

# ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА НА АСТЕРОИД НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ

*Е. Ю. Аристова, И. А. Белов, А. Ю. Воронин, Р. В. Гаранин, В. Н. Деркач, А. А. Краюхин, В. А. Мазанов, Н. С. Мальцева, В. В. Мисько, В. Г. Рогачёв, Ю. В. Скорочкин, П. В. Стародубцев, С. Н. Стёпушкин, В. Ю. Телегина*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, 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]. Ядерный заряд наиболее предпочтителен с точки зрения возможности его доставки на поверхность астероида и удельной энергии. Технически самым простым воздействием будет взрыв на поверхности астероида, хотя он и менее эффективен, чем заглубленный.

Астероид необходимо раздробить на фрагменты, которые сгорят в атмосфере, не достигнув поверхности Земли. Каменный астероид хондритного типа Челябинск имел начальные размеры около 17 метров. При прохождении атмосферы он раздробился на мелкие фрагменты, которые в основном затормозились и сгорели. Поверхности Земли с пониженной скоростью достигла лишь небольшая часть осколков. Именно из-за демпфирующего действия земной атмосферы реальной катастрофы не произошло. Таким образом, если крупный каменный астероид заведомо раздробить взрывом на фрагменты размерами менее 20 метров и обеспечить их разведение на поверхности Земли на расстояние в сотни километров, то их воздействие не будет иметь апокалиптического характера.

Данная работа посвящена экспериментальному моделированию на основе принципа физического подобия процессов взрывного разрушения астероидов [3]. Воздействие ЯВ на астероид имеет характер точечного (заряд диаметром 1 м к астероиду диаметром 200 м) и кратковременного удара (время воздействия много меньше времени прохождения ударной волны через него). Если изготовить из определённого вещества миниатюрный макет, придав ему геометрическую форму, элементный состав, плотность, прочность (на сжатие и растяжение) и структуру астероида [4], и осуществить на его поверхности точечный короткий удар большой интенсивности, то процессы распространения ударной волны в таком макете и процессы разрушения будут в точности подобны тем, что имеют место при ЯВ на поверхности натурального астероида. Важно соблюдать структурное подобие в спектре крупных осколков: если астероид имеет диаметр 200 метров, а его мини-макет – диаметр 4 мм, то осколкам в 5 метров натурной ситуации будут соответствовать песчинки размером в 100 мкм. То есть, необходимо, чтобы прочные включения в макете имели размеры примерно 100 мкм.

Представляется естественным моделировать воздействие ядерного взрыва на астероид воздействием импульса лазерного излучения (ЛИ) на миниатюрный макет астероида. Короткая длительность ( $\approx 2$  нс), возможность фокусировки ЛИ в малое пятно ( $\approx 100$  мкм), приемлемая энергия импульса и отсутствие дополнительной привносимой массы делают такой способ моделирования наиболее конкурентоспособным.

Вторым важным условием физического 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  $k$  для исследуемых масштабов событий;
- в разработке адекватной технологии изготовления мини-макетов различных астероидов и контроле их ключевых параметров;
- в проведении экспериментов с целью определения зависимости характера разрушения мини-макетов астероидов от свойств материала, формы макетов и условий выделения энергии.

### Теоретические расчёты

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

Первоначально были произведены расчёты воздействия импульса лазерного излучения с энергией  $q_1 = 200$  Дж на поверхность шарообразного макета астероида диаметром  $d_1 = 4$  мм и контактного ЯВ мощностью  $q_2 = 6$  Мт на шарообразный астероид диаметром  $d_2 = 200$  м [6]. Значения энергии воздействия и размер нагружаемых тел выбирались из соотношения энергетического подобия  $d_1/q_1^{1/3} = d_2/q_2^{1/3}$ . Расчётные значения массовой скорости и давлений в ударной волне при ЯВ на астероиде оказались примерно в два раза выше, чем при ЛИ на макете (излучение ЯВ эффективней преобразуется в ударную волну), следовательно, поправочный коэффициент  $k \approx 2$ . В расчёты была введена соответствующая поправка ( $q_2 = 3$  Мт), после чего значения массовой скорости и давления оказались близки во всём объёме нагружаемого тела. Необходимо отметить, что это хороший результат, учитывая, что макет от природы по объёму и массе отличается на четырнадцать-пятнадцать порядков. В нижеприведённых расчётах данная поправка была введена в значения энергии ЯВ.

