



РОСАТОМ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР ВНИИЭФ

Применение мощных лазеров для исследования реологических свойств веществ

В.Г. Рогачев

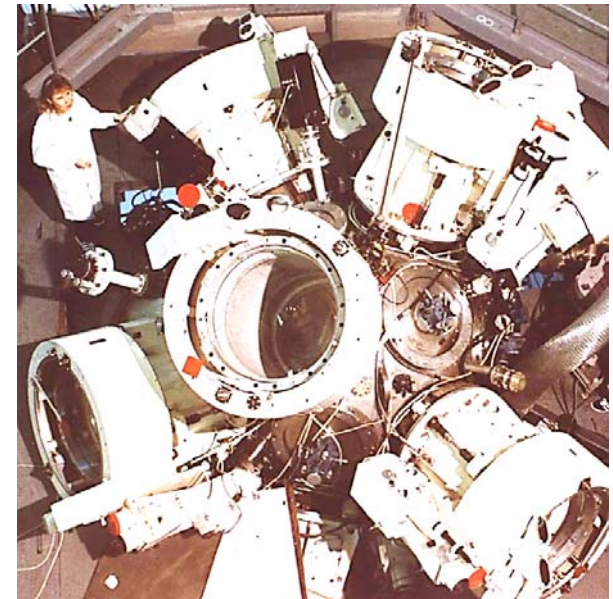
XIII Забабахинские научные чтения, Международная конференция, Снежинск, Россия, 20 – 24 марта, 2017 г.

- ✓ Рассмотрены постановка и результаты ряда экспериментов на лазерных установках РФЯЦ-ВНИИЭФ по исследованию реологических свойств веществ.
- ✓ Основное внимание уделяется экспериментам при низких потоках лазерного излучения, когда в мишени формируются ударные волны относительно слабой интенсивности. Исследуется динамика затухания ударных волн и формирование отколов.
- ✓ Рассмотрена возможность лазерного моделирования разрушающего воздействия превентивного ядерного взрыва на опасные астероиды.
- ✓ С помощью лазерных экспериментов с микро макетами каменных астероидов (хондритов) определены критерии заведомого разрушения астероидов контактным взрывом.

Лазерная установка ИСКРА-5



**Внешний вид здания установки
ИСКРА-5**



**Двенадцати лучевая
сферическая камера \varnothing 2 м**

**12-канальный фотодиссоциационный йодный лазер с $\lambda=1.315$ мкм;
Энергия ЛИ в первой гармонике – до 30кДж
Длительность импульса – 0.4 нс
Мощность – до 100 ТВт**

Лазерная установка ЛУЧ



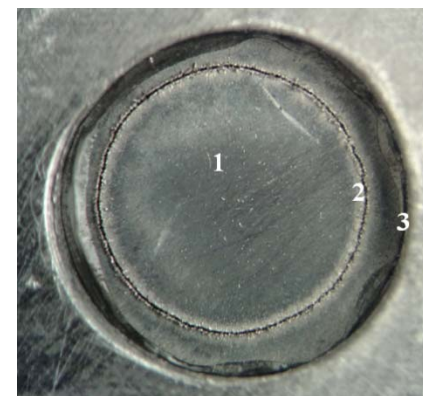
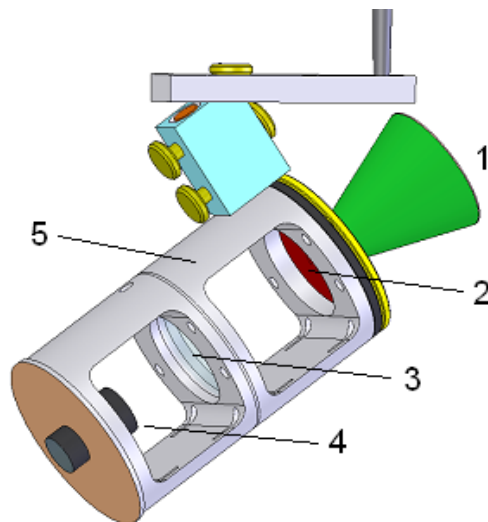
*Твердотельный ND лазер
 $\lambda = 1054$ нм
Каналов усиления – 4
Пучок – 20x20 см
Длительность - 2-4 нс
Энергия в канале – 3-3.3 кДж
Энергия в 2ω - 2кДж
Работает свыше 15 лет*



**4-х каналный
усилительный модуль**

- Уравнения состояния веществ при давлениях до 70 Мбар
- Пробеги мягкого РИ при температурах до 50 эВ
- Перенос мягкого рентгеновского излучения
- ГД неустойчивости и турбулентное перемешивание
- Перенос лазерного излучения в замкнутых полостях
- Поглощение и отражение ЛИ при потоках $10^{11} - 10^{14} \text{ W/cm}^2$
- Способы повышения симметрии лазерного излучения
- Физика замагниченной плазмы
- Физика работы мишеней ЛТС прямого облучения
- Физика работы рентгеновских мишеней ЛТС
- Неравновесные процессы в мишенях с обращенной короной
- Процессы при умеренных потоках ЛИ

Исследование реологических свойств веществ на установке ЛУЧ



Фотография и эскиз мишенного узла

- 1 – луч мощного лазерного излучения;
- 2 – тыльная сторона облучаемой мишени;
- 3 – экран защиты коллиматора;
- 4 – коллиматор PDV;
- 5 – корпус мишенного узла

Фотография исходного состояния тыльной поверхности мишени

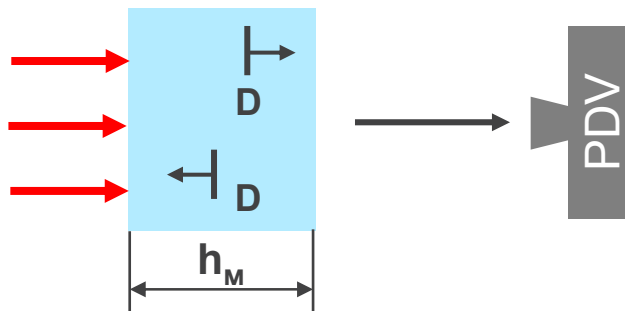
- 1 – полированная поверхность мишени;
- 2 – круговая канавка, уменьшающая влияние краевого эффекта при отколе;
- 3 – граница отверстия в корпусе

Photon Doppler Velocimetry (PDV) - Лазерный оптогетеродинный метод регистрации скорости движения

