

ЛАЗЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА НА ЛЕДЯНЫЕ И ЖЕЛЕЗНЫЕ АСТЕРОИДЫ

*И. А. Белов^a, С. А. Бельков^a, А. Ю. Воронин^a, И. Н. Воронич^a,
Р. В. Гаранин^{a*}, С. Г. Гаранин^a, К. Г. Гайнуллин^a, В. И. Гроховский^b,
В. Н. Деркач^a, Б. Г. Зималин^a, А. В. Золотовский^a, В. М. Изгородин^a,
Р. И. Илькаев^a, А. А. Краюхин^a, Н. С. Мальцева^a, В. В. Мисько^a,
Р. Ф. Муфтахетдинова^b, В. Г. Рогачёв^a, А. Н. Рукавишников^a,
П. В. Стародубцев^a, С. Н. Стёпушкин^a, А. В. Турусов^a, О. Н. Шубин^c*

^a Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ
607190, Саров, Нижегородская обл., Россия

^b Уральский федеральный университет, Физико-технологический институт
620002, Екатеринбург, Россия

^c Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
119017, Москва, Россия

Поступила в редакцию 30 ноября 2019 г.,
после переработки 25 декабря 2019 г.
Принята к публикации 25 декабря 2019 г.

Приведены результаты экспериментов на лазерной установке «Луч», в которых на основе принципа физического подобия моделируются процессы разрушения железных астероидов и ядер комет в космосе с помощью ядерных взрывов на их поверхности. Приведены результаты численного моделирования воздействий на поверхности железных объектов, подтверждающие подобие ключевых процессов в натурном и модельном случаях. Описаны технологии изготовления миниатюрных макетов с параметрами, близкими к параметрам железных астероидов и ядер комет. Для различных минимакетов размером 3–12 мм при энергии лазерного излучения от 50 до 450 Дж приведена экспериментальная оценка энергетического порога заведомого разрушения макетов и исследованы параметры их фрагментации. Сделаны выводы о вероятных результатах воздействия на опасные космические объекты ядерным взрывом.

DOI: 10.31857/S0044451020050144

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе [1] описан способ, с помощью которого на основе принципа физического подобия [2] моделировалось разрушительное воздействие ядерного взрыва на опасные каменные астероиды. Ядерный взрыв на поверхности астероида рассматривался как наиболее действенный вариант борьбы с подобной угрозой. Описан технологический процесс создания искусственного материала, соответствующего по основным параметрам (ско-

рость звука, плотность, прочность на сжатие и растяжение, структура) материалу каменного астероида. Показано, что компактные (шаровидные) минимакеты, соответствующие оригиналу, полностью разрушаются при удельной энергии лазерного излучения около 650 Дж/г. Характерные размеры осколков при этом не превышали 10% от первоначального размера макета. С учетом полученного в расчетах поправочного коэффициента было показано, что для разрушения на безопасные осколки компактного каменного астероида диаметром 200 м необходим ядерный взрыв с энергией не менее 1 Мт тротилового эквивалента.

