

Васильев Александр Александрович

Доклад
**«Проблема первой стенки в управляемом
термоядерном синтезе»**

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Бурдаков А.В.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирский государственный университет



План доклада

1. Необходимость УТС
2. Физические основы УТС
3. Постановка проблемы первой стенки
4. Текущие работы по данной тематике

Источники энергии

- Ископаемое топливо

 - Уголь, нефть, природный газ, и т.д.

- Альтернативные, не нарушающие тепловой баланс

 - Гидроэнергетика

 - Солнечная энергетика

 - Ветровая энергетика

 - Сжигание биомассы

 - Экзотика (приливная, геотермальная и прочие)

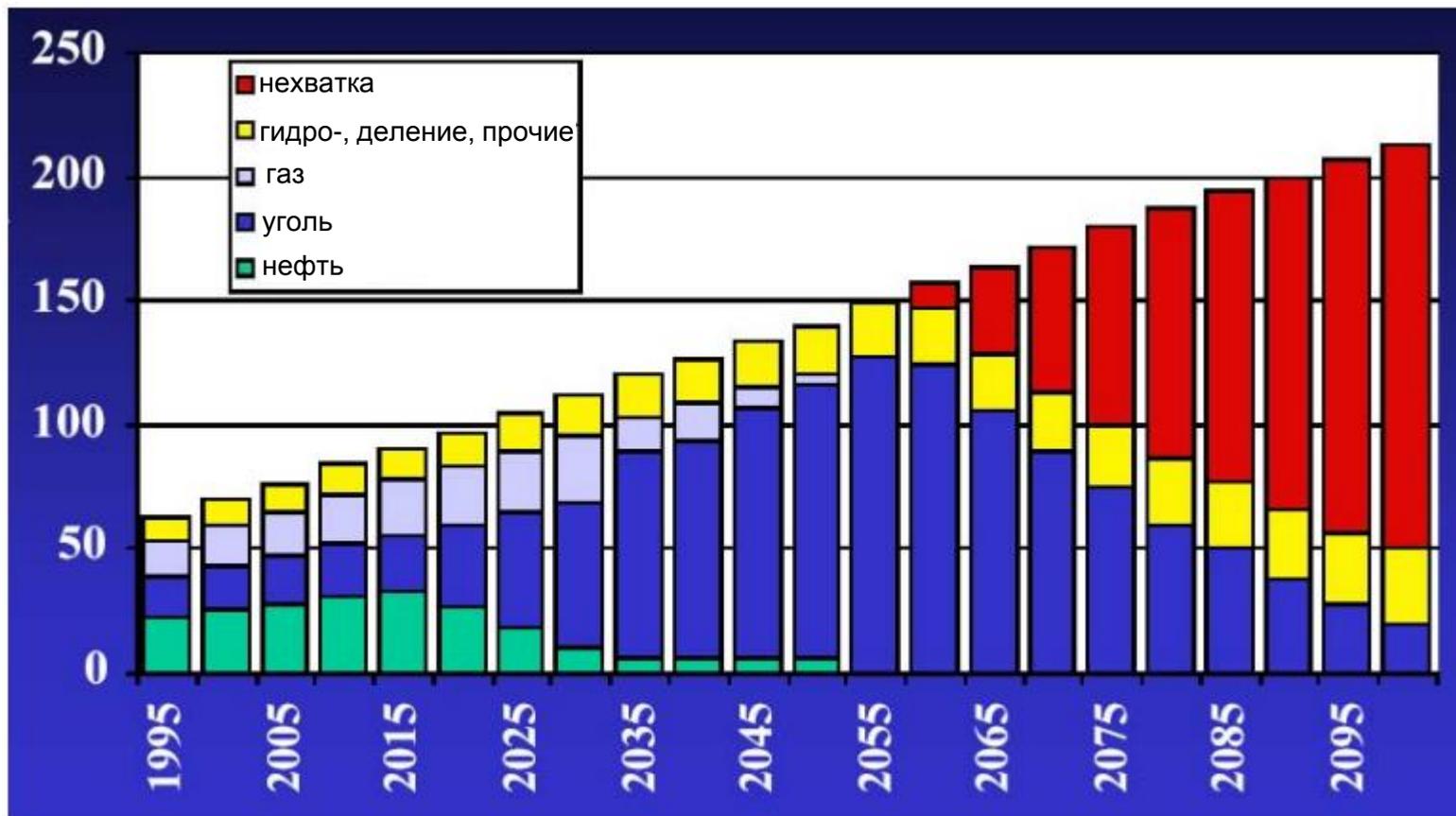
- Альтернативные, нарушающие тепловой баланс

 - Ядерная энергетика

 - Солнечная в космосе (с передачей на Землю)

