

# ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ НА РАЗЛИЧНЫЕ АСТЕРОИДЫ

*Е. Ю. Аристова, И. А. Белов, А. Ю. Воронин, В. Н. Деркач, А. В. Золотовский, А. А. Краюхин, М. Г. Кузин, В. А. Мазанов, Н. С. Мальцева, В. Г. Рогачёв, А. В. Сиренко, Ю. В. Скорочкин, П. В. Стародубцев, С. Н. Стёпушкин, Н. А. Сулов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Угроза пересечения орбит крупных тел с траекторией движения Земли вполне предсказуема, и потенциально опасные объекты в настоящее время активно регистрируются [1].

Перспективным способом защиты является разрушение астероида за счет действия мощных ударных волн. Для его реализации предлагается использовать энергию ядерного взрыва (ЯВ) на поверхности астероида. Эта идея высказывалась ранее Эдуардом Теллером и другими разработчиками ядерного оружия, как в США, так и в СССР [2].

Данная работа посвящена экспериментальному моделированию процессов взрывного разрушения астероидов на основе принципа физического подобия [3]. Воздействие ЯВ на астероид имеет характер точечного (заряд диаметром  $\approx 1$  м к астероиду диаметром 200 м) и кратковременного удара (время воздействия много меньше времени прохождения ударной волны через него).

Многочисленная статистика падений метеоритов на Землю позволила определить, размер объектов, не наносящих критического урона. Например, каменный астероид хондритного типа Челябинск имел начальные размеры около 17 метров и скорость около 19 км/с, но при прохождении атмосферы он распался и поверхности Земли достигла лишь небольшая часть осколков с существенно меньшей скоростью, которые уже не представляли критической угрозы.

Одним из способов моделирования воздействия ЯВ на астероид является облучение импульсом лазерного излучения (ЛИ) миниатюрного макета астероида. Короткая длительность ( $\approx 2$ –4 нс), возможность фокусировки ЛИ в малое пятно ( $\approx 100$ –150 мкм), приемлемая энергия импульса и отсутствие дополнительной привносимой массы делают такой способ моделирования наиболее конкурентоспособным.

Если изготовить из определенного вещества миниатюрный макет с характерным элементным составом, плотностью, прочностью (на сжатие и растяжение) и соответствующей астероиду структурой [4], и осуществить на его поверхности точечный короткий удар большой интенсивности (импульс ЛИ), то процессы распространения ударной волны в таком макете и процессы разрушения будут подобны тем,

что имеют место при ЯВ на поверхности натурального астероида [5].

Важно соблюдать структурное подобие в спектре крупных осколков: если астероид имеет диаметр 200 м, а его мини-макет – диаметр 4 мм, то после разрушения фрагментам астероида размером в 20 м натурной ситуации будут соответствовать осколки макета размером в 400 мкм. То есть, необходимо, чтобы в макете отсутствовали вкрапления, имеющие размеры больше 400 мкм и прочность большую, чем у самого макета.

Вторым важным условием подобия является обеспечение равенства характерных давлений в модельном и натурном эксперименте на начало ударно-волновой стадии процесса. Это приближенно соответствует равенству отношения энергии ЯВ к массе астероида и отношения энергии ЛИ к массе моделирующего микро-макета [5]. В случае камуфлетного взрыва данное требование является точным. Однако, в случае взрыва на поверхности оно имеет приближенный характер. Это обусловлено отсутствием подобия процессов переноса энергии на начальной высокотемпературной стадии и требует введения соответствующего поправочного коэффициента.

Цель данной работы состояла в:

- проведении сопоставительных расчетов воздействия ЯВ на астероид и воздействия импульса ЛИ на макет; определении поправочного коэффициента  $k$  в соотношении энергетического баланса, компенсирующего разницу в процессах переноса энергии;
- разработке технологии изготовления мини-макетов различных астероидов с определёнными характеристиками, контроле их параметров;
- проведении экспериментов с целью определения зависимости характера разрушения мини-макетов астероидов от свойств материала, формы макетов и условий выделения энергии.

## Теоретические расчеты

Для обоснования применения ЛИ для моделирования ЯВ на поверхности астероида в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ проведена серия сравнительных расчетов при различных условиях энерговыделения как на астероиде, так и на мини-макете.