* E-mail: garanin@otd13.vniief.ru

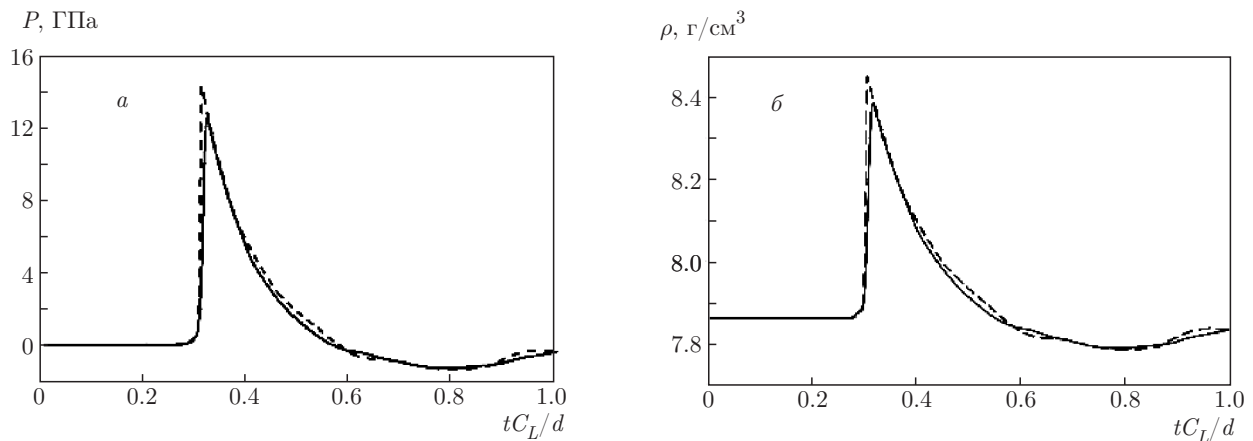


Рис. 1. Зависимости давления (а) и плотности (б) от безразмерного времени в центре железного астероида и его макета: сплошная линия — контактный ядерный взрыв; штриховая — лазерный импульс

Каменные астероиды составляют подавляющее большинство метеоритов, падающих на поверхность Земли (92.8%). Однако среди объектов, представляющих опасность для планеты, также присутствуют ядра комет, железно-каменные и железные астероиды [3]. Их отличия в структуре, плотности и прочностных характеристиках требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований в этом направлении.

Данная работа посвящена расчетному и экспериментальному моделированию воздействия ядерного взрыва на ледяные и железные астероиды на основе принципа физического подобия.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СФЕРИЧЕСКИЙ ЖЕЛЕЗНЫЙ АСТЕРОИД

Основную роль в разрушении астероида и его модели (минимакета) играют идентичные механические явления: ударные и звуковые волны, вызывающие сдвиговые и откольные деформации вещества, приводящие к фрагментации объектов [1].

Главными характеристиками, ответственными за фрагментацию, являются давления разрушения при сжатии и растяжении материала. Если астероид и моделирующий его минимакет обладают одинаковыми значениями давлений разрушения, то для моделирования картины фрагментации необходимо соблюдение подобия профилей давления. Начальная стадия процессов воздействия характеризуется высокими температурами в окрестностях фокусировки лазерного излучения или контактного

ядерного взрыва. Подобие процессов на этой стадии отсутствует. Однако с течением времени тепловые процессы, игравшие важную роль на начальной стадии, затухают. Ключевым условием подобия между картинами разрушения реального астероида ядерным взрывом и соответствующего минимакета лазерным излучением является равенство характерных давлений на этой стадии процесса [2].

Теория указывает на подобие газодинамических течений (совпадение амплитуды и формы ударных волн) при одинаковых отношениях подведенной к объекту энергии и массы астероида (его макета) при камуфлетном выделении энергии. Однако для случая воздействия на поверхность необходимо введение поправочного коэффициента, который учитывал бы различие в механизмах передачи энергии ядерного взрыва и лазерного излучения объекту. В расчетах воздействия ядерного взрыва на железный астероид энергия взрыва задавалась так, чтобы удельная энергия была в два раза меньше, чем удельная энергия для лазерного эксперимента (как в случае с каменным материалом [1]).

При моделировании железного астероида выбраны параметры материала метеорита Чинге [4]. Рассматривались тела шаровидной формы: гипотетический астероид диаметром $d_1 = 150$ м и его макет диаметром $d_2 = 3$ мм. Энергия ядерного взрыва $q_1 = 7.45$ Мт, а соответствующая энергия импульса лазерного излучения $q_2 = 500$ Дж. Методика расчетов аналогична использованной для случая каменных астероидов. Менялись лишь параметры исследуемого материала [1, 5].

В одно- и двумерных расчетах учитывался широкий круг физических процессов. Одновременно

с численным решением уравнений газовой динамики проводились расчеты электронной и ионной теплопроводности, электрон-ионной температурной релаксации, лучистой теплопроводности и ряда других процессов [1].

Результаты сравнительных расчетов воздействий на поверхности объектов иллюстрируются на рис. 1, на котором приведены зависимости давления и плотности в центре шаровидного астероида и его минимакета от безразмерного времени ($t^* = tC_L/d$, где $C_L = 4.5$ км/с — скорость звука в веществе астероида и макета, d — диаметры астероида или макета).

