

О РАЗРУШЕНИИ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Сызранова Н.Г.¹, Андрущенко В.А.¹, Головешкин В.А.^{2,3}

¹*Институт автоматизации проектирования РАН, г. Москва, Россия*

²*Московский государственный университет информационных технологий,
радиотехники и электроники, г. Москва, Россия*

³*Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Настоящая работа посвящена математическому моделированию механизмов разрушения метеорных тел в атмосфере Земли. В качестве примера проанализировано движение и разрушение трех конкретных метеоритов – Куны-Ургенчского (1998г.), Суданского (2008г.) и Челябинского (2013г.), которые различаются своими размерами, свойствами и составом материала, и траекторными параметрами. Явления движения и разрушения в настоящей работе исследуются на основе расширенных уравнений метеорной физики. Важным фактором, который здесь учитывается, – это переменность параметра уноса массы метеорита под действием тепловых потоков вдоль траектории полета. Статистика падений метеоритов показывает, что большая часть их, в том числе и рассматриваемые тела, падают на Землю раздробленными кусками, поэтому расчет уноса массы требует учета их дробления. Процесс фрагментации метеорита в настоящей работе рассматривается в рамках модели последовательного дробления с учетом влияния масштабного фактора на предел прочности объекта. На завершающем этапе движения метеорных тел процесс разрушения может продолжиться за счет температурных напряжений. В связи с этим оценивается характер возникающих напряжений из-за неоднородности температурного поля на примере шарообразного тела.

Ключевые слова: метеориты; тепловой поток; разрушение; температурные напряжения; баллистика; взрыв

THE DESTRUCTION OF METEOROIDS IN THE EARTH'S ATMOSPHERE

Syzranova N.G.¹, Andrushchenko V.A.¹, Goloveshkin V.A.^{2,3}

¹*Institute for Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

²*Moscow State University of Information Technologies, Radioengineering and
Electronics, Moscow, Russia*

³*Institute of Applied Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

ABSTRACT

This paper is devoted to mathematical modelling of mechanisms of destruction of meteoroids in the Earth's atmosphere. As an example, analyzed the motion and destruction of meteorites three specific Kunya – Urgench (1998), Sudan (2008) and Chelyabinsk (in 2013), which differ in size, properties and composition of the material and the trajectory parameters. The phenomena of movement and destruction in the present work are studied on the basis of

advanced equations of meteor physics. An important factor that is considered here is the variability of the parameter of mass loss of a meteorite under the action of heat fluxes along the flight path. Statistics of falls of meteorites shows that a large part of them, including the considered body fall to the Ground crushed pieces, so the calculation of the entrainment mass requires consideration of their crushing. The process of fragmentation of the meteorite in this paper we consider within the model of sequential fragmentation with the influence of scale factor on the tensile strength of the object. At the final stage of the movement of meteoroid destruction process can continue due to the thermal stress. In this regard, assess the nature of the stresses due to the inhomogeneity of the temperature field on the example of spherical body.

Keywords: meteorites; heat transfer; destruction; temperature stresses; ballistics, explosion

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время задачи о высокотемпературных взаимодействиях космических тел с атмосферой Земли вновь выдвинулись в ряд задач первостепенной значимости. Это связано с появлением нового междисциплинарного научного направления – проблемы астероидно-кометной опасности. Интерес к этой проблеме особенно возрос после Челябинского события 15 февраля 2013года [1].

В последнее время в результате наблюдения за малыми космическими телами накопился обширный фактический материал об их физических и кинематических характеристиках. Разрабатываются системы слежения, позволяющие осуществить мониторинг опасных метеороидов, представляющих угрозу для нашей планеты вплоть до объектов декаметрового диапазона. Исследования же движения и разрушения таких тел, уже вторгнувшихся в атмосферу Земли, является не просто важной научной задачей, но и проблемой выживания людей и сохранения объектов хозяйства и природной среды. Если вначале входа в атмосферу основными параметрами, определяющими степень опасности метеороида, являются его размеры, скорость и материал, то на следующих стадиях в качестве таких показателей выступают высота взрыва, масса выпавших обломков и их скорость у поверхности.

Процессы, происходящие при движении метеорного тела в атмосфере с гиперзвуковой скоростью, протекают при чрезвычайно высоких температурах, возникающих в ударном слое около обтекаемого тела, что приводит к интенсивному испарению его материала и другим процессам абляции. Кроме того, на определенной высоте полета давление в ударном слое может сравниться с величиной прочности материала метеорита, в результате чего происходит его фрагментация, причем часто многократная.

Следует отметить, что каждый метеорит существенно индивидуален: его форме присуща произвольная геометрическая конфигурация, а структура – сугубо неоднородна. Кроме того, на процессы его взаимодействия с атмосферой влияют скорость и угол входа в атмосферу, а также теплофизические и прочностные характеристики материала. В связи с этим, исследование движения и разрушения каждого конкретного метеорита является самостоятельной задачей. В этой ситуации целесообразно использование достаточно простой, но, тем не менее, многофункциональной математической модели – теории метеорной физики, расширяя ее возможности для каждого индивидуального объекта посредством учета дополнительных физических факторов, в том числе полученных с использованием методов и результатов гиперзвуковой

