6,2
Земля	29,77	7,91	11,19	11,19–72,8	6,7
Марс	24,22	3,57	5,09	5,19–58,2	28
Юпитер	13,07	42,2	60,20	60,20–68,0	18
Сатурн	9,65	25,1	36,20	36,20–42,8	19

Угол входа метеорных тел в атмосферу Земли изменяется от 90° (вертикальный вход) до весьма малых значений. Однако большинство наблюдаемых метеоров входит в атмосферу под довольно большими углами.

СОСТАВ И ПЛОТНОСТЬ МЕТЕОРОИДОВ

Метеориты, найденные на поверхности Земли, которые имеют астероидное и, возможно, кометное происхождение, по составу делятся на три основных класса – железные, железокремневые и каменные – в зависимости от соотношения в них силикатных минералов и никелистого железа. Наиболее редко падают железокремневые метеориты: они падают раз в семьдесят реже, чем каменные. Химические анализы метеоритов показали, что все они состоят из тех же химических элементов, что и земные объекты. Никаких новых химических элементов в них не обнаружено. Плотность железных метеоритов $\delta = 7,6 \text{ г/см}^3$, каменных $\delta = \sim 3,5 \text{ г/см}^3$, рыхлых каменных $\delta = \sim 2,2 \text{ г/см}^3$.

Каменные метеориты составляют большинство (93%) падений на Землю, остальное – железные и железокремневые.

По современным воззрениям, значительная часть влетающих в земную атмосферу мелких метеорных частиц, порождающих явление метеора, является продуктом разрушения комет, “инеет” комет, как сказал в своем стихотворении революционер-швейцарец Н.А. Морозов еще в начале этого столетия.

АТМОСФЕРА

Баллистика метеороида существенно зависит от свойств (в первую очередь от плотности) атмосферы планеты, так как торможение метеороида можно рассматривать как растянутый во времени “удар” тела об атмосферу.

Изменение температуры атмосферы Земли по высоте обычно не превосходит 50–60 К (ниже примерно 100 км), что близко к температурным колебаниям у земной поверхности. Поэтому в первом приближении, вполне достаточном для многих целей метеорной астрономии, можно принять атмосферу Земли (как, впрочем, и других планет) изотермической. Тогда из уравнения состояния $p = \rho RT/m$ и уравнения гидростатического

равновесия атмосферы $\rho g = -dp/dz$ получаем экспоненциальное распределение плотности по высоте z :

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{h}\right), \quad h = \frac{R_A T}{mg}, \quad (1)$$

где p – давление, ρ – плотность, R_A – абсолютная газовая постоянная, T – температура, m – средняя молекулярная масса атмосферы, g – ускорение силы тяжести, ρ_0 – условная плотность атмосферы на поверхности Земли ($\rho_0 = 0,001\,750$ г/см³).

Величина h называется шкалой высот и для Земли равна 6,7 км. В табл. 1 приведены средние величины h для ряда планет.

БАЛЛИСТИКА ИДЕАЛЬНОГО МЕТЕОРОИДА

Прежде чем говорить о реальном взаимодействии метеороида с атмосферой планеты, рассмотрим идеализированную задачу баллистики о входе с большой скоростью абсолютно твердого (недеформируемого) адиабатического (теплоизолированного) тела, то есть тела, которое нечувствительно к последствиям перегрузки (торможению) и не подвержено аэродинамическому нагреванию, плавлению, испарению, термонапряжениям, термомеханической эрозии и т.п., то есть оно сохраняет в процессе движения сквозь атмосферу свою массу и температуру далекого космоса, равную равновесной температуре черного тела $T_0 = 280$ К на расстоянии 1 а.е. (~150 млн км) от Солнца. Такое тело будем называть идеальным метеороидом (ИМ). Рассмотрение динамики ИМ важно по крайней мере с трех точек зрения. Во-первых, баллистика ИМ поддается полному и простому математическому анализу в аналитическом виде. Во-вторых, многие качественные и отчасти количественные выводы теории ИМ остаются верными и при реальном взаимодействии очень мелких ($R < 10^{-2}$ см) и очень крупных ($R > 10^3$ см) метеороидов с атмосферой планеты до начала их механического разрушения под действием массовых сил инерции и аэродинамических поверхностных сил. В-третьих, определяемые параметры взаимодействия (максимальное торможение, максимальная потеря кинетической энергии и др.) ИМ будут опорными параметрами для облегчения интерпретации реального взаимодействия метеороида с атмосферой.