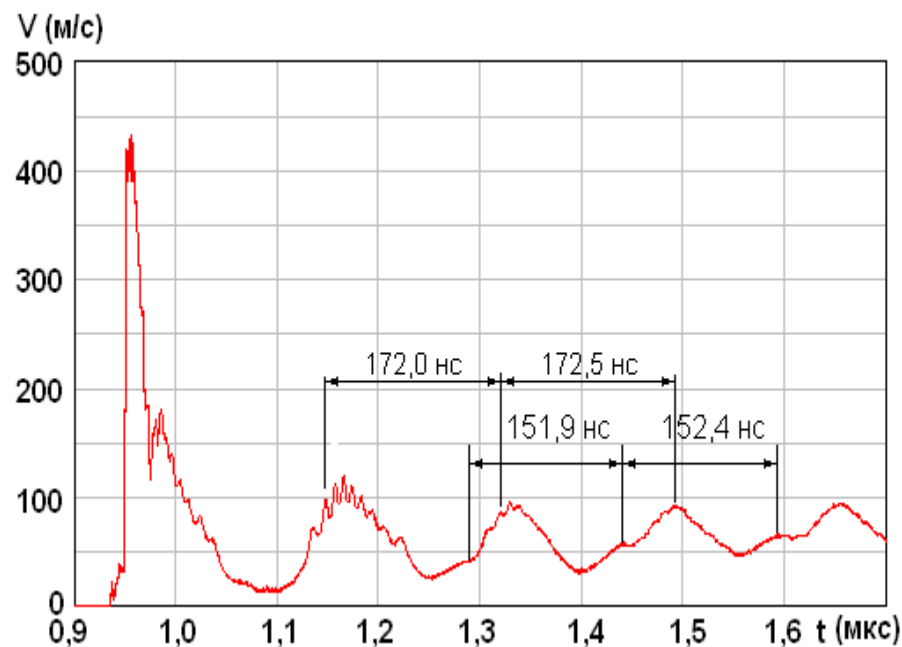
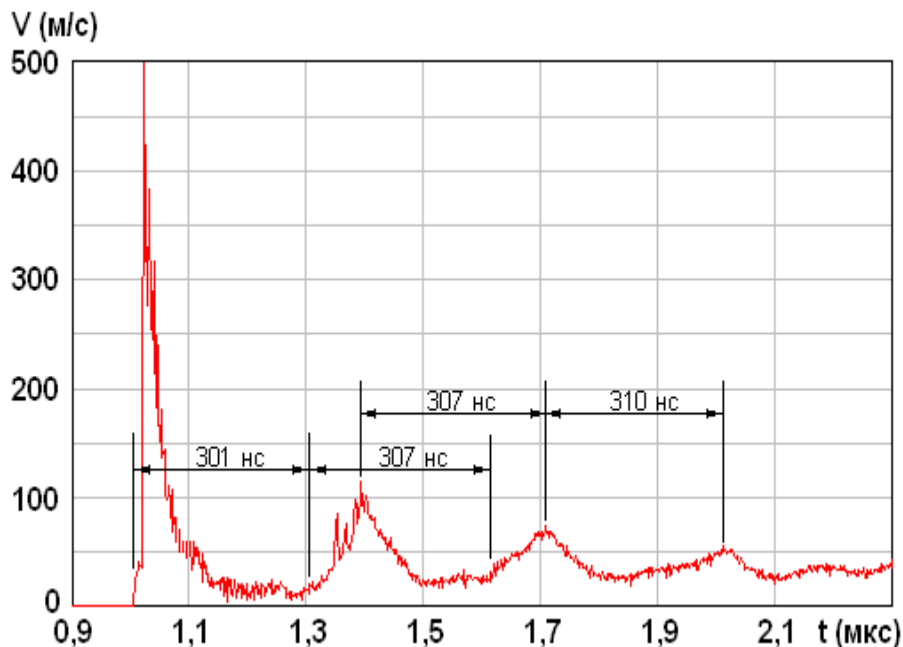
Звуковые волны в сплаве AL1060 (отколы отсутствуют)



$h_M = 975 \pm 1 \mu\text{m}$
 $Q_{\text{ли}} = 107 \pm 16 \text{ J}$
 $\tau_{\text{ли}} = 5.0 \pm 0.3 \text{ ns}$
 $S_{\text{ли}} = 9.5 \pm 0.9 \text{ mm}^2$
 $\tau = 308.5 \pm 2 \text{ ns}$
 $D = 6.32 \text{ km/s}$

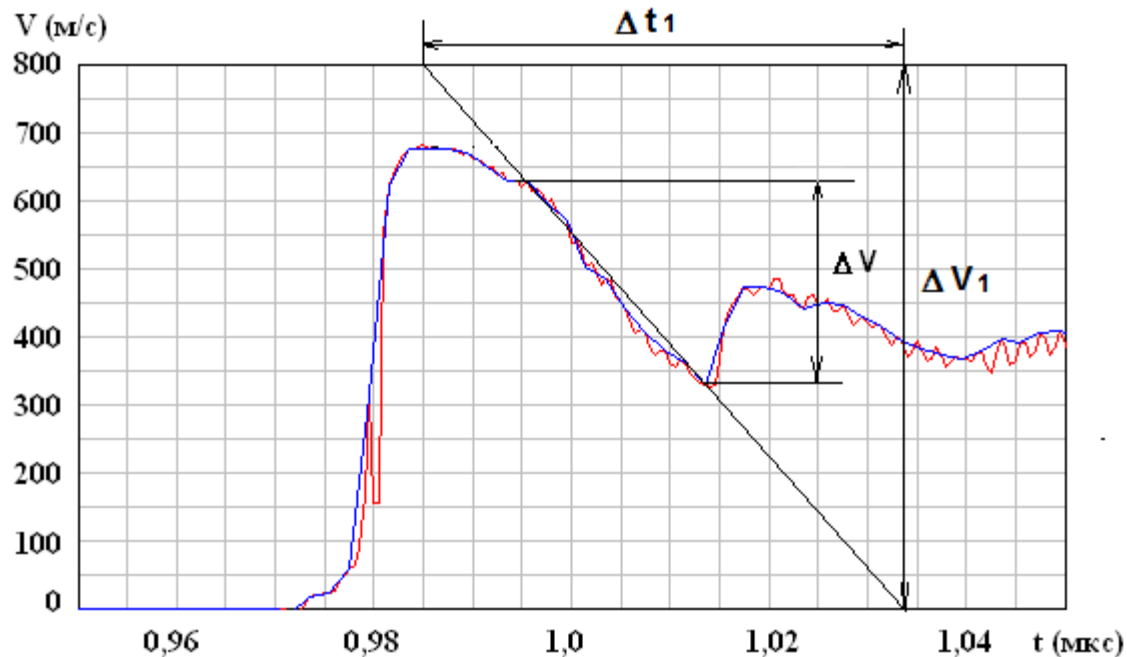


$h_M = 515 \pm 1 \mu\text{m}$
 $Q_{\text{ли}} = 86 \pm 13 \text{ J}$
 $\tau_{\text{ли}} = 4.5 \pm 0.1 \text{ ns}$
 $S_{\text{ли}} = 9.5 \pm 0.9 \text{ mm}^2$
 $\tau = 172.2 \pm 1 \text{ ns}$
 $D = 5.98 \text{ km/s}$



Скорость движения тыльной поверхности плоской мишени из сплава AL1060 в зависимости от времени. Затухание слабых ударных (звуковых) волн.

Измерение скорости движения тыльной поверхности мишени



Влияние интервала усреднения в преобразовании Гильберта на результат численной обработки осциллограммы PDV: $\Delta\tau = 125$ пс – красный цвет; $\Delta\tau = 2000$ пс – синий цвет.

Высокочастотные осцилляции обусловлены зернистостью материала с размером зерен 50 – 100 мкм.