аэродинамики. В настоящей работе используется именно такой подход. Важным фактором, который здесь учитывается, – это переменность параметра уноса массы метеорита под действием конвективно-радиационных потоков вдоль траектории полета. В большинстве же работ других авторов этот параметр полагался постоянным.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию механизмов разрушения метеорных тел в атмосфере Земли. В качестве примера проанализировано движение и разрушение трех конкретных метеоритов – Куня-Ургенчского (Туркмения, 1998г.) [2], Суданского (2008 ТСЗ, «Almahata Sitta») [3] и Челябинского (2013г.) [1], которые сильно различаются своими размерами, свойствами и составом материала, и траекторными параметрами. Эти метеориты были выбраны в качестве эталонных для верификации разработанной модели, как объекты с наибольшим объемом данных об их характеристиках в ходе наблюдений за ними различными инструментальными средствами и тщательного физико-химического исследования выпавших осколков.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

За исходные принимаются уравнения физической теории метеоритов [4] при движении в экспоненциальной атмосфере $\rho = \rho_0 \exp(-z/h)$ (z – высота положения метеорного тела над поверхностью Земли, ρ_0 – плотность атмосферы при $z = 0$, h – характерная шкала высоты)

$$\begin{aligned} M \frac{dV}{dt} &= Mg \sin \theta - C_D S_{mid} \frac{\rho V^2}{2}, \\ V \frac{d\theta}{dt} &= g \cos \theta - \frac{V^2 \cos \theta}{R_3 + z}, \\ H_{eff} \frac{dM}{dt} &= -C_H S_{mid} \frac{\rho V^3}{2}, \\ \frac{dz}{dt} &= -V \sin \theta, \end{aligned} \tag{1}$$

где V , M , θ – скорость тела, его масса и угол наклона траектории падения к горизонту; R_3 – радиус Земли; C_D , C_H , H_{eff} – коэффициенты сопротивления, теплопередачи к поверхности тела и эффективной энтальпии испарения метеорного тела; S_{mid} – площадь поперечного сечения тела.

За начальные условия падения двух метеоритов, принадлежащих к классу хондритов ($\rho = 3.3 \text{ г/см}^3$), выбираются данные наблюдений: для Челябинского метеорита – $M_0 = 1.3 \cdot 10^4 \text{ т}$, $V_0 = 19.2 \text{ км/с}$, $\theta_0 = 18^\circ$ [1]; для метеорита Куня-Ургенч – $M_0 = 3 \text{ т}$, $V_0 = 13 \text{ км/с}$, $\theta_0 = 30^\circ$ [2]. Суданский метеорит представляет собой редкий и необычный тип метеоритов, принадлежащий к классу ахондритов ($\rho = 2.8 \text{ г/см}^3$). В таких метеоритах пространство между силикатными зёрнами заполнено веществом, богатым углеродом. Его параметры входа в атмосферу: $M_0 = 80 \text{ т}$, $V_0 = 12.4 \text{ км/с}$, $\theta_0 = 20^\circ$ [3].

При предположении о шаровидности метеорных тел, начальный радиус Челябинского метеорита равен $R_0 = 9.8 \text{ м}$, Куня-Ургенч – $R_0 = 0.6 \text{ м}$, Суданского – $R_0 = 1.9 \text{ м}$.

В высокотемпературном газовом потоке имеет место два механизма передачи тепла от газа к поверхности тела: конвективная теплопередача и перенос тепла излучением.

Для конвективного теплового потока в критической точке сферической поверхности метеорита используется формула [5]

$$q_{k0} \approx 3.3 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\rho_{\infty}}{R} \right)^{1/2} V_{\infty}^{3.2}, \text{ Вт/м}^2$$

Здесь R – в м, ρ_{∞} – в кг/м³, V_{∞} – в м/с. Индекс «∞» соответствует параметрам набегающего потока.

Для коэффициента лучистой теплопередачи в критической точке используется формула ReVelle, параметры которой представлены в [4]

$$C_{Hr} = f \cdot e^{A_1} \rho^{A_2+A_3V^{-1}} R^{A_4+A_5V+A_6V^2} V^{A_7+A_8V+A_9V^2-3} \quad (2)$$

Соответственно тепловой поток в критической точке запишется как $q_{r0} = 0.5 \rho_{\infty} V_{\infty}^3 C_{Hr}$.

Распределение теплового потока вдоль сферической поверхности для конвективного теплового потока аппроксимируется формулой [6]

$$q_k = q_{k0} (0.55 + 0.45 \cos 2\beta), \quad (3)$$

где β – угол меридионального сечения, отсчитываемого от направления на критическую точку; а для радиационного потока [7] – $q_r = q_{r0} \cos^n \beta$, $n = 1/(0.051V - 0.43) + 1.811$.

Суммарный тепловой поток к поверхности тела определяется как

$$q = q_k + q_r$$

Если тепловой поток к поверхности тела велик, то он вызывает интенсивное испарение поверхности тела, то есть вдув метеорных паров в приповерхностную область. Если скорость вдува небольшая, то его учет проводится в рамках теории пограничного слоя. Интенсивным же вдувом считается такой расход испаряемого газа, который соизмерим с удельным расходом набегающего потока. При наличии интенсивного вдува картина обтекания тела сильно меняется. Вблизи поверхности образуется слой паров, толщина которого зависит от интенсивности вдува и давления набегающего потока, то есть от плотности воздуха и скорости тела. При этом происходит отрыв пограничного слоя от поверхности, в этом случае конвективный тепловой поток блокируется полностью, а аэродинамический нагрев сводится лишь к радиационному нагреву.