В остальных расчетных точках (как на поверхности, так и в объеме) величины давления и массовой скорости согласуются аналогичным образом. Несмотря на гигантское различие в абсолютных масштабах (в 10^{14} раз по массе и энергии), зависимости давления и массовой скорости от нормированного времени близки как по амплитуде, так и по форме во всем объеме астероида (макета). Наибольшее различие в амплитуде ударных волн составляет около 10%. Это обстоятельство свидетельствует о подобии процессов и о возможности воспроизведения в лазерных экспериментах качественных и количественных особенностей течения среды, возникающего при ядерном взрыве на поверхности такого астероида.

3. ПОСТАНОВКА ЛАЗЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по исследованию характера разрушения минимакетов различных астероидов под действием мощного импульсного лазерного излучения проводились на лазерной установке «Луч» [6].

Облучение осуществлялось на длине волны $\lambda_{2\omega} = 527$ нм (вторая гармоника) неодимового лазера при длительности импульса на полувывоте от 2 до 5 нс. Макет астероида помещался в прозрачный бокс для сбора осколков, позволяющий регистрировать динамику разрушения макета. Принципиальная схема проведения экспериментов изображена на рис. 2. Экспериментальный стенд оборудован приборами, позволяющими регистрировать как параметры лазерного излучения, так и характер разрушения макетов [1].

Для регистрации процесса разрушения макетов использовался стандартный теневой метод. Подсветка организована с использованием лампы-вспышки с длительностью импульса до 1 мс.

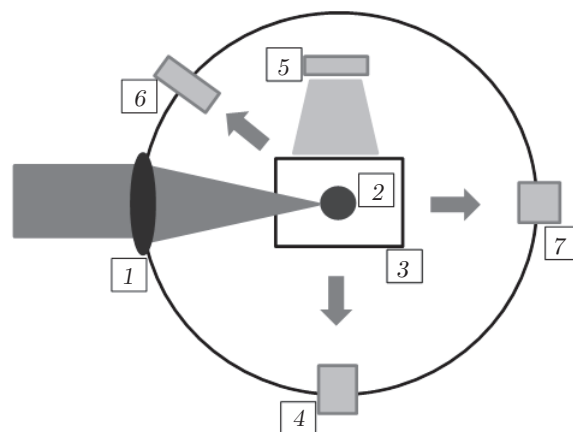


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 — объектив; 2 — минимакет астероида; 3 — бокс-уловитель; 4 — растр 9-кадровой регистрации; 5 — лампа-вспышка для теневой регистрации; 6 — камера обскуры; 7 — коллиматор оптогетеродинной регистрации

Изображения регистрировались при помощи регистратора СЭР-7 [7] в 9-кадровом режиме «лупы времени». Изображение строилось на фотохронографе с использованием оптической системы, обеспечивающей увеличение $M^* = 0.67$. Основные параметры съемки: пространственное разрешение в области расположения макета 200 мкм; количество кадров 9; динамический диапазон 700; полное время съемки 600 мкс; время экспозиции единичного кадра 1–5 мкс.

На рис. 3 представлена характерная картина разлета осколков ледяного компактного макета при помощи теневой регистрации. Лазерное излучение направлено на макет справа снизу. Указано время кадра после прихода излучения на макет.

Движение тыльной стороны макета и продуктов его разрушения регистрировалось лазерным оптогетеродинным методом [8]. Измерительный комплекс включал в себя фотоприемник с полосой пропускания 20 ГГц и осциллограф с полосой пропускания 16 ГГц. Диаметр диагностического лазерного пучка составлял примерно 300 мкм. На рис. 4 представлен пример регистрации скорости осколков того же ледяного макета с использованием оптогетеродинного метода. Хорошо видны два трека осколков, попавших в диагностический луч, летящих со скоростями 5 и 6 м/с.

Результаты регистрации скоростей разлета осколков, полученные с помощью этих двух методик, согласуются между собой: полученные значения лежат в промежутке значений от 4 до 8 м/с. Из теории физического подобия [2] следует, что в соответств-