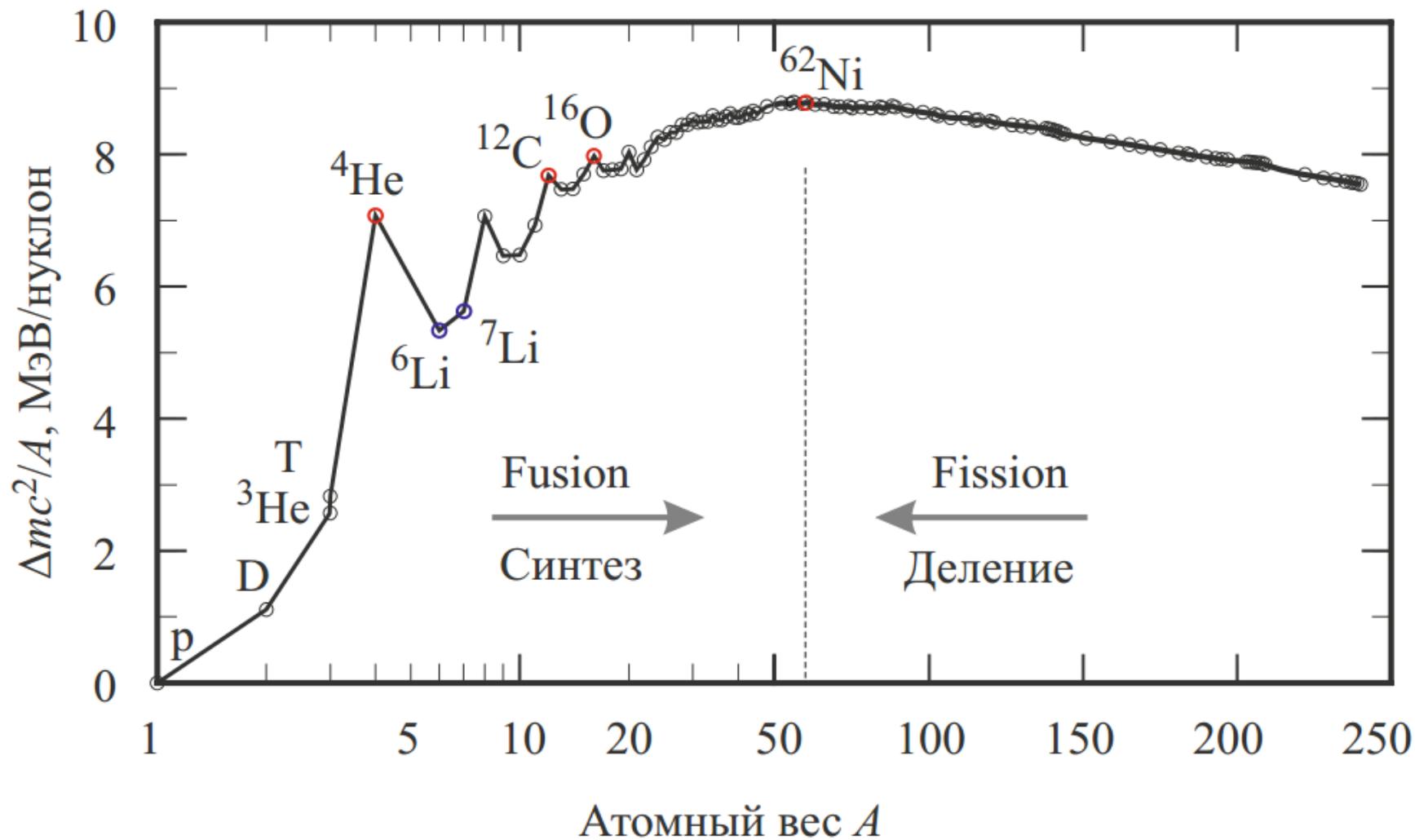
 - Управляемый термоядерный синтез

Рост энергопотребления



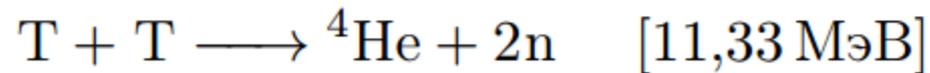
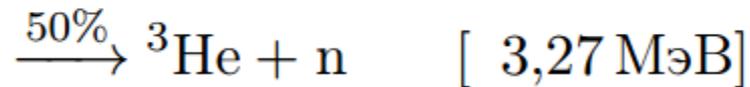
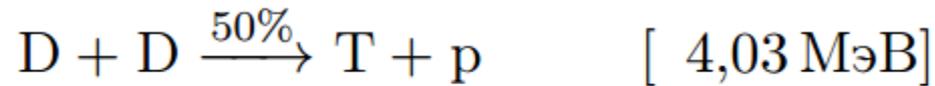
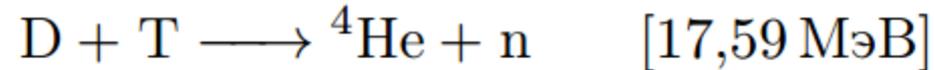
Разница между и требуемой и производимой энергией ставит проблему поиска новых видов электроэнергетики.