Лучистый тепловой поток может также экранироваться вдуваемым газом, однако полной блокировки не происходит даже при интенсивном вдуве. Основным количественным фактором, определяющим долю экранируемого потока лучистой энергии, является спектральный состав излучения, а не интенсивность вдува. Поэтому, согласно данным [8], коэффициент лучистого теплообмена в критической точке испаряющейся поверхности может быть записан в виде

$$C_{Hkrv} = [1 - \psi_0(V)] C_{Hkr},$$

где ψ_0 – степенная функция от скорости полета V . $\psi_0 = \alpha_0 V^{\beta}$. Здесь V выражено в км/с, а $\alpha_0 = 0.0059$, $\beta = 1.36$ для воздуха.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис.1 представлены параметры теплообмена для трех метеоритов в зависимости от высоты полета, рассчитанные в рамках модели единого (без учета дробления) тела.

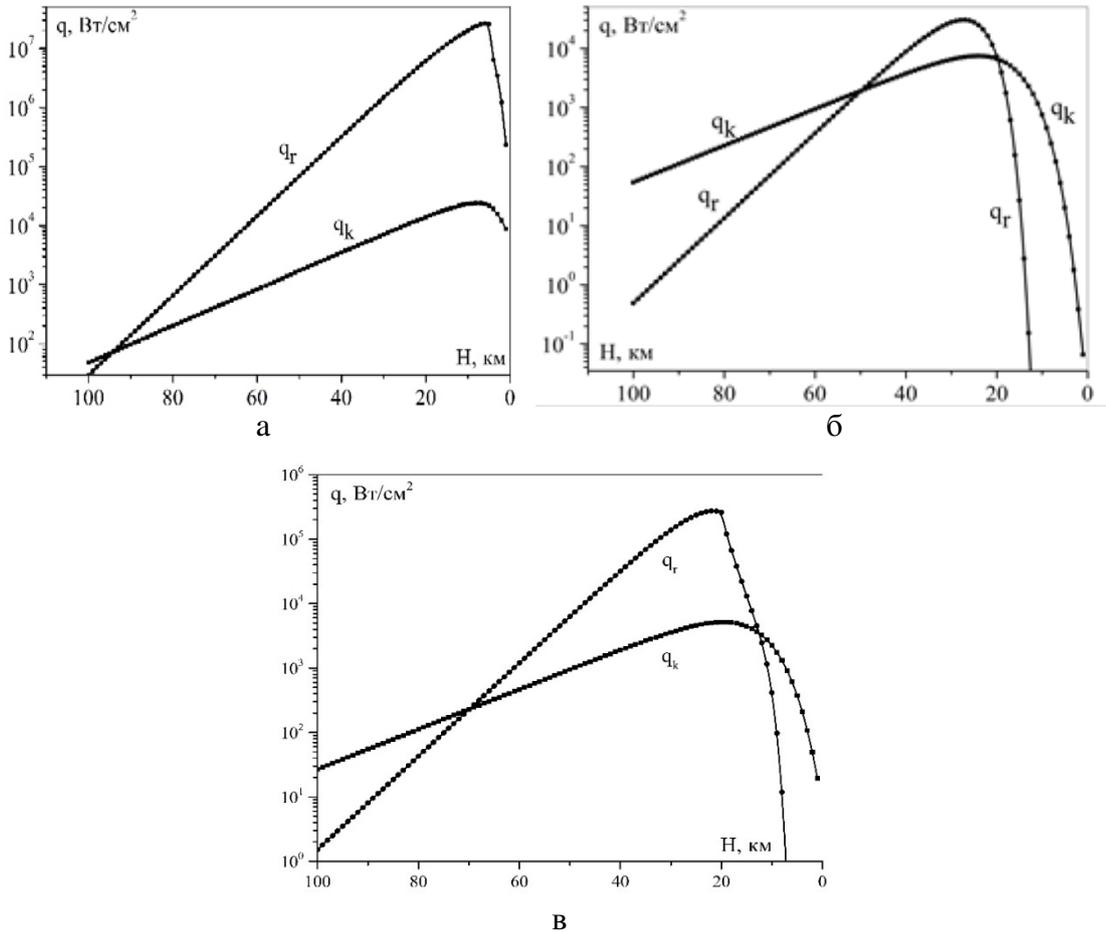


Рис.1. Значения конвективного и радиационного потока в критической точке в зависимости от высоты полета для трех метеоритов: а – Челябинского; б – Куныя-Ургенч; в – Суданского.

Расчеты параметров теплообмена, проведенные в рамках принятой модели, показывают, что для Челябинского метеорита лучистый поток намного превосходит конвективный на всей траектории падения (большая скорость полета и большой размер тела). В то время, как для метеорита Куныя-Ургенч (меньшая скорость полета и небольшой размер тела) величины радиационных тепловых потоков на несколько порядков меньше конвективных, и только на высотах 50-20 км имеет место незначительное преобладание лучистого потока над конвективным. Для Суданского метеорита превышение радиационных потоков над конвективными наблюдается в диапазоне высот 70-10 км.

Статистика падений метеоритов показывает, что большая часть их, в том числе и рассматриваемые тела, падают на Землю раздробленными кусками, поэтому расчет уноса массы требует учета их дробления.