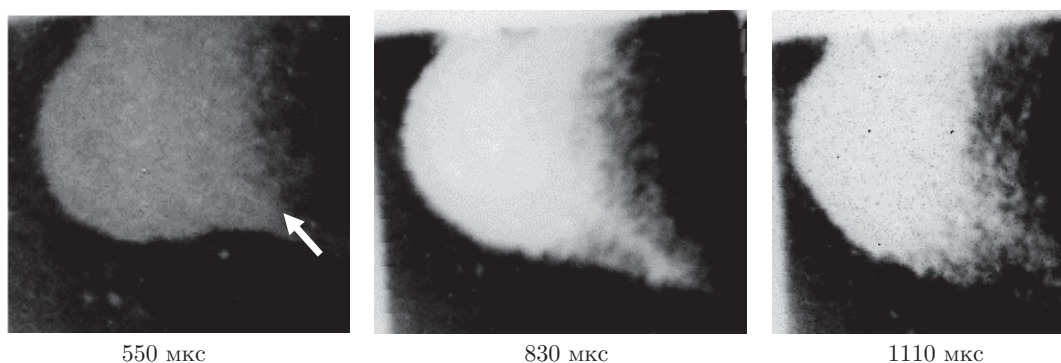


Рис. 3. Кадры теневой регистрации разлета осколков ледяного макета ($d \approx 12$ мм). Стрелка — лазерное излучение

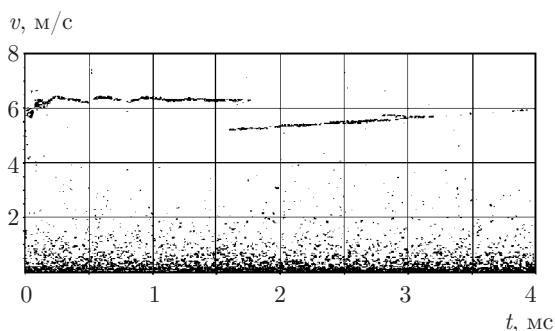


Рис. 4. Оптогетеродинная регистрация скорости осколков

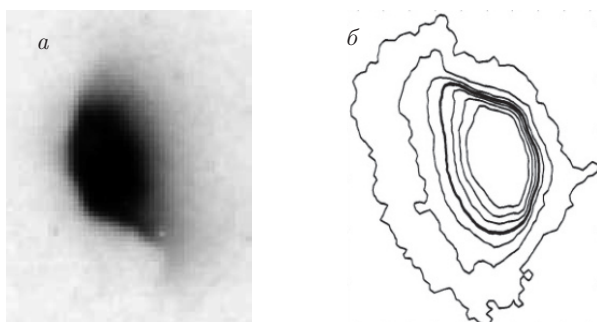


Рис. 5. Характерная обскурограмма пятна излучения: *a* — пятно облучения; *b* — изоуровни пятна облучения

ющем натурном случае характерные скорости разлета осколков ядра кометы будут такими же.

Данные по размеру и форме пятна фокусировки лазерного излучения на поверхности макета получались по его изображению в рентгеновском излучении, зарегистрированном с помощью камеры обскуры, в предположении, что интенсивность рентгеновского излучения пропорциональна интенсивности лазерного излучения. На рис. 5 изображены пятно фокусировки и результаты его обработки, полу-

ченные в эксперименте с железным макетом. Площадь пятна облучения, определенная по изолинии полувысоты максимальной интенсивности, составила $S_{0.5} = 3.6 \cdot 10^{-4}$ см², а эквивалентный диаметр пятна $d_{eq} = 214$ мкм. Пятно характеризуется вытянутым распределением засветки, что объясняется неровностью поверхности макета.

В проведенных лазерных экспериментах не ставилась задача непосредственного измерения давления в различных точках облучаемых макетов. Их малые размеры требуют разработки специальных малогабаритных датчиков давления с высоким временным разрешением. Основной экспериментальной характеристикой являлся спектр осколков макета по размерам после импульсного воздействия.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЖЕЛЕЗНЫЕ АСТЕРОИДЫ

4.1. Изготовление макетов

Поскольку, в отличие от каменных, железные астероиды не имеют ярко выраженных включений (хондр) [1], для подбора наиболее адекватного материала исследовались готовые образцы натурального и искусственного происхождения: белый чугун, промышленные сплавы железа и никеля, фрагменты упавших на Землю метеоритов. Белый чугун по своей плотности (4.2 г/см³) и прочности (280–320 МПа) занимает промежуточное положение между материалами каменных и железных астероидов [9]. Из него изготавливались минимакеты, имитирующие железно-каменные астероиды.

