



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Динамические свойства конструкционных материалов. Методы нагружения и диагностики

26.02.2024

Кучко Д.П.
НИО-4, КБ-1

1 Актуальность



Для замыкания системы уравнений движения сплошной среды, используемой при математических расчетах различных конструкций/материалов, работающих при воздействии импульсных нагрузок, необходимы:

- ✓ **уравнения состояния** веществ, объединяющие функциональной связью термодинамические параметры - E (или T), P и ρ .
- ✓ физико-математические **модели физических процессов, свойств материалов** – модели реологических свойств, упругопластического поведения, кинетики детонации, процессов динамического разрушения, диспергирования и компактирования при динамическом воздействии и т.д.

Достоверные УРС и модели позволяют:

- объяснять (интерпретировать) наблюдаемые процессы
- предсказывать поведение конструкции/материала при различных сценариях (проводить виртуальные испытания)
- создавать новые материалы с заданными свойствами



*Метод нужен для установления истины.
Рене Декарт*

Одними из основных источников информации, используемой при построении УРС и моделей, являются экспериментальные данные по отклику вещества/конструкций на динамическое воздействие и расчетные представления.

Начатые с конца сороковых годов XX века в рамках атомного проекта исследования экстремальных состояний вещества при высоких давлениях и высоких плотностях энергии к настоящему времени получили значительное развитие. Прогресс в области физики высоких плотностей энергии связан в первую очередь с развитием техники применения волн сжатия. За прошедшие десятилетия направления исследований значительно расширились в результате развития новых экспериментальных методов регистрации быстропротекающих процессов.

В условиях необратимости изменения технологий производства материалов (дрейф), проявляющиеся в первую очередь в их совершенствовании, а также создания принципиально новых методов изготовления материалов и в том числе аддитивных, чрезвычайно актуальным является отслеживание (контроль) динамических свойств конструкционных материалов и верификации применяемых УРС и моделей.

Актуальность

ВАЖНО!



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В связи с прогрессом в области численного моделирования быстропротекающих процессов резко возрастают требования к точности и информативности динамических экспериментов.

Надежность и предсказательная способность результатов расчетов напрямую определяется погрешностями в задании физико-математических моделей, верифицируемых по экспериментальным данным.

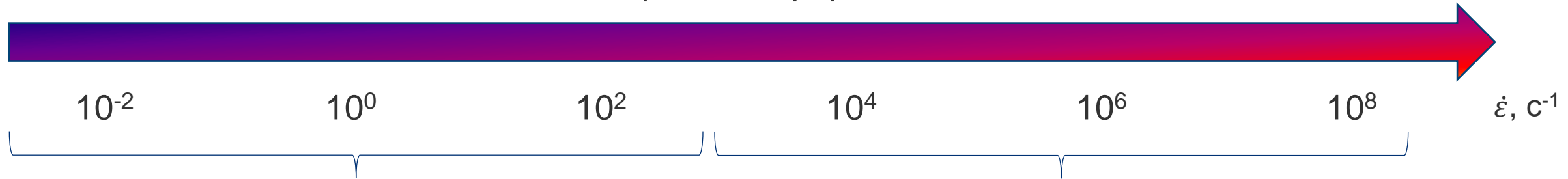


Повышение точности и информативности экспериментальных результатов достигается путем увеличения объёма информации, получаемой в эксперименте, а также применением современных прецизионных методов измерений и устройств нагружения.

2 Диапазон нагрузок



Скорость деформации



Низко- и среднеинтенсивные нагрузки

- Транспортировка
- Стихийные воздействия
- Аварии

Динамические механические свойства
предел текучести (σ_T), модуль упругости (E), прочностные (σ_B) и деформационные (δ_p) характеристики и т.д.

Высокоинтенсивные нагрузки

- Взрывные
- Высокоскоростное соударение
- Кумуляция

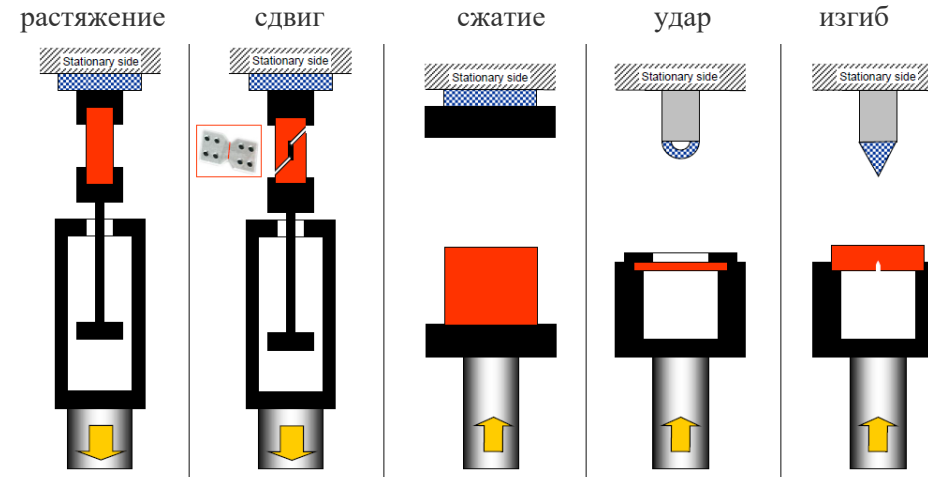
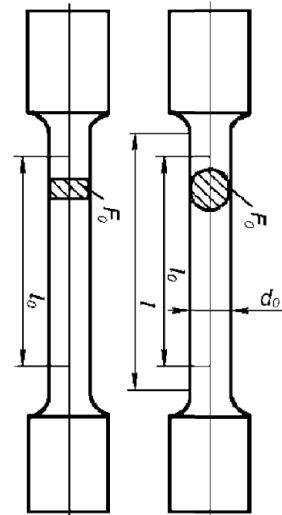
Ударно-волновые свойства
ударные адиабаты, адиабаты повторного сжатия, изэнтропы расширения, скорости звука, фазовые превращения, динамическое прочностное сопротивление и т.д.