Процесс фрагментации метеорита в настоящей работе рассматривается в рамках модели последовательного дробления с учетом влияния масштабного

фактора на предел прочности объекта. Используется модель последовательного дробления тела на основе статистической теории прочности [9], когда фрагментация происходит по дефектам и трещинам, которые присущи таким структурно неоднородным телам как метеориты. В результате дробление реализуется как процесс последовательного устранения дефектов при возрастании нагрузки путем разрушения тела по этим дефектам, таким образом появляющиеся фрагменты обладают большей прочностью, чем исходное тело. В связи с этим процесс фрагментации завершается, когда скоростной напор начинает убывать. Подробно эта модель фрагментации представлена в работах [4,10]. Задача по движению дробящегося метеорного тела решается в три этапа. На первом этапе рассматривается движение единого тела от высоты входа в атмосферу до высоты начала дробления, на втором – движение роя фрагментов от высоты начала дробления до высоты максимального скоростного напора. На третьем этапе, поскольку считается, что фрагменты имеют одинаковый размер, отслеживается движение только одного фрагмента.

Согласно рассматриваемой модели прочность фрагмента запишется в виде

$$\sigma_f^* = \sigma_0 \left(M_0 / M_f \right)^\alpha, \quad (4)$$

где σ_0 , M_0 – предел прочности и масса метеороида до входа в атмосферу, σ_f^* , M_f – те же характеристики для фрагмента; α – показатель степени неоднородности материала (для больших α неоднородность выше).

Условие начала разрушения болида в атмосфере таково

$$\rho_* V_*^2 = \sigma^*, \quad (5)$$

где слева величина скоростного напора, а σ^* – одна из прочностных характеристик материала болида (прочность на сжатие, растяжение, сдвиг).

Высота начала дробления z_* в экспоненциальной атмосфере определяется при предположении, что к этому моменту тело не успевает затормозиться, и его скорость равна скорости начальной скорости входа в атмосферу V_0

$$z_* = h \ln \left(\rho_0 V_0^2 / \sigma^* \right). \quad (6)$$

Начиная с этой высоты, вместо единого тела падает уже рой дробящихся осколков со всё увеличивающимся их количеством N . При предположении, что образовавшиеся фрагменты – сферы одинаковой массой M_f ($M_f = M / N$), из (4-6) получается их количество в зависимости от текущих величин скоростного напора и суммарной массы всех фрагментов

$$N = \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/\alpha} = \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\sigma^*} \right)^{1/\alpha}$$

Площадь Миделя, определяемая в предположении, что осколки не перекрываются, записывается следующим образом

$$S_{mid} = S_{mid*} \frac{M}{M_*} \left(\frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/3\alpha}$$

Прочность каменных хондритов меняется в широких пределах: 10^6 - 10^7 Н/м², для Суданского метеорита (ахондрит) данные наблюдений показывают, что он начинает разрушаться при динамическом давлении, равном $(2-3) \cdot 10^5$ Н/м². Проведены расчеты движения и разрушения рассматриваемых тел при разных значениях масштабного фактора α , от величины которого сильно зависит число

образовавшихся фрагментов. Так, например, для Челябинского метеорита при $\alpha=1/2$ число обломков составляет $N\sim 233$, а при $\alpha=1/8$ – $N\sim 185900$; для метеорита Куня-Ургенч при $\alpha=1/2$ – $N\sim 2$, а при $\alpha=1/8$ – $N\sim 6$, для Суданского метеорита при $\alpha=1/2$ – $N\sim 2386$, а при $\alpha=1/10$ – $N\sim 93160$. Расчеты проведены при условии, что критическое значение прочностного параметра для Челябинского метеорита равняется 10^6 Н/м², при этом высота начала фрагментации составляет 45 км, для метеорита Куня-Ургенч – $8\cdot 10^6$ Н/м² (высота начала фрагментации равняется 25 км) и для Суданского метеорита – $3\cdot 10^5$ Н/м², при этом высота начала фрагментации составляет 47 км. Приведенные значения высот примерно соответствуют данным наблюдения.

Изменения суммарной массы метеорного тела в зависимости от высоты полета в рамках модели единого тела и для дробящегося метеорита приведены на рис.2. Следует отметить, что при фрагментации метеорных тел унос массы сначала резко возрастает за счет увеличения площади поверхности в потоке. Но это приводит к увеличению торможения дробящегося тела, т.е. к уменьшению скорости метеорного тела и его обломков, что, в свою очередь, уменьшает тепловой поток к поверхности и замедляет процесс абляции дробящегося тела. Поэтому результат по уносу его массы по сравнению с нераздробившимся метеоритом неясен, что подтверждают данные на рис.2.

