

ТОМСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В. В. КУЙБЫШЕВА

ТОМСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ВСЕСОЮЗНОГО
АСТРОНОМО-ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

КОМИССИЯ ПО МЕТЕОРИТАМ И КОСМИЧЕСКОЙ ПЫЛИ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР

ВОПРОСЫ МЕТЕОРИТИКИ

Проблема Тунгусского метеорита
(сборник статей)

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Томск — 1976

ДИНАМИКА ВЗРЫВА ТУНГУССКОГО МЕТЕОРИТА В СВЕТЕ ЭФФЕКТОВ ЛАБОРАТОРНОГО РЕОЛОГИЧЕСКОГО ВЗРЫВА

Т. Я. ГОРАЗДОВСКИЙ

Известно, что вещество при высоких всесторонних давлениях меняет свои свойства, и поэтому ряд процессов в нем протекает своеобразно.

Многие исследователи проводили эксперименты по изучению реологических функций и изменений структуры при больших давлениях и больших деформациях сдвига [1], не обращая, однако, должного внимания на диспергирование вещества и энергетическую сторону процесса.

При проведении более тонкого лабораторного эксперимента нам удалось наблюдать новые явления — реологический (деформационный) взрыв невзрывчатых веществ, эффект жесткой радиации, инициированный этим взрывом, и эффект спонтанного мелкофракционного диспергирования с трибоэлектрическим эффектом [4]. В ряде случаев имели место авершоки (вторичные взрывы). Методика этих опытов заключается в нижеследующем.

В основу ее была положена гипотеза о том, что разрушение при сдвиге начинается с образования внутренних мелких каверн и что противостоять процессу кавернообразования, а тем самым механизму разрушения, можно воздействием всестороннего сжатия значительной величины. Иными словами, предполагалось, что разрушение при всестороннем давлении наступит лишь после осуществления больших сдвиговых деформаций и будет иметь иную кинетику процесса, чем без всестороннего давления большой величины.

Испытуемое твердое тело в форме плоского цилиндрического образца 1 диаметром 8 и высотой около 2 мм располагалось (рис. 1) по центру двух соосных пуансонов 2, состоящих из твердосплавных (вольфрамо-кобальтовые карбиды) пластин (модуль Юнга $6 \div 8 \cdot 10^{12}$ дин·см⁻²).

Объектом эксперимента служили «невзрывчатые» поликристаллические вещества (мрамор, базальт, уголь и др.) с ненарушенной структурой или в виде таблеток, спрессованных из порошков. Пуансоны сдавливали два соосно расположенных испытуемых образца. Вначале образцы частично разрушались по краям, а затем вдавливались в рабочие повер-

