

Расчётно-теоретическая проработка экспериментов по изоэнтропическому сжатию тяжёлых элементов на мощных лазерных установках

Работа

Младшего научного сотрудника ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ

Михеева Константина Евгеньевича

Научный руководитель: Гнутов Артём Сергеевич

Физика высоких плотностей энергии

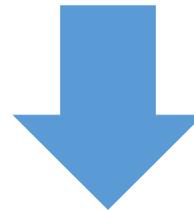
Области физики высоких плотностей энергии

← Строение планет и звёзд

↓
Управляемый термоядерный
синтез

→ Мощные взрывные волны

В физике высоких плотностей энергии крайне важно моделирование происходящих процессов, однако теоретические модели уравнений состояния вещества (УРС) в области высоких давлений и температур дают неточные результаты



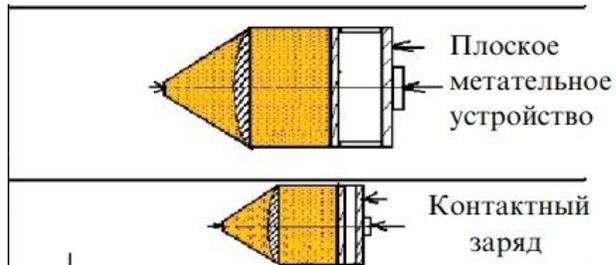
Большую важность имеет экспериментальное изучение уравнений состояния веществ при высоких давлениях и температурах. Полученные в них данные помогают уточнить теоретические модели

Способы экспериментального определения УРС

Взрывные эксперименты

Исследуемое возмущение: ударная адиабата

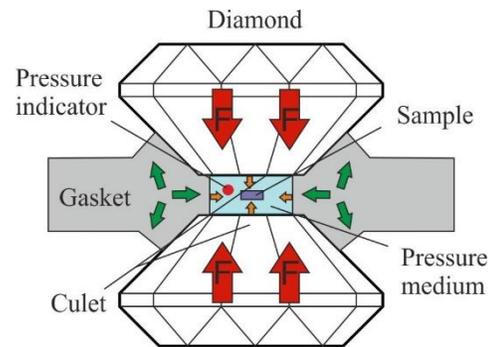
Максимальные давления: сотни гигапаскалей (потенциально возможны давления в несколько терапаскалей)



Алмазная наковальня

Исследуемое возмущение: изоэнтропическое сжатие

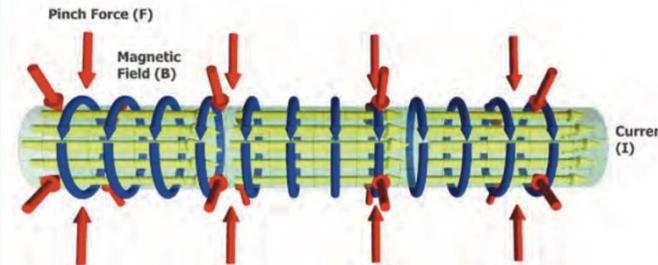
Максимальные давления: сотни гигапаскалей



Z-пинч

Исследуемое возмущение: ударная адиабата и изоэнтропическое сжатие

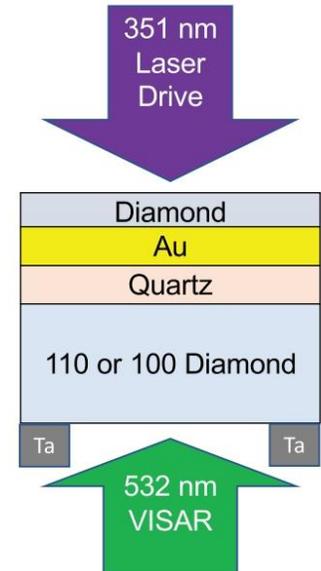
Максимальные давления: единицы терапаскалей