Движение центра масс тела неизменной массы и площадью поперечного сечения (миделя – от гол. *middle*, англ. *middle*) A , движущегося со скоростью v в среде с плотностью ρ , подчиняется второму закону Ньютона (масса m , умноженная на ускорение dv/dt , равна приложенной силе):

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} A C_D \rho v^2. \quad (2)$$

В этом уравнении C_D – безразмерный коэффициент сопротивления, характеризующий долю плотности потока импульса (количества движения) ρv^2 набегающего на тело потока, передаваемого телу. При движении в сильно разреженном газе, когда длина свободного пробега молекул больше характерного размера тела, $C_D = 2$, то есть весь импульс набегающего газа передается телу (неупругий удар молекул). При движении тела в достаточно плотной атмосфере, когда длина свободного пробега молекул много меньше характерного размера тела, для выпуклых гладких тел, близких к сфере, при метеорных скоростях $C_D \approx 1$. На рис. 1 эти области разграничены штриховой линией.

При записи уравнения (2) было сделано предположение, что сила тяжести mg пренебрежимо мала по сравнению с силой сопротивления, что выполняется с большой точностью для метеорных скоростей и небольших углов входа к горизонту (не менее 5°, лучше 10°). Кинематическое уравнение для определения высоты z метеороида от времени t будет

$$\frac{dz}{dt} = -v \sin \Theta. \quad (3)$$

При отсутствии силы тяжести и подъемной силы (второе предположение) траектория полета метеороида будет прямой линией с заданным и неизменным углом наклона Θ к горизонту, равным углу входа метеороида в атмосферу.

Трех уравнений (1)–(3) достаточно для определения скорости как функции высоты или времени при заданных m и $A C_D$. Результаты будут проще и нагляднее выглядеть, если вместо времени t перейти в уравнении (2) к плотности ρ как к новой независимой переменной. Интегрируя полученное таким образом уравнение при заданном постоянном произведении $A C_D$, получим

$$v = v_e \exp\left(-\frac{\bar{\rho}}{2}\right), \quad (4)$$

где

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_m}, \quad \rho_m = \frac{\beta \sin \Theta}{h}, \quad \beta = \frac{m}{A C_D}, \quad \rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{h}\right).$$

Здесь v_e – скорость входа метеороида в атмосферу на высоте, где плотность ρ_e можно положить равной нулю, β – баллистический коэффициент. Независимая безразмерная переменная в (4), равная

$$\bar{\rho} = \frac{\rho h A C_D}{m \sin \Theta} = \frac{3 \rho}{4 \delta} \frac{h C_D}{R \sin \Theta}$$

(для шара радиуса R с плотностью δ) и известным образом зависящая от высоты через ρ (см. (1)), представляет собой меру взаимодействия метеороида с атмосферой,

