

САРОВСКИЕ ШКОЛЬНИКИ РАСКРЫВАЮТ ТАЙНУ «ВЗРЫВА» ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРИТА

Е.Е.МЕШКОВ

Утром 15 февраля 2013 года в атмосферу Земли ворвалось небесное тело - астероид с характерным размером ~17 метров и массой ~10000 тонн. Вход астероида в атмосферу на скорости ~18 км в секунду произошел под острым углом и его полет продолжался ~32,5 секунды. Сея разрушения в Челябинской области, астероид прочертил на утреннем небе длинный светящийся след. Полет астероида (который получил название «Челябинский метеорит») завершился гигантским взрывом на высоте 15÷25 км.



Финальная стадия полета челябинского метеорита

По разным оценкам общее количество высвободившейся энергии составило от 100÷200 (оценка РАН) до 440 килотонн (оценка НАСА) в тротиловом эквиваленте (*Эти сведения почерпнуты из статей о челябинском метеорите в Интернете*)

В ИНТЕРНЕТе появилось множество видеозаписей этого события; оно привлекло всеобщее внимание, запестрели сообщения типа «НЛО взорвало метеорит», «взорвался самолет с атомной бомбой на борту» и т.п. Увидели даже «снаряд», которым НЛО растре-

ляло астероид. Событие обсуждалось очень живо, количество ссылок достигает 17600.

И эти обсуждения не затихли до сих пор. Версии: «терминатор расстрелял астероид», «челябинский метеорит сбит Галактической Федерацией Света» продолжают будоражить умы.

-Ну, хорошо, - скажет скептически настроенный читатель, - пусть «терминатор», пусть «Галактическая Федерация Света», пусть расстреляла астероид вдогонку снарядом, который летел со скоростью в три раза быстрее астероида. Только почему он взорвался? «Он же каменный! Кто ж его взорвет?» А ведь взрыв-то был, и взрыв огромной силы.

Так что же это было?

По нашим представлениям это было результатом стремительного, взрывного увеличения темпа трансформации гигантской кинетической энергии летящего метеорита в энергию ударной волны. И произошло это не каким-то чудесным образом, а по вполне объяснимым физическим причинам.

Механизм этого явления становится понятным в свете результатов экспериментов со свободно падающими цилиндрическими и сферическими водяными снарядами, проводимых в гидродинамической лаборатории СарФТИ НИЯУ МИФИ с участием школьников Сарова.

Первые эксперименты, выполненные в конце 2010 и начале 2011 годов со сферическими водяными снарядами, проводились студентом СарФТИ Володей Орешковым, Геннадием Михайловичем Янбаевым и автором. В проведении части экспериментов принимала участие Таня Биюшкина (Гимназия №2). В 2011 году была разработана методика создания

цилиндрических водяных снарядов. Большая серия таких экспериментов была выполнена с участием Яши Федоренко (Лицей №15) и позднее Маши Пикаловой (Гимназия №2) и Ромы Каньгина (Лицей №15).

Техника создания цилиндрического водяного снаряда очень проста. В вертикально расположенную трубку нужного диаметра, на нижний конец которой туго натягивалась диафрагма из тонкой резины, наливалось известное количество воды.



Г.М.Янбаев, Рома Каньгин и Маша Пикалова подготавливают опыт.

При проведении эксперимента диафрагма пробивалась с краю тонкой иглой; при этом диафрагма практически мгновенно стягивалась, открывая трубку, и вода не выливалась, а просто выпадала вниз в виде столбика. Падение водяного снаряда регистрировалось фотоаппаратом Casio Exilim EX-F1 в режиме скоростной видеосъемки с частотой 1200 кадров в секунду. Часть экспериментов, в которых высота падения снаряда превышала ~2,5 метра проводилась на лестнице нового четырехэтажного корпуса СарФТИ; здесь между маршами лестницы имелся зазор в 30 см и этого оказалось достаточно для проведения наших экспериментов.

При создании сферических водяных снарядов вода под давлением заливалась в резиновый пузырь и при прокалывании

резиновой оболочки последняя разрушалась, освобождая водяную сферу.

