

Кафедра общей и теоретической физики

А. Комендантян¹

Баллистика тела, падающего в атмосфере планеты

(научно-исследовательская работа)

Аннотация

В настоящей работе сформулирована новая модель процесса падения сферического неидеального метеороида в атмосфере планеты с учетом нелидирующих факторов. Выполнен расчет в наиболее общем случае силы сопротивления, действующей со стороны атмосферы на метеороид, потоков массы атмосферного газа и теплоты, поглощаемых последним. Представлены законы изменения массы и радиуса метеороида со временем. Представлена замкнутая система пяти нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка с граничными условиями, описывающая баллистику неидеального метеороида в атмосфере планеты, с учетом обобщенной барометрической формулы. Численным образом решена система дифференциальных уравнений для сферической частицы водяного льда с $R_0 = 10^{-3}$ м, входящей в атмосферу Земли со скоростью $V_0 = 50$ км/с, под углом $\theta = 45^\circ$. Подробно исследованы траектория и зависимости $y(t)$, $V(y)$, $R(y)$, $\Delta m/m(y)$, $F_{dr}(y)$, $F_Q(y)$ в четырех основных областях атмосферы. Показано, что медленнее всего частица падает в тропосфере, а термосферу частица проходит за 1 секунду. Резкое падение скорости движения частицы, достижение максимальных значений силы сопротивления и потока теплоты наблюдается в мезосфере. Здесь же частица теряет более половины своей первоначальной массы, а радиус частицы уменьшается до 75% от первоначального.

Комментарии: работа выполнена под научным руководством старшего преподавателя кафедры общей и теоретической физики СамГУ, к.ф.-м.н., Филиппова Ю.П.² и отмечена дипломом победителя первой степени в секции "Теоретическая физика" Самарской областной научно-практической конференции школьников в 2010 г.



Работа выставлена на **ASTRODROME**: 3.04.2010

¹E-mail:

²E-mail:yuphil@ssu.samara.ru

Оглавление

Введение	3
1 Элементы физики атмосферы, метеорологии и баллистики	8
1.1 Современные представления об атмосфере Земли	8
1.2 Физические свойства тел, падающих в атмосферу	13
1.3 Баллистика идеального метеороида	21
2 Количественный анализ искомых величин	33
2.1 Определение модели физической системы	33
2.2 Расчет силы сопротивления для сферического тела	36
2.3 Расчет потоков теплоты и массы газа, поглощаемого телом . . .	41
2.4 Закон изменения массы и радиуса тела	42
2.5 Баллистика неидеального метеороида с учетом нелидирующих факторов	44
2.6 Численные результаты и анализ	46
Заключение	50
Литература	54

Введение

Актуальность работы. **Атмосферой** (от. греч. атмосфер – «пар» и сфера – «сфера») принято называть газовую оболочку небесного тела, удерживаемую около него гравитацией. Поскольку не существует резкой границы между атмосферой и межпланетным пространством, то обычно атмосферой принято считать область вокруг небесного тела, в которой газовая среда вращается вместе с ним как единое целое. Стационарной атмосферой³ обладают большинство классических планет (за исключением Меркурия) и некоторые из их крупных спутников, например, Титан у Сатурна, Тритон у Нептуна. Нестационарной атмосферой обладают большинство карликовых планет, объекты промежуточного класса (в частности, Кентавры) и кометы.

Роль атмосферы в эволюции небесного тела огромна. В частности, без этой оболочки на Земле жизнь была бы не возможна. Всякое живое существо всю свою жизнь на Земле и в воде дышит, питая кровь кислородом – вторым по распространенности атмосферным газом. Дышат также и растения, поглощая углекислый газ и выделяя кислород. Атмосфера обеспечивает радиационный баланс планеты, пропуская к поверхности Земли излучение в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне и препятствуя оттоку от Земли дальнего инфракрасного и радиоизлучения. Атмосфера обеспечивает тепловой баланс Земли посредством "парникового эффекта", оберегая ее от больших перепадов температуры, губительных для всего живого. Поэтому на Земле не бывает резких переходов от жары к холоду. Если бы не было воздушной оболочки Земли, то в течение суток температура менялась бы $\approx 200^{\circ}\text{C}$. Благодаря атмосфере средняя температура у поверхности земли составляет $+15^{\circ}\text{C}$.