Отколы в сплаве AL1060 (Эксперименты на установке ЛУЧ)

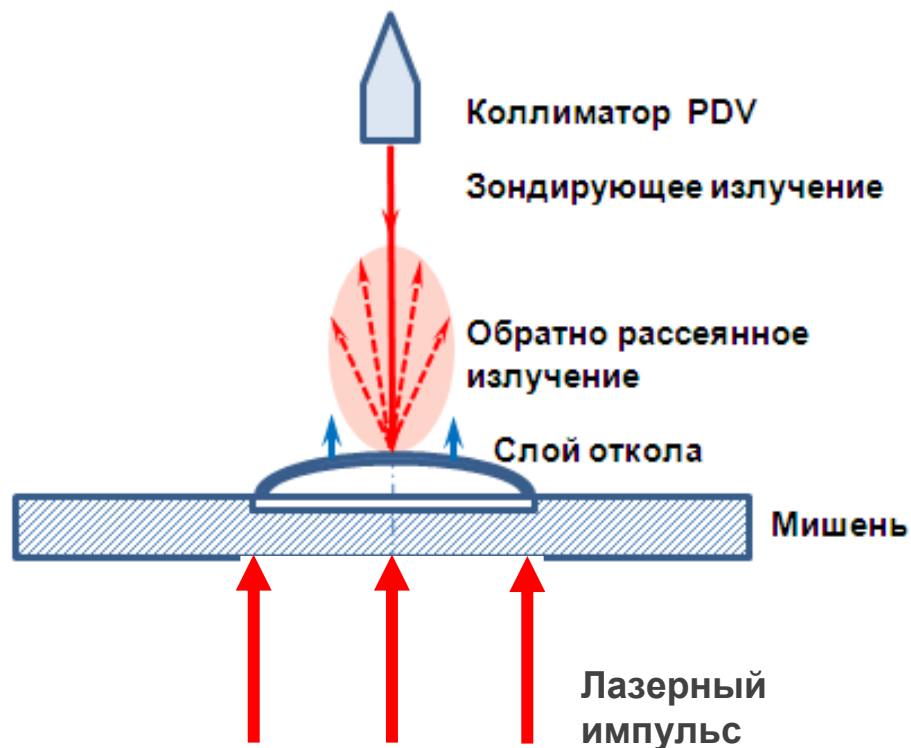
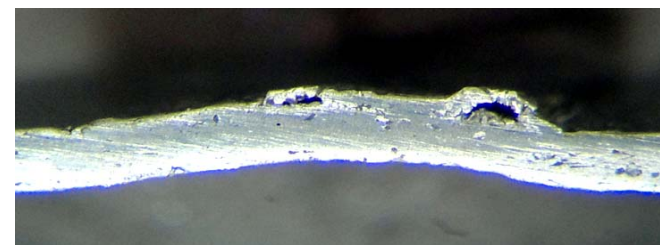


Схема эксперимента
на установке ЛУЧ
(плоский лайнер)

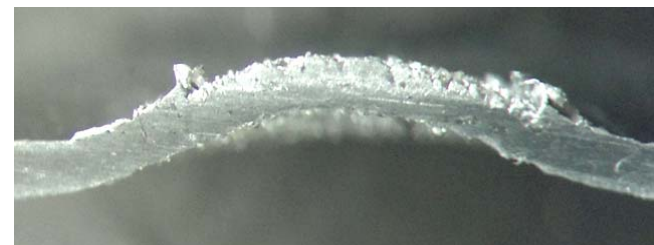
Фотографии поперечных разрезов мишеней



нет откола



скрытый откол



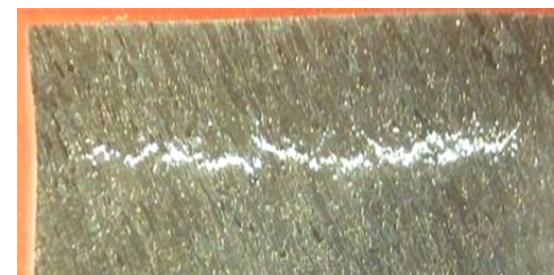
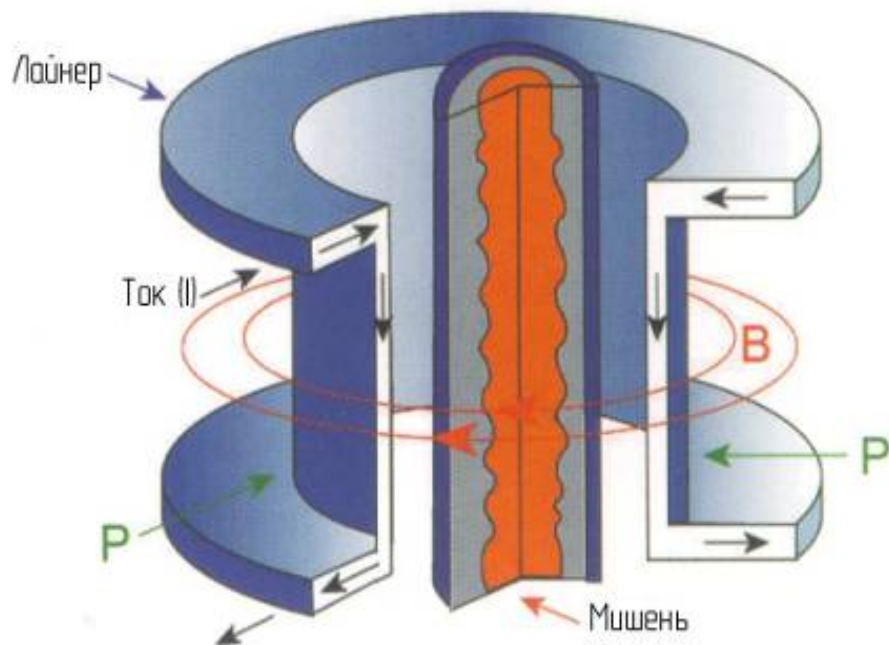
полный откол

Отколы в сплаве AL1060 (Электрофизические эксперименты с МК-генераторами)



цилиндрический лайнер

Схема нагружения



зарождение откола



полный откол

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2013, том 448, № 3, с. 285–288

ФИЗИКА

УДК 539.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2013 г. В. А. Васюков, А. М. Глыбин, П. В. Дудай, В. И. Дудин, А. А. Зименков,
В. А. Иванов, А. В. Ивановский, А. И. Краев, А. И. Кузьев, С. С. Надежин,
А. А. Петрухин, А. Н. Скобелев, О. А. Тюпанова, W. L. Atchison, D. B. Holtkamp,
A. M. Kaul, R. E. Reinovsky, G. Rodrigues, L. J. Tabaka, C. L. Rouscalp,
J. B. Stone, D. M. Oro, M. Salazar, J. R. Griego, J. R. Payton, D. T. Westley

Представлено академиком Р.И. Ильяевым 30.03.2012 г.

Поступило 18.07.2012 г.

Прочностные свойства сплавов алюминия (сравнение результатов)



Цель: Расширение диапазона экспериментальных данных по свойствам различных материалов

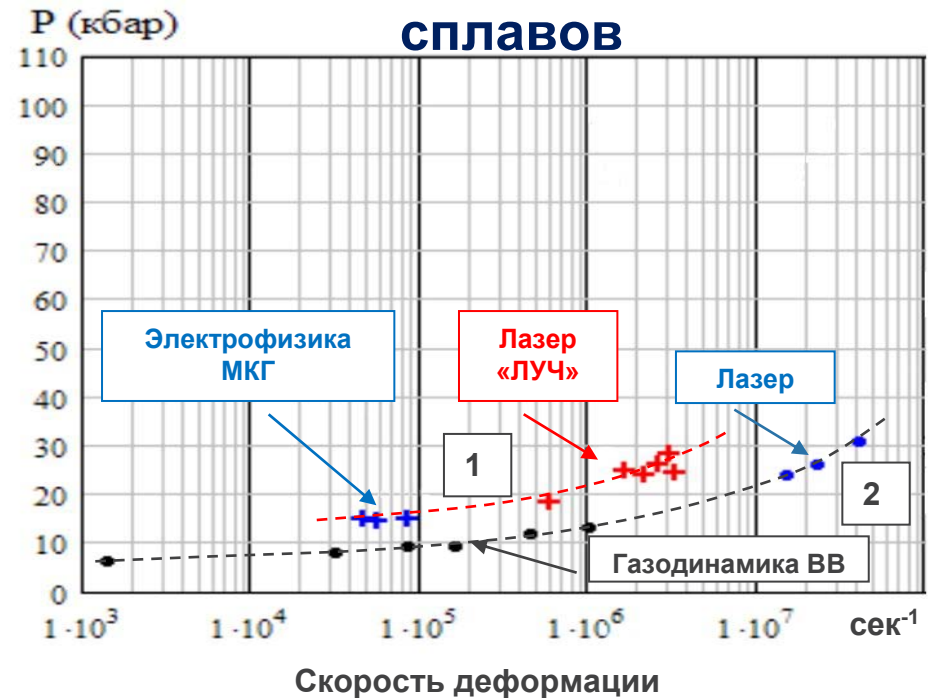
Методы: Импульсное лазерное и электрофизическое нагружение лайнеров из исследуемых материалов

Особенности: Взаимная верификация, методов, масштабный фактор, расширенный диапазон параметров воздействия

Текущий этап: Отработка методов и их оптимизация

Ожидаемые результаты: Создание экспериментальной базы свойств материалов для технологий импульсной обработки

Измерение откольной прочности алюминиевых сплавов



1 – нано дисперсный алюминий AL1060.