В экспериментах также использовался материал, полученный из фрагмента метеорита Чинге [10]. Образец представлял собой сплав железа с никелем (около 17% Ni), его удельный вес составлял

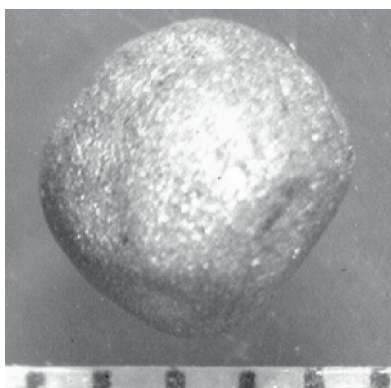


Рис. 6. Минимакет железного астероида

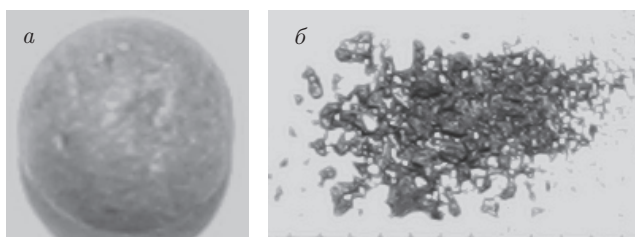


Рис. 7. Минимакет из чугуна до (а) и после (б) эксперимента

7.8 г/см³. Более подробно состав и строение метеорита описаны в работе [11]. Прочность на растяжение данного материала составляет 855 МПа, что минимум на два порядка превосходит соответствующие значения для каменных хондритов!

Из образцов изготовлено несколько компактных минимакетов диаметром 3–4 мм массой от 0.13 до 0.38 г и несколько минимакетов неправильной формы (2 × 1.5 × 1 мм³) массой от 0.02 до 0.12 г. Характерный вид железного минимакета, полученного из фрагмента метеорита Чинге, приведен на рис. 6.

4.2. Результаты экспериментов

В экспериментах по разрушению лазерным излучением минимакетов из белого чугуна и материала метеорита Чинге применялась исключительно острая фокусировка. При этом варьировались форма и масса макетов, энергия в импульсе излучения. Макеты считались полностью разрушенными, если размеры осколков не превышали 10 % от первоначального размера макета. Примеры макета из чугуна и его осколков после эксперимента с удельной энергией 3.5 кДж/г приведены на рис. 7.

Полученные в ходе экспериментов с минимакетами из белого чугуна данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов по разрушению минимакетов из белого чугуна

M, г	E _{2ω} /M, Дж/г	Крупные осколки		
		Количество, шт.	m, г	Δ, %
0.0207	4600	—	—	—
0.1225	3100	1	0.0075	6
0.1013	2820	—	—	—
0.1142	2560	1	0.0105	9
0.1389	3570	—	—	—
0.1397	2330	1	0.0217	15

Примечание: M — масса макета, E_{2ω}/M — удельная энергия, подведенная к макету, m — масса крупного осколка, Δ — доля массы крупного осколка от первоначальной массы макета.

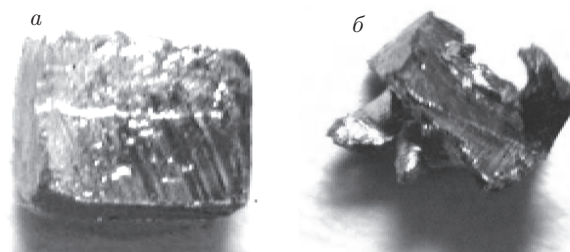


Рис. 8. Железный минимакет из материала метеорита Чинге до (а) и после (б) эксперимента

Как видно из таблицы, порог гарантированного полного разрушения данных макетов лежит в пределах от 3 до 4 кДж/г, что в 5–7 раз выше порога разрушения каменного макета (650 Дж/г) и объясняется их более высоким уровнем прочности.

Характерный вид минимакета, изготовленного из фрагмента метеорита Чинге, до и после эксперимента представлен на рис. 8. Исходно макет имел неправильную форму с размерами 2 × 1.5 × 1 мм³. Удельная энергия лазерного излучения в эксперименте составила 13 кДж/г, что в двадцать раз превосходит порог полного разрушения для хондритных макетов. Видно, что макет под действием лазерного излучения претерпел значительную деформацию, однако не разрушился (дефект массы не превысил при этом 5 %).