Лазерные установки

Исследуемые возмущения: ударная адиабата и изоэнтропическое сжатие

Максимальные давления: десятки терапаскалей



Развитие лазерных установок

Первые лазерные системы
Энергии: 10-ки Дж – 1-цы кДж
Примеры: Long path, Janus,
Дельфин, Искра -4

1970-е годы

Дальнейшее развитие
лазерных систем
Энергии: 10-ки кДж Примеры:
Примеры: Shiva, Nova,
OMEGA, Искра – 5, ГЕККО
ХII (Япония)

Конец 1970-х – начало 1990-х

Современное состояние
Энергии: 100-ни кДж – 1-цы
МДж
Примеры: NIF, LMJ (Франция),
Лазерная установка в городе
Саров

Конец 2000-х – наше время

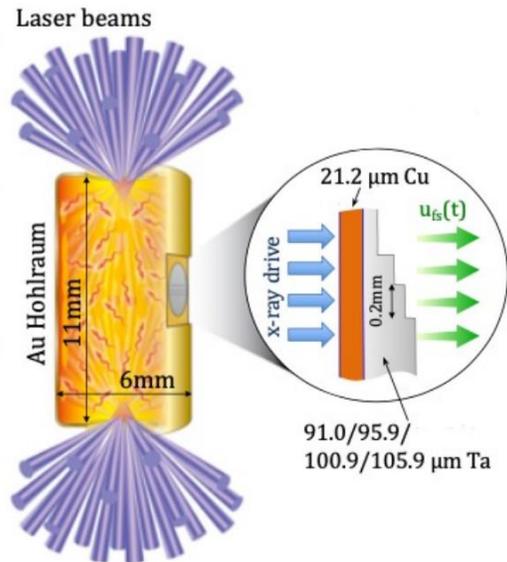
На сегодняшний момент наносекундные лазерные системы с большими энергиями импульса активно развиваются и являются наиболее востребованными установками для изучения УРС в области высоких давлений и температур. В России данное направление развивается в РФЯЦ – ВНИИЭФ на лазерной установке, расположенной в городе Саров. На данный момент выведение её на проектную мощность планируется к 2030 году.

Исследование изоэнтропического сжатия

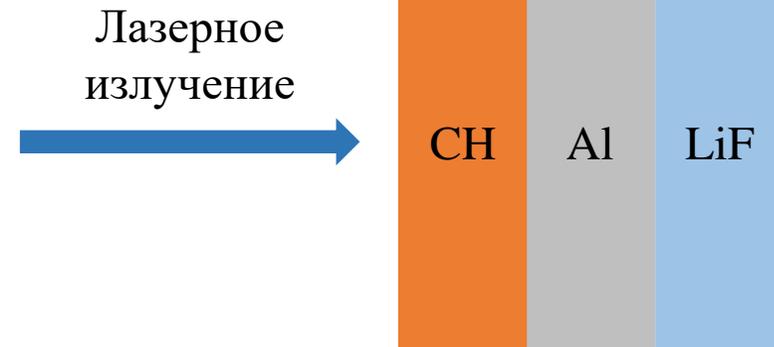
Изоэнтропическое сжатие – плавное сжатие материала, при котором энтропия системы не изменяется. Для такого типа сжатия используются длинные лазерные импульсы длительностью порядка единиц десятков наносекунд

При изоэнтропическом сжатии отсутствует предел сжатия по объёму в отличие от ударноволнового сжатия, где предел сжатия по объёму определяется количеством степеней свободы

Изоэнтропическое сжатие материала через конверсию лазерного излучения в рентгеновское