Удельная энергия связи

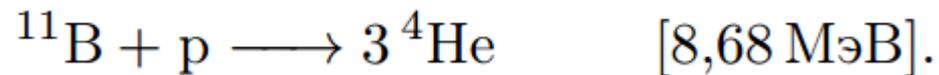
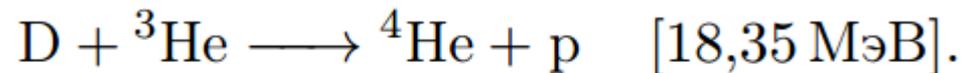


Типичные термоядерные реакции

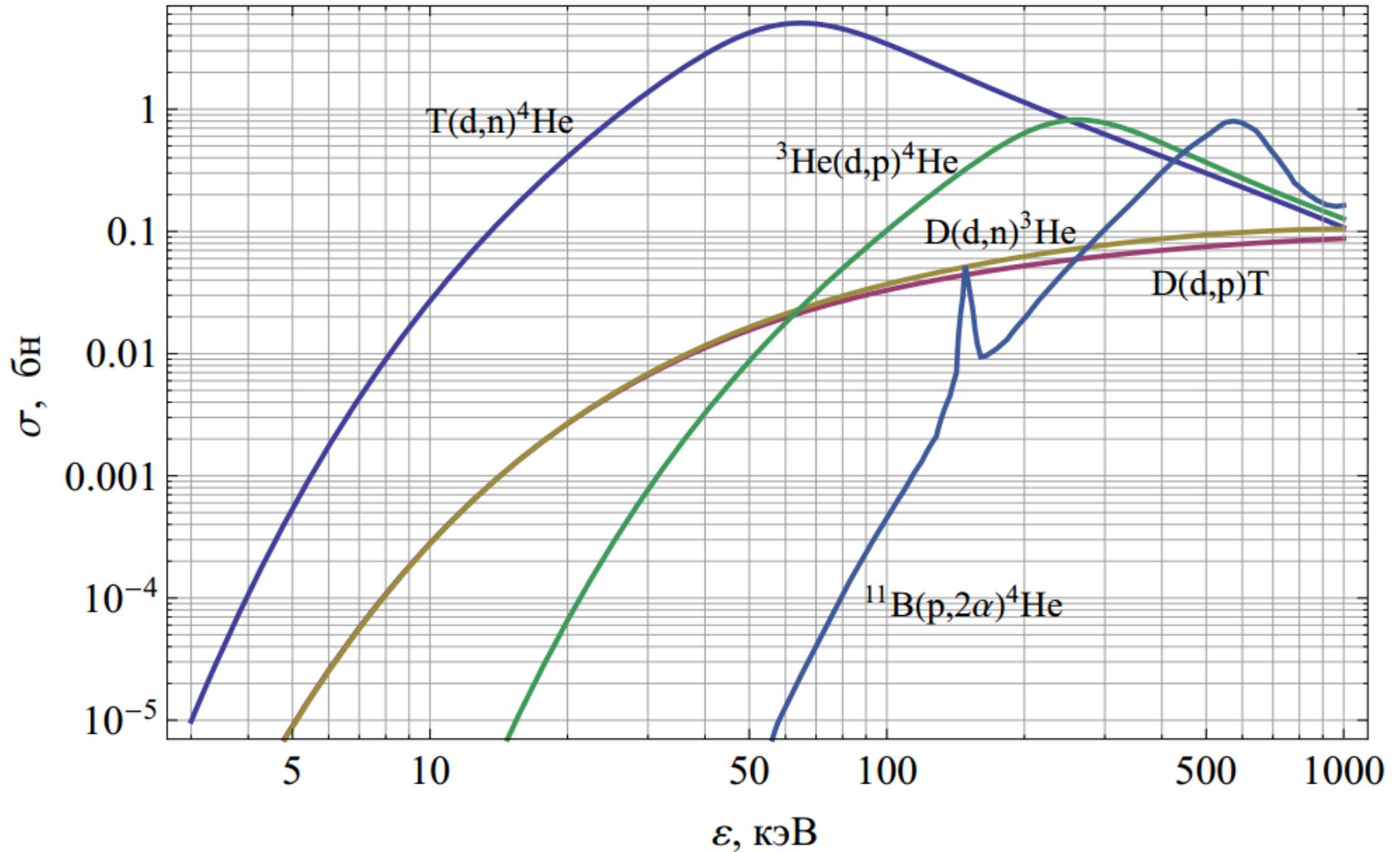
Классические термоядерные реакции