Устройства низко- и среднеинтенсивного нагружения

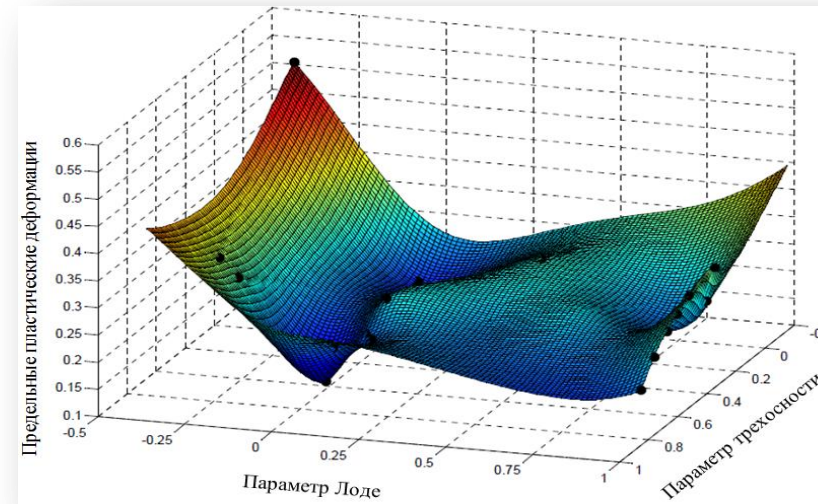


РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Разрывная машина



$$\dot{\epsilon} = 10^{-3} \div 10^2 \text{ с}^{-1}$$



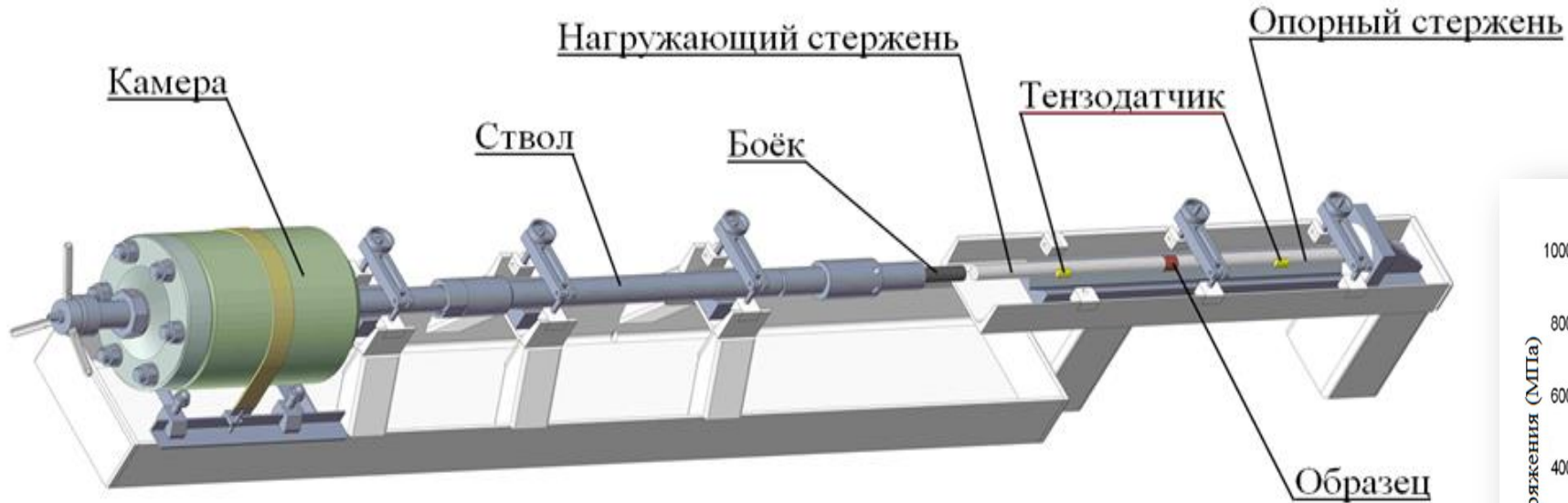
Динамическая диаграмма деформирования

Устройства низко- и среднеинтенсивного нагружения

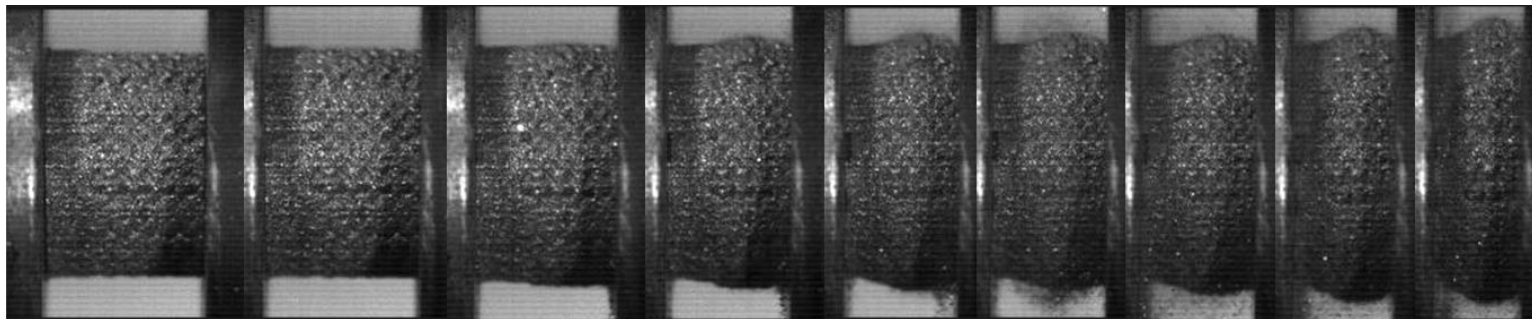
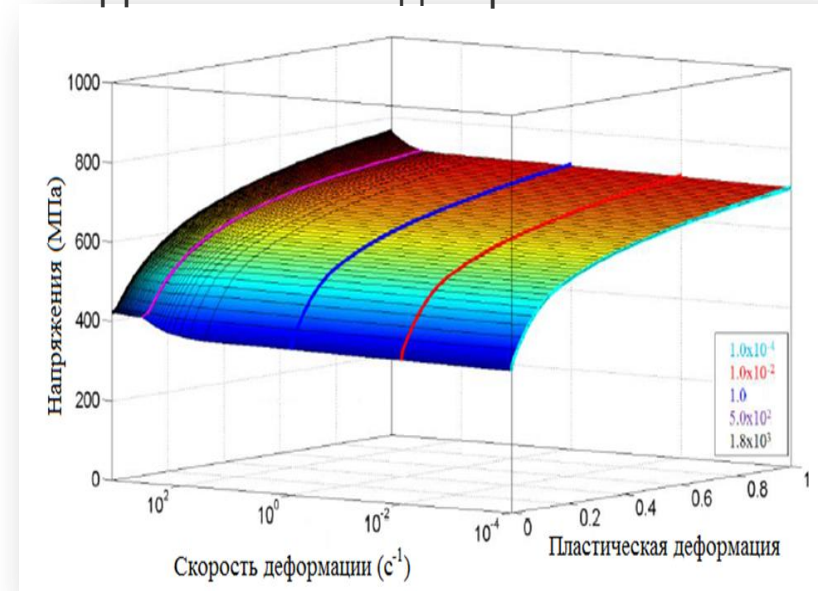


РФАЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Пневматическая установка для метода ССГ, $\dot{\epsilon}=10^2 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$



Динамическая диаграмма сжатия



Высокоскоростная съемка сжатия АТ-алюминия

Устройства высокоинтенсивного нагружения



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

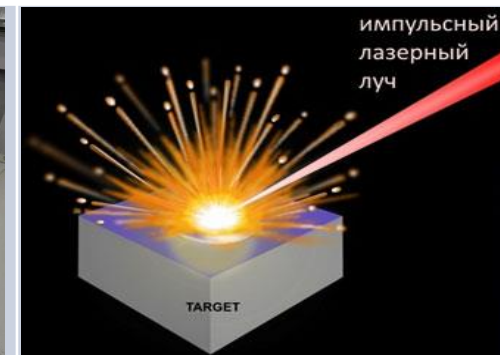
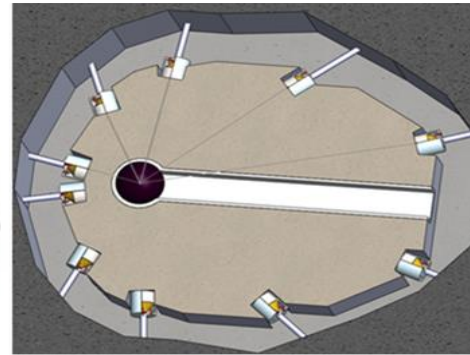
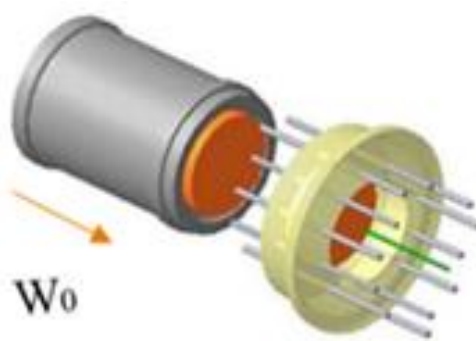
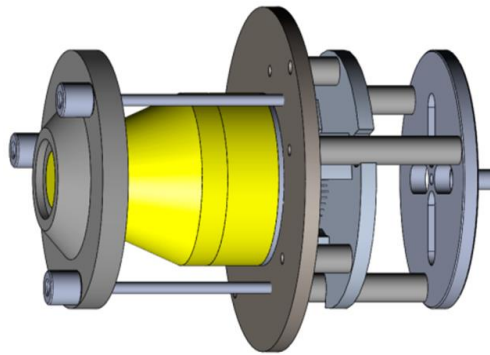
Взрывные

Баллистические

Ядерные взрывные

Электрические и электромагнитные

Источники излучения



- плоскостолновые
- цилиндрические
- сферические

- пневматические
- пороховые
- двухступенчатые

- УВ в газе
- УВ в твердом теле

- «взрывные»
- магнитные
- электродинамические

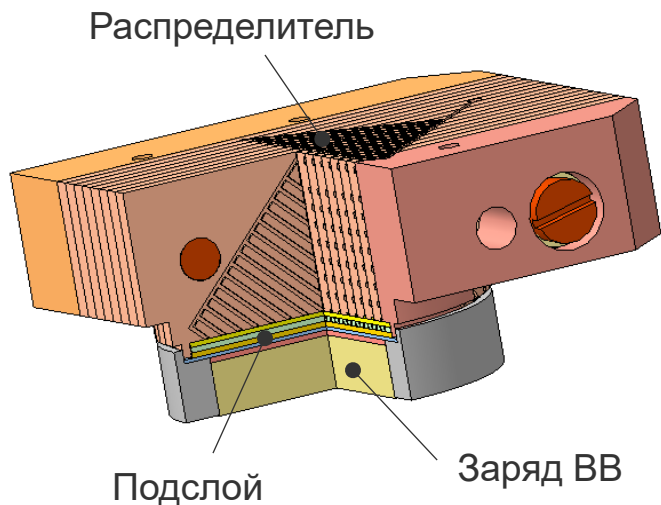
- лазерное
- рентгеновское
- электронные и ионные пучки

Взрывные плоскороволновые нагружающие устройства

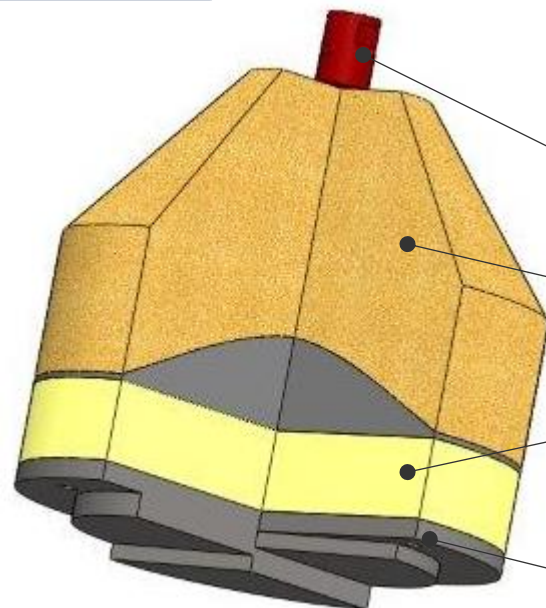


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Контактные



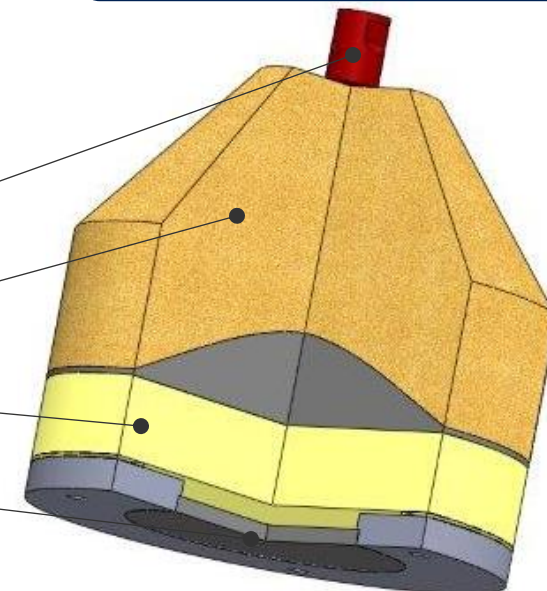
Многоточечные



Линзовые

P_{Fe} до ~50 ГПа

Метательные



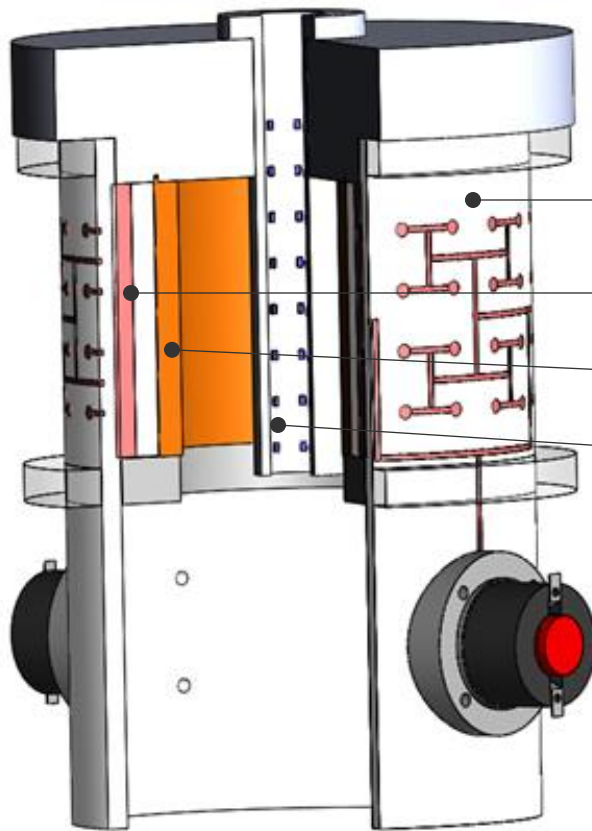
P_{Fe} до ~200 ГПа
(W_y до ~6 км/с)

Взрывные нагружающие устройства сходящихся ДВ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Цилиндрические



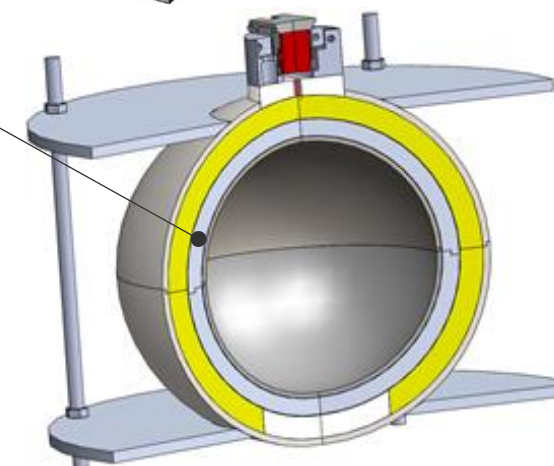
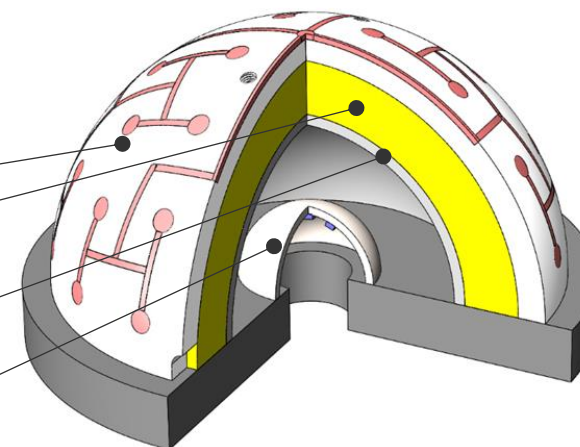
Распределитель

Слой ВВ

Оболочка-ударник

Оболочка-образец

Сферические



Баллистические установки

Пневматическая



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

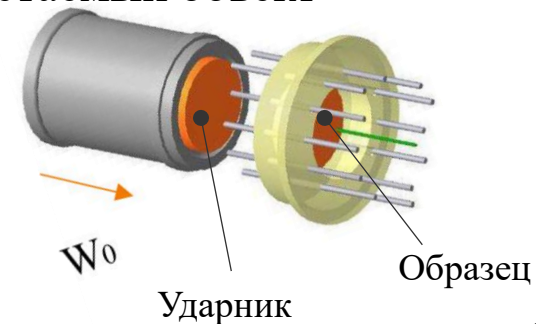
Камера высокого давления

Баллистический ствол

Мембранный отсек

Мишенный отсек

Метаемый объект



$L = 7 \text{ м}$, $P = 42 \text{ МПа}$, $m_{\text{МО}} \sim 60 \text{ г}$.