В дальнейшем, для изучения влияния места энерговыделения, состава и формы астероида на характер его разрушения были произведены следующие численные расчёты:

- воздействия контактного ЯВ мощностью  $q = 3$  Мт на железно-никелевый астероид диаметром  $D = 200$  м;
- воздействие ЛИ мощностью  $q = 500$  Дж на шарообразный макет диаметром  $D = 3$  мм, имитирующий железно-никелевый астероид;
- воздействия контактного ЯВ мощностью  $q = 7,45$  Мт на железно-никелевый астероид диаметром  $D = 150$  м;
- воздействия ЛИ мощностью  $q = 600$  Дж/г на эллипсоидный (вытянутый сфероид) макет астероида с размером осей  $a = 6$  мм и  $b = 3$  мм при фокусировании излучения на полюсе макета;
- воздействия контактного ЯВ мощностью  $q = 7,45$  Мт на эллипсоидный хондритный астероид с размером осей  $a = 300$  м и  $b = 150$  м при воздействии ЯВ на полюсе астероида;
- воздействия импульса ЛИ мощностью  $q_1 = 200$  Дж на имитатора астероида в виде конуса с диаметром основания  $D_1 = 5$  мм и высотой  $H_1 = 5$  мм (на основании и вершине конуса);
- 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 основании или вершине конуса).

Для всех исследованных составов и форм астероидов, сравнение зависимостей массовой скорости  $U$  и давления  $P$  от приведенного времени  $(t/q^{1/3})$ , полученных в точках наблюдения в системе приведенных координат  $(x/q^{1/3}, y/q^{1/3})$ , показало, что эти зависимости близки как по ампли-

туде, так и по форме волны сжатия во всем объеме нагружаемого тела. Например, на рис. 1 приведены полученные зависимости скорости и давления на экваторе эллипсоидных астероида и макета при воздействии на полюсе.

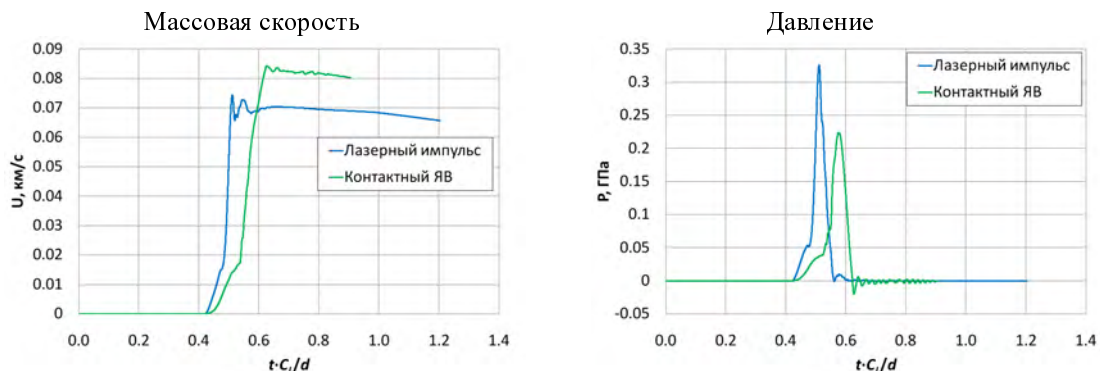


Рис. 1 Зависимости величин от безразмерного времени на экваторе эллипсоидных объектов

Эти результаты подтверждают предварительный вывод о возможности воспроизведения в лазерных экспериментах качественных и количественных особенностей течения среды, возникающего при контактном ЯВ.

На рис. 2 приведены зависимости давлений в центре конусовидного макета (на полувысоте перпендикуляра, опущенного из вершины конуса на основание) при фокусировке ЛИ на вершине и основании конуса.