2 – алюминиевый сплав АМг6М –

А.И. Бушман, Г.И. Каннель, А.Л. Ни, В.Е. Фортов, «Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий», Черногловка, 1988г.

Калибровка методики PDV в экспериментах на установке ЛУЧ

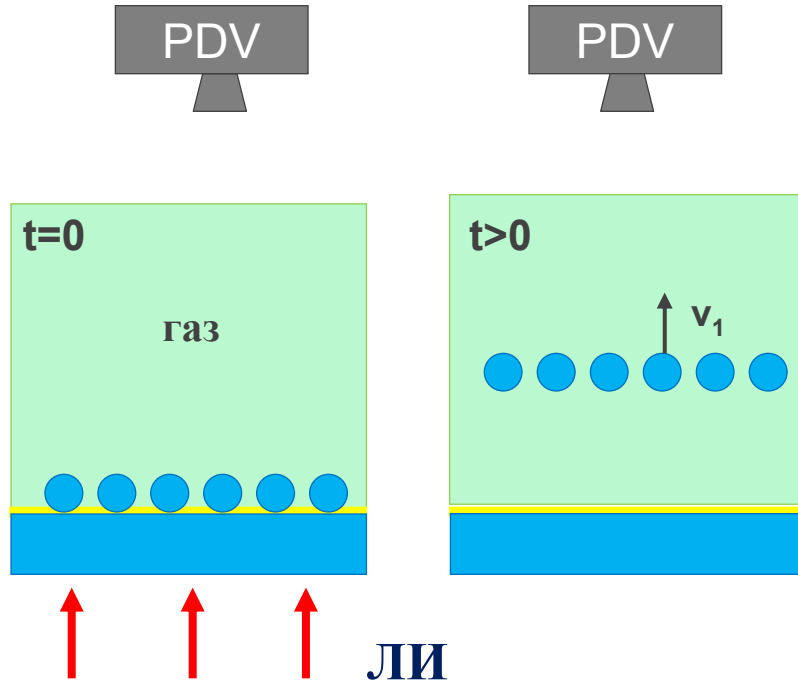
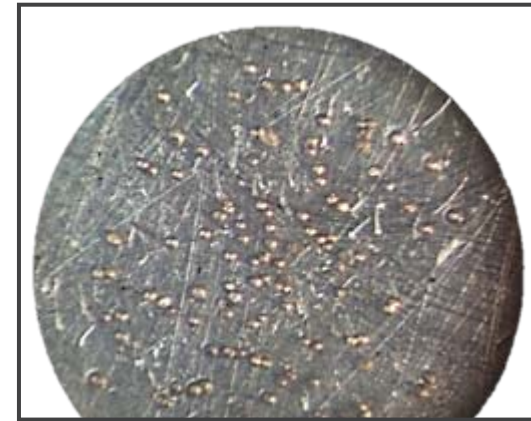


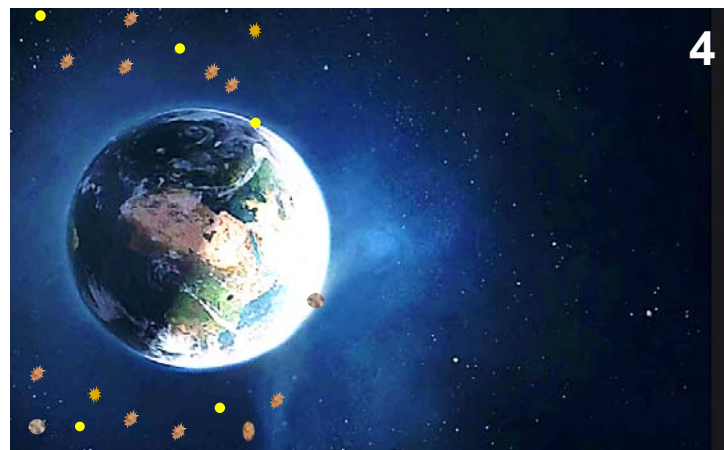
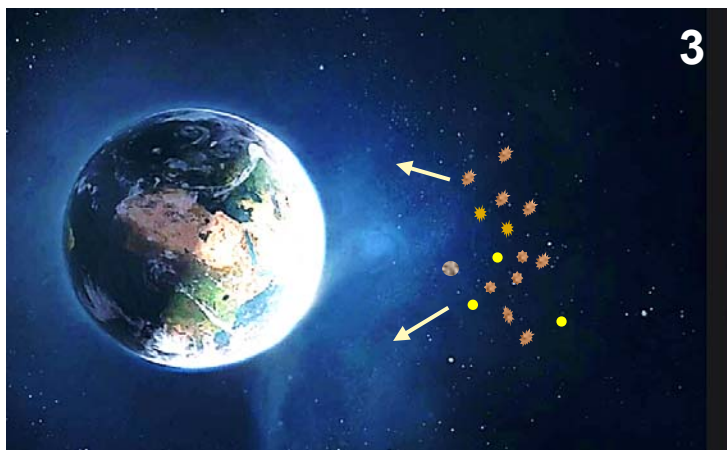
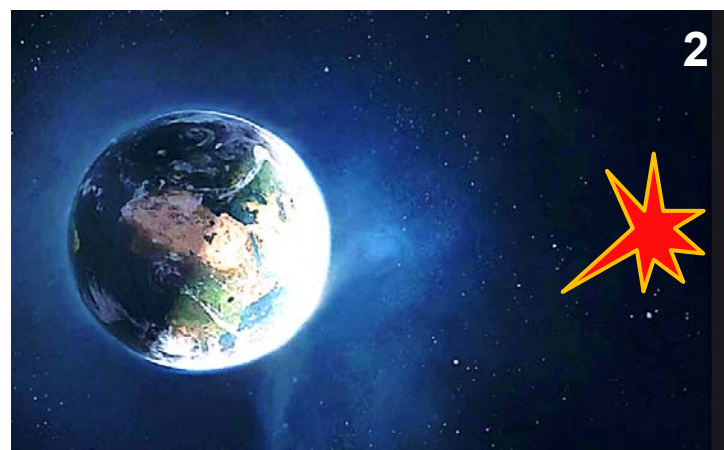
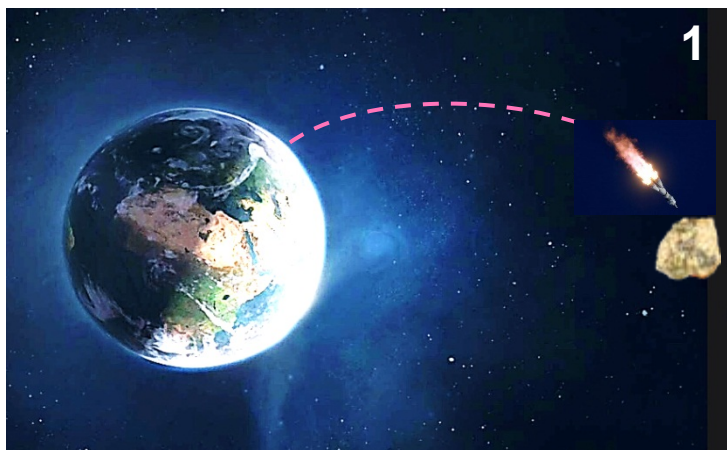
Схема опыта