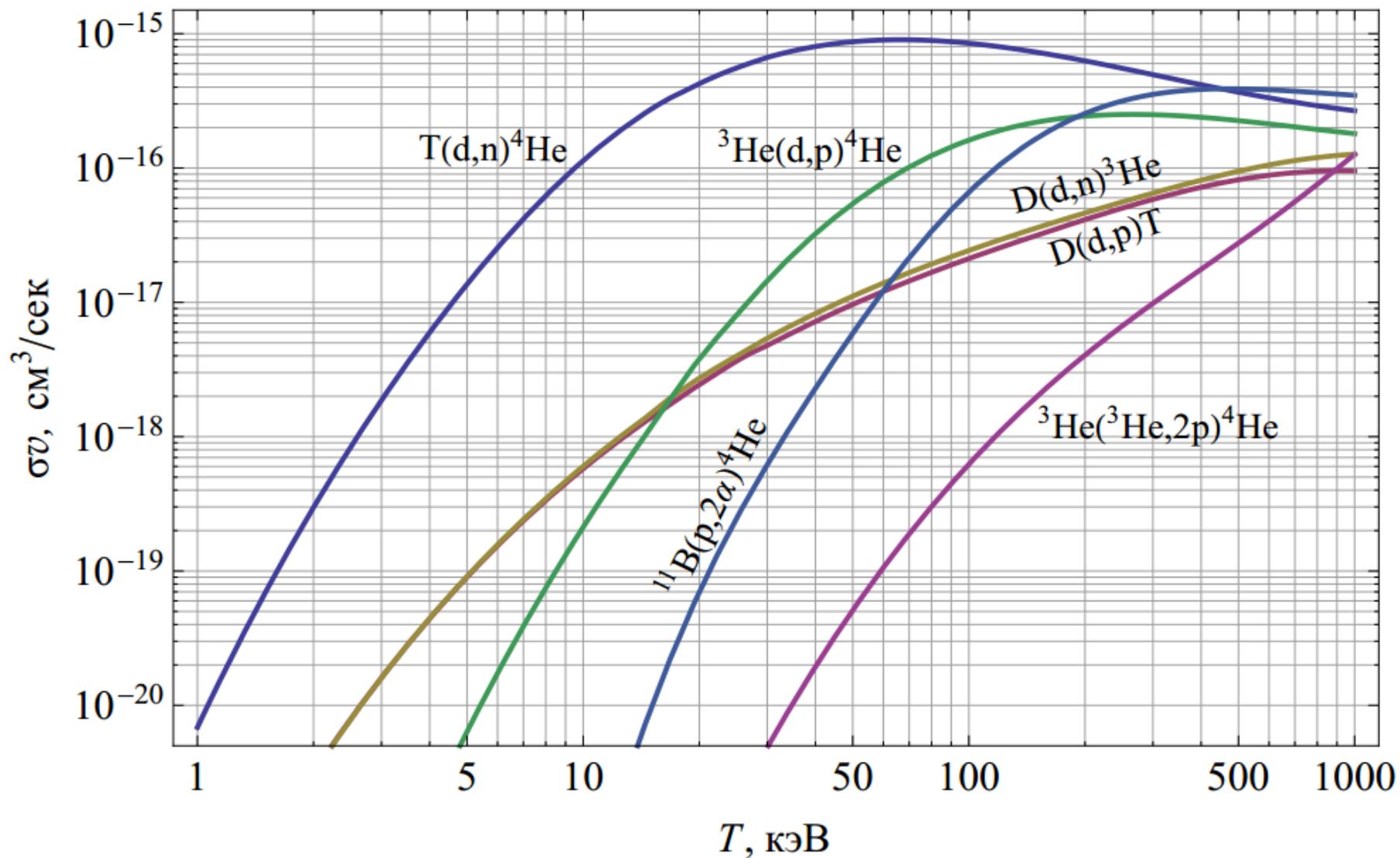
Анейтронные термоядерные реакции



Сечение термоядерных реакции

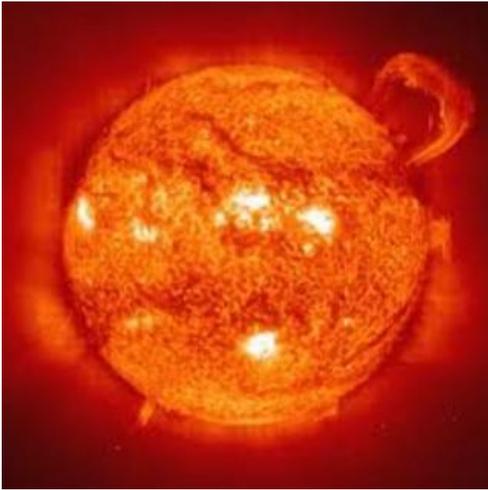


Скорость термоядерных реакции

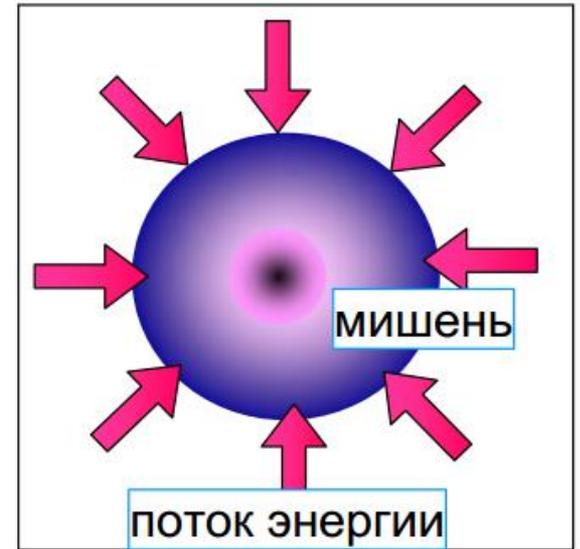