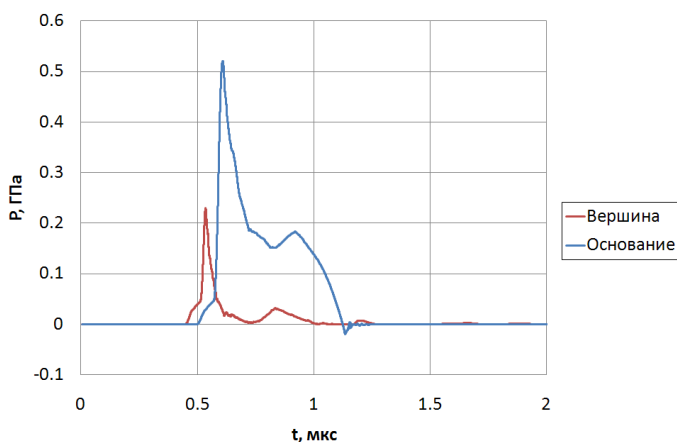


Рис. 2. Зависимости давления в центре конуса от времени при разном положении источника энерговыделения

Расчёты для полей продольных и поперечных массовых скоростей приводят к аналогичному результату. Отсюда следует, что ЯВ на вершине конусовидного астероида не будет эффективно его разрушать. Эксперименты по разрушению конусовидных и эллипсоидных макетов, а также эксперименты по имитации «заглубленных» взрывов подтвердили этот вывод.

### Создание макетов

Наибольший интерес с точки зрения безопасности планеты представляют каменные (хондритные) астероиды, составляющие подавляющее большинство космических объектов (92,5 %) падающих на поверхность Земли. За исходные данные были взяты характеристики Челябинского хондрита [7], получены серии образцов материала с прочностью на сжатие от 6,5 до 134,1 МПа [3]. Результат испытания на прочность на сжатие представительского образца одной из серий на рис. 3.

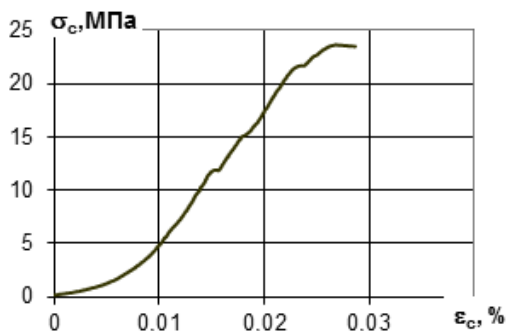


Рис. 3 Результаты испытания на сжатия образцов изготовленных при давлении 3,5 МПа

Как видно из рис. 3, полученные образцы имели прочность 22,5 МПа, что наиболее соответствует натуральному астероиду. Размеры прочных частиц в данной серии составляла от 10 до 125 мкм. Для этих образцов были также проведены испытания на растяжение. Разрушение образца произошло при нагрузке растяжения  $\approx 0,95$  МПа. Плотность образцов варьировалась от 2,3 до 2,5 г/см<sup>3</sup>, что несколько ниже плотностей, характерных для натуральных хондритных астероидов. Полученный материал использовался для изготовления макетов разного размера и конфигурации.

Для моделирования ледяных астероидов и ядер комет были использованы микро-макеты, состоящие из водяного льда, с расчетной прочностью на сжатие  $\approx 4,0-5,0$  МПа [8]. Макет представлял собой сплошной шарообразный кусок водяного льда, удерживаемый на медном стержне в вакуумной камере. Второй конец медного стержня помещался в сосуд, заполненный льдом и играющий роль холодного термостата, 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 счёт теплопроводности. Давление насыщенных паров воды в вакуумной камере составило 0,04 Торр, что соответствует температуре льда минус 20 °С.

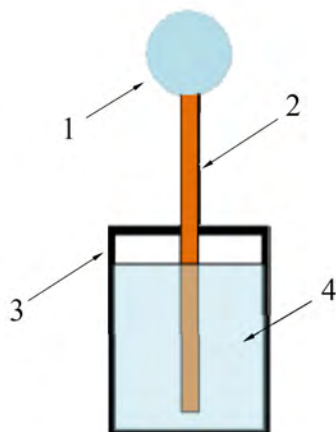


Рис. 4. Схема крепления ледяной мишени: 1 – мишень (диаметр 1 см), 2 – медный стержень, 3 – сосуд из второпласта, 4 – вода

Так как железо-никелевые астероиды обычно не имеют чётко выраженных крупных вкраплений (хондр, как в каменных астероидах), для проведения экспериментов по определению критерия их разрушения решено было использовать 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>, прочность на растяжение 855 МПа, т. е. примерно на три порядка больше, чем прочность на растяжение материалов, имитирующих каменные астероиды. Нужно заметить, что данный астероид был взят за образец, как наиболее прочный из всех, падавших на поверхность Земли.