Произведены расчеты воздействия импульса лазерного излучения с энергией  $q_1 = 200$  Дж на поверхность шарообразного макета каменного астероида диаметром  $d_1 = 4$  мм и контактного ЯВ мощностью  $q_2 = 6$  Мт на шарообразный каменный астероид диаметром  $d_2 = 200$  м [6]. Значения энергии воздействия и размер нагружаемых тел выбирались из соотношения энергетического подобия  $d_1/q_1^{1/3} = d_2/q_2^{1/3}$ .

В расчётах учитывался широкий круг физических процессов. Одновременно с численным решением уравнений газовой динамики проводился расчет электронной и ионной теплопроводности, электрон-ионной температурной релаксации, расчет лучистой теплопроводности и ряда других процессов [3].

Расчётные значения массовой скорости и давления в ударной волне при ЯВ на астероиде оказались примерно в два раза выше, чем при облучении импульсом ЛИ макета. То есть при заданных уровнях энергии и химическом составе объектов энергия ЯВ эффективней преобразуется в ударную волну. Таким образом, поправочный коэффициент  $k$  был принят равным  $1/2$  и в дальнейшие расчеты введено соответствующее изменение в значения энергии ЯВ ( $q_2^* = 1/2 q_2$ ).

Необходимо отметить, что величина поправки определяется достаточно точно, несмотря на то, что макет от астероида по объёму и массе отличается на четырнадцать-пятнадцать порядков. Например, для воздействия контактного ЯВ мощностью  $q_2^* = 7,45$  Мт на железно-никелевый астероид диаметром  $d_2 = 150$  м и воздействия импульса ЛИ мощностью  $q_1 = 500$  Дж на шарообразный макет диаметром  $d_1 = 3$  мм разница в амплитудах массовой скорости и приведенного давления не превышала 10 %.

В дальнейшем, для изучения влияния формы астероида и его макета на подобие в протекающих процессах проведены следующие численные расчеты:

- воздействия импульса ЛИ мощностью  $q_1 = 600$  Дж на эллипсоидный (вытянутый сфероид) макет астероида с размером осей  $a_1 = 6$  мм и  $b_1 = 3$  мм при фокусировке излучения на полюсе макета и воздействия контактного ЯВ мощностью  $q_2^* = 7,45$  Мт на эллипсоидный хондритный астероид с размером осей  $a_2 = 300$  м и  $b_2 = 150$  м при воздействии ЯВ на полюсе астероида;

- воздействия импульса ЛИ мощностью  $q_1 = 200$  Дж на имитатор астероида в виде конуса с диаметром основания  $d_1 = 5$  мм и высотой  $h_1 = 5$  мм (на основание и вершину конуса) и воздействия контактного ЯВ мощностью  $q_2^* = 3$  Мт на полномасштабный астероид в виде конуса с диаметром основания  $d_2 = 250$  м и высотой  $h_2 = 250$  м (на основание и вершину конуса).

Для всех исследованных форм астероидов (шар, эллипсоид, конус), получены зависимости массовой скорости  $U$  и давления  $P$  от приведенного времени

( $t \cdot C/d$ , где  $C$  – скорость звука в материале, а  $d$  – диаметр объекта) в точках наблюдения в системе приведенных координат ( $x/d$ ,  $y/d$ ). Они близки как по амплитуде, так и по форме волны сжатия во всем объеме нагружаемого тела.

Например, на рис. 1 приведены полученные зависимости давления в центре шаровидного каменно-го астероида и его макета.

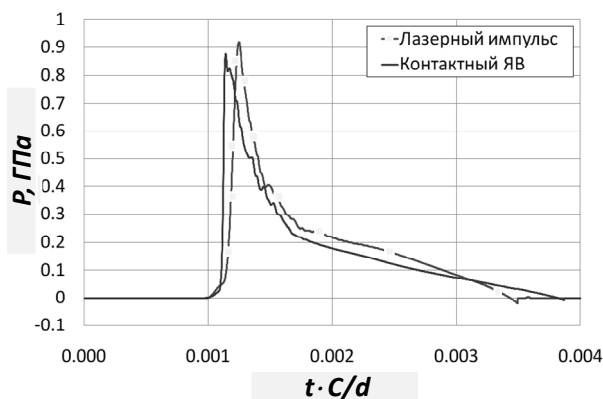


Рис. 1. Зависимости давления от безразмерного времени в центре шаровидных объектов

Таким образом, расчетно подтверждена возможность воспроизведения в лазерных экспериментах качественных и количественных особенностей течения среды, возникающего при контактном ядерном взрыве.