Результаты, полученные в ходе экспериментов по минимакетам из фрагмента метеорита Чинге, представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, значе-

Таблица 2. Результаты экспериментов по разрушению железных минимакетов, изготовленных из фрагмента метеорита Чинге

M , г	$E_{2\omega}$, Дж	$E_{2\omega}/M$, Дж/г	m , г	Δm , г
0.3376	186	552	0.3373	0.0003
0.2682	222	826	0.2675	0.0007
0.1365	236	1733	0.1358	0.0007
0.3818	218	572	0.3815	0.0003
0.0567	289	5100	0.0562	0.0005
0.0575	245	4256	0.0571	0.0004
0.0424	140	3304	0.0422	0.0002
0.0446	376	7100	0.0438	0.0008
0.0461	427	7800	0.0454	0.0007
0.0281	406	13100	0.0247	0.0034

Примечание: $E_{2\omega}$ — энергия лазерного излучения на поверхности макета, M — масса макета до эксперимента, m — масса макета после эксперимента, Δm — масса вещества, выбитого излучением.

ний удельной энергии, при которых макеты данного типа претерпели бы значительные разрушения, достигнуть не удалось. При удельных энергиях 8–13 кДж/г скорость целых макетов достигла 30 м/с. Максимальное значение удельной энергии (13 кДж/г) с учетом масштабного фактора и поправочного коэффициента соответствует применению против железного астероида диаметром 60 м заряда с энергией примерно 1.4 Мт тротилового эквивалента. Очевидно, что из-за более высоких прочностных характеристик материала (855 МПа на растяжение у железного астероида по сравнению с 4–15 МПа у хондрита [5, 10]) такого воздействия будет недостаточно для разрушения.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЯДРА КОМЕТ

5.1. Изготовление макетов

Различные теории образования ядер комет подразумевают, что структура ядра варьируется от относительно разреженного «снежного кома» до плотного «конгломерата льдов и камней». Соответству-

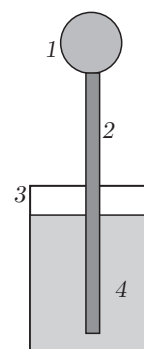


Рис. 9. Схема ледяного макета: 1 — ледяной макет; 2 — медный стержень; 3 — сосуд из фторопласта; 4 — водяной лед

ющая им плотность может составить от 0.1 до 1.5 г/см³ (с учетом вкраплений других материалов) [3]. Для моделирования использовался обычный водяной лед плотностью 0.9 г/см³.

Минимакет намораживался на медный стержень последовательным его погружением в жидкий азот, а затем в воду. Эта процедура повторялась несколько раз. После получения компактного (шаровидного) макета из льда требуемых размеров другой конец медного стержня опускался в чашку термостата, заполненного водой. Затем термостат помещался в жидкий азот, в результате чего вода замерзала и образовавшийся лед охлаждался до температуры от -100°C до -150°C , как показано на рис. 9. Затем система устанавливалась в вакуумную камеру. Равновесные значения температуры и сохранность макета поддерживались балансом испарения льда и откачки водяных паров. Давление паров в камере стабилизировалось на значении 0.04 Торр, что примерно соответствует температуре мишени -20°C [12]. Остаточная концентрация водяных паров не препятствовала прохождению лазерного излучения.

Характерный вид минимакета приведен на рис. 10.

5.2. Результаты экспериментов

Масса ледяных макетов определялась посредством измерения их объемов. Плотность льда принималась равной 0.9 г/см³. Результаты экспериментов по их разрушению, в частности показания оптогетеродинной регистрации, приведены в табл. 3.

Во всех проведенных экспериментах получено уверенное разрушение минимакетов, в том числе при удельных энергиях от 15 до 40 Дж/г. Анализ скоростей разлета осколков показывает, что при

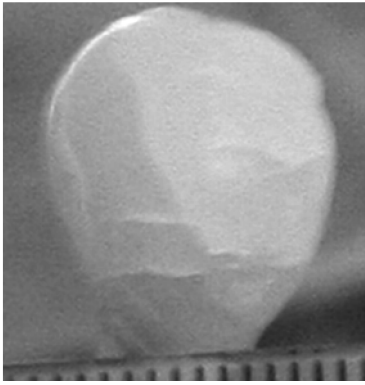


Рис. 10. Минимакет ядра кометы

Таблица 3. Результаты экспериментов по разрушению ледяных минимакетов

D , мм	M , г	I , 10^{14} Вт/см ²	$E_{2\omega}/M$ Дж/г	v , м/с
13	1	12	240	5–10
12	0.8	2.6	260	5–7
10	0.6	8.4	380	7–13
14	1.5	13	150	0.2–1
13	1	8.1	165	4–5
12	0.8	12	330	10–13
13.5	1.3	13	220	7–8
15	1.9	1.3	13	1–1.5
15	1.9	4.6	35	3–4.5
15	1.9	4.7	39	4