Экспериментальный образец свинцовой мишени с шариками

Торможение слоя шариков $\varnothing \sim 100\mu\text{m}$ в газе; $\Delta p < \sigma_{\text{проч.}}$

Астероидная безопасность



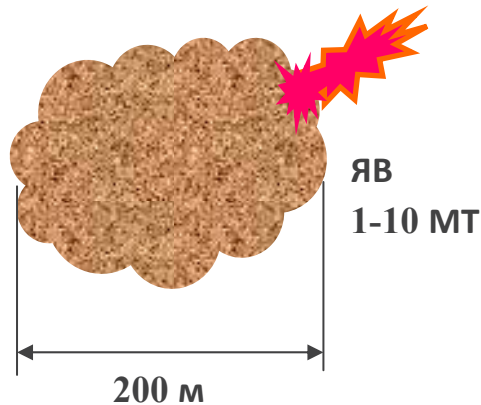
Астероид раздроблен ядерным взрывом на мелкие части, разлетающиеся на большое расстояние. Устранение катастрофы.

Оценка условий применения ядерной защиты:

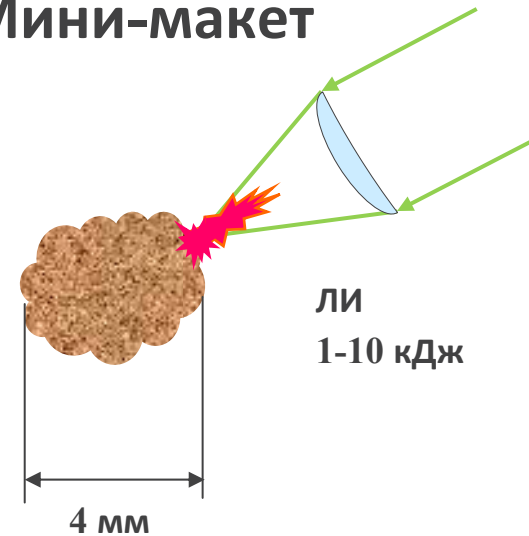
- Если скорость разлета осколков астероида при дроблении составляет $V_{\text{оск}} \sim 10$ м/с, а типичная скорость сближения астероида с Землей $V_{\text{аст}} \sim 20\,000$ м/с, то для разведения осколков на безопасное расстояние большее радиуса Земли $R_3 = 6400$ км потребуется произвести ЯВ на расстоянии $L = R V_{\text{аст}} / V_{\text{оск}} \sim 13$ млн. км.
- При скорости ракеты $V_{\text{рак}} \sim 10\,000$ м/с она должна стартовать за время $t = L / V_{\text{рак}} \sim 15$ дней до прилета астероида.
- На этот момент времени астероид будет находиться на удалении $L_1 = L (V_{\text{аст}} + V_{\text{рак}}) / V_{\text{рак}} \sim 39$ млн. км от Земли.
- На всем этапе полета должна обеспечиваться высокая точность навигации с тем чтобы обеспечить контролируемый эффект устранения угрозы.

- Предложен и реализован способ моделирования разрушающего воздействия мощного ядерного взрыва на астероиды, основанный на принципах физического и геометрического подобия
- Предлагается заменить астероид диаметром в сотни метров его моделью из вещества того же состава и физических свойств диаметром несколько миллиметров. Выделение энергии ЯВ (мегатонны) на поверхности астероида заменить импульсным выделением лазерной энергии (сотни джоулей) на малой площадке поверхности модели.
- Характер воздействия и разрушения будут физически приближенно подобны в натурном и модельном случаях, если соблюсти равенство отношений энергии взрыва (лазерного импульса) к массе астероида (модели).
- С использованием принципа физического подобия на лазерной установке ИСКРА-5, ЛУЧ проведена экспериментальная оценка критерия разрушения каменного астероида ядерным взрывом на его поверхности.

Астероид



Мини-макет



Крупные каменные астероиды (80-90% от общего числа) хрупки и имеют низкий порог разрушения – 0.05-0.1 кбар, что позволяет рассчитывать на эффективное дробление астероидов ЯВ.

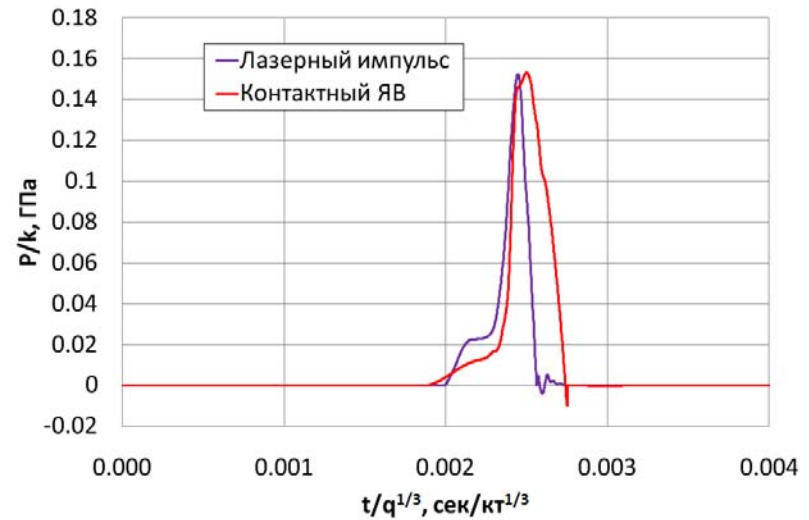
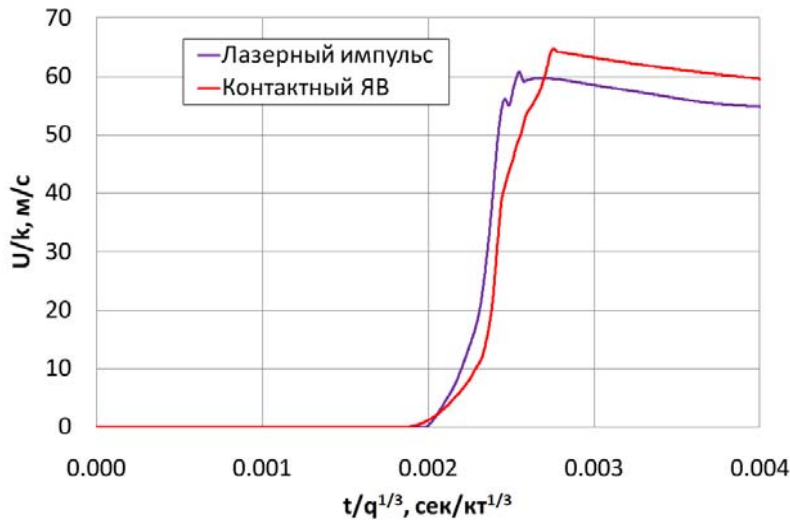
Ключевым критерием физического подобия процессов в натуральных и модельных условиях является равенство отношений энергии воздействия к массе объекта.

Астероидная безопасность (2D расчетное подтверждение подобия)

т. наблюдения



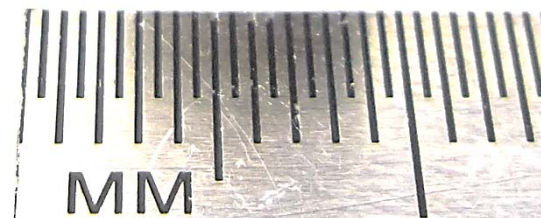
схема расчетов



Пример зависимости нормированных величин массовой скорости и давления от приведенного времени в указанной точке наблюдения.