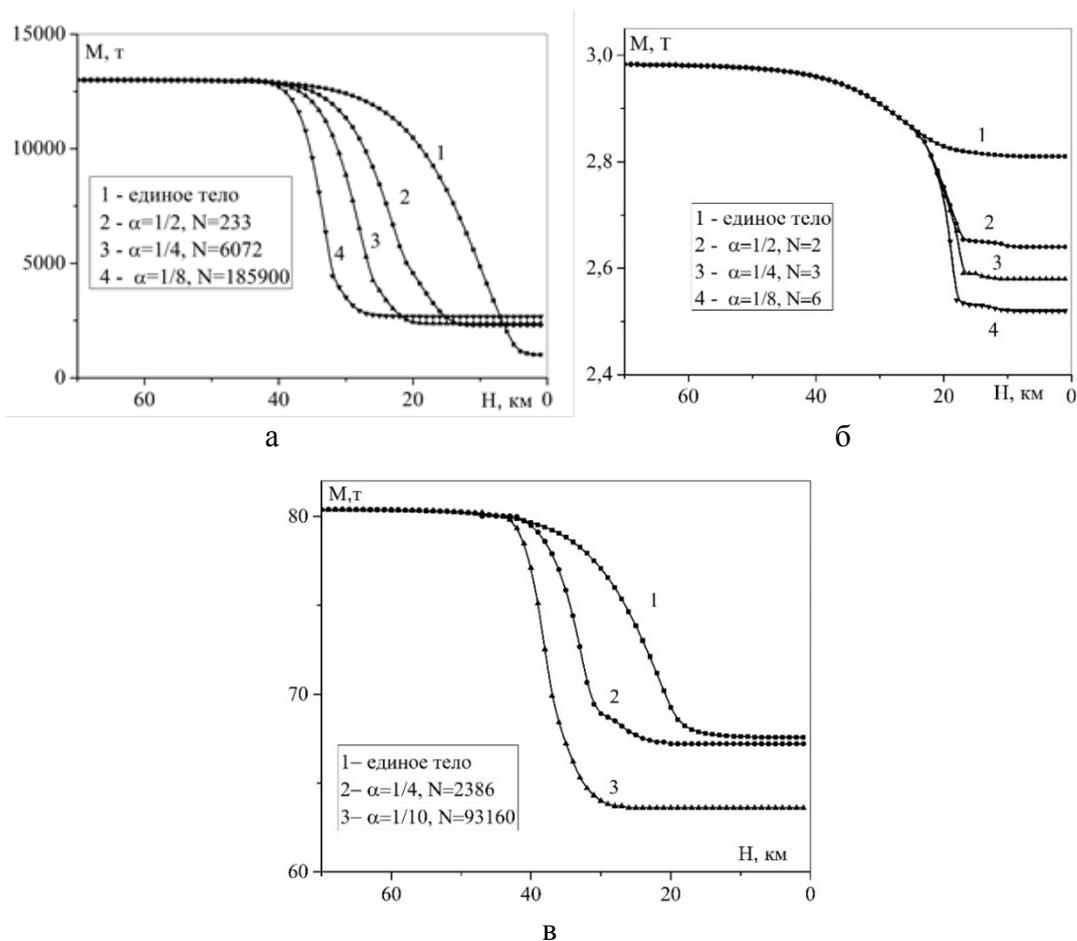


Рис.2. Изменение суммарной массы метеоритов в зависимости от высоты полета при разных значениях параметра α ; а – Челябинский метеорит, б – метеорит Куня-Ургенч, в – Суданский метеорит.

На этот процесс влияют параметры входа в атмосферу, а также размеры метеорного тела. Следует отметить, что по данным на рис.2 суммарная масса фрагментов рассматриваемых обломков метеоритов намного превышает данные наблюдений. Так, масса найденных фрагментов Челябинского метеорита не превышает 1 т, и для метеорита Куня-Ургенч она составляет около 1 т., а для Суданского она ничтожна мала: не превышает 11 кг.

Однако установлено, что на завершающем этапе движения метеорных тел процесс разрушения может продолжиться за счет температурных напряжений [11]. Термические напряжения не играют большой роли для крупных метеорных тел, но, если размер обломка достигнет нескольких сантиметров, то возникшие градиенты температуры могут разрушать в дальнейшем небольшие обломки до размеров крупной пыли, которая быстро расплавляется и испаряется в высокотемпературном воздухе. О сложности механизма фрагментации рассматриваемых метеоритов свидетельствуют также факты, приведенные в работе [12]. На обширной территории найдено множество мелких (размером не более 2 см) осколков метеорита. Среди собранных сантиметровых обломков обнаружены куски, не полностью покрытые коркой плавления, что свидетельствует о том, что дробление продолжается и после потери метеоритом скорости, и этот процесс, вызванный температурными напряжениями, приводит к дополнительному уносу массы дробящегося метеорита.

В связи с этим оценивается характер возникающих напряжений из-за неоднородности температурного поля на примере шара радиуса R (в предположении наличия сферической симметрии). В работе [11] были получены следующие соотношения для радиальных напряжений σ_r и тангенциальных напряжений σ_φ при известном законе распределения температуры $T(r)$

$$\sigma_r(r) = \frac{2E}{1-\nu} \frac{\alpha_t}{r^3} \left[\frac{r^3}{R^3} \int_0^R T(z) z^2 dz - \int_0^r T(z) z^2 dz \right], \quad (7)$$

$$\sigma_\varphi(r) = \frac{E}{1-\nu} \frac{\alpha_t}{r^3} \left[\frac{2r^3}{R^3} \int_0^R T(z) z^2 dz + \int_0^r T(z) z^2 dz - T(r) r^3 \right]. \quad (8)$$

Здесь E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, α_t – коэффициент температурного расширения.

Для оценки характера распределения температуры по радиусу рассматривается следующая модельная задача. Пусть имеется шар радиуса R , с начальной нулевой температурой, к которому мгновенно на границе «подводится» температура Θ , считающаяся в дальнейшем постоянной. Изменение температуры внутри шара описывается уравнением теплопроводности, которое в сферической системе координат при наличии сферической симметрии имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (9)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности, $T(r, t)$ – температура (функция радиуса r и времени t). Начальные условия: $T(r, 0) = 0$, граничные условия $T(R, t) = \Theta$.

