

О воздействии на астероидное тело ядерным взрывом

Аспирант В.С. Кулик

Научные руководители:
В.П. Стулов, С.И. Арафайлов

Цели исследования

1. Определение мощности заряда, необходимой для разрушения МКТ внутренним взрывом.
2. Определение числа и среднего радиуса фрагментов, образующихся при разрушении.
3. Определение вероятного количества фрагментов, выпадающих на Землю.
4. Сравнение эффективности внутреннего и поверхностного взрыва.

Обозначения

R_0 - радиус тела;

ρ_0 - плотность породы;

R - радиус полости;

r_0 - начальный радиус полости;

p_0 - начальное давление;

H^* - эффективная энтальпия испарения породы;

q - энергия взрыва;

Радиус полости взрыва и критерий разрушения (Эмпирические соотношения по В.Н. Архипову)

$$R = \frac{Kq^{1/3}}{(\rho_0 H 10^3)^\alpha},$$

для скальной породы $\alpha=0,32$, $K = 5,5$.

$$\frac{R_0}{q^{1/3}} \geq 10 \text{ м/т}^{1/3}$$

Модель хрупкого тела.

1. Тело линейно-упруго в 0-состоянии.
2. Упрочнение тела в F -состоянии отсутствует.
3. Скачок упругого потенциала на поверхности разрушения есть константа материала.
4. Поверхность текучести является границей области, определяемой неравенствами:

$$(1) \quad \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \leq 0, \quad (2) \quad \max(\tau_n - |\sigma_n| \operatorname{tg} \delta) \leq k,$$

где δ - угол внутр. трения, k - коэфф. сцепления

5. Деформации тела в состоянии (2) конечны, а тело несжимаемо.
6. Деформации тела в 0-состоянии и (1) малы, а упругие деформации линейны.

Система уравнений механики хрупкого разрушения

$$r_1(t) < r < r_2(t): \quad \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + 2(1-\alpha) \frac{\sigma_r}{r} - \frac{2\beta}{r}, \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 v)}{\partial r} = 0.$$

$$r_2(t) < r < r_3(t): \quad \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2\sigma_r}{r} \quad (\sigma_g = 0),$$

$$\sigma_r = \lambda (\varepsilon_r^e + 2\varepsilon_g^e) + 2\mu \varepsilon_r^e, \quad \sigma_g = \lambda (\varepsilon_r^e + 2\varepsilon_g^e) + 2\mu \varepsilon_g^e = 0,$$

$$e_r^p = 0 \quad (e_r = e_r^p + e_r^e = \partial v / \partial r).$$

$$r_3(t) < r < r_4(t): \quad \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + 2r^{-1} (\sigma_r - \sigma_g),$$

$$\sigma_r = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} \right) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \sigma_g = \lambda \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} \right) + 2\mu \frac{u}{r}.$$

Граничные условия

$$r = r_1(t):$$

$$u = r_1(t) - r_0,$$

$$r = r_2(t):$$

$$[v] = 0, \quad [\sigma_r] = 0, \quad [U_F] = 0.$$

$$r = r_3(t):$$

$$[v] = 0, \quad [\sigma_r] = 0, \quad U_0 - U_F = D$$

D – константа материала, величина скачка упругого потенциала.

Определить её можно, например, из эмпирических соотношений Архипова.

Баланс энергии

$$q = W_k + W_s + \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0 H^*$$

W_k - кинетическая энергия осколков;
 W_s - поверхностная энергия осколков.

Подставляя R (по Архипову), получаем :

$$W_k + W_s = q - \frac{4\pi\rho_0 K q^{1/3} H^*}{3(\rho_0 H 10^3)^\alpha}$$

При поверхностном взрыве:

$$W_k + W_s = \mu_0 q, \quad \mu_0 = 0.067 \text{ кТ}^{-1}$$

Процесс фрагментации (Grady, Glenn, Chudnovsky)

Баланс энергии:

$$\Delta W_k = \Delta W_p + \Delta W_s = W_k^i (\xi / R_0)^2 + W_p^i + W_s^i (1 - R_0 / \xi) = 0.$$

$$\Delta W_k = W_k^i (\xi / R_0)^2 = 2\pi N \rho \dot{\epsilon}^2 \xi^2 / 5, \quad \Delta W_p = W_p^i = 4 / 3 \pi R_0^3 (\sigma_{cr}^2 / 2K),$$

$$\Delta W_s = W_s^i (1 - R_0 / \xi) = 4\pi N \xi^2 \gamma.$$

$$\xi^3 + a\xi - 2b = 0, \quad \text{где}$$

$$a = \frac{2\beta}{R_0} + \frac{5}{3} \left(\frac{\sigma_{cr}}{\rho c \dot{\epsilon}} \right)^2, \quad b = \frac{5}{2} \left(\frac{K_{lcr}}{\rho c \dot{\epsilon}} \right)^2,$$

ξ - средний радиус осколков.