Осколок Челябинского астероида весом ~ 0.5 т (исходный вес ~ 10000 т)



Мини-макет каменного астероида весом ~ 1 г, изготовленный во ВНИИЭФ

Астероидная безопасность

(о технологии создания искусственных астероидов)



1. Химический состав искусственного хондрита:

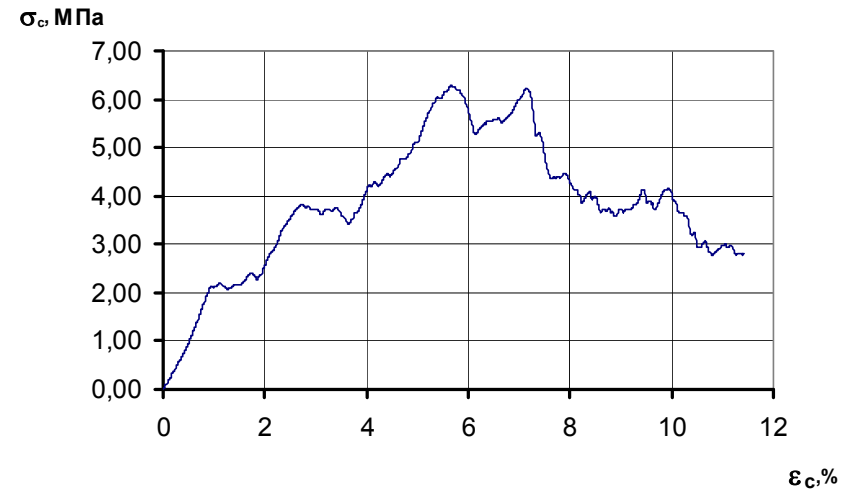
SiO_2 – 40%
 FeS – 6%
 MgO – 26%
 Fe_2O_3 – 18%

2. Степень дробления исходных материалов: 1 – 20 - 800 мкм.

3. Изготовлены партии астероидов с различными максимальными напряжениями сжатия:

65 кгс/см²
225 кгс/см²
900 кгс/см²
1341 кгс/см²

4. Максимальное напряжение растяжения на порядок меньше



Типичная диаграмма сжатия образца искусственного астероидного материала. Максимальное напряжение $\sigma_{сж} = 6,3$ МПа (64 кгс/см²), и деформация $\epsilon_{сж} = 5,5$ %.

Астероидная безопасность

(постановка экспериментов на установке ЛУЧ)

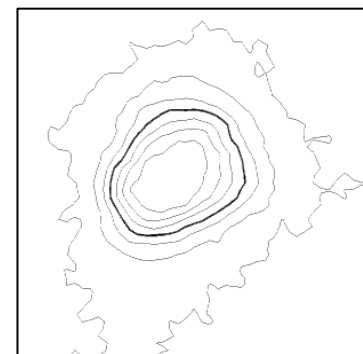
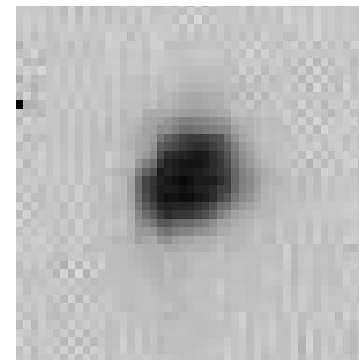
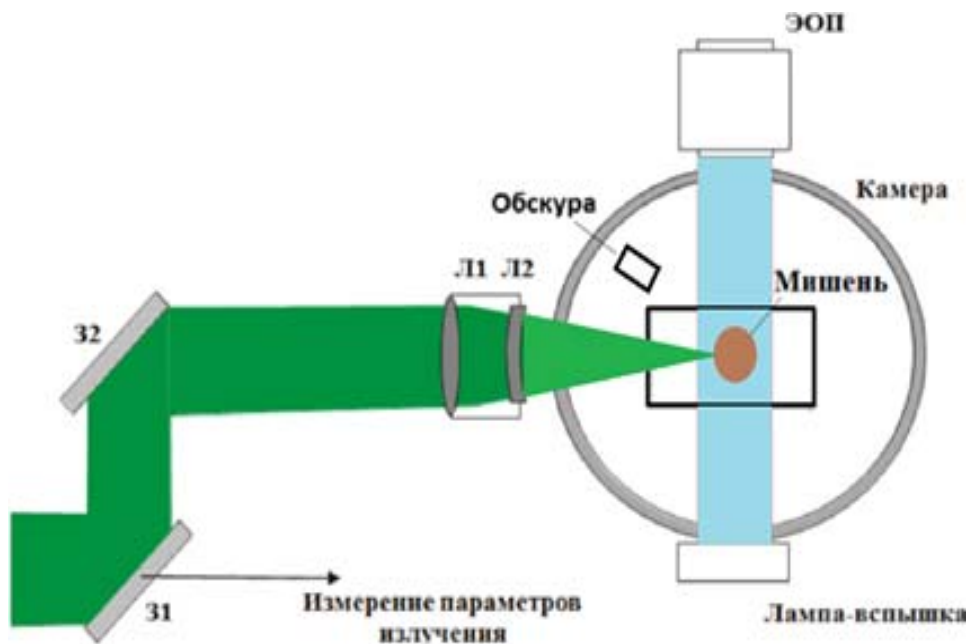


Схема стенда

31, 32 – зеркала, Л1, Л2 – линзы,
ИЭОП – импульсный электронно-
оптический преобразователь.

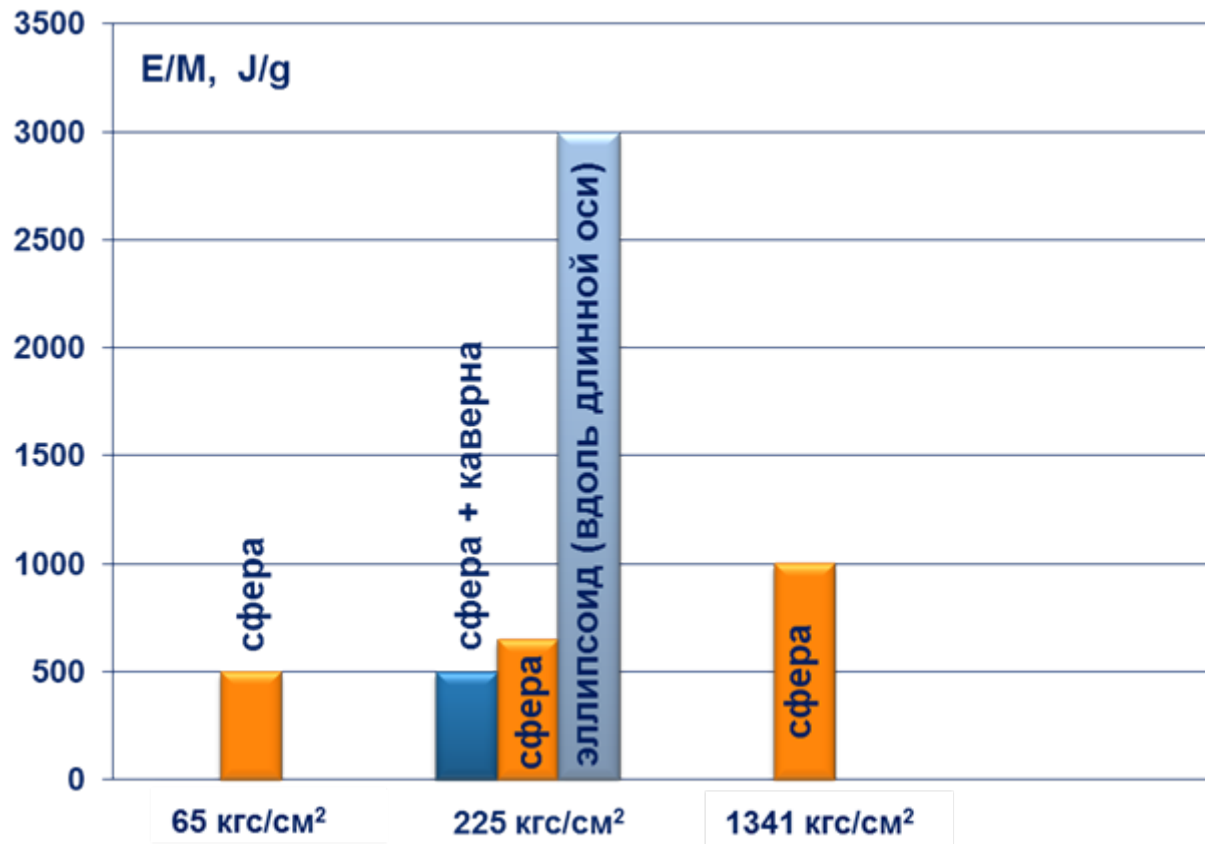
$\lambda = 0.527$ мкм, $E_{\text{лаз}} = 100 \div 500$ Дж,