Способы удержания плазмы

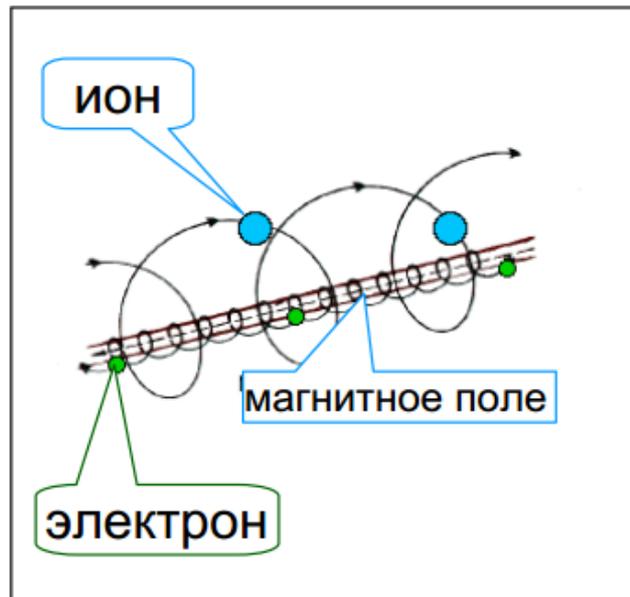
Гравитационное



Инерциальное

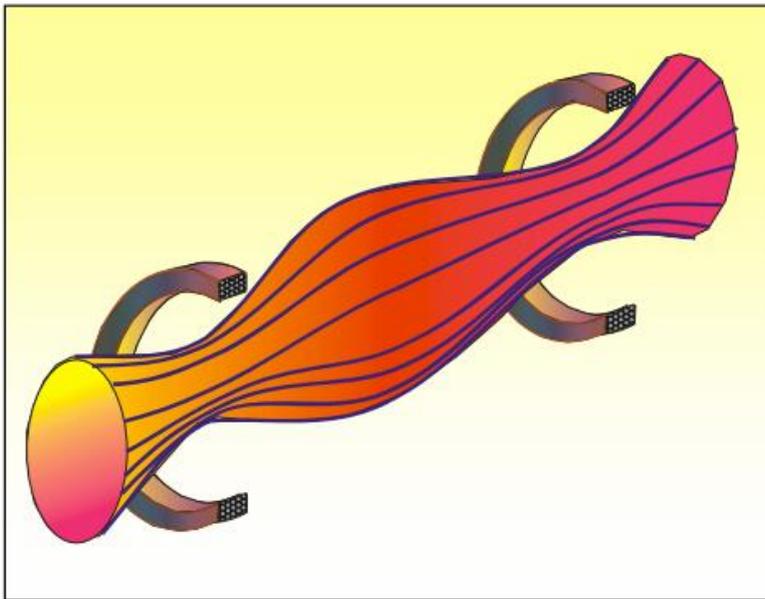


Магнитное



Магнитное удержание плазмы

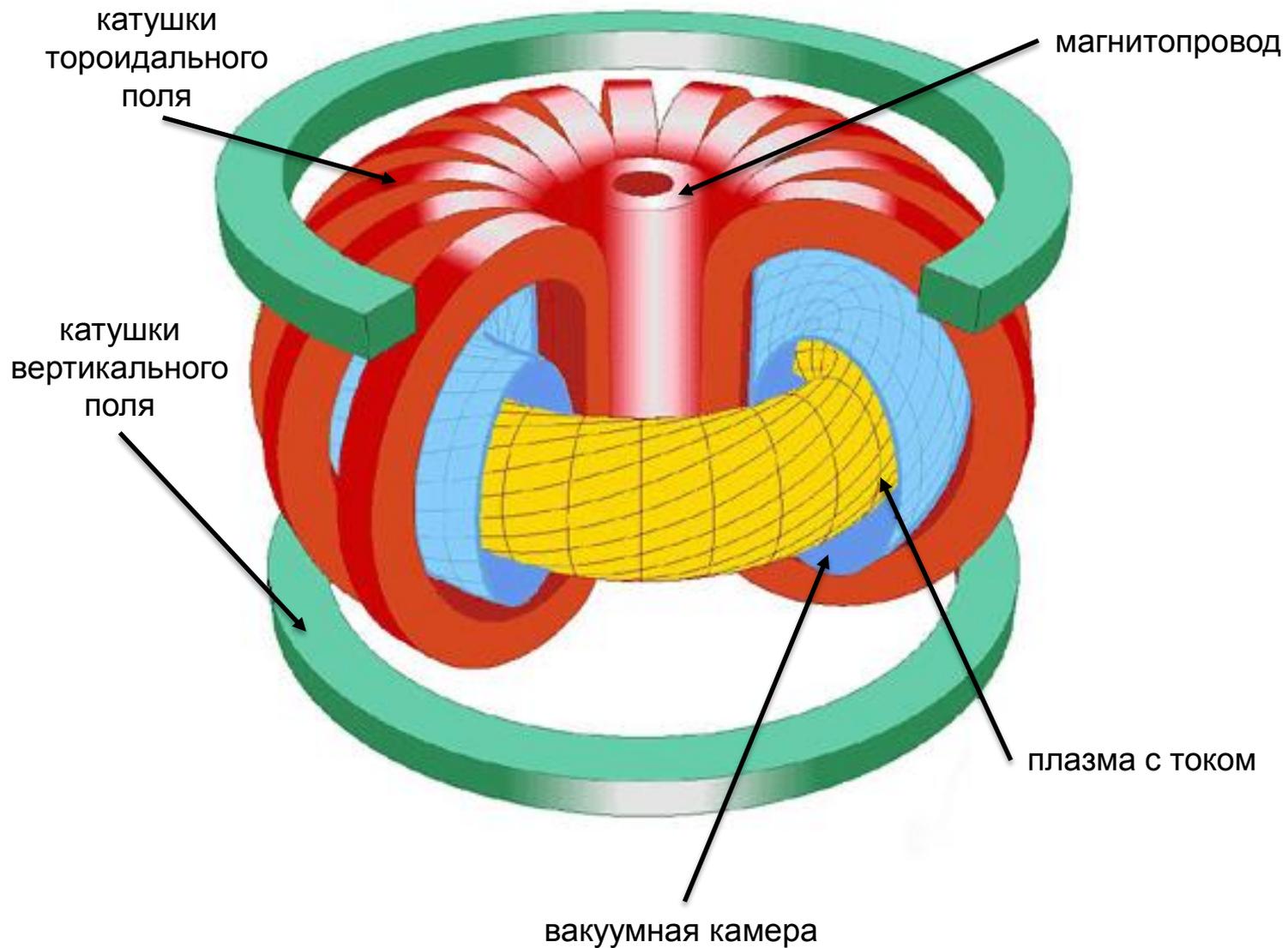
Открытые ловушки