Решение уравнения (9) представляется в виде [9]

$$T = \Theta \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot (-1)^n \frac{R}{r} \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \exp\left(-\frac{n^2\pi^2}{R^2} at\right) \right]. \quad (10)$$

Качественный анализ соотношений (7), (8), (10) показывает, что напряжение σ_φ имеет отрицательный знак на поверхности шара и положительный в его центре. Напряжение σ_r всюду положительно и его максимум достигается в центре. Так как свойства каменных метеоритов близки к свойствам гранита, а у гранита предел прочности на сжатие существенно выше (в 40-60 раз) предела прочности на растяжение, то далее анализируется напряжение σ_r . Согласно формулам (7) и (10)

$$\sigma_r(r,t) = \frac{2E}{1-\nu} \alpha_t \Theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n^2\pi^2} \cdot (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2\pi^2}{R^2} at\right) \times \\ \times \left[(-1)^{n+1} - \frac{R^2}{r^2} \cos\left(\frac{n\pi r}{R}\right) + \frac{R^3}{r^3} \frac{1}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) \right]$$

Если величина at/R^2 порядка единицы, то для оценки возникающих напряжений достаточно ограничиться одним слагаемым

$$\sigma_r(r,t) = \frac{2E}{1-\nu} \alpha_t \Theta \frac{2}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2}{R^2} at\right) \left[-1 - \frac{R^2}{r^2} \cos\left(\frac{\pi r}{R}\right) + \frac{R^3}{r^3} \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi r}{R}\right) \right].$$

При этом

$$\sigma_r(0,t) = \frac{2E}{1-\nu} \alpha_t \Theta \frac{2}{3} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2}{R^2} at\right) \left(\frac{\pi^2 - 3}{\pi^2} \right). \quad (11)$$

При условии $at/R^2 \ll 1$ (тело успевает прогреться на незначительную глубину) для оценки характера распределения температурного поля можно воспользоваться решением следующей одномерной задачи

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

с начальными условиями $T(x,0)=0$ ($t=0$) и граничными условиями $T(0,t) = \Theta$ ($x=0$).

Решение данного уравнения представляется в виде

$$T(x,t) = \Theta \left[1 - \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{2at}}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \right]. \quad (12)$$

Тогда

$$\sigma_r(0,t) = \frac{2E}{1-\nu} \frac{\alpha_t}{R^3} \left[\int_0^{\infty} T(z,t) R^2 dz \right] = \frac{2E}{1-\nu} \frac{\alpha}{R} \left[\int_0^{\infty} T(z,t) dz \right]. \quad (13)$$

С использованием (12) и (13) получается

$$\sigma_r(0,t) = \frac{2E}{1-\nu} 2\alpha_t \Theta \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{at}}{R}.$$

Проведем оценки с использованием следующих данных для гранита: коэффициент температурного расширения $\alpha_t = 7,9 \cdot 10^{-6}$; коэффициент температуропроводности $a = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; модуль Юнга $E = 10^{11} \text{ Н/м}^2$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$; предел прочности на растяжение $\sigma^* = 3 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$; $\Theta = 100^\circ$.

Оценим время, необходимое для достижения критического значения напряжения. Если положить $\sigma_r(0, t) = \sigma^*$, то $\sqrt{at}/R \approx 2 \cdot 10^{-2}$.

Таким образом, время t^* , необходимое для критического прогрева, может быть оценено следующим соотношением

$$t^* = 4 \cdot 10^{-4} R^2 / a$$

В частности, для тела радиуса 10 см время t^* достижения критических напряжений ~ 4 с, т.е. такое тело за время прохождения в атмосфере может успеть не один раз подвергнуться разрушению из-за возникающих температурных напряжений. Этим можно, по-видимому, объяснить отсутствие следов плавления на отдельных обломках и этот процесс приведет к дополнительному уносу массы дробящегося метеорита.

Таким образом, если фрагменты болида достаточно велики, термические напряжения не играют большой роли. Когда же размеры обломков уменьшаются до нескольких сантиметров (так, в настоящих расчетах для Челябинского метеорита при $\alpha = 0.125$ радиус фрагмента ~ 12 см, а для Суданского метеорита при $\alpha = 0.1$ радиус обломков ~ 4 см) часть из них температурные градиенты могут разрушить до размеров крупной пыли, которая быстро расплавится и испарится в высокотемпературном воздухе, а другая часть все-таки выпадет на Землю.

Одной из важных характеристик в метеорной физике является потеря кинетической энергии тела на единицу длины в зависимости от высоты полета. Торможение обломков метеорита на этапе падения приводит к последствиям, подобным «взрыву» – мгновенному выделению энергии на участке траектории. Т.е. в метеорной физике «взрывом» метеорного тела в полете называют отрезок траектории, где происходит быстрая потеря кинетической энергии тела с переходом ее в кинетическую и внутреннюю энергию окружающего газа. С учетом уравнений системы (1) можно определить энергию, выделившуюся в атмосфере, приняв ее равной потере кинетической энергии тела E

$$\frac{dE}{dz} = \frac{S_{mid} \rho V^2}{2 \sin \theta} \left(C_D + C_H \frac{V^2}{2H_{eff}} \right).$$

Два слагаемых в скобках в полученном выражении отвечают за выделение кинетической энергии за счет торможения и уноса массы.

На рис.3 представлены расчетные кривые потери кинетической энергии на единицу длины, рассчитанные для рассматриваемых тел без учета (единое тело) и с учетом дробления при различных значениях параметра α .