Исследования по разрушению макетов имитирующих реальные астероиды проводились на лазерной импульсной установке «Луч» [9]. Облучение макетов-имитаторов осуществлялось на длине волны  $\lambda = 527$  нм (вторая гармоника) неодимового лазера, длительности импульса на полувысоте составляла от 2 до 5 нс. Макет закреплялся на вертикально ориентированном держателе в вакуумной камере и помещался в специальный, индивидуально юстируемый бокс для сбора осколков, имеющий прозрачные стенки. Таким образом, обеспечивалась возможность боковой и тыльной подсветки для регистрации динамики разлета макета. Принципиальная схема проведения экспериментов изображена на рис. 5.

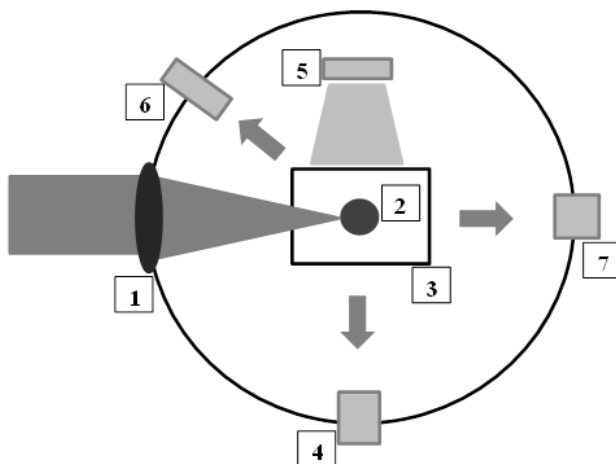


Рис. 5. Схема экспериментального стенда: 1 – объектив; 2 – микро-макет астероида; 3 – бокс улавливающий осколки; 4 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП); 5 – лампа-вспышка ЭОП; 6 – камера обскуры; 7 – коллиматор PDV (Photon Doppler Velocimetry)

Размер пятна облучения в экспериментах определялся по его изображению в рентгеновском излучении, зарегистрированном с помощью камеры-обскуры в предположении, что интенсивность рентгеновского излучения прямо пропорциональна интенсивности ЛИ [3].

Для регистрации процесса разрушения макетов использовался теневой метод. Подсветка была организована с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса до 1 мс. Регистрация изображений осуществлялась при помощи регистратора СЭР-7 [3] в девятикадровом режиме с экспозицией кадра 1–2 мкс и промежутками между кадрами 80 мкс. На рис. 6 представлена характерная регистрация разлёта осколков хондритного шаровидного макета. Указано время кадра после прихода ЛИ на макет.

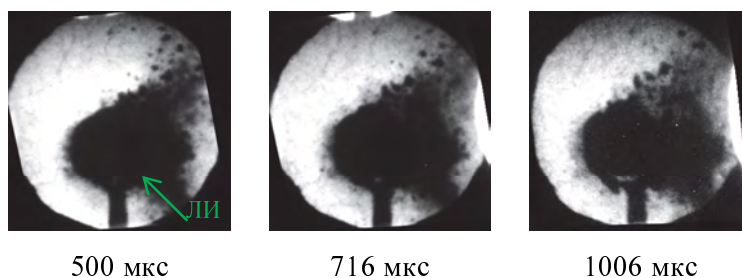


Рис. 6. Покадровый снимок разлета шаровидного хондритного макета  $d \approx 5$  мм

Движение тыльной и боковой (относительно направления прихода ЛИ) поверхности макета и продуктов его распада регистрировались лазерным оптогетеродинным методом (PDV) [3]. На рис. 7 представлен пример регистрации динамики разлета тыльной стороны конусообразного каменного

макета, полученной с использованием методики PDV. В эксперименте зарегистрировано его полное разрушение. Хорошо видны два трека соответствующих осколкам скоростями 7 и 9 м/с.