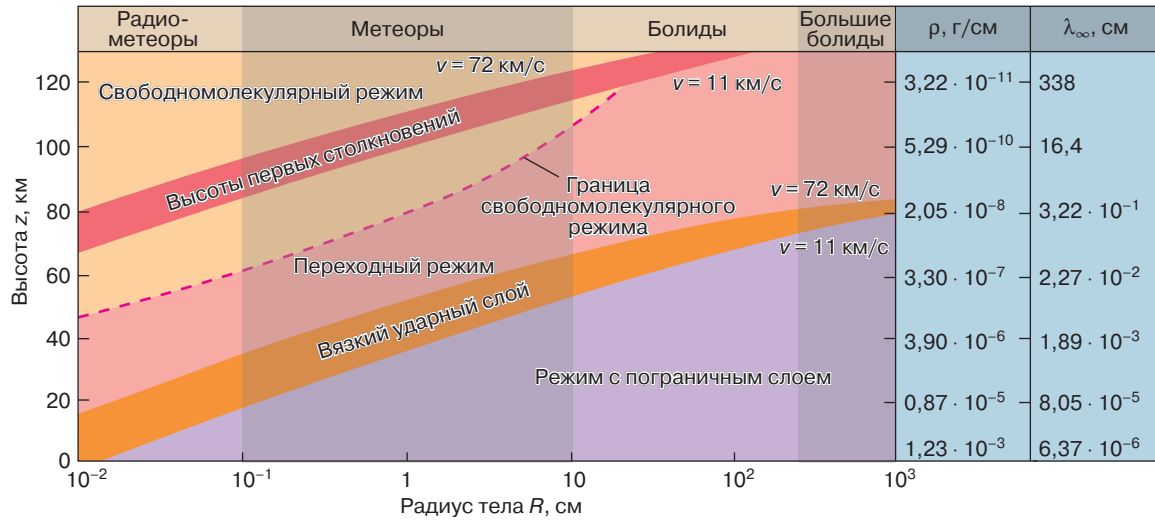


Рис. 1. Режимы обтекания тел разных размеров при входе в атмосферу Земли с метеорными скоростями. Справа – плотность атмосферы ρ и длина свободного пробега λ_∞ в невозмущенной атмосфере

равную отношению массы газа, заметенной метеороидом $\rho AhC_D/\sin\Theta$ на его пути до достижения плотности ρ , умноженной на коэффициент сопротивления C_D , к массе метеороида. При движении в разреженной атмосфере $C_D = 2$ и в показателе экспоненты в (4) будет стоять точно указанное отношение. Когда заметенная метеороидом масса газа, умноженная на C_D , сравняется с массой метеороида, тогда $\bar{\rho} = 1$, то есть $\rho = \rho_m$, и скорость его уменьшится в $\sqrt{e} = 1,65$ раза и станет равной $v_m = 0,61v_e$. Смысл характерной плотности ρ_m будет раскрыт далее.

Переход к высоте, согласно (1), дается выражением

$$z = h \ln \frac{h\rho_0}{\beta\bar{\rho}\sin\Theta}. \quad (5)$$

Замедление метеороида (или торможение) получаем из (2) и (4)

$$-\dot{v} \equiv -\frac{dv}{dt} = \frac{\rho v^2}{2\beta} = \frac{v_e^2 \sin\Theta}{2h} \bar{\rho} \exp(-\bar{\rho}), \quad (6)$$

откуда видно, что с увеличением $\bar{\rho} < 1$ (уменьшением высоты, см. (1)) торможение метеороида сначала растет, а затем при $\bar{\rho} > 1$ падает. Значит, при некотором $\bar{\rho}$ существует максимальное торможение. Оно будет, как легко видеть, достигаться при $\bar{\rho} = 1$, то есть на высоте z_m (см. (5)) с плотностью ρ_m :

$$z_m = h \ln \frac{h\rho_0}{\beta\sin\Theta}, \quad \rho_m = \frac{\beta\sin\Theta}{h}. \quad (7)$$

Таким образом, максимальное торможение достигается тогда, когда заметаемая метеороидом по его траектории масса газа сравняется с массой самого метеороида. Само максимальное торможение или максимальная перегрузка G_m для движения в атмосфере Земли (в (6) надо подставить $\bar{\rho} = 1$) будет ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $h = 6,7 \text{ км}$)

$$|\dot{v}|_{\max} = \frac{v_e^2 \sin\Theta}{2he}, \quad (8)$$

$$G_m = \frac{|\dot{v}|_m}{g} = \frac{v_e^2 \sin\Theta}{2ghe} = 2,85 v_e^2 \sin\Theta, \quad [v_e] = \frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Это замечательное выражение для G_m говорит о том, что сама максимальная перегрузка для данной атмосферы (планеты), то есть при заданных g и h , зависит только от скорости и угла входа и не зависит от массы, формы и размеров метеороида! От этих параметров будет зависеть, конечно, высота z_m (7), где достигается максимальная перегрузка.