Видно, что максимум потери энергии, так называемый взрыв, для Челябинского метеорита при использовании модели единого тела приходится на высоту 12 км, а с учетом процесса дробления – на высоты 20-35 км при изменении прочностного параметра α от 0.5 до 0.125 (данные наблюдений отмечают высоту основного взрыва, равную 23 км). Для метеорита Куня-Ургенч максимум потери энергии приходится на высоты 15-18 км, что примерно соответствует данным наблюдения (10-15 км). Для Суданского метеорита, по данным наблюдения высота взрыва ~ 37 км. Видно, что расчетная кривая на рис.3в, соответствующая учету дробления при прочностном параметре $\alpha = 1/10$, имеет максимум на высоте $H = 38$ км. В этом случае метеорное тело распадается на множество обломков со средним радиусом ~ 4 см, которые разрушаются в плотных слоях атмосферы

из-за температурных напряжений. Этим объясняется факт, что лишь ничтожное количество (11 кг) обломков Суданского метеорита было найдено на Земле.

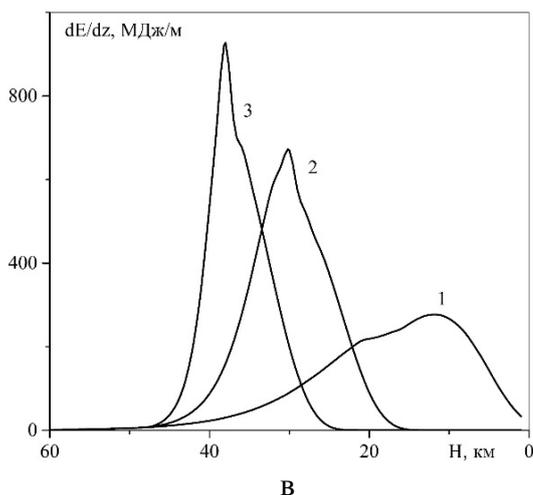
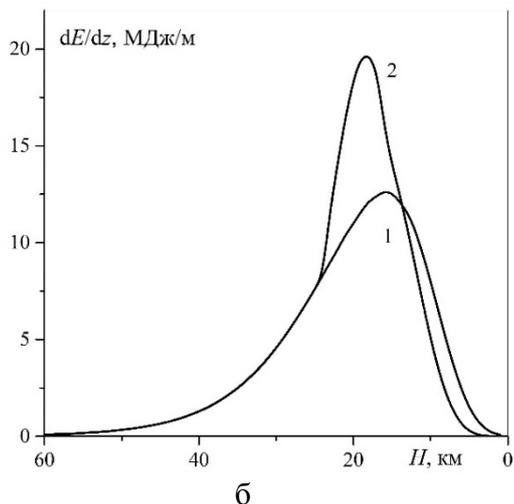
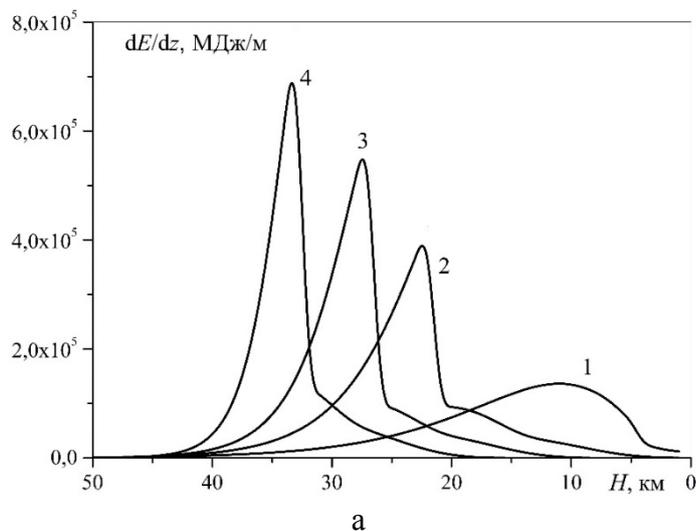


Рис.3. Потеря кинетической энергии на единицу длины в зависимости от высоты полета при разных значениях масштабного параметра для трех метеоритов:

а – Челябинский метеорит; 1 – единое тело, 2 – дробящийся метеорит, $\alpha = 0.5$, 3 – дробящийся метеорит, $\alpha = 0.25$, 4 – дробящийся метеорит, $\alpha = 0.125$;

б – метеорит Куня-Ургенч, 1 – единое тело, 2 – дробящийся метеорит, $\alpha = 0.25$.

в – Суданский метеорит; 1 – единое тело, 2 – дробящийся метеорит, $\alpha = 0.25$, 3 – дробящийся метеорит, $\alpha = 0.1$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено математическое моделирование разрушения метеорных тел в атмосфере Земли. Получены результаты с учетом переменного параметра уноса массы и фрагментации метеорита за счет различных механизмов. Эти результаты качественно правильно отражают процесс разрушения