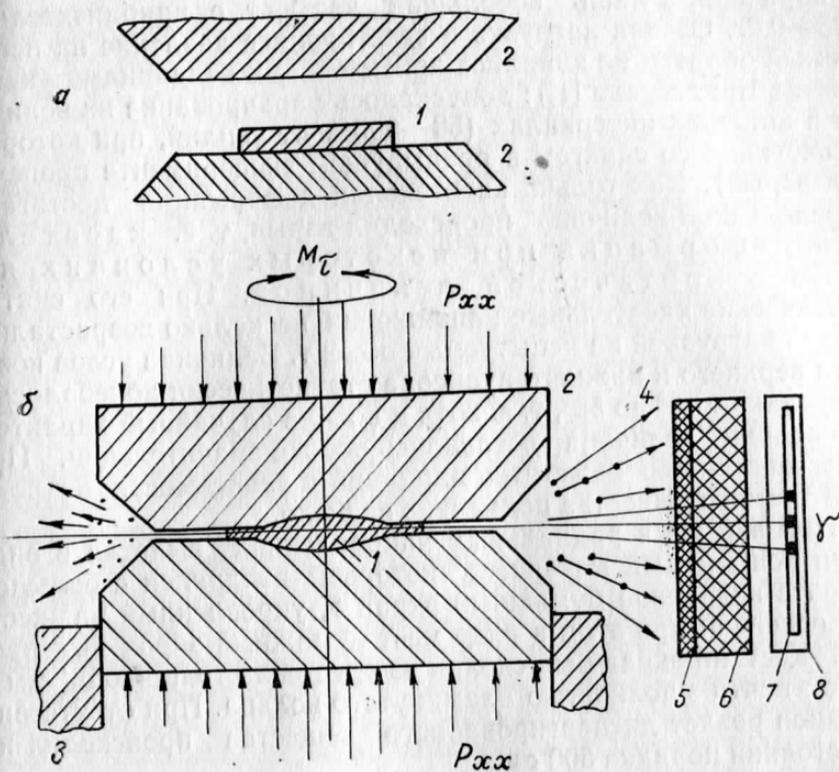


Рис. 1. Схема эксперимента по разрушению твердого тела при сдвиге и восприятию жесткого излучения:

1 — испытуемый образец; 2 — пуансоны; 3 — заделка пуансона; 4 — световое излучение; 5, 6, 7 — экраны; 8 — кассета.
 P_{xx} — осевая нагрузка на пуансоны; M_{τ} — крутящий момент, создающий касательные напряжения в образце; γ — диспергированное вещество; γ — жесткое излучение

ности пуансонов, и в них образовывалась чечевицеобразная полость. Усилия пресса ΣP_{xx} были такими, что в этих полостях создавалось всестороннее давление порядка $1 \cdot 10^{11}$ дин \cdot см $^{-2}$.

Оставляя вертикальное усилие пресса неизменным, при помощи указанного приспособления в образце создавались дополнительные касательные напряжения $\tau(M_{\tau})$ значительной величины порядка $2 \div 10^{11}$ дин \cdot см $^{-2}$. Под их воздействием происходила большая пластическая деформация сдвига образца — до величины порядка единиц ($\text{tg} \gamma \geq 1$) в его периферической области (без учета возможного проскальзывания). При некотором значении деформации сдвига происходил взрыв, т. е. звуковой эффект, подобный выстрелу из огнестрельного оружия, с вылетом части испытуемого вещества в форме мелкодиспергированной пыли. Во взрыве участвовала не вся мас-

са образцов, а лишь небольшая часть, т. е. приблизительно 0,05—0,2r. Осевая нагрузка и всестороннее давление на испытуемый образец не являлись критическими величинами (как в опытах Бриджмена [1]): допускалось варьирование их величины в широких интервалах (50—500% от усилий, при которых в сочетании со сдвигом в предыдущем эксперименте происходил взрыв). Как только касательная деформация достигала определенной величины, происходил взрыв, т. е. касательная деформация при некоторых условиях являлась критической величиной. При его снятии критические касательные напряжения несколько возрастали с осевой нагрузкой на испытуемый объект. Величина углов поворота верхнего и нижнего пуансона статистически колебалась в пределах от 10° до 50°, т. е. хотя и носила случайный характер, но средняя величина оставалась все же значительной. При этом каких-либо заметных вариаций в зависимости от рода испытуемого вещества подмечено не было.

При взрыве в радиальных направлениях вылетал в виде пыли испытуемый материал, который внедрялся с большой силой в кольцевой бумажный экран 5, укрепленный на жесткой основе 6; при этом в ряде мест бумажный экран был пробит. Жесткий экран был сделан из оргстекла толщиной 4 мм в виде почти полностью замкнутого кольца. При отсутствии экранов разлет диспергированного вещества происходил на расстоянии порядка 500 см.

Седиментометрический анализ диспергированного вещества показал, что наиболее вероятный размер частиц характеризуется диаметром порядка 10μ.

Кривая распределения частиц по диаметрам была весьма узкой, т. е. частицы были почти одинаковых размеров. Вылет частиц сопровождался трибоэлектричеством и электризацией.