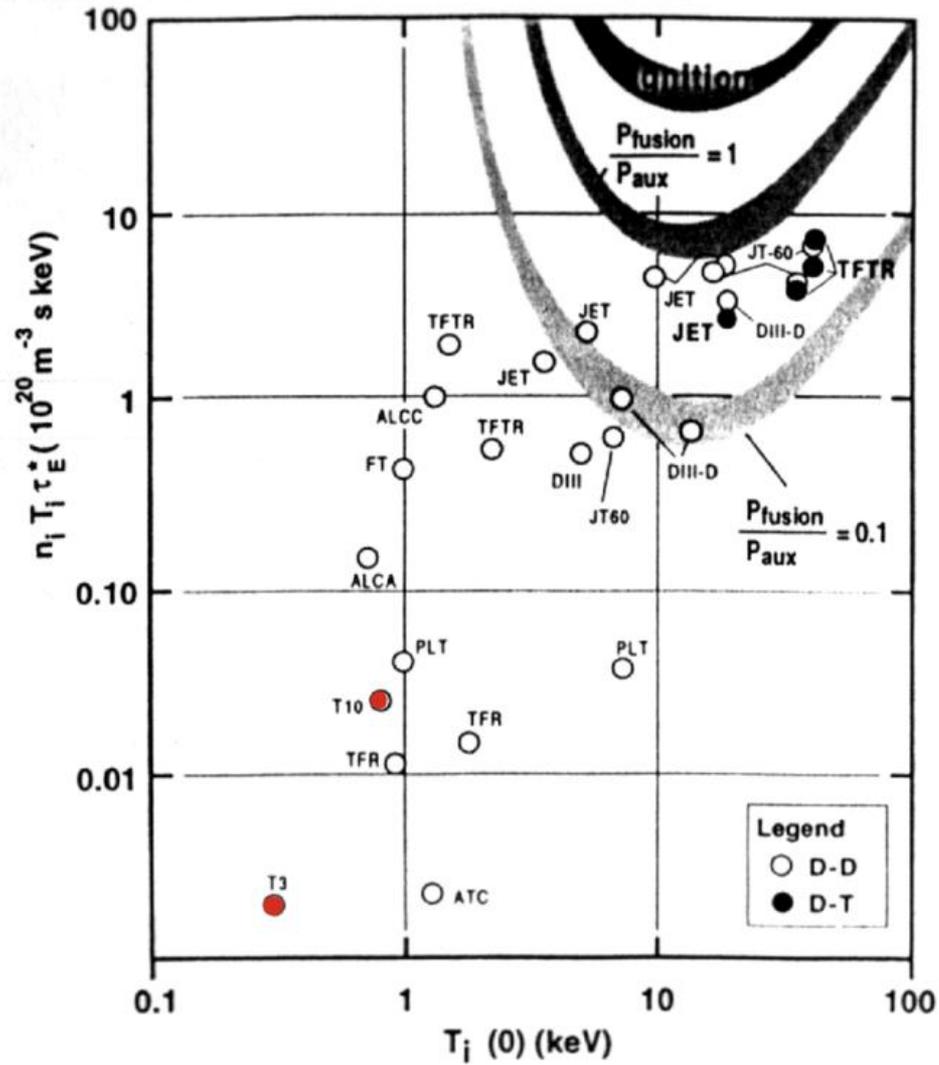
Замкнутые ловушки



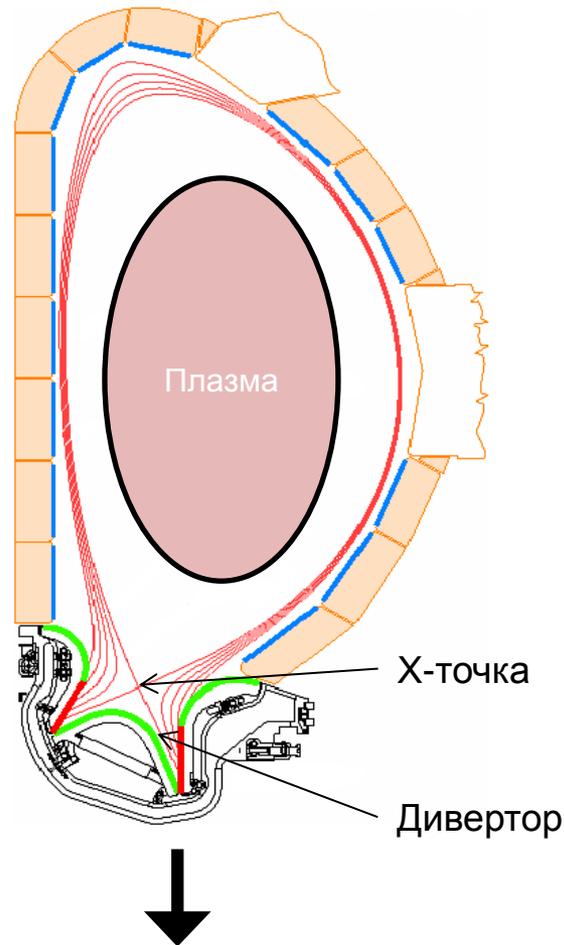
Строение токамака (общая схема)



Прогресс в классических токамаках



Проблема первой стенки