$\tau_{0,5} = 1.4 \div 2.2$ нс.

Рентгеновская обскура пятна и
изолинии распределения
интенсивности в типичном
эксперименте, $d_{\text{ЭКВ.}} = 129$ мкм.

Астероидная безопасность

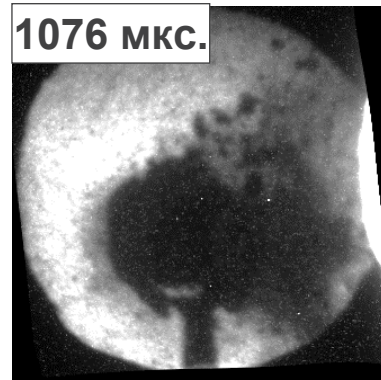
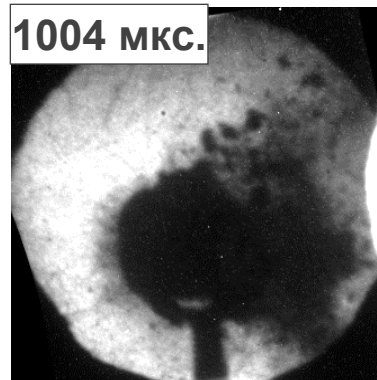
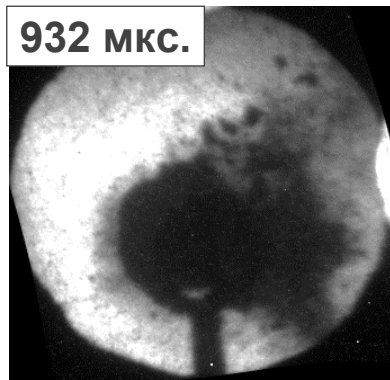
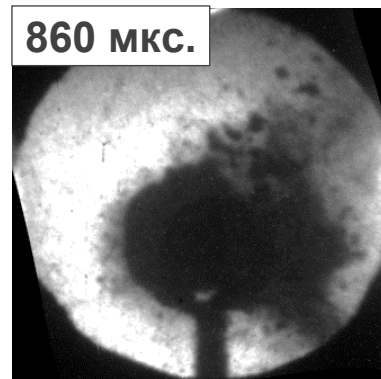
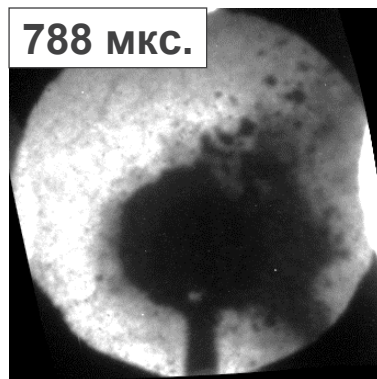
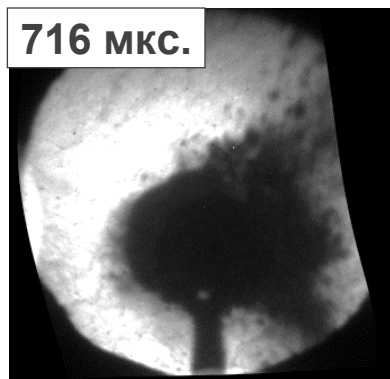
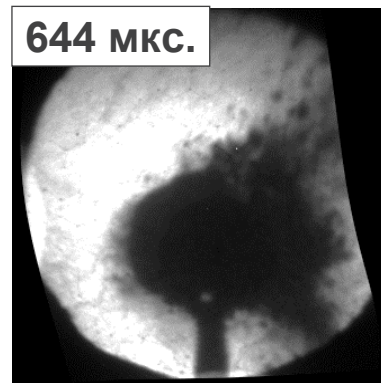
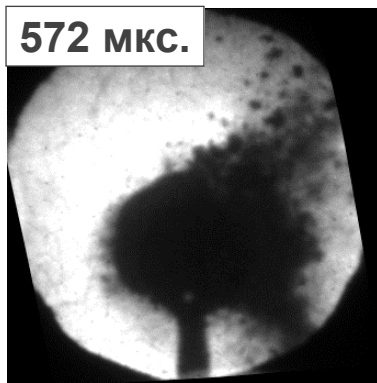
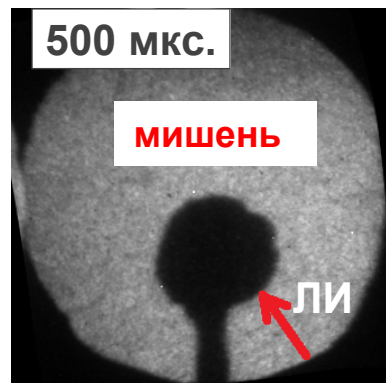
(Результаты экспериментов на установке ЛУЧ)



Зависимость критерия разрушения макета астероида от его формы и прочности на сжатие

Астероидная безопасность

(разлет осколков мишени на установке ЛУЧ)



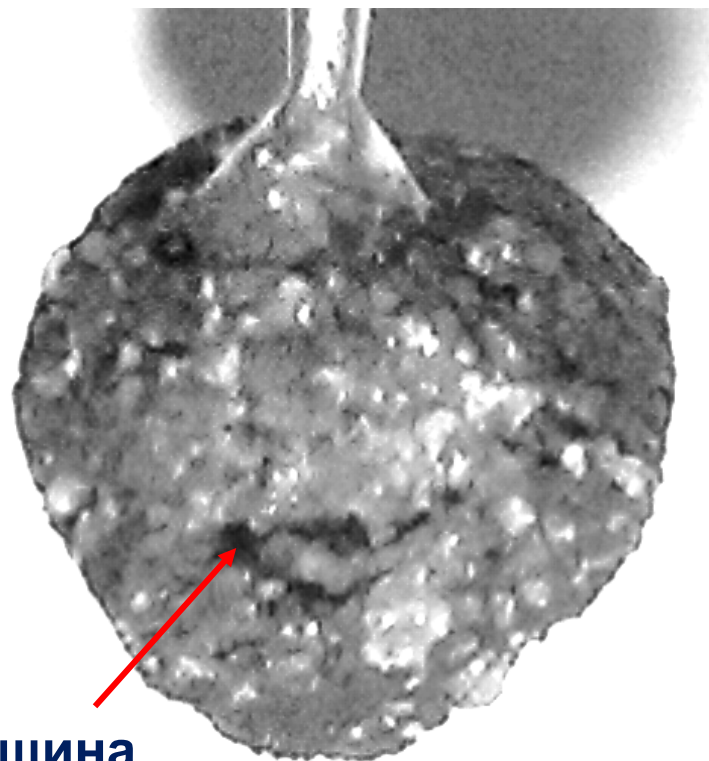
Типичная динамика разлёта осколков от мишени в опыте 05.02.15.