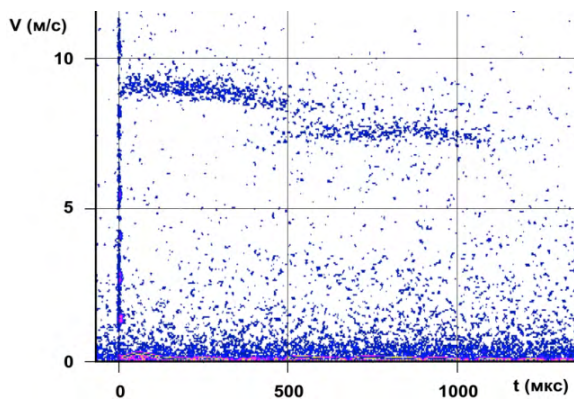


Рис. 7 PDV-регистрация движения осколков тыльной стороны макета

На рис. 9 представлены результаты экспериментов по разрушению шаровидных хондритных макетов астероидов с прочностью на сжатие 22,5 МПа и размер прочных вкраплений менее 125 мкм. Как полностью разрушенные классифицированы макеты, не образовавшие в результате воздействия на них ЛИ фрагментов крупного размера (больше 10 % от первоначального линейного размера макета).

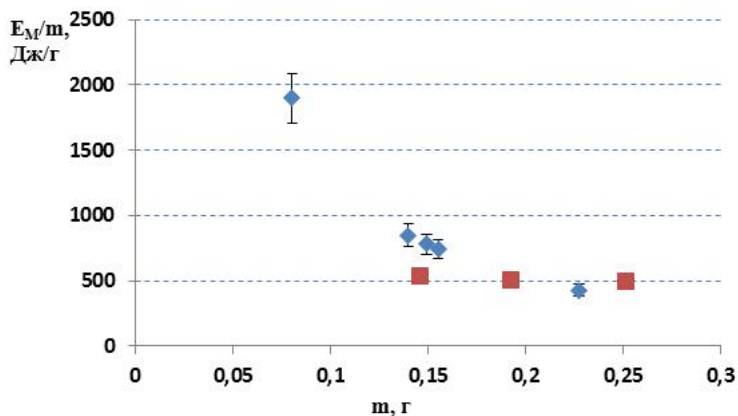


Рис. 8 Удельная энергия в экспериментах по разрушению шаровидных каменных макетов с прочностью на сжатие 22,5 МПа

На рис. 8 синим цветом отмечены эксперименты, в которых получено полное разрушение макета, красным – макеты частично разрушены с образованием крупных осколков. Погрешность приводится только для оси ординат. Она определяется погрешностью измерения энергии, подведенной к макету, и оценивается величиной  $<10\%$ . Из рисунка видно, что испытанный тип макета имеет порог разрушения около 650 Дж/г. Вместе с тем, в единичных случаях данная закономерность нарушается, что свидетельствует о наличии неучтенных факторов. С учётом расчётного поправочного коэффициента  $k \approx 2$  и возможной средней плотности реального астероида около  $3 \text{ г/см}^3$ , данный результат указывает, что для разрушения на безопасные осколки шарообразного каменного астероида диаметром 200 метров необходим ЯВ мощностью не менее 1 Мт тротилового эквивалента.

Ранее, приближённо был 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].

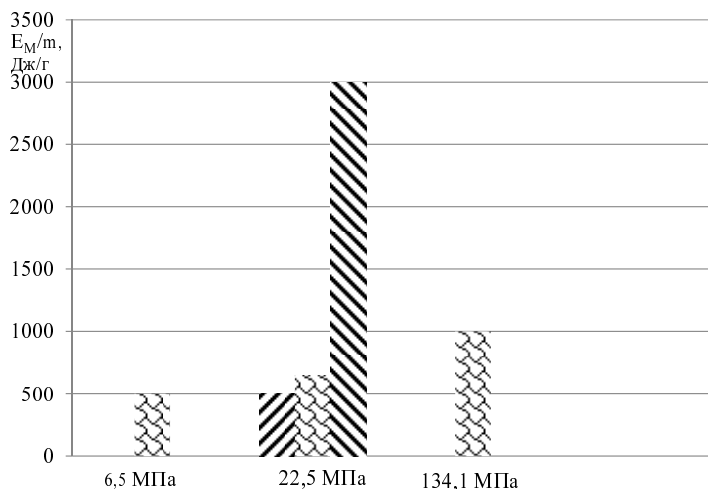





Рис. 9. Сравнительная гистограмма критериев разрушения макетов разной формы и прочности на сжатие

 – сфера; 
  – сфера с каверной; 
  – эллипсоидный, облучаемый на полюсе

Для дальнейшего изучения влияния формы астероида и места воздействия на характер разрушения были использованы конусовидные (высота и диаметр основания равны 4–5 мм) макеты из материала с прочностью на сжатие 13 МПа: граница полного разрушения для случая фокусировки ЛИ на центре основания мини-макета лежит в пределах 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.