метеорита в атмосфере, дают возможность провести анализ и сделать заключение о характере разрушения метеорных тел в атмосфере Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. *Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization* // Scienceexpress. – 2013. – Vol.342. – Pp.1069-1073.
2. Мухамедназаров С. *Наблюдение болида и падение первого крупного метеорита в Туркменистане* // Письма в Астрономический журнал. – 1999. – Т.25. – №2. – С.150-152.
3. Jenniskens P., Shaddad M.H., Numan D. and 32 co-authors. *The impact and recovery of asteroid 2008 TC3* // Nature. – 2009. – Vol.458. – Pp.485-488.
4. Андрущенко В.А., Сызранова Н.Г., Шевелев Ю.Д. *Моделирование падения Челябинского метеорита* // Компьютерные исследование и моделирование. – 2013. – Т.5. – №6. – С.927-940.
5. Андрущенко В.А., Сызранова Н.Г., Шевелев Ю.Д. *Оценка тепловых потоков к поверхности затупленных тел при движении с гиперзвуковой скоростью в атмосфере* // Прикладная математика и механика. – 2007. – Т.71. – Вып.5. – 827 с.
6. Мурзинов И.Н. *Ламинарный пограничный слой на сфере в гиперзвуковом потоке равномерно диссоциирующего воздуха* // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1966. – №2. – С.184-188.
7. Апштейн Э.З., Вартанян Н.В., Сахаров В.И. *О распределении лучистых тепловых потоков по поверхности пространственных и осесимметричных тел при сверхзвуковом обтекании их идеальным газом* // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1986. – №1. – С.92-97.
8. Стулов В.П., Мирский В.Н., Вислый А.И. *Аэродинамика болидов*. М.: Наука. Физматлит, 1995. – 240 с.
9. Weibull W.A. // Proc. Roy Swedish Inst. Eng. Res. – 1939. – №151. – Pp.1-45.
10. Тирский Г.А., Ханукаева Д.Ю. *Баллистика дробящегося метеороида с учетом уноса массы в неизотермической атмосфере* // Космические исследования. – 2008. – Т.46. – №2. – С.122-134.
11. Андрущенко В.А., Головешкин В.А., Холин Н.Н. *Оценка температурных напряжений, возникающих в метеороиде при гиперзвуковом движении в атмосфере Земли* / Проблемы вычислительной и прикладной механики. Автоматизация моделирования: Сборник статей. М.: МАКС Пресс. – 2012. – Вып.2. – С.80-85.
12. Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н. и др. // Астроном. вестник. – 2013. – Т.47. – №4. – С.1-16.

REFERENCES

1. Popova O.P., Jenniskens P., Emel'yanenko V. et al. *Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization*. Scienceexpress, 2013, Vol.342, Pp.1069-1073.
2. Mukhamednazarov S. *Observation of a fireball and the fall of the first large meteorite in Turkmenistan*. J. Astronomy Letters, 1999, Vol.25, No.2, Pp.117-118.

3. Jenniskens P., Shaddad M.H., Numan D. and 32 co-authors. *The impact and recovery of asteroid 2008 TC3*. Nature, 2009, Vol.458, Pp.485-488.
4. Andrushchenko V.A., Syzranova N.G., Shevelev I.U.D. *Modelirovanie padeniia Cheliabinskogo meteorite*. Kompiuternye issledovaniia i modelirovanie, 2013, Vol.5, No.6, Pp.927-940.
5. Andrushchenko V.A., Syzranova N.G., Shevelev Yu.D. *An estimate of heat transfer to blunt bodies moving with hypersonic velocity in the atmosphere*. J. of Applied Mathematics and Mechanics, 2007, Vol.71, No.5, Pp.747-754.
6. Murzinov I.N. *Laminar boundary layer on a sphere in hypersonic flow on a equilibrium dissociating air*. Fluid Dynamics, 1966, Vol.1, No.2, Pp.131-132.
7. Apshtein E.Z. Vartanyan N.V., Sakharov V.I. *Distribution of radiant heat flux over the surface of three-dimensional and axisymmetric bodies in a supersonic ideal-gas flow*. Fluid Dynamics, 1986, Vol.21, No.1, Pp.78-83.
8. Stulov V.P., Mirskiy V.N., Vislyy A.I. *Aerodinamika bolidov*. Moskva, Nauka, Fizmatlit, 1995, 240 p.
9. Weibull W.A. Proc. Roy Swedish Inst. Eng. Res, 1939, No.151, Pp.1-45.
10. Tirskiy G.A., Khanukaeva D.Yu. *Ballistics of a fragmenting meteor body with allowance made for ablation in the non-isothermal atmosphere*. Cosmic Research, 2008, Vol.46, No.2, Pp.120-132.
11. Andrushchenko V.A., Goloveshkin V.A., Kholin N.N. *Otsenka temperaturnykh napriazheni, voznikaiushchikh v meteoroid pri giperzvukovom dvizhenii v atmosphere Zemli*. Problemy vychislitelnoi i prikladnoi mekhaniki, Avtomatizatsiia modelirovaniia, Sbornik statei, Moskva, MAKS Press, 2012, Iss.2, Pp.80-85.
12. Emel'yanenko V.V., Chugai N.N., Shelyakov M.A., Pakhomov Y.V., Shustov B.M., Rykhlova L.V., Naroenkov S.A., Kartashova A.P., Popova O.P., Shuvalov V.V., Rybnov Y.S., Kharlamov V.A., Trubetskaya I.A., Biryukov E.E., Marov M.Y. *Astronomical and physical aspects of the chelyabinsk event*. Solar System Research, 2013, Vol.47, No.4, Pp.240-254.

Поступила в редакцию 29 ноября 2016 года

Сведения об авторах:

Сызранова Нина Геннадьевна – к.т.н., ученый секретарь Института автоматизации проектирования РАН, г. Москва, Россия; e-mail: nina-syzranova@ya.ru

Андрущенко Виктор Анатольевич – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института автоматизации проектирования РАН, г. Москва, Россия; e-mail: andrusvictor@ya.ru

Головешкин Василий Адамович – д.т.н., профессор Московского государственного университета информационных технологий, радиотехники и электроники, г. Москва, Россия; e-mail: nikshevolog@ya.ru