Баллистические установки КБ-1 РФЯЦ-ВНИИТФ	Рабочий газ	Скорость ударника, км/с	Калибр, мм
Пневматическая установка	воздух, водород, гелий	0,5-1,5	44
Пороховая пушка	-	0,5-1,5	100
Двухступенчатая легкогазовая пушка	водород, гелий	1-4	50

Баллистические установки

Пороховая



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



$L = 7 \text{ м}$, $P = 335 \text{ МПа}$, $m_{\text{мо}} \sim 2000 \text{ г}$.

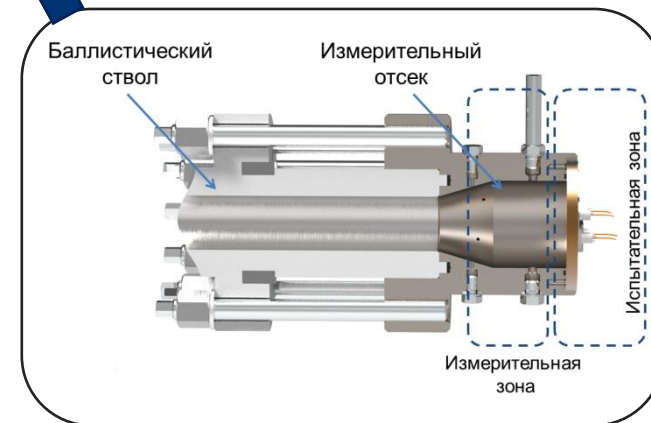
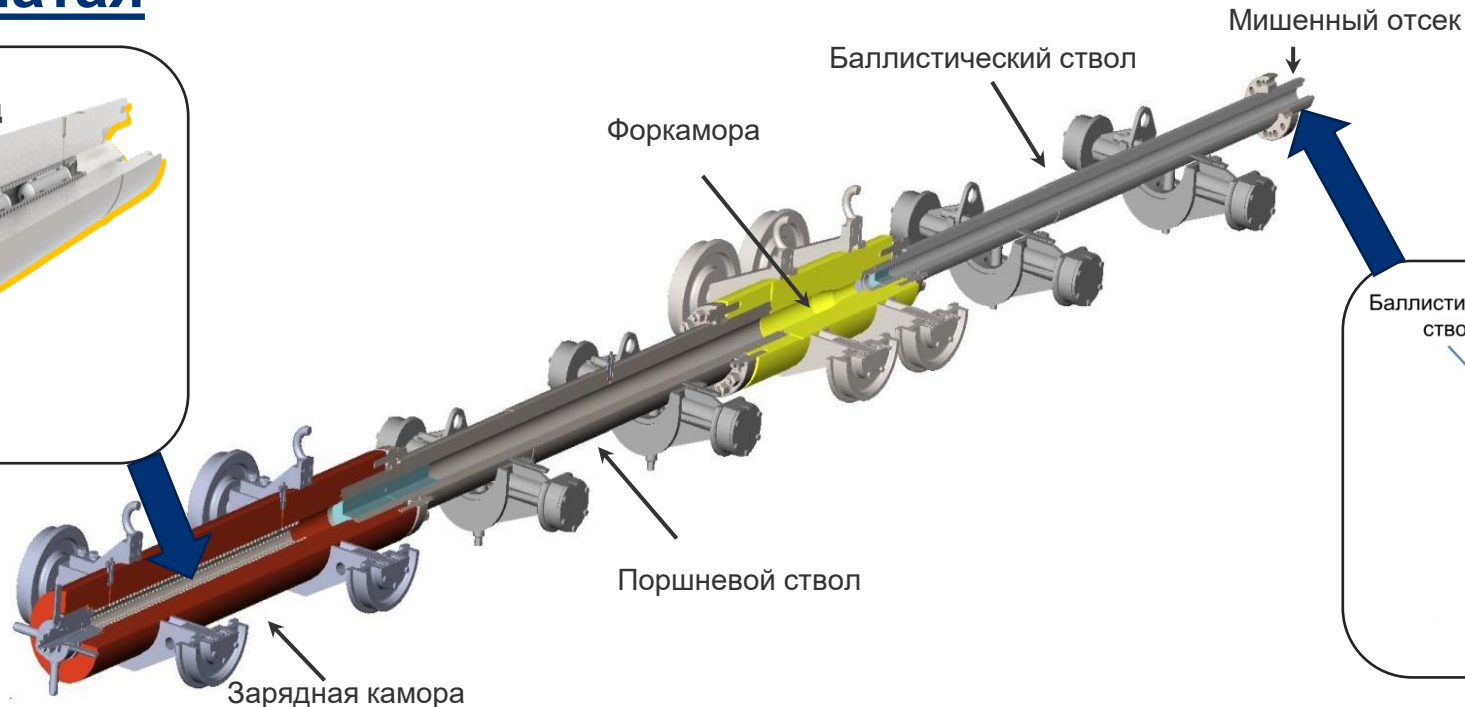
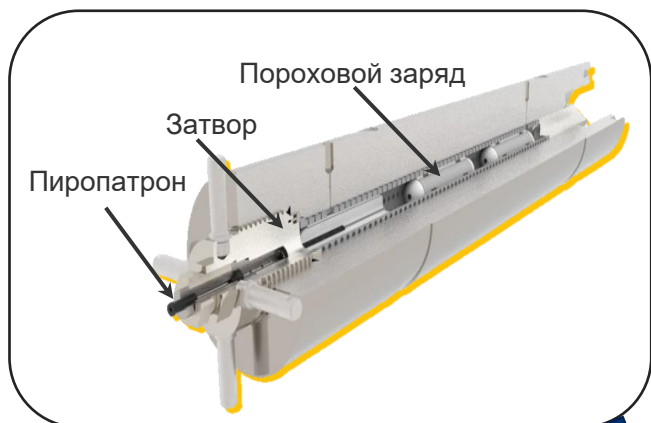
Баллистические установки КБ-1 РФЯЦ-ВНИИТФ	Рабочий газ	Скорость ударника, км/с	Калибр, мм
Пневматическая установка	воздух, водород, гелий	0,5-1,5	44
Пороховая пушка	-	0,5-1,5	100
Двухступенчатая легкогазовая пушка	водород, гелий	1-4	50

Баллистические установки

Двухступенчатая



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



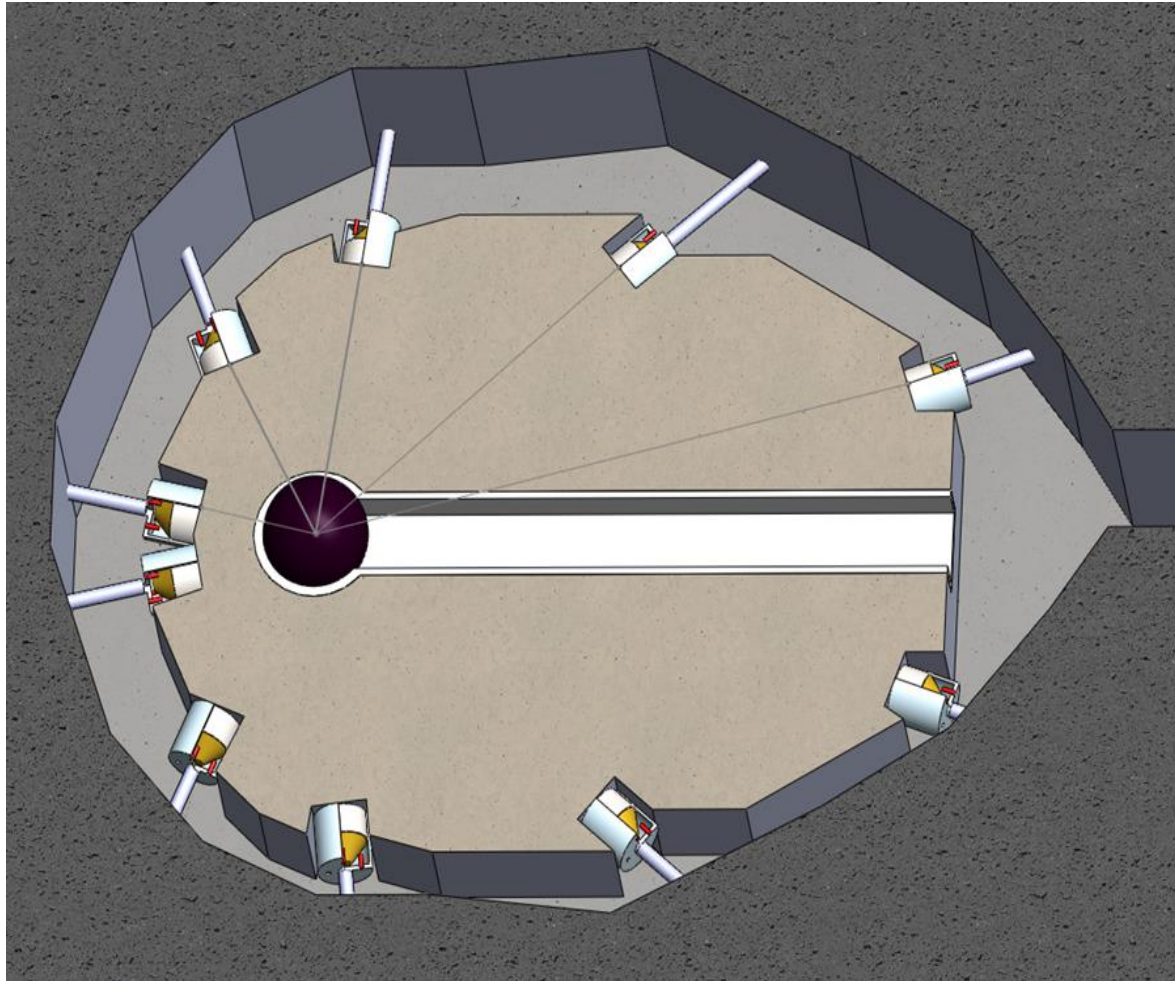
$L = 27 \text{ м}$, $P = 420 \text{ МПа}$, $m_{\text{МО}} \sim 200 \text{ г}$.