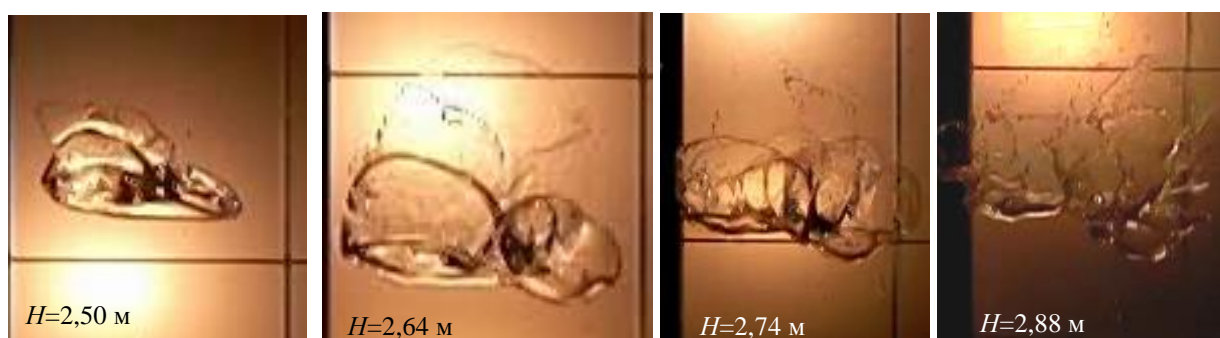
Кадры видеogramм опытов демонстрируют трансформацию цилиндрического водяного снаряда в процессе падения. Снаряд при падении испытывает повышенное давление в лобовой части под действием набегающего встречного потока воздуха и пониженное давление на боковой поверхности; в результате возникает градиент давления, деформирующий переднюю часть снаряда. Снаряд в падении приобретает вначале каплевидную форму ($H=0,36$ м), при этом удивительным образом на хвосте снаряда формируется воздушный сферический пузырек. Позднее этот пузырек схлопывается, образуя капельку, а снаряд приобретает форму головки шурупа ($H=1,11$ м). Затем он приобретает форму зонтика ($H=2,96$ м), а на поверхности купола зонтика начинают расти бугристые возмущения – следствие развития неустойчивости Рэля-Тейлора. Возмущения растут, надуваются пузыри, которые в конечном итоге лопаются, образуя облако капель ($H=3,43$ м).



Яша Федоренко проводит съемку падения цилиндрического водяного снаряда



Свободное падение и трансформация цилиндрического водяного снаряда (45 мл, $h/d=2,4$, «длинный» снаряд). H -путь, пройденный снарядом на данный момент времени.

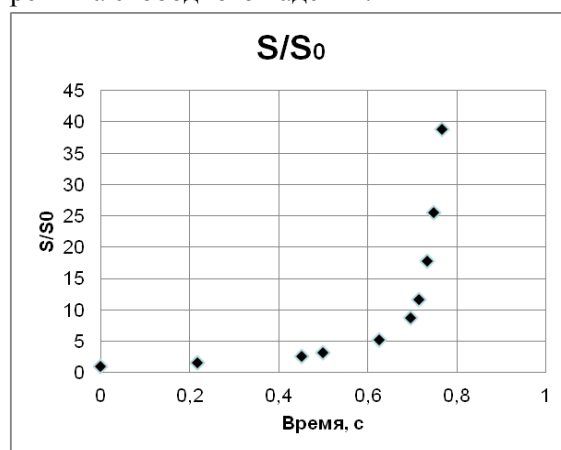


Разрушение цилиндрического водяного снаряда (45 мл, $h/d=1,23$, «короткий» снаряд) вследствие развития неустойчивости Рэля-Тейлора

Развитие этой неустойчивости проявляется особенно ярко в случае «короткого» снаряда (45 мл, $h/d=1,23$). На приведенных кадрах видеогаммы можно наблюдать стадию разрушения снаряда вследствие развития неустойчивости Рэля-Тейлора.

Действие перепада давления между осью и периферией снаряда приводит к ускоренному расширению передней части снаряда. Наблюдается стремительный, взрывной рост (в 40 раз!) площади поперечного сечения S «короткого» снаряда (45 мл, $h/d=1,23$). Неустойчивость Рэля-Тейлора начинает развиваться по мере того, как нарастает площадь поперечного сечения снаряда и, как следствие, возникает торможение снаряда

встречным потоком воздуха и отклонение от режима свободного падения.