Расчёты также позволяют выбрать наиболее оптимальное место воздействия на макет и астероид при усложнении их формы. На рис. 2 приведены зависимости давлений в центре конусовидного макета (на полувысоте перпендикуляра, опущенного из вершины конуса на основание) при фокусировке импульса ЛИ на вершине и на основании конуса.

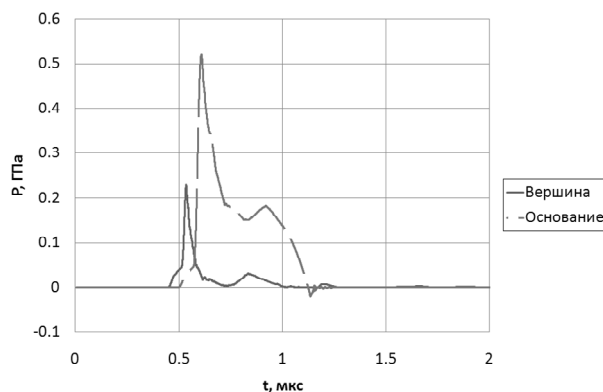


Рис. 2. Зависимости давления в центре конуса от времени при разном положении источника энерговыделения

Эксперименты по разрушению конусовидных и эллипсоидных макетов, а также эксперименты по имитации «заглубленных» взрывов подтвердили этот вывод.

Каменные (хондритные) астероиды, составляющие подавляющее большинство космических объектов (92,5 %), падающих на поверхность Земли. За исходные данные при изготовлении материала для их мини-макетов взяты характеристики Челябинского метеорита [7].

Путём смешивания порошков определенной дисперсности, химического состава и плотности, их прессования и нагрева при разных давлениях и температурах имитирован естественный процесс длительного формирования реальных каменных астероидов.

Таким способом получены несколько партий образцов материала с прочностью на сжатие от 6,5 до 134,1 МПа [3]. Результат испытания на прочность на сжатие одного из образцов представлен на рис. 3. Данные образцы имели прочность 22,5 МПа, что наиболее соответствует натуральному астероиду.

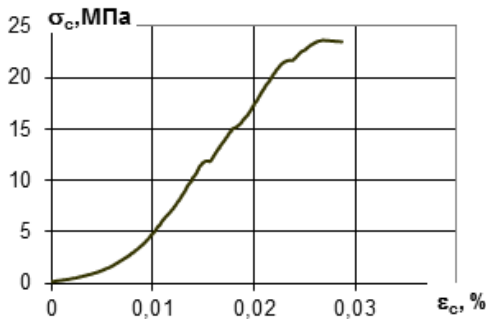


Рис. 3. Результаты испытания на сжатие образцов, изготовленных при давлении 3,5 МПа и температуре 1000 °С

Размеры прочных частиц в этой партии составляли от 10 до 125 мкм. В ходе испытаний на растяжение разрушение образца произошло при нагрузке ≈0,95 МПа. Плотность образцов варьировалась от 2,3 до 2,5 г/см<sup>3</sup>, что несколько ниже плотностей, характерных для натуральных хондритных астероидов.

Различные теории образования ядер комет подразумевают, что структура ядра варьируется от относительно разреженного «снежного кома» до плотного «конгломерата льдов и камней». Соответствующая им плотность может составить от 0,1 г/см<sup>3</sup> до 1,5 г/см<sup>3</sup> (с учетом вкрапления других материалов) [1]. Для моделирования комет использовался обычный водяной лед плотностью 0,9 г/см<sup>3</sup>.

Макет представлял собой сплошной шаровидный кусок льда, формируемый на конце медного стержня в вакуумной камере. Другой конец медного стержня помещался в термостат, как показано на рис. 4. Равновесные значения температуры и давления, а также сохранность конфигурации льда поддерживались балансом скорости испарения льда, скоростью откачки паров, охлаждением поверхности льда при испарении и притоком тепла за счет теплопроводности. Давление насыщенных паров воды в

вакуумной камере составило 0,04 Торр, что соответствует температуре льда минус 20 °С, с прочностью на сжатие ≈ 4,0–5,0 МПа [8].