Баллистические установки КБ-1 РФЯЦ-ВНИИТФ	Рабочий газ	Скорость ударника, км/с	Калибр, мм
Пневматическая установка	воздух, водород, гелий	0,5-1,5	44
Пороховая пушка	-	0,5-1,5	100
Двухступенчатая легкогазовая пушка	водород, гелий	1-4	50

В программу большого числа специальных физических опытов и испытаний ядерных зарядов входили работы по изучению свойств веществ в динамических процессах при рекордно высоких давлениях (до ~ 36 ТПа).

Натурный опыт с постановкой таких измерений впервые был проведен сотрудниками ВНИИТФ в марте 1966 г. Схема постановки таких опытов и проведение измерений была разработана В.А. Симоненко, К.К. Крупниковым и Л.П. Волковым.

Мораторий на ядерные испытания, объявленный СССР в 1989 году, и последующее заключение Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний вызвали прекращение таких исследований.



3 Регистрация быстропротекающих процессов



Измерения физических параметров быстропротекающих ударно-волновых процессов имеют две характерные особенности:

- *кратковременность* (~от 10^{-9} до 10^{-5} с)
- *дистанционность* (от нескольких до сотен метров)

Экспериментальные методы можно разделить на два основных типа:

- *дискретные*, когда регистрируется сигнал, соответствующий определенному событию в пространстве (электроконтактный, электрооптический, фотохронографический, пирометрический, импульсная рентгенография и т.д.)

- *непрерывные*, в которых непрерывно записывается диагностируемый процесс (электромагнитный, оптический, интерферометрический, пьезоэлектрический, индикаторный метод, пьезорезистивный, тензорезистивный, импульсная рентгенография и т.д.).

По способам размещения датчиков методы можно разделить на внутренние (*возмущающие*) и внешние (*невозмущающие*).

Дискретные методы измерений



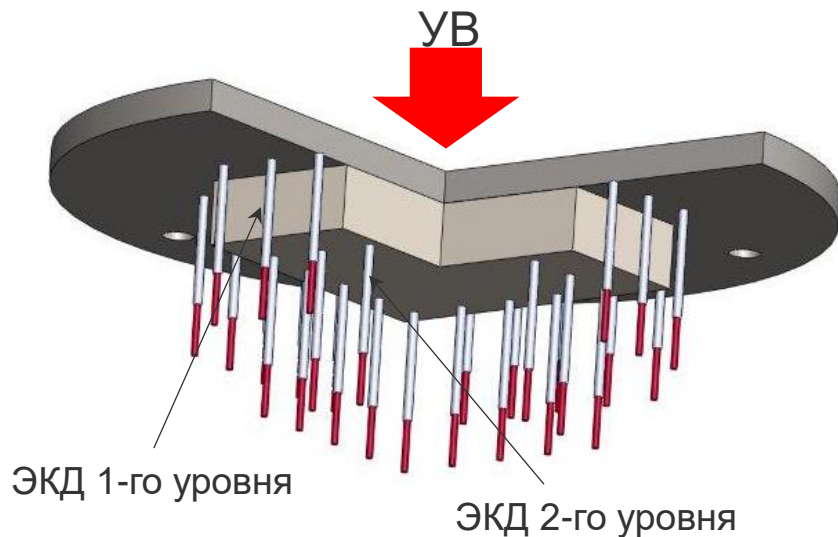
Электроконтактный метод

Принцип работы: ионизационное или механическое замыкание электрической цепи.

Назначение: регистрация интервалов времени.

Решаемые задачи: Исследование симметрии фронта ударной волны, процесса распространения УВ или ДВ, процессов метания.

Количество каналов: ~ тысячи



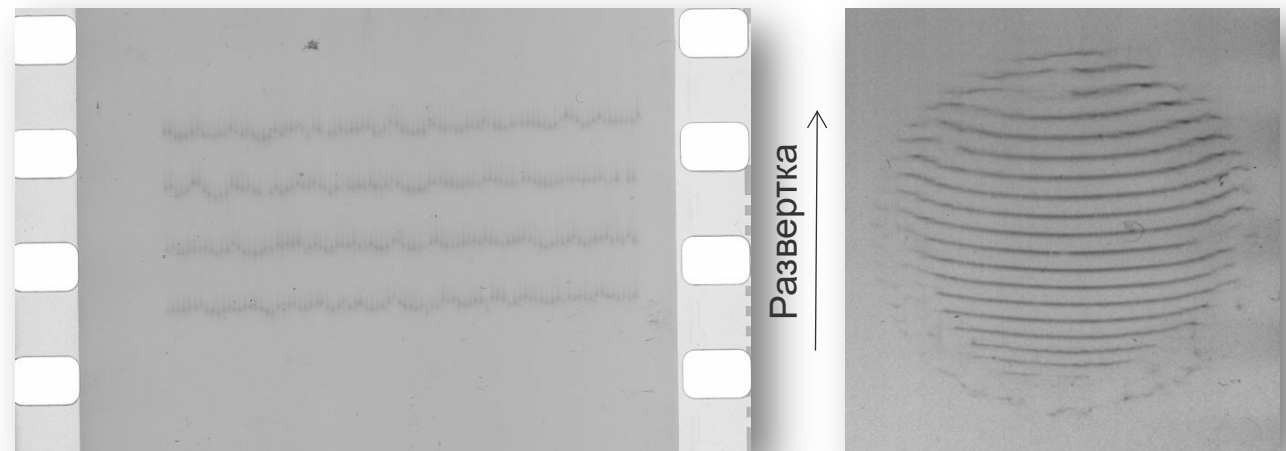
Фотохронографический метод

Принцип работы: вспыхивание газовых зазоров.

Назначение: регистрация интервалов времени.

Решаемые задачи: Исследование симметрии фронта УВ или ДВ, процессов метания.

Количество каналов: ~ сотни



Непрерывные методы измерений



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Электромагнитный метод

Принцип работы: принцип электромагнитной индукции.

Назначение: регистрация профилей массовой скорости и $x-t$ диаграмм движения ударных (детонационных) волн при помощи шоктрекера.

Решаемые задачи: Эволюция ударных и детонационных волн, построение поля массовых скоростей в неустановившихся течениях, определение скорости звука методом догоняющей разгрузки.

Количество каналов: ~ десятки

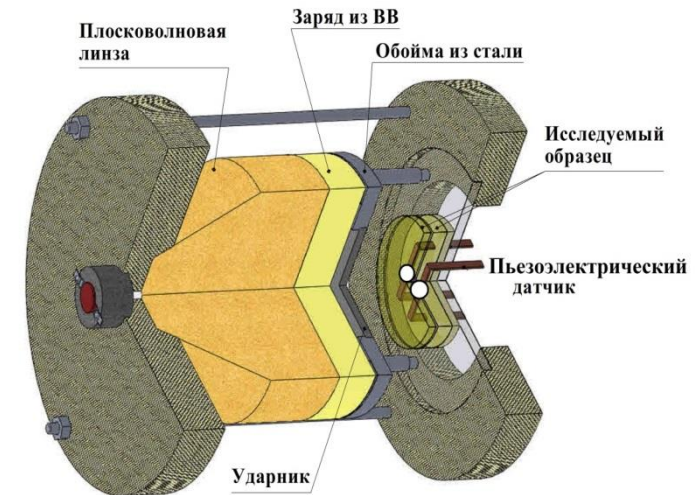
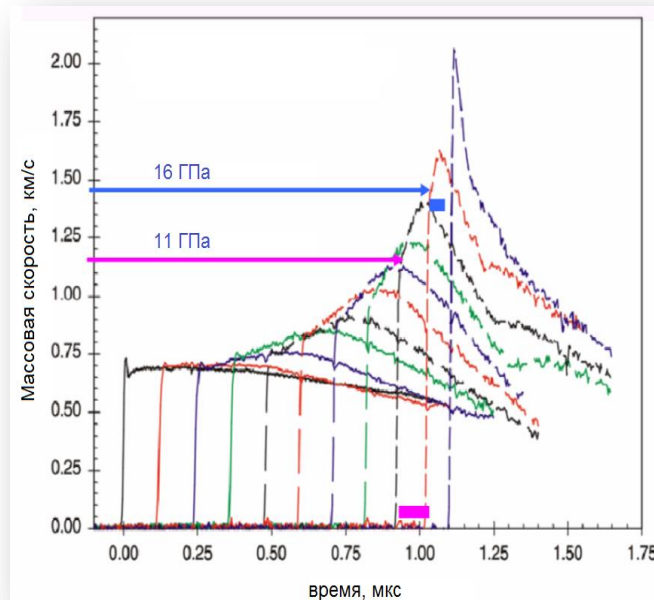
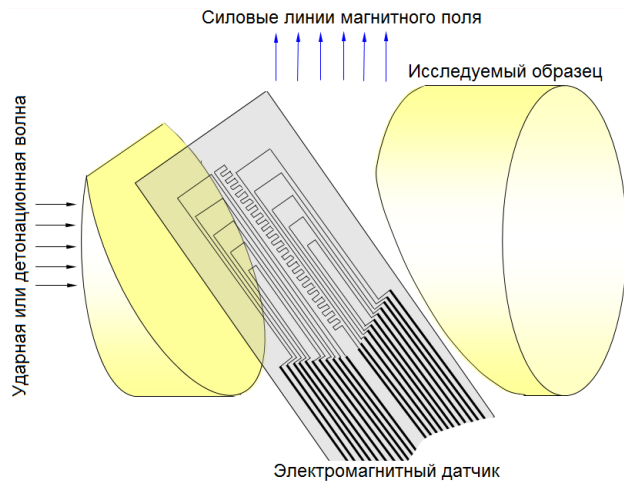
Пьезоэлектрический метод

Принцип работы: пьезоэлектрический эффект - эффект возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений.

Назначение: регистрация интервалов времени, регистрация профилей слабых ударных волн, регистрация процессов пыления.

Решаемые задачи: Исследование симметрии фронта ударной волны, процесса распространения УВ, упруго-пластических свойств и полиморфных превращений вещества, процессов пыления.