Начало съёмки – 500 мкс. после облучения мишени.

Фотографии мишени \varnothing 8 мм в лазерном эксперименте на установке ИСКРА-5 (на пороге разрушения)



до опыта



трещина

после опыта

Астероидная безопасность (лазерное моделирование, ИСКРА-5)



мишень \varnothing 8 мм
после эксперимента



Осколки мишени \varnothing 4 мм,
собранные после эксперимента

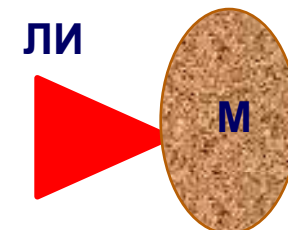
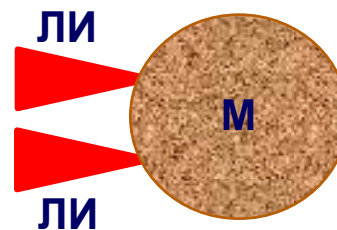
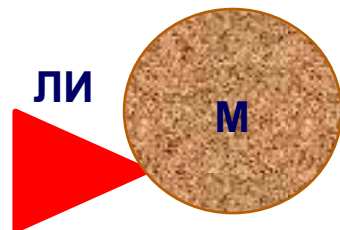
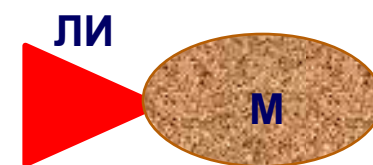
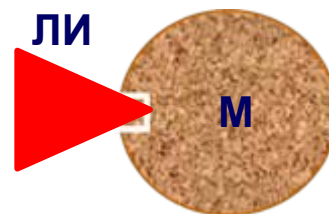
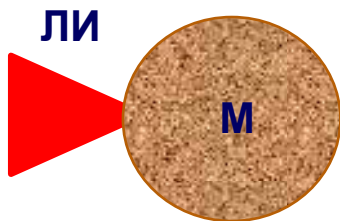
Астероидная безопасность

(вариация постановки лазерных экспериментов)



Для определения критериев заведомого разрушения астероидов ядерным взрывом проведены лазерные эксперименты:

- с вариацией размеров, формы и места энерговыведения
- с вариацией структуры гетерогенности вещества
- с моделями каменных астероидов различной прочности
- с натуральным астероидным веществом
- с имитацией заглубленных взрывов

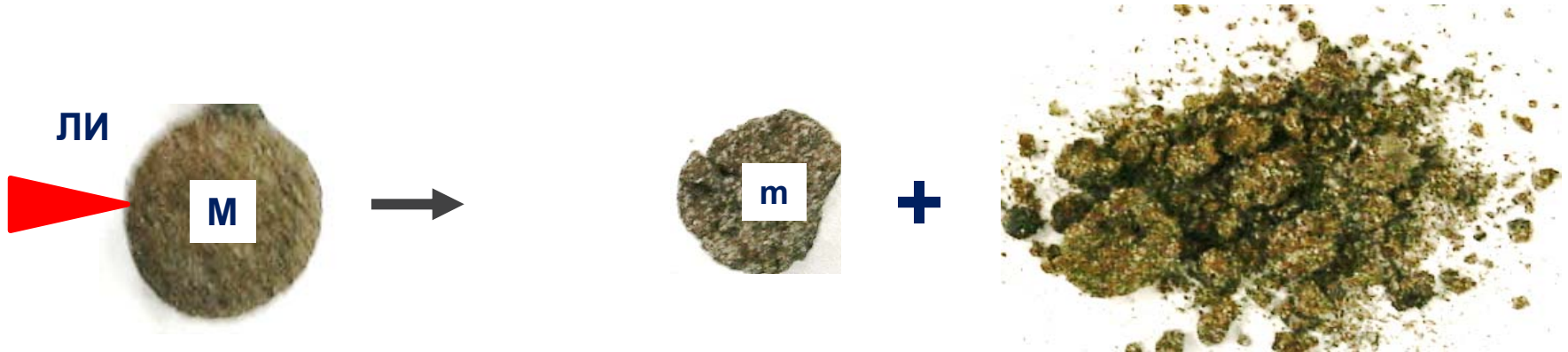


Астероидная безопасность

(лазерное моделирование, ЛУЧ, сфера, $\sigma_{сж} = 225 \text{ кгс/см}^2$)



29.09.2015 E/M= 500 Дж/г. Частичное разрушение. Осколок с тыльной стороны $m = 0.35 \cdot M$



23.09.2015 E/M= 750 Дж/г. Особо крупные осколки отсутствуют



Астероидная безопасность

(лазерное моделирование, ЛУЧ, сфера, $\sigma_{сж} = 1341 \text{ кгс/см}^2$)



21.07.2015 E/M=740 Дж/г. Частичное разрушение. Осколок с тыльной стороны $m = 0.75 \cdot M$



22.07.2015 E/M=1100 Дж/г. Особо крупные осколки отсутствуют



Астероидная безопасность

(лазерное моделирование, ЛУЧ, **эллипсоид** $\sigma_{сж} = 225 \text{ кгс/см}^2$)



22.01.2016 E/M=1300 Дж/г. Частичное разрушение. Осколок с тыльной стороны $m = 0.45 \cdot M$



03.02.2016 E/M= 2900 Дж/г. Частичное разрушение. Осколок с тыльной стороны $m = 0.23 \cdot M$



03.02.2016 E/M= 3000 Дж/г. Отсутствуют крупные осколки



Астероидная безопасность

(выводы)



- Прямые численные расчеты количественно подтверждают наличие рассматриваемого подобия
- Заведомое разрушение астероида происходит при отношении энергии ЯВ к массе большем 1000 - 3000 Дж/г
- Пересчет на натурные условия результатов лазерных экспериментов показывает, что ЯВ с энергией ~ 6 Мт заведомо разрушит каменный астероид диаметром 200 м
- Порог заведомого разрушения повышается для астероидов вытянутой формы
- Характерная скорость разлета макроскопических осколков в натурном и модельном случаях одинакова и составляет $V_{\text{оск}} \sim 4,5 \div 15$ м/с

1. Л.В. Альтшулер, С.А. Новиков, И.И. Дивнов, «Связь критических разрушающих напряжений со временем разрушения при взрывном нагружении металлов», ДАН СССР, т. 166, №1, 1966.
2. А.И. Бушман, Г.И. Каннель, А.Л. Ни, В.Е. Фортов, «Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий», Черноголовка, 1988г.
3. В.А. Васюков, А.М. Глыбин, П.В. Дудай, А.В. Ивановский, R.E. Reinovsky и др. «Исследование реологических свойств алюминия с применением взрывомагнитных генераторов», Доклады Академии Наук, 2013, том 448, №3, с. 285-288.
4. В.Г. Рогачев, «Физическое подобие, лабораторное моделирование, лазеры, астероиды», Международная конференция « 18-е Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии», 2016, Саров.



РОСАТОМ

РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР ВНИИЭФ

Спасибо за внимание!