При взрыве в затемненном помещении в кольцеобразной области вокруг пуансонов всегда наблюдалось сильное синевioletовое свечение 4 без заметного визуального изменения цвета при взрывах различных веществ и различных значений нагрузок.

За жестким экраном 6 располагался фотоэкран в виде кассеты (конверта) 8 из светонепроницаемой бумаги и фотопленки 7 внутри него. При всех экспериментах обнаруживалось жесткое излучение, проходящее через слой воздуха около 8 см, несколько (2—4) слоев бумаги порядка 0,5÷0,1 мм и оргстекла — 4 мм, засвечивающее фотопленку. Засвечивание происходило отдельными очагами. Микрофотометрирование (МФ-4) показало, что плотность почернения имеет не менее чем две различные величины:

$$I_1 = \lg 88 \text{ и } I_2 = \lg 40.$$

Ориентировочная оценка, основанная на данных о массовых коэффициентах поглощения (узкого пучка) рентгеновских

и γ -лучей выше K —границы адсорбции для различных пластмасс [9], показывает, что нами наблюдалось жесткое излучение с длиной волны $0,5 A^0$ и менее. Иными словами, при взрыве происходило излучение не только в коротковолновой части видимого спектра, но и в спектре жесткой радиации. Эти данные говорят о том, что здесь имеет место не исследованный ранее процесс разрушения под действием высокого всестороннего давления и больших касательных деформаций, обеспечиваемых за счет адгезии испытуемого вещества с поверхностью пуансонов и предотвращением образования внутренних каверн высоким всесторонним напряжением сжатия. Суть этого эффекта заключается в мгновенном выделении большой энергии вследствие потери устойчивости кристаллических структур при деформации порядка единицы, когда функция изменения энергии сцепления с расстояниями между ионами кристаллов претерпевает разрыв при максимальном значении этой энергии. Ориентировочный расчет показывает, что при этом процессе разрушения ионы (атомы), составляющие кристаллическую решетку, настолько возбуждены, что следует ожидать процесса внутренней конверсии со всеми вытекающими отсюда последствиями, в частности, X -излучением и, может быть, γ -излучением даже на весьма короткой длине пробега порядка $1 \cdot 10^{-2}$ см. Хорошо известно, что цепные реакции, в частности взрывы, критичны к размерам тела, в котором происходит взрыв, чем больше длина (масса) его, тем больше может выделяться энергии. Таким образом, при больших размерах образца испытуемого тела можно ожидать более жесткого излучения и большого удельного энерговыделения.

Итак, эксперимент показал, что широкий класс твердых упругих веществ при критических деформациях сдвига и высоком всестороннем давлении взрываются, давая взрывную волну, диспергируются, электризуются, излучают жесткую радиацию и видимый свет и дают вторичный взрыв. По крайней мере, некоторые из этих эффектов имели место и при взрыве Тунгусского метеорита [8]. Поэтому целесообразно проанализировать известные факты о взрыве метеорита под углом зрения этих явлений, сопутствовавших описанному выше эксперименту.

При движении метеора в плотных слоях атмосферы со скоростью порядка $v = 10\,000 \div 40\,000$ км/час в окрестности его лобовой части возникают большие внутренние напряжения сжатия, а также большие касательные напряжения. Внешнее напряжение на метеор равно давлению газа при лобовом сопротивлении. Это давление может быть определено [9] по формуле

$$P = \beta \frac{d_b v^2}{2}, \quad (1)$$

где β — есть функция числа Маха и d_b — плотность воздуха.

Для тел сложной и малоопределенной формы целесообразнее говорить [9] о силе лобового сопротивления

$$P = C \frac{sd_b v^2}{2}, \quad (2)$$

где s — приведенная площадь поперечного сечения и C_v — коэффициент сопротивления, зависящий от формы движущегося тела, ориентации его относительно вектора скорости и безразмерных критериев подобия, отображающих не только механические, но и теплофизические характеристики процессов, сопутствующих обтеканию движущегося тела. Если бы метеорное тело было приемлемой аэродинамической формы, то в нем возникли бы поверхностные напряжения порядка 10^7 дин/см² [6].