Метеороид при торможении (“растянутом ударе”) совершает работу над атмосферой, теряя при этом свою кинетическую энергию с высотой по экспоненциальному закону

$$K = \frac{mv^2}{2} = K_e \exp(-\bar{\rho}), \quad K_e = \frac{mv_e^2}{2}, \quad (9)$$

где K_e – начальная кинетическая энергия метеороида при подлете к планете. Теряемая кинетическая энергия идет на приведение атмосферы в движение, ее нагрев, нагрев, плавление, испарение, а также разрушение самого метеороида. В модели идеального метеороида мы

рассматриваем потерю кинетической энергии только за счет торможения.

Скорость изменения K на единицу пути метеороида $l = -z/\sin\Theta$ (погонное изменение энергии) будет

$$\frac{dK}{dl} = \frac{\rho \sin\Theta dK}{h \frac{dp}{p}} = -\frac{K_e \sin\Theta}{h} \bar{\rho} \exp(-\bar{\rho}). \quad (10)$$

Из выражения (10) сразу следует, что на траектории существует точка (высота) максимальной потери кинетической энергии на единицу длины. В этой точке $\bar{\rho} = 1$, и она совпадает, следовательно, с точкой максимального торможения. Сама максимальная погонная потеря кинетической энергии

$$-\left(\frac{dK}{dl}\right)_m = \frac{K_e \sin\Theta}{he}. \quad (11)$$

Оставшаяся кинетическая энергия в точке максимальной потери кинетической энергии будет (см. (9))

$$K_m = \frac{K_e}{e} = 0,37K_e.$$

Таким образом, в точке максимального торможения, совпадающей с точкой максимальной потери погонной кинетической энергии, остается только 37% начальной кинетической энергии метеороида.

Конечно, эти выводы остаются справедливыми, только если метеороид достигает точки $\bar{\rho} = 1$ до того момента, когда он долетит до поверхности планеты.

В дальнейшем понадобится величина скоростного напора ρv^2 , определяющая величину напряжений в теле, которая, согласно (6),

$$\begin{aligned} \rho v^2 &= -2\beta\dot{v} = \frac{2\beta v_e^2 \sin\Theta}{2h} \bar{\rho} \exp(-\bar{\rho}) = \\ &= e p_m v_m^2 \bar{\rho} \exp(-\bar{\rho}). \end{aligned} \quad (12)$$

Максимальный скоростной напор достигается в той же самой точке $\bar{\rho} = 1$ и равен

$$(\rho v^2)_{\max} = \rho_m v_m^2 = \frac{\beta v_e^2 \sin\Theta}{he}. \quad (13)$$

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТЕОРОИДОВ С АТМОСФЕРОЙ

Приведем теперь некоторые основные следствия из полученного решения. Рассмотрим метеороид в виде шара радиуса $R = D/2$ с плотностью δ , движущегося в атмосфере Земли ($h = 6,7$ км, $\rho_0 = 0,001750$ г/см³). Тогда

$$\beta = \frac{m}{AC_D} = \frac{4\pi R^3 \delta}{3\pi R^2 C_D} = \frac{\delta D}{c}, \quad c = \frac{3}{2} C_D \approx \frac{3}{2},$$

$$\rho_m = \frac{\beta \sin\Theta}{h} = \frac{\delta D \sin\Theta}{hc} \approx \frac{\delta D \sin\Theta}{10^6}$$

$$(h = 6,7 \text{ км}; hc \approx 10^6 \text{ см}),$$

$$[\delta] = \frac{\text{г}}{\text{см}^3}, \quad [D] = \text{см}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_m} = \frac{10^6 \rho}{\delta D \sin\Theta}.$$

