

от планеты текущая высота его положения над ней определяется по формуле

$$z = R_0 \left[ \sqrt{1 + (\xi/R_0)^2} - 1 \right] = R_0 (\operatorname{ch} \theta_1 - 1), \quad (3.91)$$

где  $\xi$  – перемещение фрагмента по траектории от точки  $z_0$  (рис. 2.3) и

$$\theta_1 = \theta_1(\xi) = \operatorname{arsh}(\xi/R_0). \quad (3.92)$$

С учетом (3.92) формулы (3.61), (3.62) и (3.64)–(3.67) следует использовать после замены в них  $\theta$  на  $\theta_1$ . Таким же образом могут быть использованы и формулы в конечных разностях (3.68)–(3.71), (3.73) и (3.74), где тоже следует заменить  $\theta_s$  на  $\theta_{1s} = \operatorname{arsh}[(\xi_{s-1} + \delta\xi_s)/R_0]$ . В начальных условиях при расчетах следует использовать параметры МКТ в точке  $z_0$ , приняв, однако,  $t = 0$ . В остальном же методика расчетов остается прежней.

### 3.3. Обсуждение результатов

Рассматривая представленную модель рассеяния фрагментов МКТ, важно отметить, что в первой его фазе действующие силы вызывают поворот фрагментов вокруг своих центров масс и движение последних вперед относительно точки или линии контакта фрагментов. В первой фазе распада, когда этот контакт сохраняется, оба фрагмента, независимо от их геометрии, находятся за фронтом единой УВ, причем общая лобовая поверхность прямоугольных фрагментов (они касаются по линии), где среднее давление газа за фронтом воздушной УВ максимально, остается сплошной. Это препятствует фронтальному внедрению газа в клиновидный зазор между фрагментами – газ поступает только с боков и тыла, где среднее давление значительно ниже. У полусферических фрагментов, соприкасающихся в точке, внедрение газа, разумеется,

происходит более интенсивно. В любом случае этот газодинамический (ГД) фактор не учитывается, однако ясно, что его действие приведет к некоторому дополнительному ускорению фрагментов. Эффективность влияния этого фактора можно оценить, сравнив полученные результаты с соответствующими данными работ, где это влияние исследовалось. К ним можно отнести, прежде всего, работы [3] и [4], где рассматривалось рассеяние фрагментов МКТ, снижающихся по вертикали.

В [3] для определения максимальной поперечной скорости после однократного разделения МКТ на 2 части получена формула (приводим ее в наших обозначениях)

$$V_{\eta 1} \approx V_1 \sqrt{C \rho_{a1} / \rho_b}, \quad (3.93)$$

где  $C$  – безразмерный коэффициент. При этом предполагалось, что эта скорость вызвана взаимодействием воздушных УВ, пока фрагменты не разошлись на некоторое расстояние. В результате анализа известных кратерных полей, коэффициент  $C$  оценивается как 0,02–1,52 с наиболее вероятным значением 1, поэтому формула (3.93), в конечном счете, является полуэмпирической и, очевидно, характеризуется значительной неопределенностью. Позднее в [4] путем трехмерного моделирования ГД процессов между двумя полукубическими или полуцилиндрическими фрагментами получена аналогичная формула. Как было принято в расчетах, вначале фрагменты снижались рядом по вертикальной траектории за фронтом возбужденной ими воздушной УВ. При этом фрагменты не вращались, хотя, как известно, реальные МКТ всегда вращаются. В дальнейшем сжатый газ за фронтом УВ проникал между фрагментами в зазор, расширявшийся под давлением, и вызывал их поперечное ускорение. Причина появления начального зазора не указана, и его размер, по-видимому, постулировался (по крайней мере, результаты расчетов приведены, начиная с зазора порядка 0,1 размера фрагментов). Максимум скорости разлета достигался при расстоянии между фрагментами порядка их размера. В результате оценка коэффициента  $C$  дала значение 0,2.

Очевидно, формулы (3.93) и (3.51) (при  $k = 1$ ) с точностью до коэффициента идентичны, а при  $C = 0,2$  практически совпадают. Это означает, что при однократном разрушении МКТ ГД [4] и АД механизмы разгона фрагментов одинаково эффективны, и это, в принципе, возможно, но при одном условии: для работы ГД механизма необходим начальный зазор между фрагментами. В противном случае модель [4] нереализуема, однако физически обоснованных причин образования начального зазора не видно. В самом деле, даже в постановке [4] после образования трещины в МКТ его фрагменты первоначально должны находиться в тесном соприкосновении, без зазоров, прижатые друг к другу наружным давлением газовой среды за фронтом УВ. Следовательно, каких-либо воздушных УВ между ними быть не должно. По-видимому, для появления зазора необходим какой-то начальный фактор (типа толчка). В отсутствие же зазора воздушная УВ, возбужденная МКТ, будет теоретически квазистационарной, давление на фрагменты – квазистатическим, и они будут продолжать движение в тесном соприкосновении до падения на грунт. Поэтому возникновение начального зазора между фрагментами в модели [4] представляется принципиально невозможным, и, поскольку без него она не будет работать, это можно расценить как ее существенный недостаток. Причина указанной некорректности, очевидно, связана с историей взаимодействия МКТ с атмосферой. Авторы [3] и [4] эту историю игнорируют.

В самом деле, ведь изначально МКТ было целым, но по мере входа в атмосферу оказалось под действием силы АДС. Именно эта сила и обусловленная ею инерция разрушают МКТ и приводят в движение его фрагменты, а ГД факторы «подключаются» позднее. Таким образом, изначальная природа фрагментации и рассеяния МКТ – аэродинамическая.

С этой точки зрения, поскольку на фрагменты действуют квазистатические силовые факторы АД природы, в частности, силы инерции, направленные вперед, появление зазора вполне объяснимо и закономерно. Эти силы неминуемо приведут к реализации первой фазы рассеяния, т. е. к повороту фрагментов вокруг своих центров масс. В результате последние начнут движение относи-

тельно точки или линии контакта непременно вперед\*, ускоренно удаляясь от первоначальной траектории. И лишь при этом между фрагментами появится и будет увеличиваться клиновидный зазор. Однако к этому моменту они уже не будут двигаться только поступательно, но, вращаясь с определенной угловой скоростью, будут удаляться от траектории со скоростью порядка (3.51). Таким образом, в АД модели рассеяния вращение фрагментов является естественным и важным фактором их поперечного разгона и разлета. Этот вывод, конечно, справедлив и для «транзита», так как и в этом случае природа факторов рассеяния фрагментов остается аэродинамической.

### Литература

1. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Модель рассеяния фрагментов малого космического тела в атмосфере планеты // Доклады АН. 2004. Т. 398, № 6. С. 759–763.
2. Иванов А. Г., Рыжанский В. А. Модель распада и рассеяния фрагментов малого космического тела в атмосфере планеты // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 121–132.
3. Passey Q. R., Melosh H. J. Effects of atmospheric breakup on crater field formation // Icarus. 1980. Vol. 42, N 2. P. 211–233.
4. Artem'eva N. A., Shuvalov V. V. Interaction of shock waves during the passage of a disrupted meteoroid through the atmosphere // Shock Waves. 1996, N 5. P. 359–367.

---

\*Кстати, в модели [4] расчетный поворот фрагментов происходит в обратную сторону и настолько мал, что его можно не учитывать.