Количество каналов: ~ десятки



Непрерывные методы измерений



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

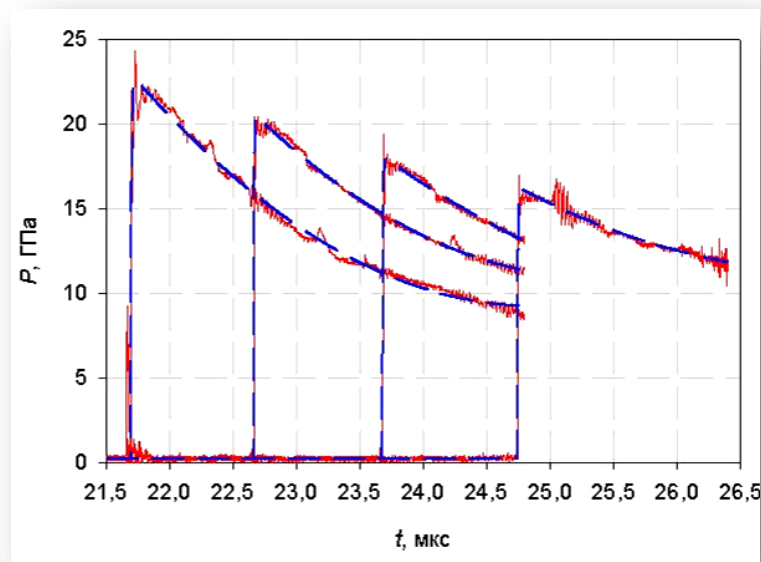
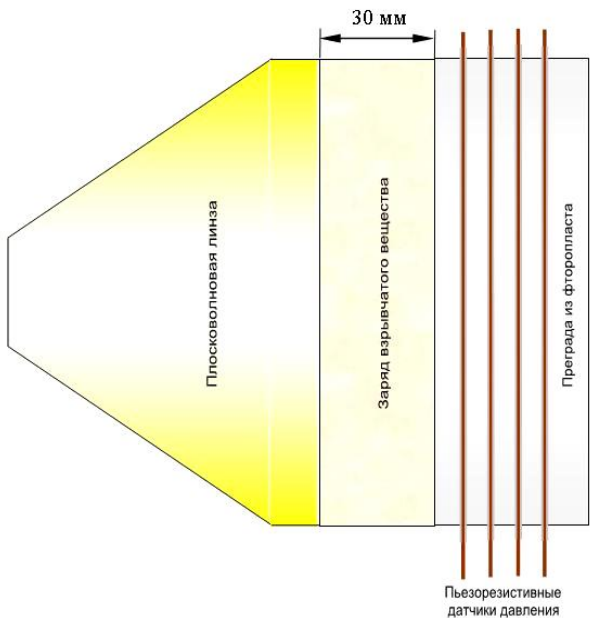
Пьезорезистивный метод

Принцип работы: изменение сопротивления материала под действием давления.

Назначение: регистрация профилей давления ударных и детонационных волн, регистрация интервалов времени, регистрация проводимости.

Решаемые задачи: Исследование симметрии фронта ударной волны, процесса распространения УВ или ДВ, процессов инициирования ВВ, скорости звука методом догоняющей разгрузки.

Количество каналов: ~ единицы



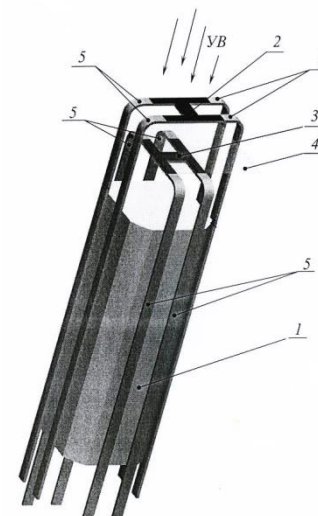
Тензорезистивный метод

Принцип работы: изменение сопротивления материала при деформации (растяжение или сжатие).

Назначение: регистрация профилей давления в расходящихся или сходящихся ударных и детонационных волнах.

Решаемые задачи: Исследование симметрии фронта ударной волны, процесса распространения УВ или ДВ, процессов инициирования ВВ, упруго-пластических свойств и полиморфных превращений вещества.

Количество каналов: ~ десятки



Pin-схема размещения пьезо- и тензорезистивного датчиков.

- 1- диэлектрическая матрица (фторопласт),
- 2,3 – чувствительные элементы датчиков,
- 4 – фторопластовая плёнка, 5 – выводы датчиков.

Непрерывные методы измерений



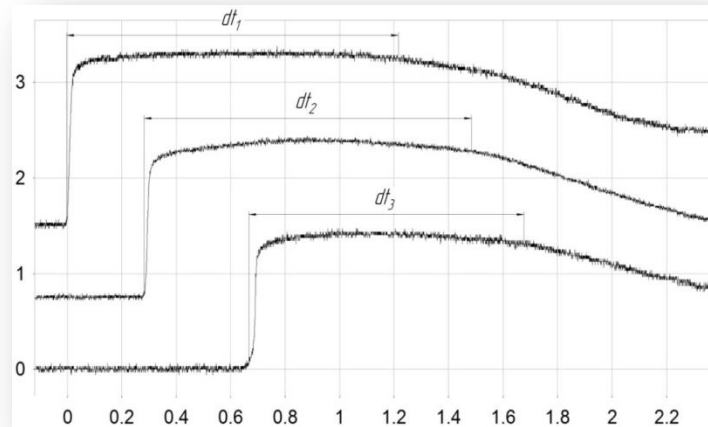
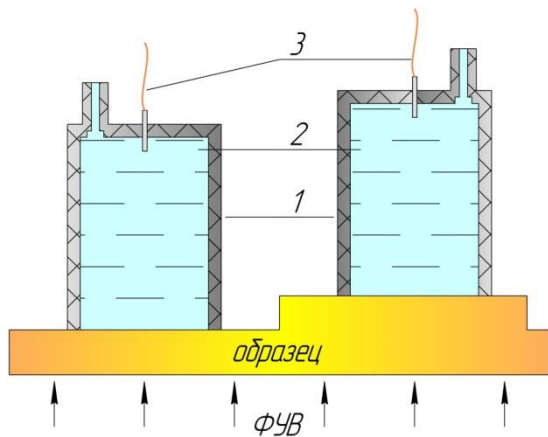
Индикаторный метод

Принцип работы: регистрация свечения индикаторной жидкости при помощи ФЭУ или фотодетектора.

Назначение: регистрация профилей ударных и детонационных волн и многоволновых конфигураций.

Решаемые задачи: Эволюция ударных и детонационных волн, определение скорости звука ударно-нагруженных сред.

Количество каналов: ~ единицы



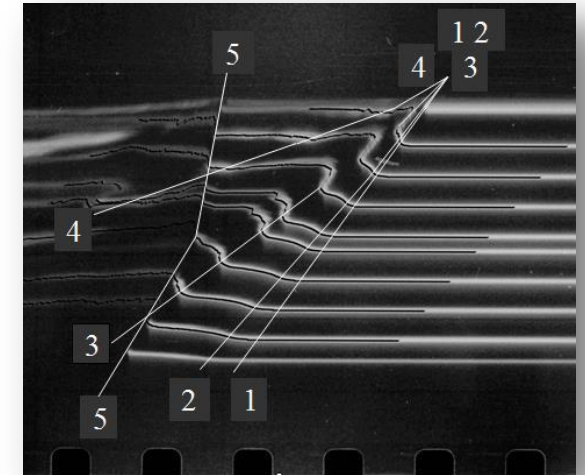
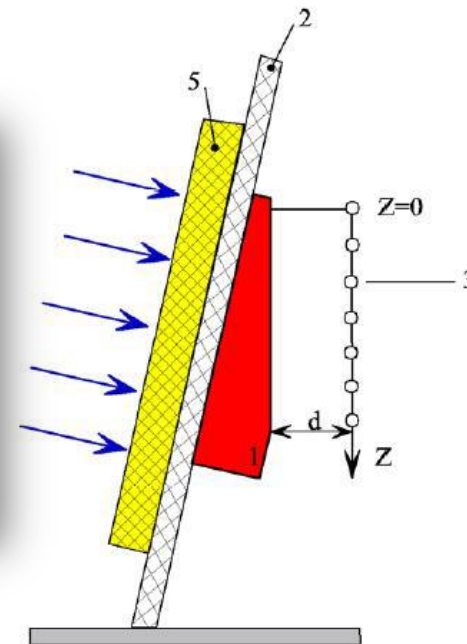
Метод оптического рычага

Принцип работы: смещения растровых линий при повороте отражающей поверхности

Назначение: измерение скорости отражающей поверхности.

Решаемые задачи: Исследование упруго-пластических и прочностных свойств, полиморфных превращений вещества

Количество каналов: ~ десятки



Непрерывные методы измерений



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

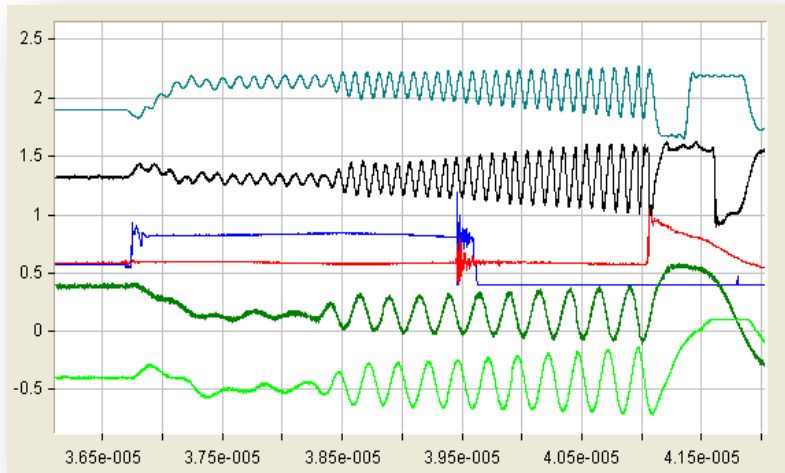
Радиоинтерферометрический метод

Принцип работы: эффект Доплера.

Назначение: измерение перемещения отражающей радиоволну границы.

Решаемые задачи: Регистрация распространения дефлаграционных, ударных и детонационных волн в радиопрозрачных средах, исследование инициирования ВВ, процессов метания.

Количество каналов: ~ единицы



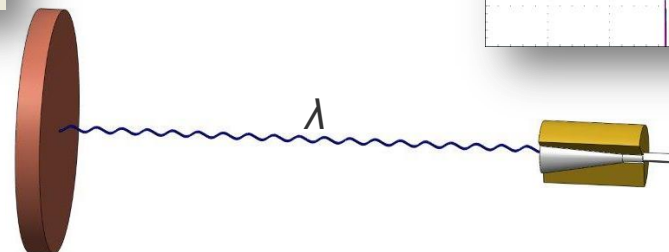
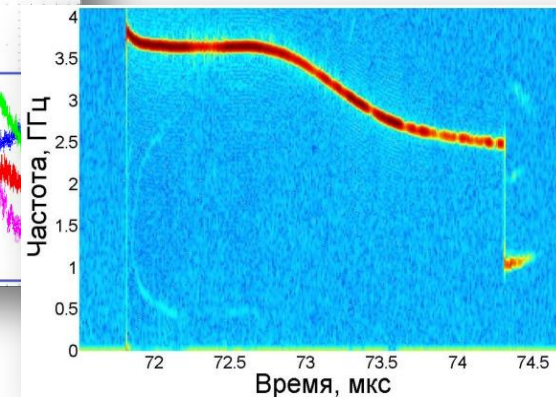
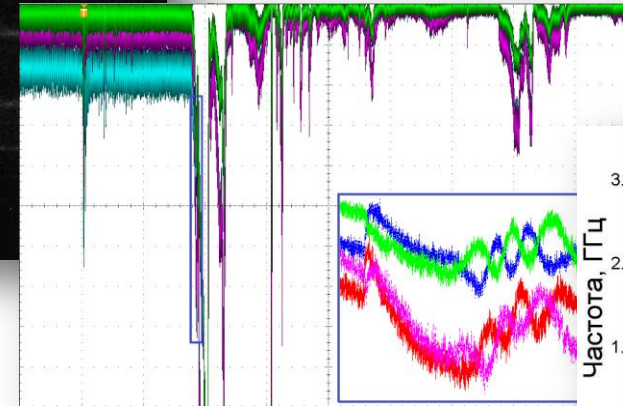
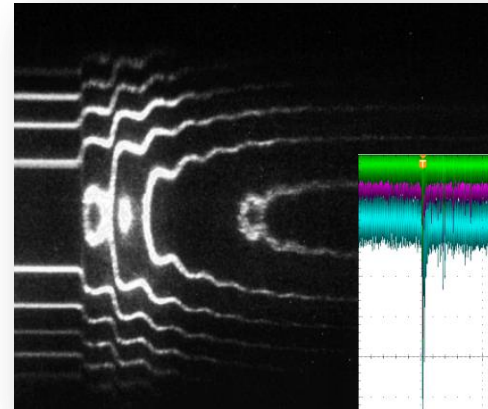
Лазерноинтерферометрический метод (Фабри-Перо, VISAR, PDV)