Высота максимального торможения и максимальной потери кинетической энергии z_m (7) будет ($\bar{\rho} = 1$, $\rho_0 \exp(-z_m/h) = \rho_m$)

$$\begin{aligned} z_m &= h \ln \frac{\rho_0}{\rho_m} = h \ln \frac{1750}{\delta D \sin\Theta} = \\ &= 2,30h (\lg 1750 - \lg \delta - \lg D \sin\Theta). \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 2 приведена эта зависимость. Высота, на которой длина свободного пробега равна диаметру шара D , умноженному на $\sin\Theta$, обозначена линией $\text{Kn} = \lambda_\infty / (D \sin\Theta) = 1$. Эта линия является приближенной границей между свободно-молекулярным и континуальным режимами обтекания.

Метеороиды, размеры которых меньше 0,1 мм (микрометеороиды), влетающие в атмосферу Земли с любыми скоростями (до 72 км/с), будут тормозиться в области свободно-молекулярного режима обтекания (см. также рис. 1). В силу малых размеров ($\bar{\rho} \rightarrow \infty$) они тормозятся в верхних слоях атмосферы раньше, чем

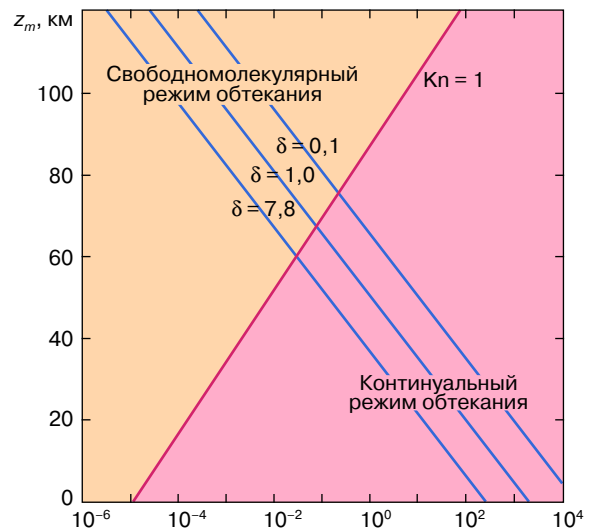


Рис. 2. Высота z_m максимального торможения и максимальной потери погонной кинетической энергии как функция размера и угла входа метеороида. Это соответствует также окрестности точки максимального теплового потока. Линия $\text{Kn} = 1$ является приближенной границей между свободномолекулярным и континуальным режимами обтекания. $[D \sin\Theta] = \text{см}$, $[\delta] = \text{г/см}^3$

нагреваются до температуры плавления, и теряют всю свою кинетическую энергию (см. (9)).

Кроме того, тела размером $D \gg 10$ м могут достигать поверхности Земли, не теряя в атмосфере заметной доли своей кинетической энергии (“прошивают атмосферу”). Это следует из формулы (9), если иметь в виду, что для поверхности Земли $\bar{\rho} = \bar{\rho}_0 = \rho_0/\rho_m = = 1750/(\delta D \sin \Theta) \ll 1$, если $D \gg 10$ м ($\delta \geq 3$ г/см³). При этом они прогреваются на толщину порядка $\Delta(t) = = 0,1\sqrt{t} \approx 0,2-0,3$ мм ($t \sim 4-6$ с), не успев потерять сколько-нибудь значительной доли своей массы. Однако здесь не следует упускать из виду большое аэродинамическое давление, возникающее при торможении метеороида и сжимающее его в направлении движения. Из формулы (13), которую для шара можно переписать в виде

$$(\rho v^2)_{\max} = \frac{\beta v_c^2 \sin \Theta}{h e} \approx 0,01 D v_c^2 \sin \Theta \text{ атм,}$$

$$\delta = 2,72 \text{ г/см}^3, \quad [D] = \text{см}, \quad [v_c] = \text{км/с,}$$

можно оценить максимальную нагрузку, если она достигается, действующую на лобовую поверхность метеороида.