Разогрев наружных слоев метеоров создает большие градиенты температуры ($\sim 10^9$ град./см⁻¹) и, следовательно, большие термические напряжения, которые суммируются с нормальными напряжениями обжатия. Сложная форма метеора, а также наличие в нем каверн и трещин может на 2—4 порядка увеличить рост этих напряжений. В процессе полета в лобовой части тела обтекания имеют место большие градиенты компонент вектора скорости обтекания [6], что вызывает создание поля больших сдвигов поверхностных и подповерхностных напряжений. Эти факторы могут создать внутри тела метеора компоненты тензора напряжений, обеспечивающие описанный выше реологический взрыв. Анализ аэродинамических кривых показывает, что взрывы метеоритов должны происходить при скоростях, больших скорости звука в воздухе (особое значение имеют скорости: $v_j \geq 1,2M_\infty$, $v_j \geq 3,74M_\infty$), и что при прочих равных условиях взрыв наступает тем раньше, чем менее аэродинамична форма тела. Это понятно, так как коэффициент сопротивления для хороших форм при подходе к скорости звука по мере убывания скоростей возрастает сильнее, чем у плохих (в аэродинамическом смысле слова).

Итак, взрыв метеорита в атмосфере Земли вполне возможен. Как показывают опыты, в процессе взрыва происходит спонтанное диспергирование тела на части с поперечником в 10—100 м. Именно такие частицы из железоникелевого сплава и силикатов найдены и в природных объектах района Тунгусской катастрофы [2].

Экспериментальные данные позволяют составить уравнение энергии на момент взрыва болида в воздухе. Удобнее это сделать на единицу массы метеора и при одностадийном взрыве

$$\frac{v^2}{2} + \frac{m_r^\sigma v_n^2}{2} + qm_2^\sigma + \Delta = E_d + \frac{u^2}{2} + \frac{m_r^\sigma u_n^2}{2} + E_\phi + E\gamma. \quad (3)$$

Здесь v_n и u_n — приведенная скорость газовой среды в окрестности болида до и после взрыва; m_2 — масса газовой среды на единицу массы болида; q — среднее теплосодержание единицы массы газовой среды; Δ — возможный вклад ядерной энергии; $E_d, E_{\phi}, E^{\gamma}$ — удельная энергия соответственно диспергирования, фиолетового и жесткого излучения; u — скорость разлета частиц.

Теория полета тупых тел в атмосфере позволяет оценить величины второго и третьего члена левой части уравнения как функцию v [6]. Вся правая часть и четвертый член левой части могут быть определены в лабораторных условиях, если поставить эксперименты с хорошим аппаратурным оформлением. До сих пор считалось, что самым большим членом должен быть E_d . Наши экспериментальные данные позволяют оценить его величину.

В первом приближении при разрыве упругого хрупкого тела на две части необходимая энергия равна

$$E'_p = 0,5\Delta l_1 f = 0,5\epsilon l_1 \sigma_p s = \frac{\sigma_p^2}{2k} l_1 \cdot s = \frac{\sigma_p^2}{2k} v'_q. \quad (4)$$

Здесь σ_p — напряжение хрупкого разрушения,
 ϵ — упругая (относительная) деформация,
 k — модуль объемной упругости,
 v'_q — объем исходной частицы.