Изоэнтропическое сжатие материала прямым облучением мишени лазерным излучением

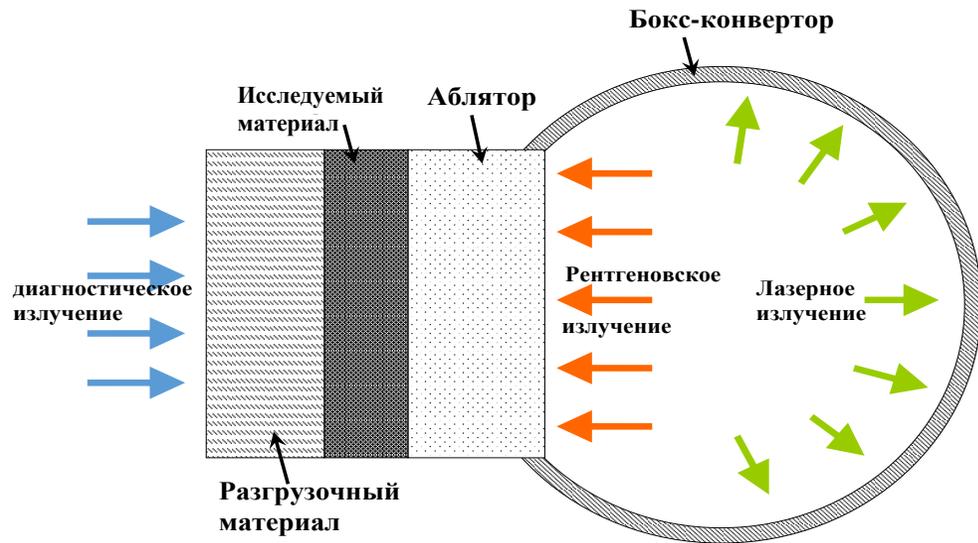


Важным направлением является исследование изоэнтропического сжатия золота, которое является важным эталоном для исследования тяжёлых элементов, а также основным материалом для хольраумов

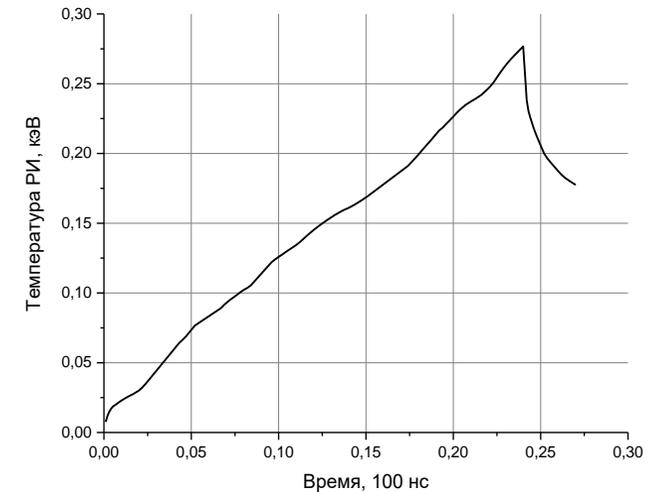
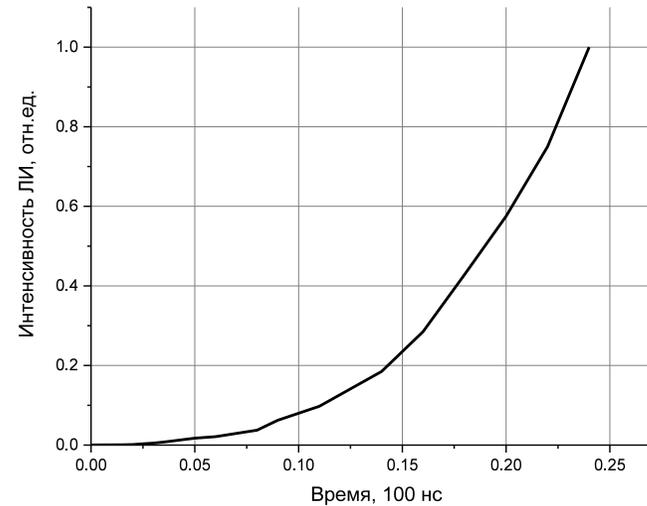
Моделирование изоэнтропического сжатия золота