Атмосфера обеспечивает водный баланс планеты, что принципиально важно в первую очередь для живого мира. Благодаря движению воздушных масс, процессам испарения и конденсации вода участвует в непрерывном мировом круговороте.

В среде атмосферы хорошо распространяется звук. При отсутствии атмосферы на Земле царил бы мертвая тишина и был бы невозможным контакт живых существ посредством передачи звуковых сигналов, в частности, человеческая речь.

³Под **стационарной атмосферой** здесь и далее понимается атмосфера небесного тела, основные физические параметры которой (масса, размеры, давление, химический состав и др.) не меняются существенным образом в процессе обращения данного тела вокруг Солнца.

Атмосфера является надежным щитом, спасающим живые организмы Земли от губительных ультрафиолетовых, рентгеновских, гамма – и корпускулярных излучений, частично поглощая, частично рассеивая в своих верхних слоях все вредные излучения. Именно благодаря атмосфере обитателям Земли не страшны падения метеороидных дождей и отработанных малых искусственных спутников (космического мусора), которые с собой несут значительные механические повреждения вплоть до полного разрушения объектов, встречающихся на их пути. Абсолютное большинство метеороидов и малых спутников сгорают в верхних слоях атмосферы и не долетают до земной поверхности.

Сегодня можно выделить два типа объектов, которые могут падать в атмосферах Земли и других планет: это объекты 1) искусственного и 2) естественного происхождения. К объектам искусственного происхождения стоит отнести такие тела, как спускаемые ракетные модули, отработанные ступени ракетополетов, нерабочие спутники, зонды и др. К объектам естественного происхождения стоит отнести три класса малых тел: астероиды, кометы и метеороиды.

Среди выше указанных *метеороиды* – самый многочисленный класс объектов, падающих в атмосферах Земли и планет. Малые метеороиды, размером до 10^{-4} м порождают явление метеора ("падающей звезды"), т. е. создают при быстром движении в атмосфере достаточно сильное свечение и ионизационный след такой интенсивности, что становится возможным их наблюдение визуальным, фотографическим или радиолокационным методами [1]. Более крупные объекты порождают феномен болида – яркий метеор, видимый поперечник которого достигает и даже превосходит видимый диаметр полной Луны или Солнца. За болидом тянется огненный хвост и с треском сыплются искры.

Наука, изучающая атмосферные явления называется *метеорологией*. Результаты исследований метеорологов показали, что ежедневно в атмосферу Земли влетают с метеорными скоростями ($V \geq 11.2$ км/с) около $7 \cdot 10^6$ подобных космических тел размеры которых не менее $5 \cdot 10^{-8}$ м, интенсивно взаимодействующих с ней [2]. Из этого большого количества космических пришельцев выживает только, вероятно, около 1000 кг (1%) метеорного материала⁴ и достигает поверхности Земли в виде отдельных (макро)фрагментов – метеоритов [2].

Метеороиды влетают в атмосферу Земли со скоростями от 11.2 до 72 км/с

⁴Метеороиды испытывают интенсивный комбинированный конвективно-радиационный нагрев, следствием чего являются их плавление и испарение, а также огромные перегрузки, достигающие $\sim \mathcal{O}(10^3g)$, приводящие к их механическому разрушению и дальнейшему на последнем этапе быстрому плавлению и испарению мелких кусков, образовавшихся за счет термонапряжений. 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 10^5 до 10^8 кг/день [3].

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.

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 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.

Последнее время высказывается мнение, что происхождение жизни на Земле связано с органической материей, занесенной на Землю падающими метеоритами [4], а также остро обсуждается проблема астероидной опасности для Земли — падения на Землю крупных космических тел (астероидов и комет) с региональными и даже глобальными катастрофическими последствиями.

И сегодня еще не утихают дискуссии по поводу объяснения Тунгусского события [5] — 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 осознан учеными на качественном уровне, но количественно до конца не изучен.