При дальнейшем разрушении этих двух частей еще на две части каждой из них необходима энергия

$$E''_p = 2 \cdot 0,5\Delta l_2 f = \epsilon l_2 \sigma_p s = \frac{\sigma_p^2}{k} \frac{l_1}{2} s = \frac{\sigma_p^2}{2k} v'_q.$$

На каждой стадии разрушения будет происходить удвоение числа частей с поглощением одного и того же количества энергии. Общее число доз энергии (n) связано с числом частиц (N) соотношением: $N = 2^n$, или $n = 1,42 \ln N$. При диспергировании объема $v (= v'_q)$ на N частиц необходима энергия

$$E_q = n \frac{\sigma_p^2}{2E} v. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что $N = \frac{v}{\sigma}$,

где σ — объем средней частицы, образовавшейся в результате диспергирования:

$$E_q = 1,4 \frac{\sigma_p^2}{2E} v \ln \frac{v}{\sigma} \quad (6)$$

$$\text{или } \ln v - \ln \sigma = 1,4 \frac{E_q E}{\sigma_p^2} \cdot \frac{1}{v}, \quad (7)$$

$$\text{следовательно } v = -1,4 \frac{E_q^p E}{\sigma_p^2} = -1,4 \frac{E_q}{\sigma_p^2}, \quad (8)$$

$$\text{а это означает, что } v = -2,8 \frac{E_q}{E_k} \text{ или } E_q = -0,7 \frac{\sigma_p^2 N}{E_d}. \quad (9)$$

Тогда здесь E_k — критическая плотность энергии упругого сжатия σ_p есть напряжение всестороннего сжатия (при сдвиге), которое вызывает диспергирование; оно порядка $3 \cdot 10^{11}$ дин/см² для ряда веществ. Модуль всестороннего сжатия имеет значение порядка $1,6 \cdot 10^{12}$ дин/см². Зная объем диспергировавшегося метеора, по уравнению (9) можно оценить порядок величины затраты энергии метеора, израсходованной на его разрушение. Минимальная кинетическая энергия метеора, необходимая только для диспергирования:

$$\frac{d v u^2}{2} = 0,4 E_k v \quad (10)$$

при $d=5$, $u=0,7 \cdot 1$ км/сек. ≈ 1 М. Это доказывает возможность в природных условиях существования такого механизма взрыва.

В окрестности района падения Тунгусского метеорита найдено сравнительно большое количество силикатных и железоникелевых шариков с малым диапазоном диаметров (10 ÷ 150). Эти сферулы являются результатами макроскопического разрушения (диспергирования) в процессе реологического взрыва твердого тела с последующим разогревом до температур выше точки плавления. Их нельзя рассматривать как результат конденсирования из парообразного состояния. В самом деле, каждый шарик состоит из $10^{22} \div 10^{24}$ молекул. При испарении любых веществ, в том числе металлов, происходит разлет атомов или молекул. Ввиду того, что этот разлет должен был происходить при скоростях, соответствующих скорости фронта ударной волны, молекулы должны были бы разлететься на большие расстояния и разнестись воздушной средой далеко от места катастрофы. Собраться и слиться в $\sim 10^{20}$ шариков, каждый из которых состоит из 10^{22} холодных молекул, в течение даже нескольких секунд невозможно. Поэтому шарики — это результат разлета материала в жидком или пластичном состоянии при высокой его температуре. Это доказывается и опытом по изготовлению шариков при выливании расплавленного металла в воду (изготовление дроби).

Оплавление мелкодисперсных частиц метеора может происходить при пролете их через воздушный термодинамический слой, окружающий болид, имеющий температуру порядка $10^3 - 10^4$ °К.

Энергию жесткого излучения, как и измерения в видимой части спектра, нам пока не удалось оценить, однако сам факт

наличия излучений при реологическом взрыве принципиально важен.

Эффект жесткой радиации, инициируемый реологическим взрывом, в сочетании с фиолетовым и ультрафиолетовым излучением, сопровождающим этот взрыв, могли иметь место и при падении Тунгусского метеорита. Все эти излучения ионизируют молекулы воздуха. При трении частиц метеоритного тела, разлетающихся при взрыве, должен иметь место трибоэлектрический эффект, порождающий электростатическое электричество, т. е. также вызывающий ионизацию окружающей среды. Поэтому помимо ионизации, имеющей место в среде, в которой движется тело со скоростью, близкой к $5 M_{\infty}$, при движении метеора и при движении его диспергированных частиц под действием вышеперечисленных факторов имела место сильная дополнительная ионизация воздуха.