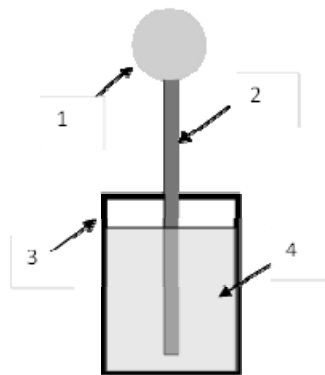


Рис. 4. Схема крепления ледяного макета: 1 – макет диаметром 10 мм; 2 – медный стержень; 3 – сосуд из фторопласта; 4 – термостат со льдом

Для моделирования вещества железокремнистого астероида использовался белый чугун с плотностью 4,2 г/см<sup>3</sup>. Его прочность на сжатие составляет от 280 до 320 МПа. Это почти на порядок превосходит прочность каменных хондритов и занимает промежуточное место между материалами каменных и железных астероидов [4].

Наиболее прочными телами, падающими на поверхность планеты из космоса, являются железно-никелевые астероиды. Так как некоторые из них не имеют четко выраженных крупных вкраплений (хондр, как в каменных астероидах), для проведения экспериментов по определению критерия их разрушения использовался непосредственно материал астероида Чинге (тип атаксит, т. е. «лишенный порядка»). Он представлял собой сплав железа с никелем (~17 % никеля), имел плотность 7,8 г/см<sup>3</sup>, с высокой прочностью на растяжение 855 МПа, т. е. примерно на три порядка больше, чем прочность на растяжение материалов, имитирующих каменные астероиды.

### Экспериментальный стенд, методики измерений и результаты

Исследования по разрушению макетов, имитирующих реальные астероиды проводились на лазерной импульсной установке «Луч» [9]. Их облучение осуществлялось на длине волны  $\lambda = 527$  нм (вторая гармоника неодимового лазера) импульсом длительностью от 2 до 5 нс по уровню полувисоты интенсивности. Макет закреплялся на вертикально ориентированном держателе в вакуумной камере в специальном, индивидуально юстируемом боксе для сбора осколков, имеющим прозрачные стенки. Таким образом, обеспечивалась возможность боковой и тыльной подсветки для регистрации динамики разлета макета. Как полностью разрушенные классифицированы

макеты, не образовавшие в результате воздействия на них ЛИ фрагментов крупного размера (больше 10 % от первоначального линейного размера макета). Принципиальная схема проведения экспериментов изображена на рис. 5.

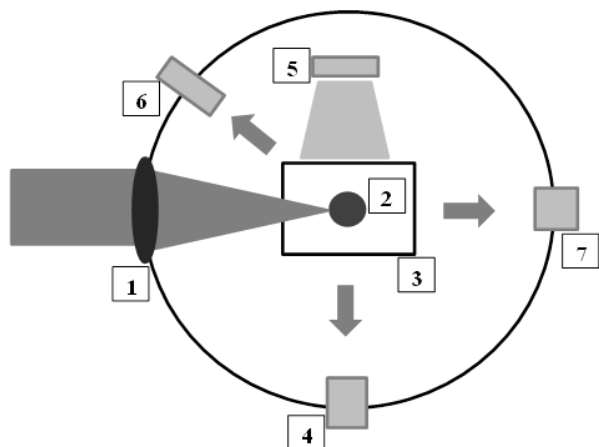
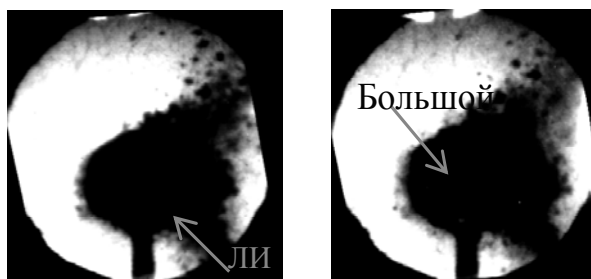


Рис. 5. Схема экспериментального стенда: 1 – объектив; 2 – микро-макет; 3 – бокс, улавливающий осколки; 4 – электронно-оптический преобразователь; 5 – лампа-вспышка теневой регистрации; 6 – камера-обскура; 7 – регистратор оптогетеродинной методики PDV

Размер пятна облучения в экспериментах определялся по его изображению в рентгеновском излучении, зарегистрированном с помощью камеры-обскуры [3].