Например, тело размером $D = 100$ см при вертикальном входе ($\sin \Theta = 1$) в атмосферу со скоростью 20 км/с будет испытывать максимальное давление, достигаемое в передней критической (лобовой) точке, равное $(\rho v^2)_{\max} = 400$ атм. Пределы прочности метеороидов лежат в широких пределах от 0,01 до 500 атм [5, 6] в силу их неоднородности, наличия микротрещин и вообще рыхлого строения некоторых из них. Поэтому они дробятся часто даже до достижения максимального давления. Большие метеороиды, как правило, дробятся в атмосфере, образуя рой быстро тормозящихся фрагментов, которые, в свою очередь, попадая в более плотные слои атмосферы, дробятся далее, пока не образуются сильно заторможенные и далее не дробящиеся осколки в силу повышения их прочности с уменьшением размеров, которые или выпадают на Землю в виде метеоритов, или, если образуются осколки весьма малых размеров, рассыпаются далее под действием термонапряжений (“тепловой удар”) до размеров крупной пыли, которая, оказавшись в облаке горячего газа, под действием конвективных и радиационных потоков

плавится и испаряется за десятые доли секунды [7]. В этом случае в конце траектории образуется “взрыв” метеороида с максимально быстрой передачей оставшейся кинетической энергии окружающей атмосфере планеты с выпадением остатков (иногда незначительных) метеорного вещества на поверхность планеты. Этот сценарий “взрыва” может быть описан математически и дает хорошее согласие с наблюдательными данными по дроблению и “взрыву” крупных метеорных тел, таких, как Пришбрам (Чехословакия, 1959), Лост-Сити (США, 1970) и Иннисфри (Канада, 1977).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Passy Q.R., Melosh H.J.* Effects of Atmospheric Breakup on Crater Field Formation // ICARUS. 1980. Vol. 42, № 2. P. 211–233.
2. *Додд Р.Т.* Метеориты. М.: Мир, 1986.
3. *Alvarez L.W., Alvarez W., Asaro F., Michel H.V.* Extraterrestrial Cause for the Cretaceous–Tertiary Extinction // Science. 1980. Vol. 208. P. 1095–1108.
4. *Бронштэн В.А.* Тунгусский метеорит: История исследования. М.: Звездочет, 1999.
5. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981. 416 с.
6. *Verniani F.* Structure and Fragmentation of Meteoroids // Space Sci. Rev. 1969. Vol. 10. P. 230–261.
7. *Анштейн Э.З., Пилюгин Н.Н., Тирский Г.А.* Унос массы и изменение формы трехмерного тела при движении в атмосфере Земли // Космич. исслед. 1979. Т. 17, № 2. С. 246–255.

Рецензент статьи А.М. Черепашук

Григорий Александрович Тирский, доктор физико-математических наук, профессор Московского физико-технического института, научный руководитель аспирантуры МФТИ, зав. лабораторией физико-химической газодинамики Института механики МГУ, Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии М.В. Ломоносова МГУ, лауреат первой премии Минвуза СССР, премии МАИК “Наука”, награжден Золотой медалью им. С.А. Чаплыгина РАН, памятной медалью им. П.Л. Капицы “Автор научного открытия”. Член редколлегии журнала “Прикладная математика и механика”. Область основных научных интересов – физико-химическая газодинамика, теория гиперзвуковых течений, кинетическая теория газов, вычислительная гидродинамика. Автор более 260 научных статей, двух монографий, двух изобретений.