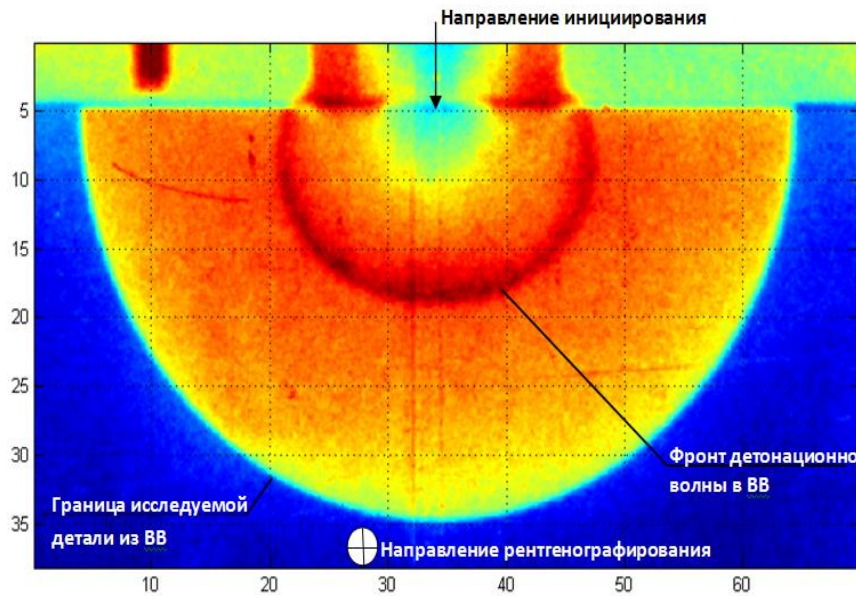
Принцип работы: эффект Доплера.

Назначение: измерение скорости отражающей поверхности.

Решаемые задачи: регистрация профилей ударных и детонационных волн и многоволновых конфигураций, исследование процессов метания оболочек, упруго-пластических свойств и полиморфных превращений вещества

Количество каналов: ~ сотни





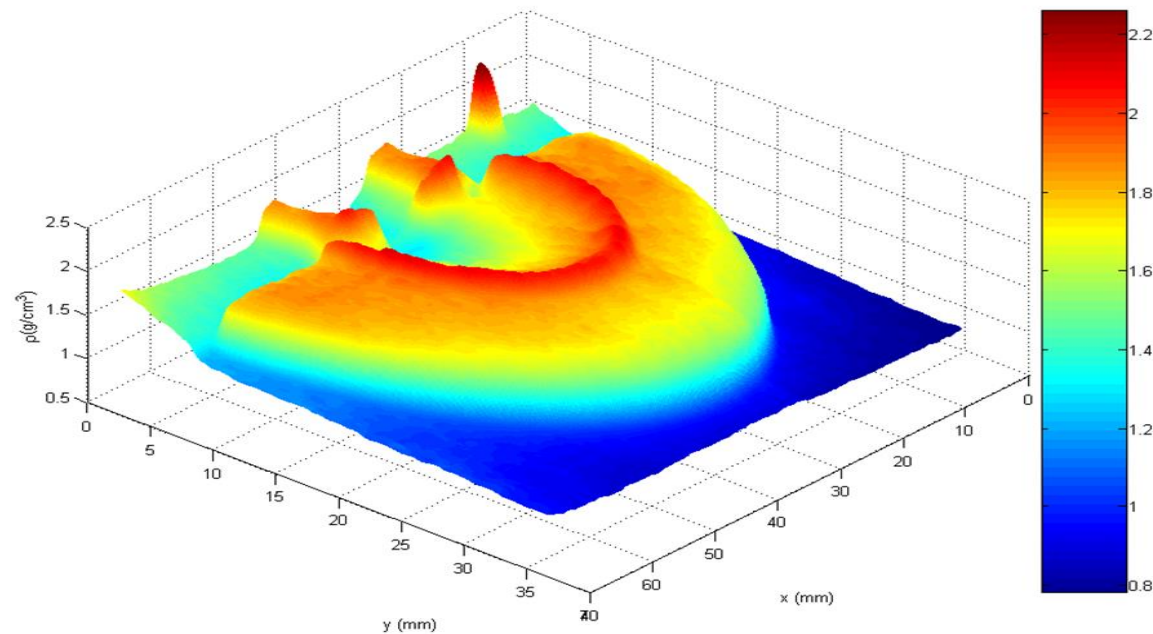
Импульсная рентгенография

Принцип работы: взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Назначение: теневая регистрация и восстановление распределения плотности.

Решаемые задачи: Визуализация быстропротекающих процессов, определение плотности материалов, перемещения и скорости движения рентгеноконтрастных объектов.

Количество каналов : ~ единицы



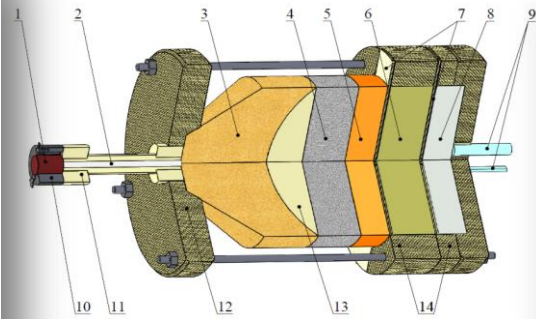
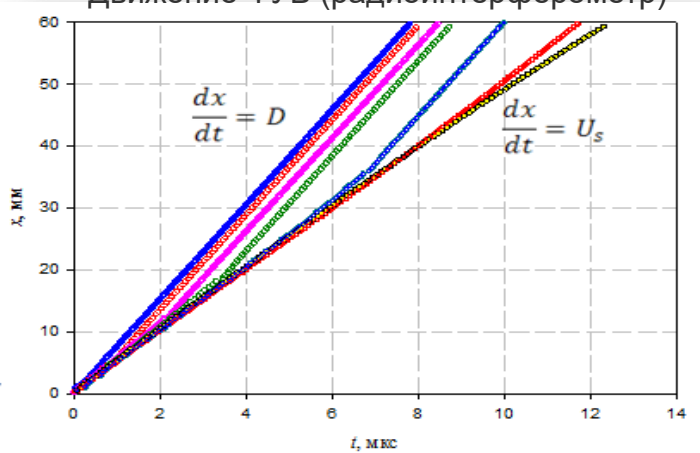
Совмещение методов измерений



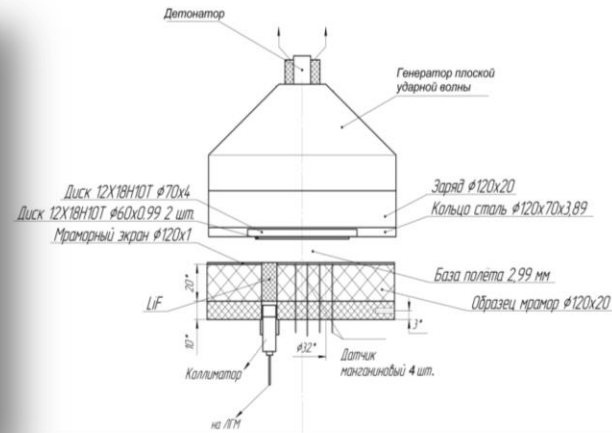
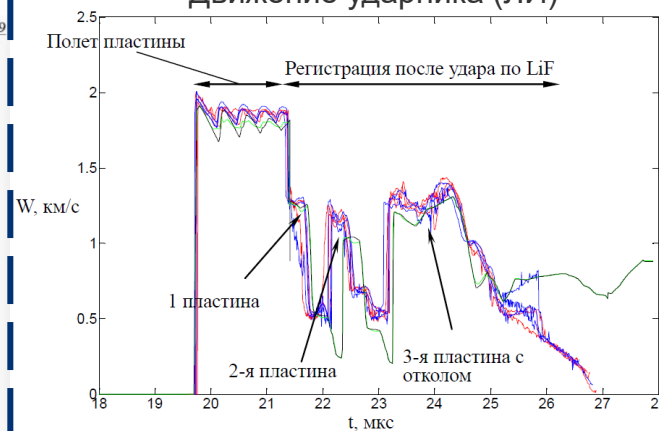
Для повышение достоверности и информативности результатов необходимо в эксперименте задействовать одновременно несколько методик, основанных на различных физических принципах.

Повышение информативности

Движение ФУВ (радиоинтерферометр)



Движение ударника (ЛИ)

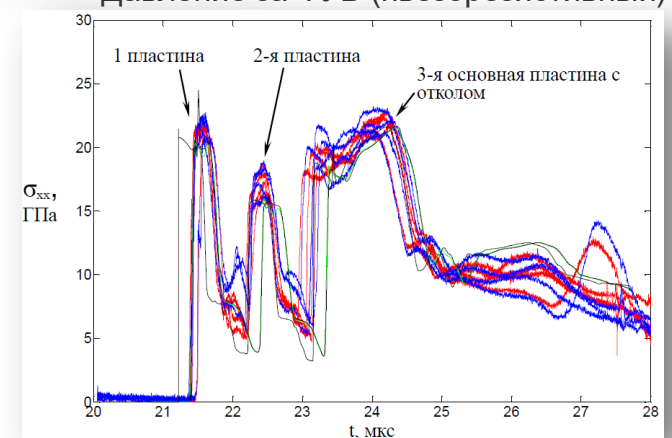


Давление за ФУВ (пьезорезистивный)



РИ+ПР

Давление за ФУВ (пьезорезистивный)