Цель работы: моделирование возможных экспериментов по изоэнтропическому сжатию золота на лазерной установке, расположенной в городе Саров. Данные эксперименты необходимы для уточнения уравнения состояния золота в области высоких давлений порядка 10 Мбар

Схема моделируемого эксперимента



Профиль полного лазерного импульса и соответствующего ему рентгеновского импульса



Основные параметры эксперимента:

- 1) длительность лазерного импульса
- 2) Радиус бокс-конвертора
- 3) Материал аблятора (выбрана медь)
- 4) Вид разгрузочного материала (LiF или хрусталь)
- 5) Толщины слоёв материалов

Для моделирования используется фиксированный профиль лазерного импульса, обрезаемый в нужный момент времени

Моделирование изоэнтропического сжатия золота

Проводилось одномерное моделирование с учётом газодинамики, переноса излучения, теплопроводности и взаимодействия излучения с веществом по изоэнтропическому сжатию золота до 10 и 20 Мбар. Моделирование было разбито на две подзадачи: взаимодействие лазерного излучения с бокс-конвертором и генерация рентгеновского излучения и взаимодействие сгенерированного рентгеновского излучения с мишенью

Изменяемые при моделировании параметры:

- 1) Длительность лазерного импульса
- 2) Вид разгрузочного материала
- 3) Радиус бокс-конвертора

Методика оценки требуемой энергии лазерного импульса:

- 1) Измеряется временной профиль температуры сгенерированного рентгеновского импульса
- 2) Интегрированием по формуле $E_{\text{РИ}} = \int_0^t S \sigma T^4 dt$ ищется его полная энергия
- 3) Учитывается коэффициент преобразования лазерного излучения в рентгеновское и потери из-за альбедо рассматриваемого бокс-конвертера

Параметры моделируемых экспериментов по сжатию до 10 Мбар

Разгрузочный материал	Радиус бокса, мм	Длительность импульса, нс	Достигаемое давление, Мбар	Требуемая энергия лазерного импульса, кДж
LiF	4	18	11.8	380
Хрусталь	4	16	10.6	230
LiF	3	18	11	210
Хрусталь	3	16	10	130