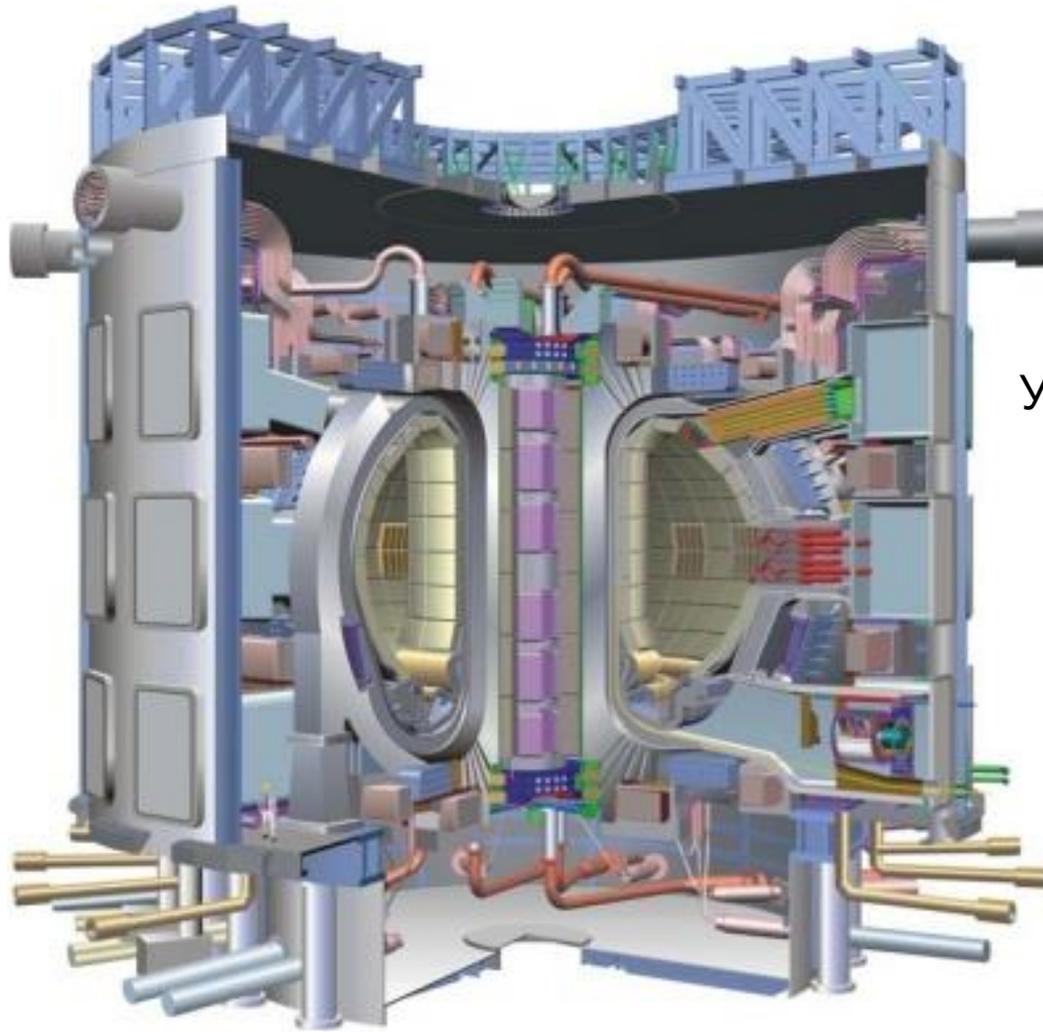
Высокие тепловые повторяющиеся нагрузки

Стационарный поток: 5 МВт/м^2

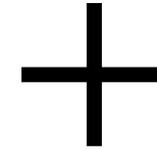
ЭЛМы типа 1: $0.5-10 \text{ МДж/м}^2$ за $0.3-0.6 \text{ мс}$,
до 1000 раз за разряд