Для хрупкого разрушения:

$$\xi \approx \frac{2b}{a}.$$

Определение числа фрагментов

Обозначения

ξ - средний радиус фрагментов;

N - число фрагментов;

γ - плотность поверхностной энергии;

σ_{cr} - предел прочности породы

K_{Icr} - критическое значение к-та интенсивности напряжений

c - скорость звука в породе;

l - характерный размер неоднородностей в теле;

W - энергия, переданная телу;

W_s - поверхностная энергия взрыва.

Формулы

$$\xi = 3 \left(\frac{10\rho\gamma}{3\dot{\rho}^2} \right)^{1/3}, \quad \gamma = \frac{K_{Icr}^2}{2\rho c^2} = \frac{\pi l \sigma_{cr}^2}{2\rho c^2};$$

$$W_s = \frac{(4/3)\pi R_0^3}{(4/3)\pi \xi^3} 4\pi \xi^2 \gamma = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \gamma \left(\frac{3\dot{\rho}^2}{10\rho\gamma} \right)^{1/3};$$

$$W = \int_0^{R_0} \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\rho}}{3\rho} \right)^2 R^2 4\pi\rho R^2 dR = \frac{2\pi}{45} R_0^5 \frac{\dot{\rho}^2}{\rho};$$

$$\frac{W_s}{W} = \left(\frac{\gamma S}{W} \right)^{2/3}.$$

Определение числа фрагментов

Характерные значения параметров МКТ

$$\rho_0 = 3.5 \text{ г/см}^3, \quad c = 5 \text{ км/с},$$
$$l = 1 \text{ мм}, \quad \sigma = 400 \text{ МПа},$$
$$H^* = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж/г}$$

Число и средний радиус фрагментов

$$W = q - \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0 H^*, \quad W_s = W \cdot \left(\frac{\pi l \sigma_{cr}^2 S}{2 \rho_0 c^2 W} \right)^{2/3};$$
$$\xi = \frac{4 \pi R_0^3 \gamma}{W_s}, \quad N = \frac{R_0^3}{\xi^3}.$$