Важно отметить, что метеорология — это преимущественно феноменологическая наука, ее математический аппарат и сегодня весьма слабо развит, а любые численные расчеты изобилуют феноменологическими константами и зависимостями. Кроме того, в литературе по данной тематике (смотри, например [6, 7, 8, 9]), представленной широкому кругу читателей (среди которых не мало астрономов-любителей и пытливых физиков-теоретиков), основные результаты физики метеоров представлены без каких-либо серьезных обоснований (исключение в какой-то степени составляет лишь работа [10]), а для расчета наблюдаемых применяются самые простые "школьные" модели феноменов, с пренебрежением нелидирующих факторов (учет ускорения свободного падения, различных режимов взаимодействия с атмосферой).

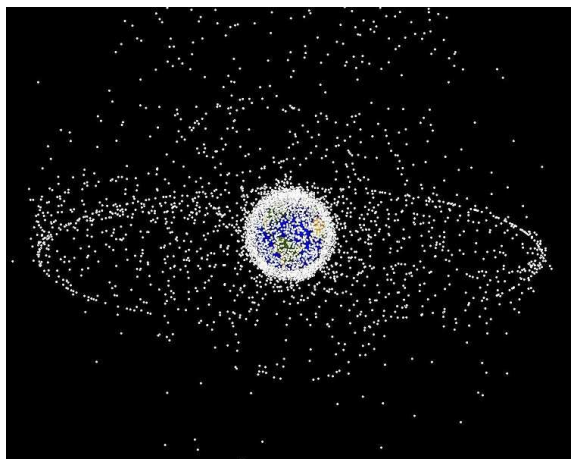


Рис. 1. Современная картина распределения космического мусора в околоземном пространстве.



Рис. 2. Станция «Мир» в марте 1996 г.

Сегодня существует серьезная проблема в освоении околоземного космического пространства — *проблема космического мусора и его утилизации*, а также тесно связанные с ней вопросы переработки отработанной космической техники. По данным, опубликованным управлением ООН по вопросам космического пространства, в октябре 2009 года вокруг Земли вращалось около $3 \cdot 10^5$ обломков космического мусора (с $D \geq 1$ см, рис. 1) [11]. В связи с этим стремительно растет со временем опасность для людей и наземных объектов, в силу неконтролируемого вхождения космических объектов в плотные слои атмосферы и их падения на Землю. Один из самых перспективных методов борьбы — затопление мусора в определенных водах мирового океана с последующим подъемом остатков материала (если таковые будут). Так было уже сделано со станцией «Мир» в 2001 году (см. рис. 2). Правильное затопление аппарата и оценка его остаточной массы в принципе не возможны без детального количественного анализа процесса падения тела в атмосфере планеты.

В связи со сказанным главной целью настоящей работы является количественный анализ баллистики неидеального метеороида, падающего в атмосфере планеты с заданными параметрами, с учетом нелидирующих факторов.

Согласно сформулированной цели основными задачами являются следующие положения:

1. Построение модели процесса взаимодействия неидеального метеороида с атмосферой планеты. Расчет силы сопротивления для тела сферической формы с учетом процессов поглощения и отражения поверхностью последнего частиц атмосферы.

2. Расчет потока массы и теплоты, получаемого сферическим телом при движении в атмосфере за счет неупругих столкновений частиц атмосферы.

3. Определение законов изменения массы и радиуса сферического тела (дифференциальных уравнений), падающего в атмосфере. Определение всех

нелидирующих факторов и соответствующих аналитических результатов, принимаемых во внимание.

4. Построение замкнутой системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс падения неидельного метеороида сферической формы с учетом массовых потерь. Выполнение процедуры обезразмеривания системы уравнений и начальных условий. Решение полученной системы и численный анализ результатов.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Методы интегро-дифференциального исчисления.
2. Основные уравнения динамики материальной точки и элементы термодинамики.
3. Избранные теоретические инструменты статистической физики.

Данная работа имеет следующую структуру.

В **первой главе** изложены элементы физики атмосферы, метеорологии и баллистики идеального метеороида.

Во **второй главе** представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.