Зависимость площади поперечного сечения снаряда (отнесенной к начальному значению) от времени. (короткий снаряд, 45 мл, $h/d=1,23$).

Одновременно с этим происходит стремительное развитие неустойчивости Рэля-Тейлора и взрывное разрушение снаряда с образованием облака капель. Можно отметить, что в наших экспериментах падение снаряда незначительно отклоняется от режима движения с постоянным ускорением и можно оценить скорость снаряда (~ 7 м/с) на момент его разрушения.

В экспериментах со свободным падением сферических водяных снарядов объем до 0.5 литра наблюдается такая же картина - трансформация в процессе полета с разрушением и образованием облака капель.



Облако капель, образовавшееся при разрушении сферического водяного снаряда объемом 0.2 л в процессе свободного падения.

Если мы снова обратимся к картине финальной стадии полета и взрыва челябинского метеорита, то мы наблюдаем аналогичную картину.

Процесс достаточно длительного полета метеорита по пологой траектории порождает в воздухе головную ударную волну. Кинетическая энергия метеорита постепенно переходит в энергию ударной волны. По мере

вхождения в более плотные слои атмосферы нарастает давление на фронте головной ударной волны. В конечном итоге это давление превысило прочность материала метеорита, и он начал трансформироваться подобно тому, как трансформировался водяной снаряд. Быстрое расширение светящегося следа метеорита, завершившегося взрывом, является подтверждением этого предположения. Стремительное увеличение площади поперечного сечения метеорита сопровождается столь же стремительным увеличением трансформации кинетической энергии метеорита в энергию ударной волны, и это увеличение воспринимается зрителем как взрыв, хотя на самом деле взрыва (как мы его понимаем) не было.

Может возникнуть вопрос был ли достигнут предел прочности материала метеорита в процессе роста давления за фронтом головной ударной волны? Оценки, выполненные в грубом приближении, позволяют ответить на этот вопрос утвердительно. Челябинский метеорит был каменным; для оценки величины его прочности можно воспользоваться данными по прочности бутового камня. Согласно этим данным прочность бутового камня на сжатие в зависимости от категории варьируется в пределах 100-1400 атмосфер.

Теперь попробуем оценить величину давления за фронтом головной ударной волны. Это можно сделать, зная число Маха этой волны $M=D/c_0$, где D -скорость волны, а c_0 -скорость звука. Можно сделать оценку числа Маха M в предположении, что скорость волны равна скорости метеорита ($1.8 \cdot 10^4$ м/с), а скорость звука в воздухе ~ 300 м/с. Соответственно, $M \approx 60$. Отношение давлений на фронте ударной волны в идеальном газе выражается через M и показатель адиабаты γ в виде.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}$$

При больших числах Маха вследствие диссоциации и ионизации воздуха γ приближается к единице и поэтому для сильной ударной волны

$$P_2/P_1 \approx M^2$$

Давление воздуха на высоте 15 км составляет 0.12 атмосферы; соответственно, давление за фронтом головной ударной волны (и на лобовой части метеорита) составляет более 400 атмосфер. Поскольку на челябинский метеорит вряд ли пошел камень самой высшей категории, то наш метеорит скорее всего при таком давлении должен был вести себя подобно водяному снаряду в экспериментах наших школьников

Таким образом, результаты приведенных экспериментов и оценок указывают на то, что

так называемый «взрыв» Челябинского метеорита является следствием стремительного, взрывообразного увеличения площади поперечного сечения метеорита и сопутствующего ему стремительному увеличению трансформации кинетической энергии метеорита в энергию ударной волны. Кстати, отметим, что кинетическая энергия метеорита, которую нетрудно оценить, равна ~400 кТ ТНТ, и эта величина не противоречит оценкам энергии «взрыва» метеорита.

И в заключение еще раз с удивлением отметим широко распространенное желание объяснить при помощи «НЛО, терминатора, Галактической Федерации Света» и т.п. в общем простое физическое явление.