Конус разлёта осколков

Обозначения

Формулы

φ - угол раствора конуса,

$$E \downarrow = \frac{M_{\text{мкт}} V_r^2}{2},$$

V_r - относительная скорость МКТ,

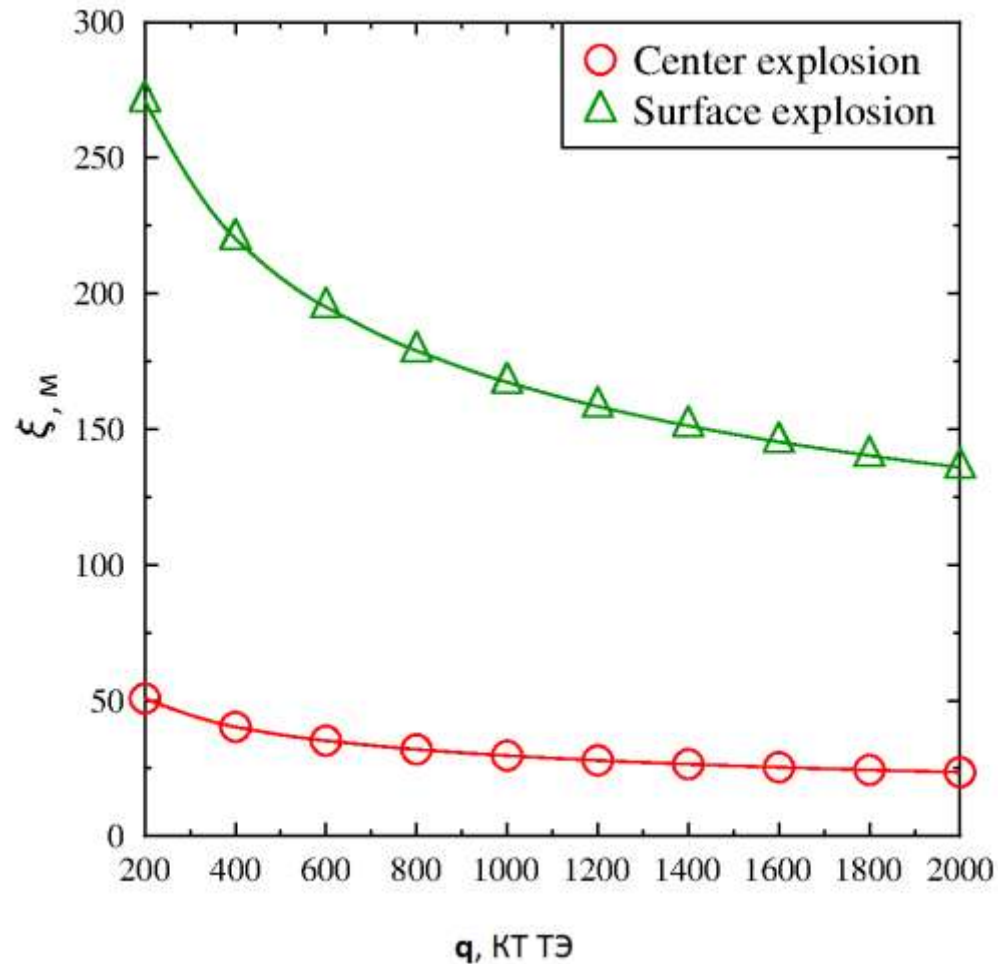
T - время между воздействием

и падением

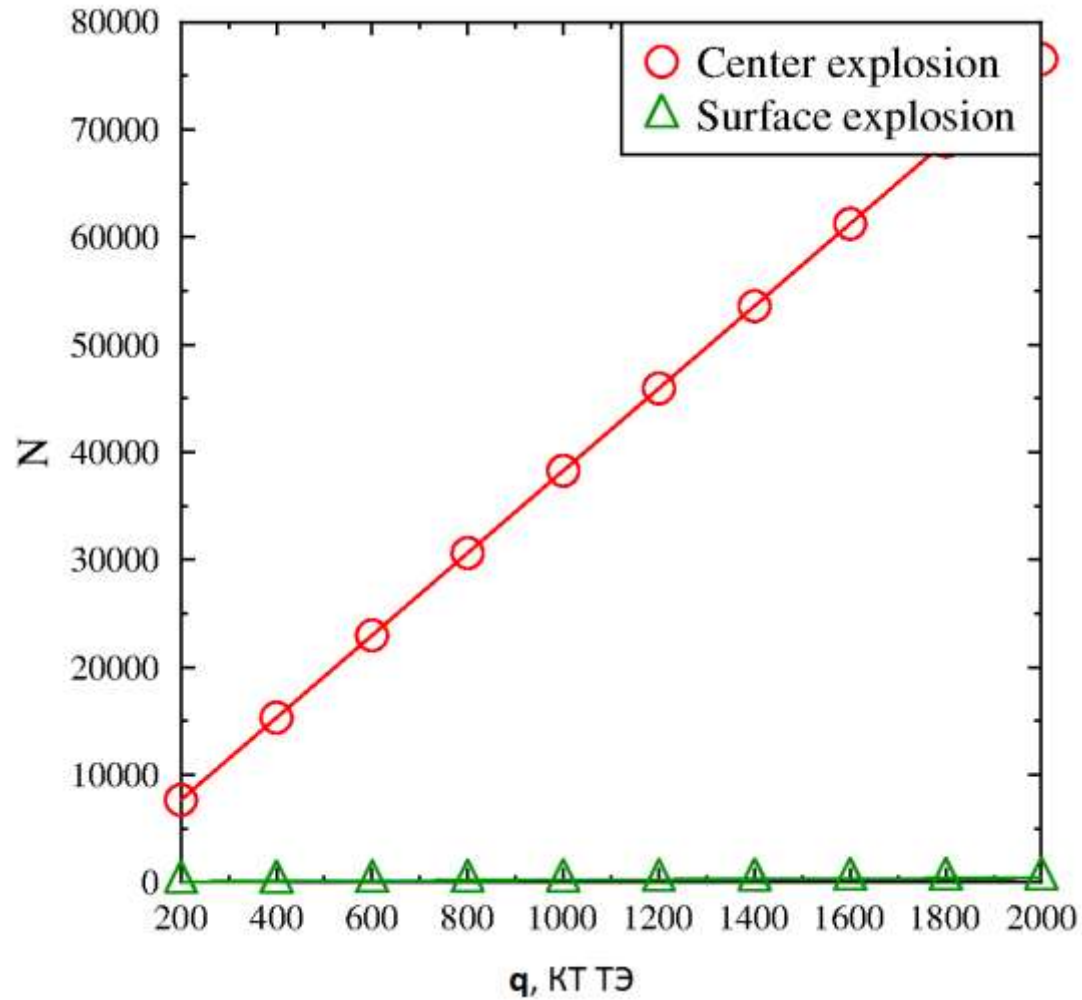
$$\varphi \approx 2(5\pi W_k / 3E \downarrow)^{1/2};$$