Примечание: D — средний диаметр макета; M — ориентировочная масса макета; I — интенсивность лазерного излучения на поверхности макета; v — характерная скорость осколков.

уменьшении удельной энергии от 350 до 15 Дж/г скорость разлета осколков уменьшается с 7–13 до 2–3 м/с.

Полученные данные ориентировочно свидетельствуют о том, что при воздействии ядерного взрыва с энергией 30 Мт на ядро кометы диаметром один километр [3] его осколки разлетятся в течение недели на расстояние большее, чем диаметр Земли.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена экспериментальная оценка воздействия ядерного взрыва на поверхности железных астероидов и ядер комет. Исследования базировались на физическом подобии гидродинамических явлений, сопровождающих ядерный взрыв на поверхности объекта, и аналогичных явлений при воздействии импульса мощного лазерного излучения на поверхность миниатюрного макета.

Для железных астероидов путем расчета определен поправочный коэффициент, учитывающий влияние начальной стадии процессов на точность газодинамического подобия явлений. Показано, что при разнице в массе между реальным астероидом и его лабораторным аналогом в 14–15 порядков удельная энергия ядерного взрыва, необходимая для создания определенного давления в волне, проходящей по телу, почти в два раза меньше, чем удельная энергия лазерного излучения, необходимая для подобного результата в минимакете.

Отработана технология получения образцов из фрагмента железного метеорита Чинге. Предложена и отработана методика изготовления искусственных минимакетов ядер ледяных комет.

Выполнена серия лазерных экспериментов. Макеты, изготовленные из белого чугуна, имели порог полного разрушения в пределах удельной энергии от 3 до 4 кДж/г. Железные образцы, полученные из фрагмента метеорита Чинге, не теряли целостности даже при достижении удельной энергии в 13 кДж/г.

Заведомое разрушение ледяных минимакетов шаровидной формы наблюдалось, если отношение энергии лазерного излучения к массе макета превосходила 15 Дж/г, что в сорок раз меньше, чем для хондритов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ю. Аристова, А. А. Аушев, В. К. Баранов и др., ЖЭТФ 153, 157 (2018).
2. И. С. Седов, *Методы подобия и размерности в механике*, Наука, Москва (1977).
3. Н. А. Артемьев, Е. С. Баканас, С. И. Барабанов и др., *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра*, Физматлит, Москва (2010).
4. В. И. Гроховский, С. В. Гладковский, Е. С. Козловских, А. А. Пятков, в сб. *VI Международная*

- научная конференция «Прочность и разрушение материалов и конструкций», материалы конференции (2010), с. 638.
5. V. I. Grokhovsky and S. V. Gladkovsky, *Meteoritics and Planetary Sci.* **45**, A69 (2010).
 6. Н. Н. Безнасюк, И. В. Галахов, С. Г. Гаранин и др., в сб. *IV Харитоновские научные чтения*, РФЯЦ — ВНИИЭФ, Саров (2002), с. 82.
 7. А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин, В. В. Мисько и др., *Физика плазмы* **32**, 166 (2006).
 8. P. D. Sargis, N. E. Molau, D. Sweider, and M. E. Lowry, *Photonic Doppler Velocimetry*, LLNL Report UCRL-ID-133075 (1999).
 9. Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева, *Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений*, Машиностроение, Москва (1990).
 10. V. I. Grokhovsky and S. V. Gladkovsky, *Meteoritics and Planetary Science* **51**, S1, 6457 (2016).
 11. В. П. Семенов, Л. Г. Самойлович, Л. Н. Егорова, И. С. Козлов, *Метеоритика* №41, 93 (1982).
 12. В. А. Лобанов, *Дифференциальные уравнения и процессы управления* (электронный журнал) №4 (2008).