ЛИ+ПР

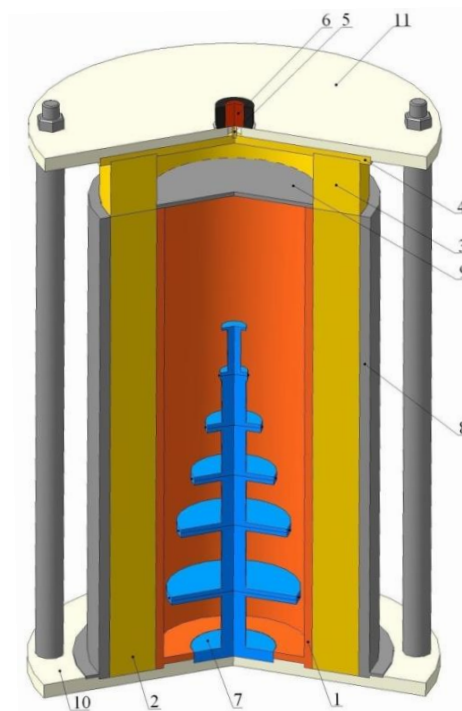
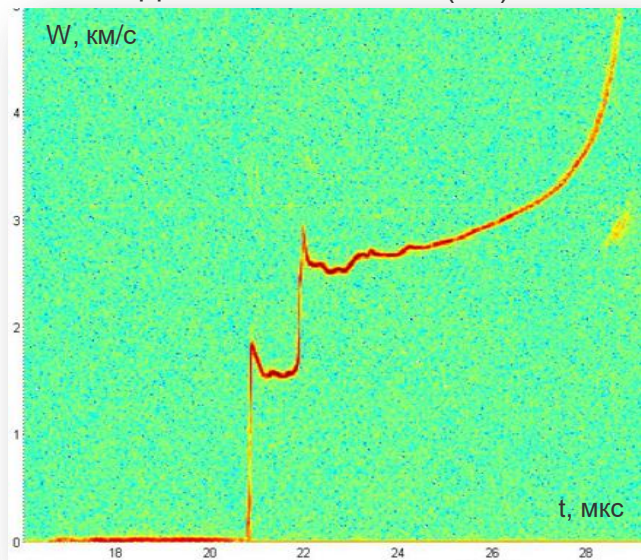
Совмещение методов измерений



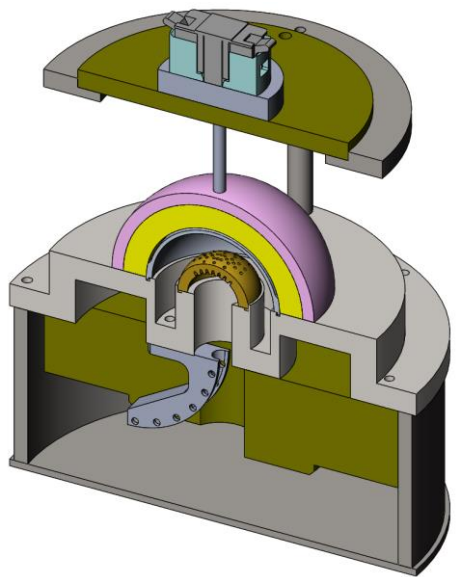
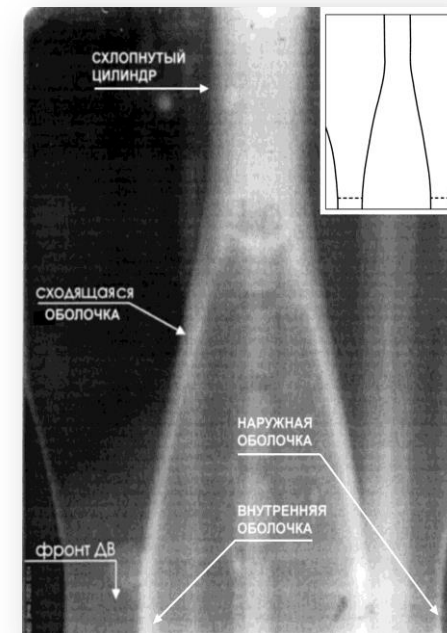
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Повышение достоверности

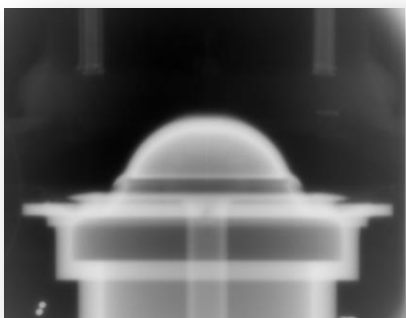
Движение оболочки (ЛИ)



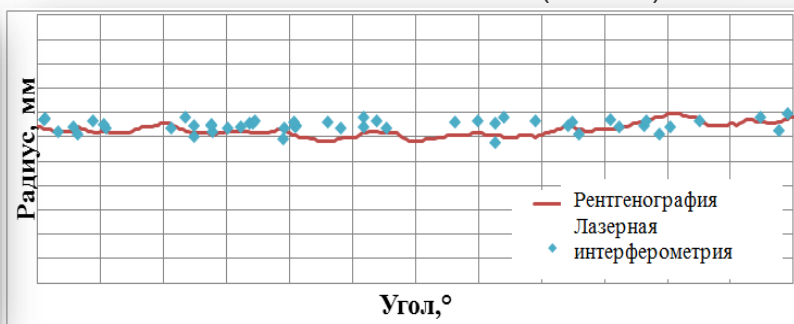
Положение оболочки (РГ)



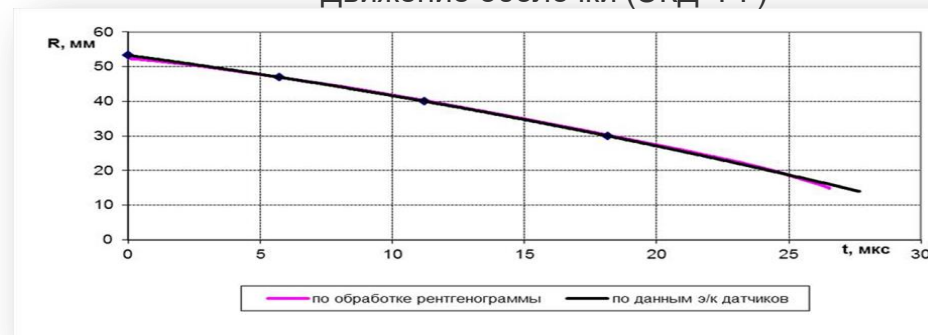
Положение оболочки (РГ)



Положение оболочки (ЛИ+РГ)



Движение оболочки (ЭКД+РГ)



ЛИ+РГ

ЭК+РГ

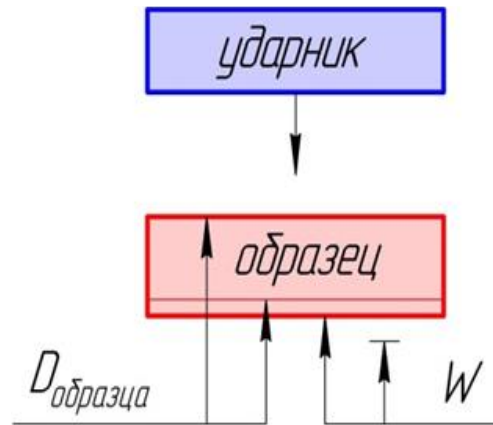
4 Ударно-волновые свойства материалов

Ударная сжимаемость



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

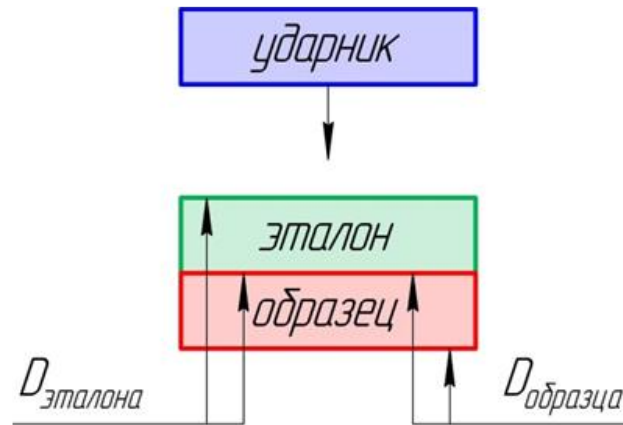
Откола



Приближенный метод

Удвоение массовой скорости при выходе УВ на свободную поверхность образца
Л.В. Альтшуллер, К.К. Крупников, Б.И. Леденев, В.И. Жучихин, М.И. Бражник (1958 г.)

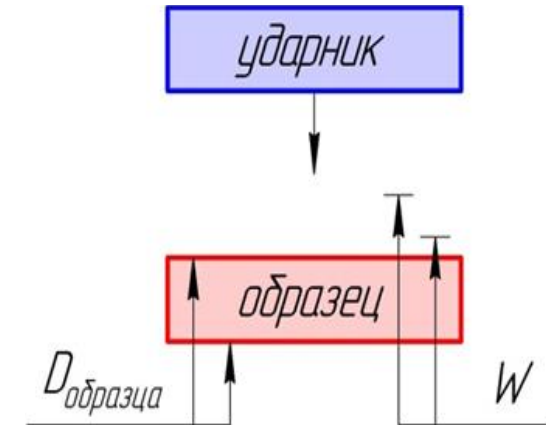
Отражения



Относительный метод

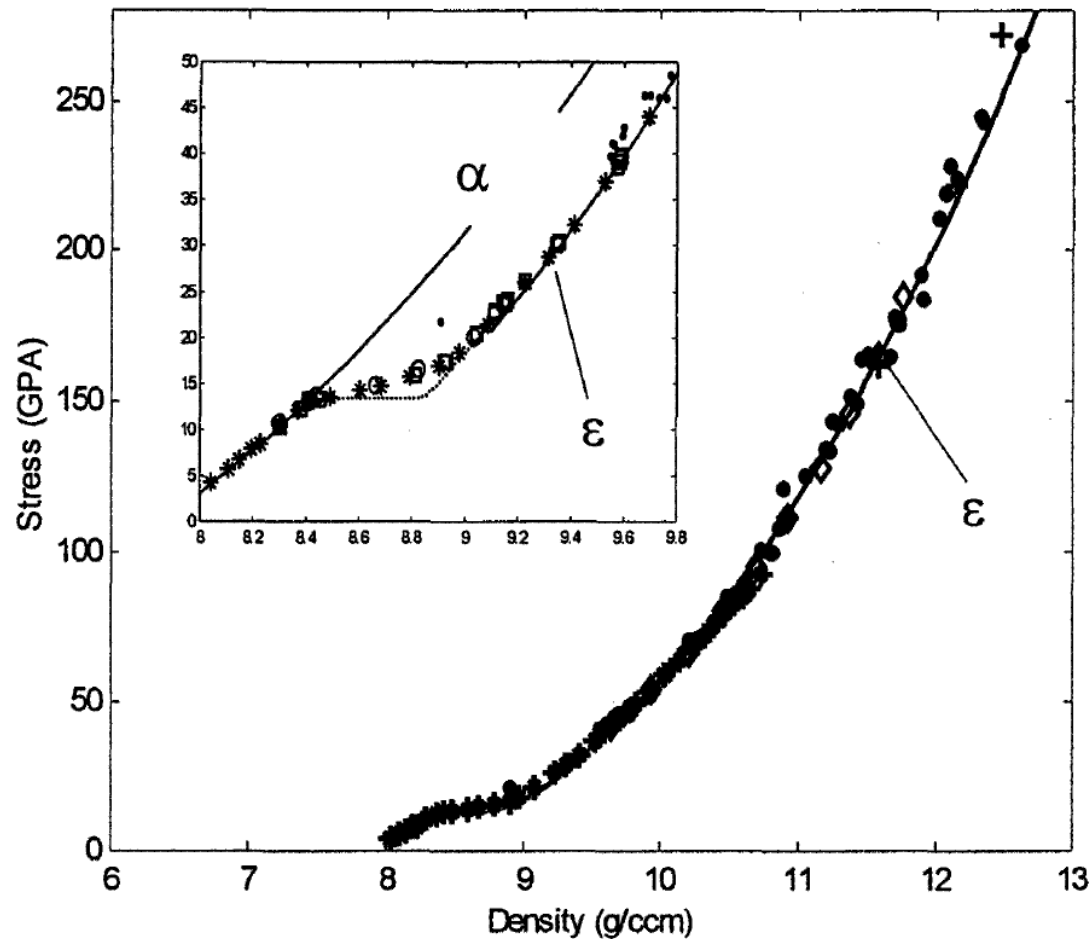
Основан на использовании эталонных материалов
Л.В. Альтшуллер, К.К. Крупников, Г.М. Гальденман (1958 г.)