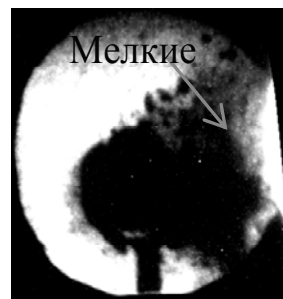
Для наблюдения процесса разрушения макетов использовался теневой метод. Подсветка организована с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса до 1 мс. Регистрация изображений осуществлялась при помощи СЭР-7 [3] в девятикадровом режиме с экспозицией кадра 1–2 мкс и промежутками между кадрами 80 мкс. На рис. 6 представлена характерная регистрация разлета осколков хондритного шаровидного макета, который не был разрушен полностью в ходе эксперимента. Указано время кадра после прихода ЛИ на макет. Стрелками на рис. 6 показаны: направление прихода ЛИ, большой неразрушенный фрагмент макета и мелкие осколки. Указано время задержки съёмки кадра после прихода излучения на макет, экспозиция кадров составляла 2 мкс.

Движение тыльной и боковой (относительно направления прихода ЛИ) поверхности макета и продуктов его распада регистрировались лазерным оптогетеродинным методом (PDV) [10]. На рис. 7 представлен пример регистрации динамики разлета тыльной стороны конусообразного каменного макета, полученной с использованием методики PDV. В эксперименте зарегистрировано полное разрушение макета. Хорошо видны два трека соответствующих групп осколков со скоростями 7 и 9 м/с.



а

б



в

Рис. 6. Кадровый снимок разлета шаровидного каменного макета диаметром  $\approx 5$  мм: а – 500 мкс, б – 716 мкс, в – 1006 мкс

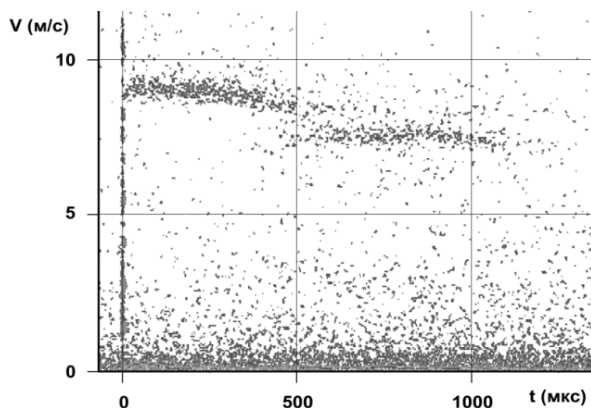


Рис. 7. PDV-регистрация движения осколков тыльной стороны макета

Важно отметить, что согласно теории подобия [5] скорости осколков, измеренные в таких экспериментах, будут соответствовать скоростям, возникающим при натурном разрушении астероида ЯВ. Таким образом, можно прогнозировать размер и форму облака осколков через определенное время после разрушения астероида.

На рис. 8 представлены результаты экспериментов по разрушению шаровидных хондритных макетов астероидов с прочностью на сжатие 22,5 МПа и размером прочных вкраплений менее 125 мкм. Данный образец материала признан наиболее соответствующим по характеристикам реальным каменным астероидам и условиям подобия.

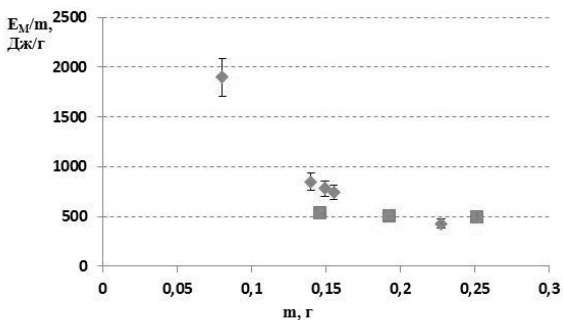


Рис. 8. Удельная энергия в экспериментах по разрушению шаровидных каменных макетов с прочностью на сжатие 22,5 МПа

На рис. 8 ромбами отмечены эксперименты, в которых получено полное разрушение макета, квадратами – в которых макеты частично разрушены с образованием крупных осколков.