В ходе исследований были высказаны предположения о том, что можно добиться выигрыша в суммарной энергии воздействия на астероид применением нескольких последовательных слабых ЯВ или одновременными двумя ЯВ, разнесёнными по поверхности астероида. Надо отметить, что минусом обоих методов является усложнение наведения и требование к синхронизации по времени двух зарядов. В первом случае расчёт основывался на предположении, что первый ЯВ нарушает структуру астероида, делая её менее прочной. Двумя последовательными пучками облучались макеты с прочностью на сжатие 134,1 МПа: при достижении суммарной удельной энергии в 1200 Дж/г оставался крупный осколок 58 % от первоначальной массы. Во втором случае рассчитывали на взаимодействие ударных волн от двух ЯВ. При одновременном облучении двумя параллельными пучками одинаковой мощности макетов с прочностью на сжатие 22,5 МПа удельная энергия достигла 1000 Дж/г, однако полного разрушения макета не произошло: остался крупный осколок, имевший массу 8 % от первоначальной массы макета. Таким образом, наиболее перспективно бороться с опасным астероидом одним, но мощным ЯВ.

В серии экспериментов шаровидные макеты облучались пятном ЛИ сопоставимым с его размером, для чего макет диаметром 5 мм располагался за фокусом ЛИ на расстоянии  $\approx 50$  мм. Целью экспериментов было определение удельной энергии и интенсивности излучения, при которых макет не претерпит сильных разрушений, и измерение полученной им скорости. При достижении удельной энергии в 300 Дж/г и интенсивности излучения  $\approx 8 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> макет, имевший прочностью на сжатие 22,5 МПа, приобретает скорость  $\approx 4$  м/с. При этом отделяемая фракция представляет из себя маленькие осколки (<125 мкм, т. е. <10 % от первоначального размера) и не превышает 9 % от первоначальной массы мишени. При больших значениях удельной энергии (>500 Дж/г) макет начинает фрагментироваться с образованием крупных осколков (>10 % от первоначальной массы). Однако расчётные исследования, подтверждающие подобие между такими экспериментами и ЯВ над поверхностью реального астероида, ещё только планируются.

Во всех экспериментах по моделированию ЯВ на ледяных астероидах девятикадровой съёмкой зарегистрировано полное разрушение макета при понижении удельной энергии до значений от 20 до 40 Дж/г. Однако, так как собрать осколки не удалось, делать выводы о характере фрагментации макетов невозможно. Необходимо проведение экспериментов с применением более совершенных криотехнологий, которые позволят точнее регистрировать массогабаритные данные макетов и их осколков.

В экспериментах, проведённых по железно-никелевым макетам, не удалось достичь их разрушения при значениях удельной энергии в 14 кДж/г. В перспективе предполагается проведение экспериментов с повышенным энерговыделением, а также моделирование других вариантов воздействия на данный тип астероидов (многократные ЯВ или изменение траектории астероида).

Для уточнения масштабного фактора проведены эксперименты с увеличенным размером макетов. Исследовалось разрушение каменных образцов с помощью взрывчатого вещества (ВВ). Каменный макет разрушался на осколки размером менее 10 % от первоначального при энерговыделении ВВ 550 Дж/г, а для ЛИ энерговыделением составил 850 Дж/г.

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

### Список литературы

1. Акимов В. А., Глазачёв Д. О., Емельяненко В. В. и др. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия. 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. ГЕОХИ РАН, Москва, 2014.
5. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Под ред. Л. С. Полак. Наука, 1989.
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 // Сб. докл. X-ой Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. 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. Труды ЗНЧ-2014. XII Международная конференция. г. Снежинск, 2013.
8. Лобанов В. А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления, электронный журнал № 4, 2008.
9. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В., Гаранин С. Г. др. Четырёхканальная лазерная установка ЛУЧ – модуль установки ИСКРА-6 // IV Харитоновские тематические научные чтения. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2002. С. 82.