Торможения

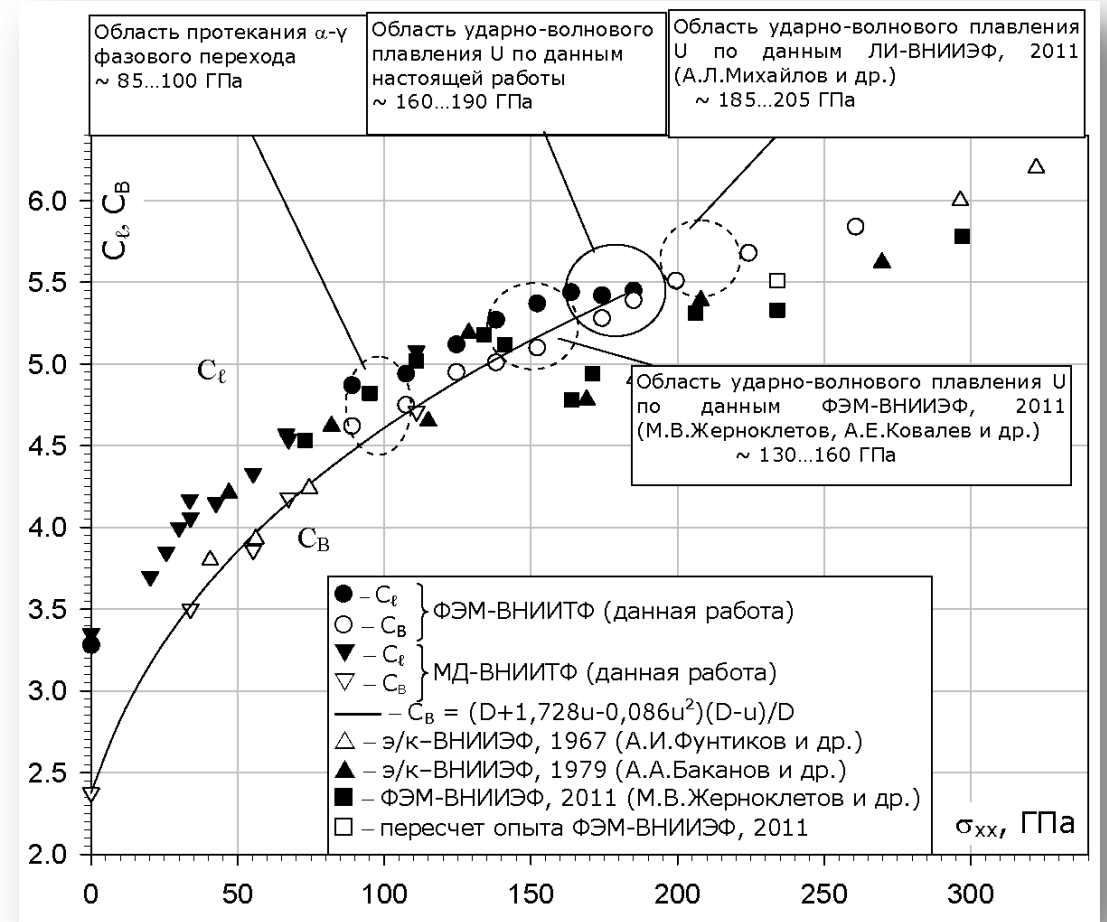


Абсолютный метод

Л.В. Альтшуллер, К.К. Крупников, Б.И. Леденев, В.И. Жучихин, М.И. Бражник (1958 г.)



Ударная сжимаемость Fe ¹



Скорость звука в U ²

¹ V.V. Dremov, A.L. Kutepov, A.V. Petrovtsev, A.T. Sapozhnikov, *Shock Compression of Condensed Matter*, 2001, pp.87-90

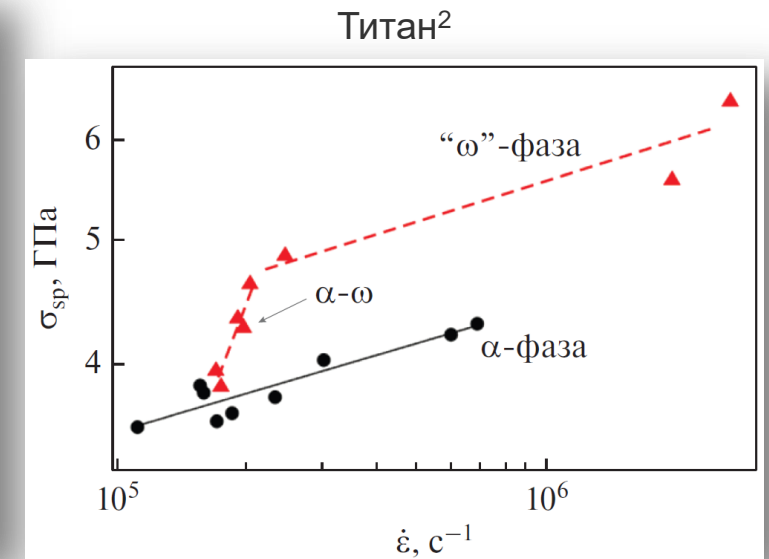
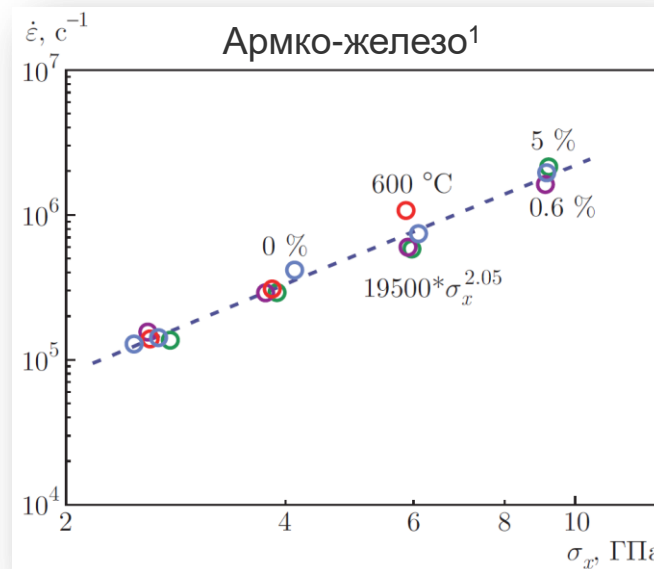
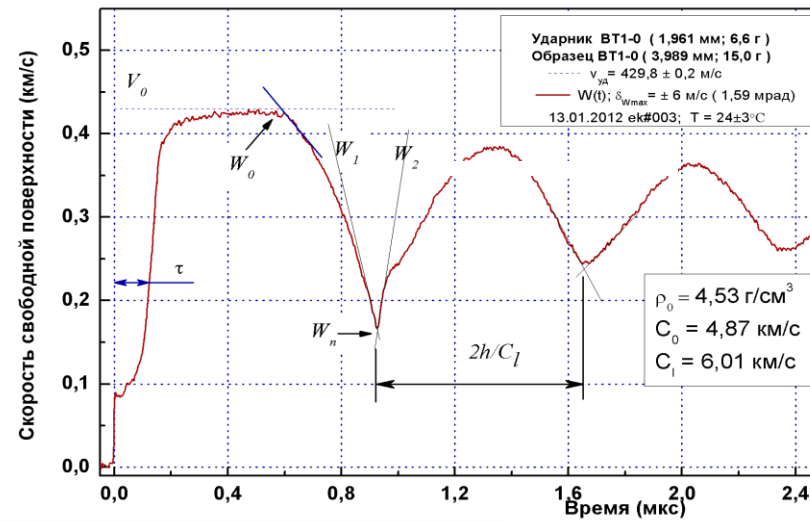
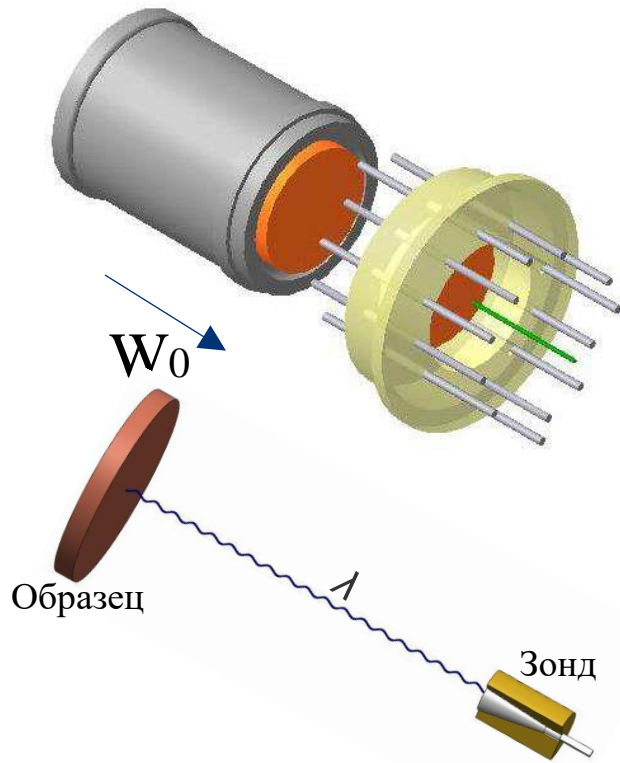
² Д.Г. Панкратов, А.К. Якунин, А.Г. Попцов, Д.Т. Юсупов. Скорости звука в ударно-сжатом уране в диапазоне 20-250 ГПа. 34-я Международная конференция «Физика экстремальных состояний вещества», пос. Эльбрус 1-6 марта 2019 года

Ударно-волновые свойства материалов

Динамическая прочность



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



¹А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов. ЖЭТФ, 2022, том 161, вып.6, стр.825-832

²А.В. Павленко, А.В. Добромислов, Н.И. Талуц, С.Н. Малюгина. ФММ, 2021, том 122, № 8, с.851-857

Заключение



Использование в качестве инструмента физического исследования волны сжатия и динамических методов (регистрация кинематических параметров ударных волн) позволило определить в широких диапазонах давлений и температур ударные адиабаты и параметры уравнений состояния элементов, соединений, сплавов и других материалов, обнаружить электронные переходы в металлах, фазовые превращения в веществах, определить линии плавления и испарения, исследовать динамическую прочность материалов.

В РФЯЦ-ВНИИТФ исследования динамических свойств материалов проводятся с целью:

- аттестации динамических свойств конструкционных материалов в условиях дрейфа технологий производства материалов, смены поставщиков, а также вследствие старения материалов в интересах сохранения работоспособности конструкций
- получения прецизионных экспериментальных данных о динамических свойствах материалов в диапазоне скоростей деформаций до 10^9 1/с в интересах совершенствования расчётных программ, предназначенных для проведения «виртуальных испытаний» конструкций.

**Спасибо за
внимание!**

Кучко Д.П.

8(35146)53019

26.02.2024