Погрешность приведена только для значений подведенной к макету энергии, оцениваемой величиной  $<10\%$ . Погрешность в измерении массы составляла 0,0005 г и на рисунке не видна. Представленные результаты свидетельствуют, что испытанный тип макета имеет порог разрушения около 650 Дж/г.

Таким образом, с учетом расчетного поправочного коэффициента  $k = 1/2$  и возможной средней плотности реального астероида около  $3 \text{ г/см}^3$ , данный результат определяет величину необходимого ЯВ, достаточного для разрушения соответствующего каменного астероида. Так, при исходном диаметре 200 м для разрушения его до безопасного состояния необходим заряд с мощностью около 1 Мт тротилового эквивалента. При этом осколки астероида получат скорость около 10 м/с и в течение недели разлетятся на расстояния большее диаметра Земли. В результате часть из них вообще не упадет на планету, а остальные сгорят в атмосфере.

Также приближенно смоделирован случай «заглубленного» ЯВ и проведены исследования с целью определения оптимальной точки воздействия на эллипсоидный макет с отношением осей 1:2. На рис. 9 представлены сравнительные результаты экспериментов по хондритным макетам разной прочности и формы при разных условиях облучения [3].

Для изучения влияния формы астероида и места воздействия на характер разрушения использованы конусовидные (высота и диаметр основания одинаковы и составляли 4–5 мм) макеты из материала с прочностью на сжатие 13 МПа.

Их полное разрушение для случая фокусировки ЛИ на центре основания мини-макета наступает при минимальной удельной энергии от 900 до 1100 Дж/г, а при фокусировке на полувысоте боковой поверхности – от 600 до 800 Дж/г. Наименее результативным в плане разрушения является выбор фокусировки ЛИ на вершине конуса. Например, в эксперименте с удельной энергией 2300 Дж/г от основания конуса отделился крупный осколок, составляющий 21% первоначальной массы макета. Полного разрушения макетов при таких условиях добиться не удалось.

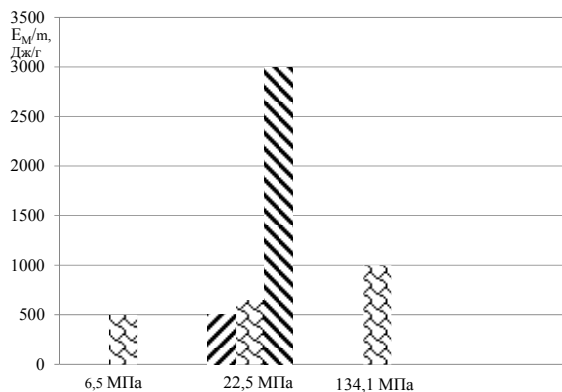


Рис. 9. Сравнительная гистограмма критериев разрушения каменных макетов разной формы и прочности на сжатие:  $\times$  – сфера;  $\parallel$  – сфера с каверной;  $\text{||||}$  – вытянутый эллипсоидный ( $a/b = 2/1$ ), облучаемый на полюсе

В ходе экспериментов по имитации воздействия на астероид нескольких ЯВ двумя последовательными импульсами ЛИ облучались макеты с прочностью на сжатие 134,1 МПа. При достижении в двух экспериментах суммарной удельной энергии в 1200 Дж/г оставался крупный осколок массой 58 % от первоначальной массы макета.

Также проводились эксперименты по имитации воздействия двух ЯВ, произведенных одновременно. Макет с прочностью на сжатие 22,5 МПа и диаметром 4 мм облучался двумя пучками равной энергии, пятна фокусировки которых были разнесены друг от друга на 2 мм. Однако полного разрушения макета не произошло вплоть до величины удельной энергии 1000 Дж/г.

Таким образом, представляется предпочтительным использовать для разрушения астероида один, но мощный ЯВ.

Во всех экспериментах по моделированию ЯВ на ледяных астероидах зарегистрировано полное разрушение макета при понижении удельной энергии вплоть до значений от 20 до 40 Дж/г [11]. Необходимы дополнительные исследования для определения порогового условия разрушения подобных объектов.

Макеты, изготовленные из белого чугуна, имели порог полного разрушения в пределах удельной энергии от 3 до 4 кДж/г, что примерно в шесть раз превышает значения, для каменных образцов.

