

2. Морозов А.И., Брушлинский К.В., Терёшин В.И., Белан В.Г., Астапинский В.М. и др. Серия статей // Физ. плазмы. — 1990. — Т. 16, Вып. 2. — С. 131–196.
3. Морозов А.И., Соловьёв Л.С. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. - М: Янус-К, 2007. — Серия Б. — Т. IX-2. — С. 292–333.
4. Брушлинский К.В., Морозов А.И. // Там же. — С. 334–369.
5. Брушлинский К.В. Математические и вычислительные задачи магнитной газодинамики. - М: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 200 с.
6. Брушлинский К.В., Жданова Н.С., Стёпин Е.В. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. — 2017. — № 42. — 19 с.

Моделирование взаимодействия единого и дробящегося метеороида с атмосферой

¹И. Г. Брыкина, ²Г. А. Тирский

НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

¹shantii@mail.ru

²tirskiy@imec.msu.ru

Предлагается метод моделирования взаимодействия с атмосферой крупного метеороида, когда он движется как единое и как дробящееся тело; этим методом исследуется взаимодействие с атмосферой Земли Челябинского болида 15 февраля 2013 г. Большинство крупных каменных и железных метеороидов разрушается во время входа в атмосферу. Можно выделить два основных подхода к моделированию дробления метеороида. В первом предполагается, что фрагменты двигаются независимо (модели дробления на достаточно крупные куски или прогрессивной фрагментации). Другой подход - дробление метеороида на мелкие осколки, движущиеся, объединенные общей ударной волной, как единое тело, которое под действием аэродинамических нагрузок расплющивается, т.е. расширяется в поперечном направлении и сжимается в продольном. Такая <жидкостная> модель была предложена [1] для малых метеороидов, затем

подробно разработана [2] для крупных; аналогичные модели, получившие название «блин» (был введен термин «pancake» [3]), применялись и в других работах ([3,4] и др.)

В данном исследовании разработана модель фрагментации в атмосфере крупного метеороида с применением второго подхода. Предполагается, что до начала разрушения метеороид имеет форму сферы, затем он движется как облако фрагментов, мелких испаряющихся частиц и паров с единой ударной волной. Рассматриваются два процесса: расплющивание дробящегося метеороида, при этом сфера трансформируется в сплюснутый эллипсоид вращения, и уменьшение его плотности за счет увеличения промежутков между фрагментами, заполненных парами. Предложенная модель дробления отличается от других моделей «блин» тем, что учитывает уменьшение плотности раздробленного метеороида вдоль траектории и зависимость скорости увеличения радиуса поперечного сечения облака фрагментов от значения этого радиуса.

Взаимодействие метеороида с атмосферой исследуется в рамках уравнений физической теории метеоров [5], описывающих его торможение и абляцию, в которые входят коэффициенты сопротивления и теплопередачи. Для коэффициента сопротивления эллипсоида вращения получено выражение в зависимости от отношения его осей. Для коэффициента радиационной теплопередачи для эллипсоида вращения с использованием литературных данных получено выражение в зависимости от его скорости, размера, отношения осей и плотности атмосферы. Проведена оценка областей преобладающего влияния конвективного и радиационного тепловых потоков. Найдены при некоторых предположениях аналитические решения уравнений физической теории метеоров для уноса массы единого и фрагментированного метеороида, скорости, энерговыделения, световой кривой и высоты максимального энерговыделения. Проведено сравнение аналитического решения с численными расчетами.

Рассматривается взаимодействие с атмосферой Земли Челябинского болида с использованием предложенной модели фрагментации и найденных решений. Проведено моделирование изменения массы метеороида вдоль траектории, энерговыделения и световой кривой. Оценивается влияние определяющих параметров на характеристики взаимодействия болида с атмосферой. Проводится сравнение полученного решения с наблюдательными

данными: кривой энерговыделения [6] и световыми кривыми, построенными по разным видеозаписям [7,8].

Литература

1. Opik E.J. *Physics of meteor flight in the atmosphere*. New York, Interscience Publishers Inc., 1958. 174 p.
2. Григорян С.С. *Движение и разрушение метеоритов в планетных атмосферах* Космич. исслед. 1979. Т. 17. № 6. С. 875-893.
3. Melosh H.J. *Atmospheric breakup of terrestrial impactors* Proc. Lunar Planet. Sci., 12A.1981. P. 29-35.
4. Hills J.G., Goda M.P. *The fragmentation of small asteroids in the atmosphere* Astronomical J. 1993. Vol. 105. No 3. P. 1114-1144.
5. Бронштэн В.А. *Физика метеорных явлений*. М.: Наука, 1981. 416 с.
6. Brown P.G., Assink J.D., Astiz L., et al. *A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors*
7. Borovicka J., Spurný P., Brown P., et al. *The trajectory, structure and origin of the Chelyabinsk asteroidal impactor*. Nature. 2013. Vol. 503. P. 235-237.
8. Попова О.П., Дженнискенс П., Глазачев Д.О. *Фрагментация Челябинского метеороида. Динамические процессы в геосфере*. Сборник научных трудов ИДГ РАН. Вып. 5. Геофизические эффекты падения Челябинского метеороида. М.: ГЕОС, 2014. С. 59-78.

Моделирование волновой динамики стратифицированных сред

¹В. В. Булатов, ²Ю. В. Владимиров

Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН

¹internalwave@mail.ru

²vladimyura@yandex.ru