Движущийся с большой скоростью, следовательно, с большими ускорениями ионизованный воздух в свою очередь создает магнитное поле. Не исключено, что этим можно в первом приближении объяснить геомагнитный эффект, наблюдавшийся в г. Иркутске непосредственно после Тунгусской катастрофы в течение нескольких часов.

Итак, описанный выше эксперимент подтверждает возможность интерпретировать механизмы разрушения Тунгусского метеорита как реологический взрыв (или несколько последовательных взрывов) со всеми сопутствующими ему явлениями.

Выводы

1. Разрушение Тунгусского метеорита произошло вследствие реологического (деформационного) взрыва при определенных компонентах тензора напряжений, возникших при движении метеорита в плотных слоях атмосферы.

2. Реологический взрыв твердого вещества воспроизведен в лаборатории. Определены две минимально необходимые компоненты тензора напряжений — шаровой тензор и одна из компонент денантора напряжений.

3. Установлено, что критической величиной являются деформации сдвига — они инициируют взрыв.

4. Наблюдаются тандем-взрывы: первый — мощный, последующий — слабый (наподобие автершоков при землетрясениях). Весьма вероятно, что при падении Тунгусского метеорита наблюдалось несколько взрывов такого рода. Возможно, что именно этим обусловлена пятнистая картина намагниченности почвы, термических и других эффектов.

5. Взрыв метеора мог произойти лишь при скоростях, больших числа Маха, в окрестности поверхности Земли, на нескольких горизонтах последовательно.

6. Форма железо-никелевых частиц и расположение зоны их рассеивания поблизости от места катастрофы доказывает, что эти частицы не результат испарения метеорита, а следствие диспергирования разогретого метеоритного вещества в ходе его разрушения при взрыве и пролете их через термо-высокотемпературный реологический слой.

7. Не исключено, что геомагнитный эффект, сопровождавший Тунгусский взрыв, обусловлен радиационными эффектами, аналогичными наблюдавшимся нами эффектам жесткой и световой радиации при экспериментальном реологическом взрыве, а также действием заряженных частиц и ионов газа, образовавшимся при диспергировании материала метеора.

8. Уравнение энергий, отнесенных к единице массы метеора и расчет энергии диспергирования на основании эксперимента показывает, что необходимость предположения о ядерной природе Тунгусского взрыва отпадает. Для взрыва и диспергирования (а не испарения, как предполагали ранее) достаточна скорость нескольких единиц Мф.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриджмен П. (1955). Исследование больших пластических деформаций и разрывов. М., ИЛ.

2. Васильев Н. В. и др. (1971). Состояние проблемы Тунгусского метеорита на 1971 год. В сб.: «Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита». Материалы совещания 14—16 апреля 1971 г. в г. Новосибирске. Новосибирск, СО АН СССР, 3—5.

3. Гораздовский Т. Я. (1957). Эффект жесткой радиации при сдвиговом разрушении твердого тела. Письма в редакцию ЖЭТФ, 5, вып. 3, 1 февраля 1957, АН СССР.

4. Гораздовский Т. Я. (1970). О термореологическом эффекте. ДАН СССР, 195, № 5, 1075—1078.

5. Зоткин И. Т., Цикулин М. А. (1966). Моделирование Тунгусского взрыва, «Природа», № 6, 81—90.

6. Любимов А. Н., Русаков В. В. (1970). Течение газа около тупых тел. Ч. I. М., «Наука».

7. Мак-Мастер Р. (1966). Неразрушающие испытания. М., ИЛ.

8. Плеханов Г. Ф. (1967). Предварительные итоги по изучению проблемы Тунгусского метеорита. В сб.: «Проблема Тунгусского метеорита». Томск. Изд-во Томского ун-та, 3—22.

9. Прандтль А. (1949). Гидромеханика, М., ИЛ.