Параметры моделируемых экспериментов по сжатию до 20 Мбар

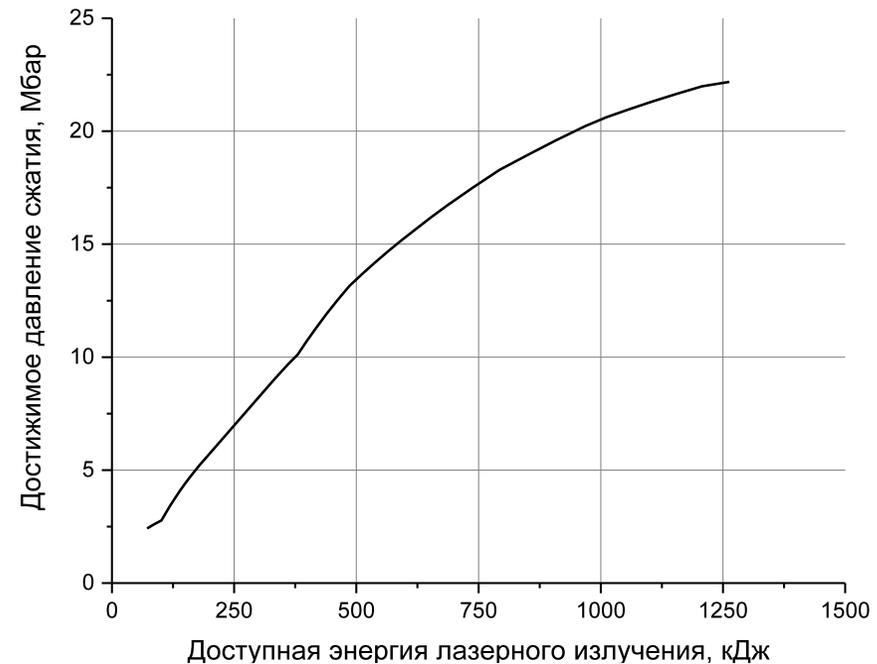
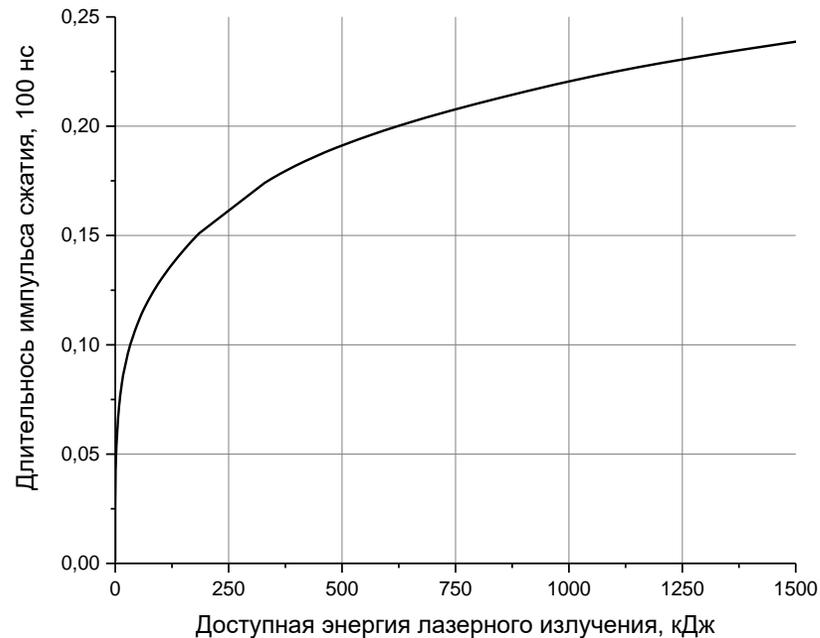
Разгрузочный материал	Радиус бокса, мм	Длительность импульса, нс	Достигаемое давление, Мбар	Требуемая энергия лазерного импульса, кДж
LiF	3	24	22	660
Хрусталь	3	22	20.8	460
LiF	4	24	21	1130
Хрусталь	4	22	19.8	840

Моделирование изоэнтропического сжатия золота

Результаты моделирования: были получены энергии импульса, необходимые для изоэнтропического сжатия золота до уровней давлений в 10 и 20 Мбар. В случае конвертера радиусом 3 мм и использовании LiF для достижения 11 Мбар потребуется 210 кДж, а для достижения 22 Мбар потребуется 660 кДж.

Результаты соотносятся с экспериментами на лазерной установке NIF, в которых для изоэнтропического сжатия золота до давления в 23 Мбар потребовалось 1500 кДж энергии в 30 наносекундном импульсе с использованием хольраума длиной 11 мм и диаметром 6 мм.

Параметры лазерного импульса и зависимость достигаемого давления от энергии лазерного импульса при использовании в качестве разгрузочного материала LiF



Моделирование изоэнтропического сжатия золота

Итоги работы:

- 1) Продемонстрирована модель для моделирования изоэнтропического сжатия через бокс-конвертор
- 2) Подобран лазерный импульс для изоэнтропического сжатия
- 3) Получены энергии лазерного импульса, необходимые для изоэнтропического сжатия золота до 10 и 20 Мбар
- 4) Показано влияние разгрузочного материала на результат сжатия
- 5) Сделаны выводы о требованиях к дальнейшему развитию мощной лазерной установки, расположенной в городе Саров

Дальнейшие планы:

- 1) Оптимизация профиля лазерного импульса
- 2) Проведение моделирования изоэнтропического сжатия других тяжёлых элементов, например платины
- 3) Постановка экспериментов и экспериментальная проверка расчётов