В экспериментах, проведенных с железно-никелевыми макетами, не удалось достичь разрушения на множество осколков при значениях удельной энергии вплоть до 13 кДж/г, что связано с их аномально высокой прочностью. Макеты сильно деформировались, однако дефект их массы не превышал 5 % [11].

Для уточнения масштабного фактора проведены эксперименты с гораздо более крупными макетами и другим способом нагружения. Исследовалось разрушение шаровидных каменных образцов с помощью цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ). Схема одного из таких экспериментов и его результаты приведена на рис. 10.

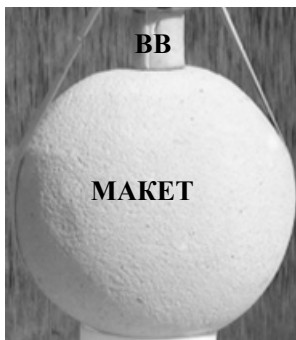


Рис. 10. Каменный макет диаметром 90 мм и заряд взрывчатки

Шаровидные каменные макеты диаметром 45 и 90 мм и прочностью на сжатие 15 МПа разрушались на осколки размером менее 10 % от первоначального при энерговыкладе ВВ 550 Дж/г. Макеты из того же материала диаметром 5 мм разрушались импульсом ЛИ при энерговыкладе от 800 до 900 Дж/г.

На рис. 11 представлены рассортированные осколки, собранные после эксперимента по разрушению макета диаметром 90 мм зарядом ВВ. Удельный энерговыклад составил 44 Дж/г.

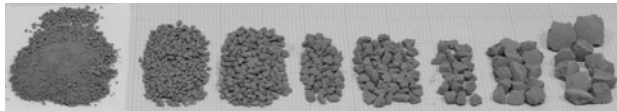


Рис. 11. Осколки каменного макета после разрушение зарядом ВВ

При изменении масштабов массы объекта и подводимой энергии более чем на три порядка в пределах погрешностей значения удельных энергий, необходимых для полного разрушения макетов, близки. Их отличие может быть объяснено дополнительной массой привносимой ВВ, и как результат - более длительным воздействием на объект.

Таким образом, продемонстрирована адекватность моделирования разрушения крупных объектов с помощью импульсного воздействия их мини-макеты.

На данный способ определения удельной энергии, необходимой для разрушения опасного астероида ядерным взрывом получен патент № 2655880 от 23.05.2018.

## Литература

1. Акимов В. А., Глазачёв Д. О., Емельяненко В. В. и др. Астероидно-кометная опасность: стратегия

противодействия. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015.

2. Dillow C. Destroying an Incoming Killer Asteroid With a Nuclear Blast // ICMAR XV, Bonnier, 9 April 2012.

3. Аристова А. Ю., Аушев А. А., Баранов В. К. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // ЖЭТФ. 2018. Т. 153. Вып. 1. С. 157–172.

4. Слюта Е. Н. Особенности гравитационной деформации малых тел Солнечной системы в зависимости от их химического и минерального состава. М.: ГЕОХИ РАН, 2014.

5. Седов И. С. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977.

6. Белов И. А., Бельков С. А., Воронин А. Ю. и др. Исследование на лазерной установке «Луч» критериев разрушения астероидоподобных тел из хондрита при воздействии на них мощного импульсного излучения / X Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. С. 247–256.

7. Авраменко М. И., Глазырин И. В., Ионов Г. В., Карпеев А. В. Расчеты параметров взрывной волны, вызванной Челябинским болидом / Международная конференция «XII Забабахинские научные чтения» // Сборник трудов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2014.

8. Лобанов В. А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой // Электронный журнал. Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2008. № 4.

9. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. и др. Четырехканальная лазерная установка ЛУЧ – модуль установки ИСКРА-6 / Международная конференция «IV Харитоновские тематические научные чтения» // Сборник аннотаций. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2002. С. 82.

10. Sargis P. D, Molau N. E., Sweider D., Lowry M. E. Photonic Doppler Velocimetry. // LLNL Report UCRL-ID-133075, 1999.

11. Аристова А. Ю., Белов И. А., Кузин М. Г. и др. Исследование критериев разрушения макетов каменных, ледяных и железных астероидов при воздействии на них мощного импульсного излучения / X семинар молодых ученых и специалистов госкорпорации «Росатом» и КАИФ «Современные методы исследований и моделирования материалов» // Сборник докладов. Москва, 2018. С. 90–97.