$$S \approx \pi V_r^2 T^2 (\varphi / 2)^2.$$

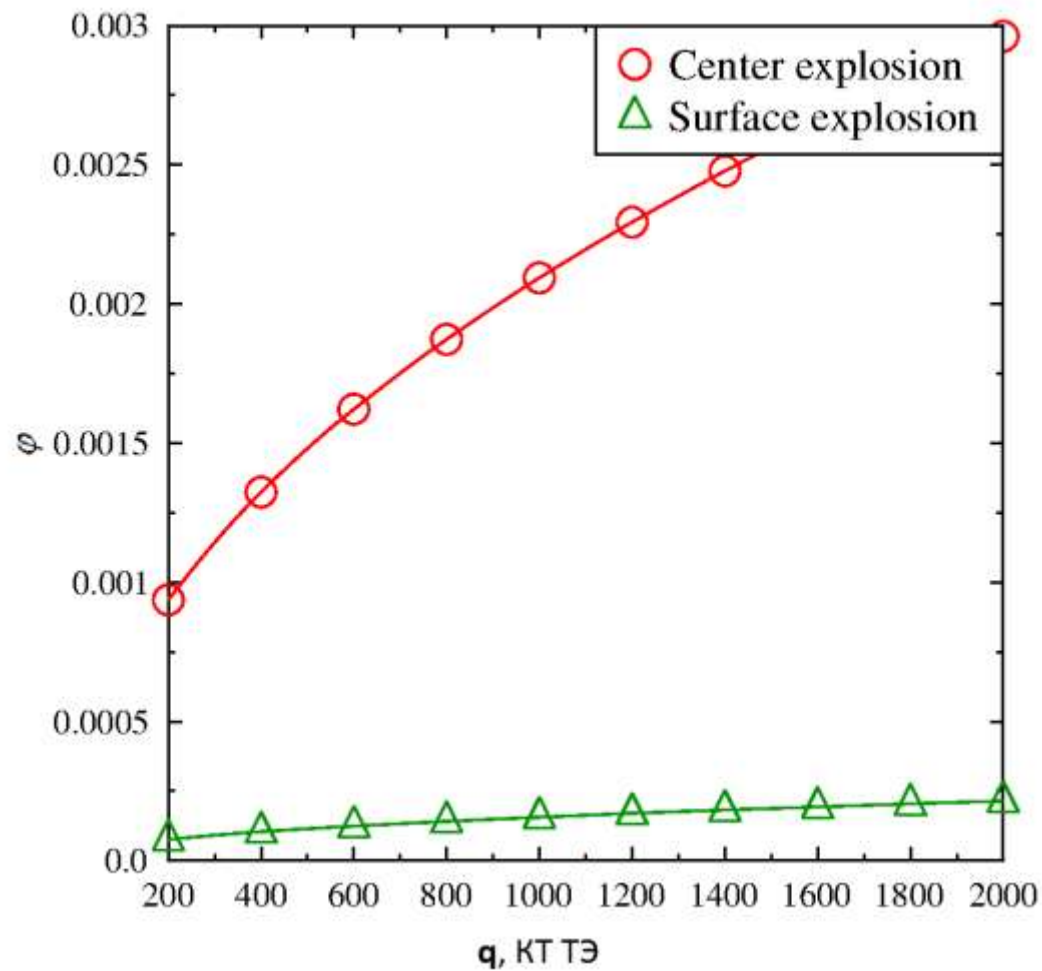
Сравнение с поверхностным взрывом. Средний радиус



Число осколков



Угол разлёта осколков



Дальнейшие планы

1. Исследование распределения осколков по массе. Определение качества дробления.
2. Проведение детального моделирования взрыва по модели Г.П. Черепанова.
3. Вычисление вероятного количества и массы «опасных» осколков, выпадающих на Землю.
4. Решение задачи в случае взрыва на малой глубине.

Литература

1. Архипов В.Н. и др. Механическое действие ядерного взрыва. М., 2001.
2. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М., 1974.
3. Заграфов В.Г., Шаненко А.К., Рыжанский В.А. Применение ядерных взрывов для воздействия на МКТ в случае опасности столкновения с Землёй. //Физика горения и взрыва, 2009, т. 45, №5.
4. Стулов В.П. и др. Аэродинамика болидов. М., 1994.
5. Grady D.E. Local inertial effects in dynamic fragmentation // J. Appl. Phys. – 1982 – V.53.
6. Glenn L.A., Chudnovsky A. Strain-energy effects on fragmentation // J. Appl. Phys. – 1986 – V.59.