Большие срывы: 100 МДж/м^2 за 1 мс

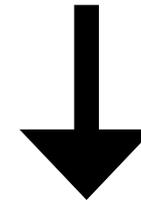
Проект ИТЭР и проблема первой стенки



Низкая нейтронная активация



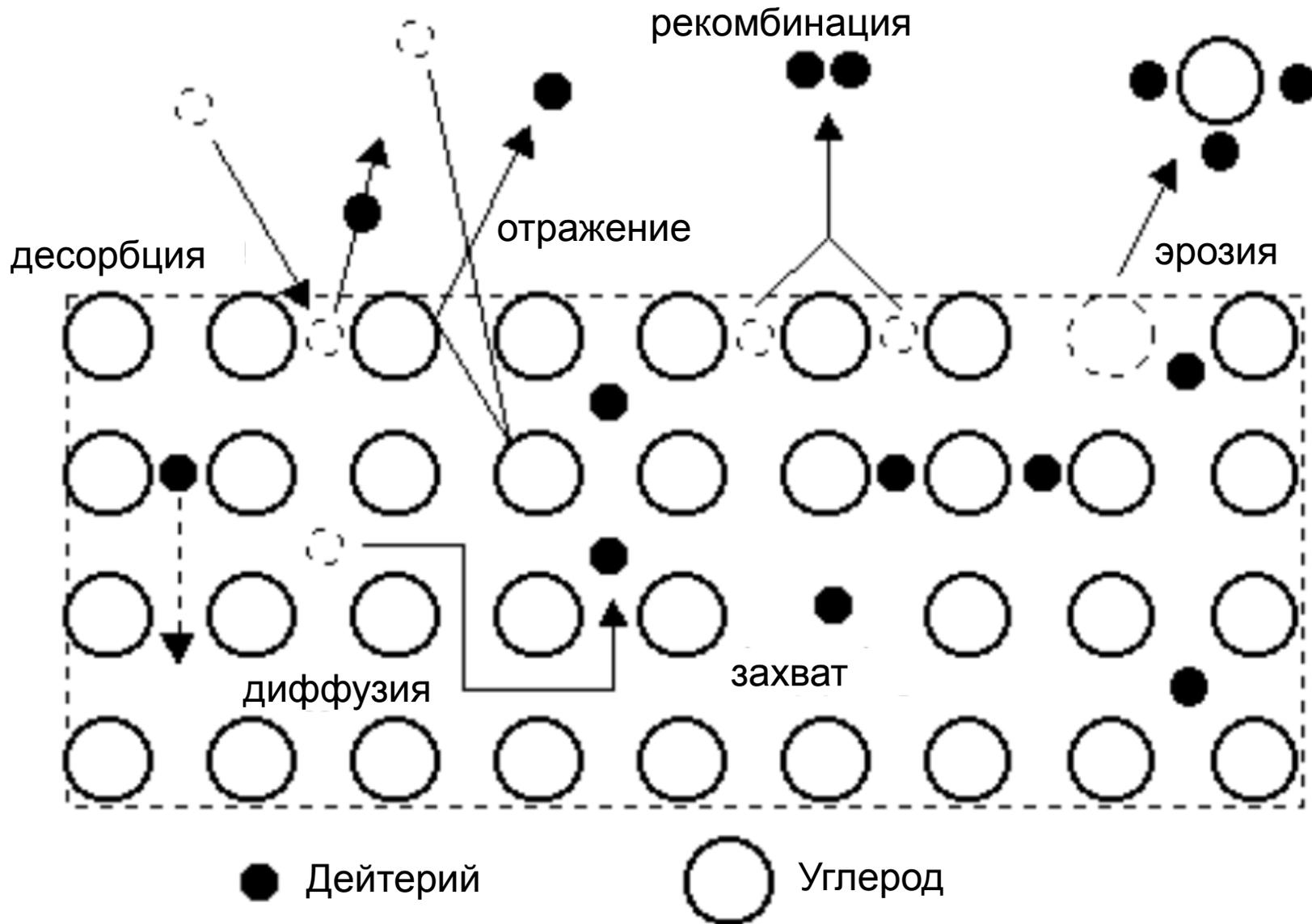
Устойчивость к тепловым нагрузкам



3 материала: 1) углерод
2) бериллий
3) вольфрам

Для дивертора подходит только вольфрам

Процессы на первой стенке, обращенной к плазме



Существующие системы и параметры

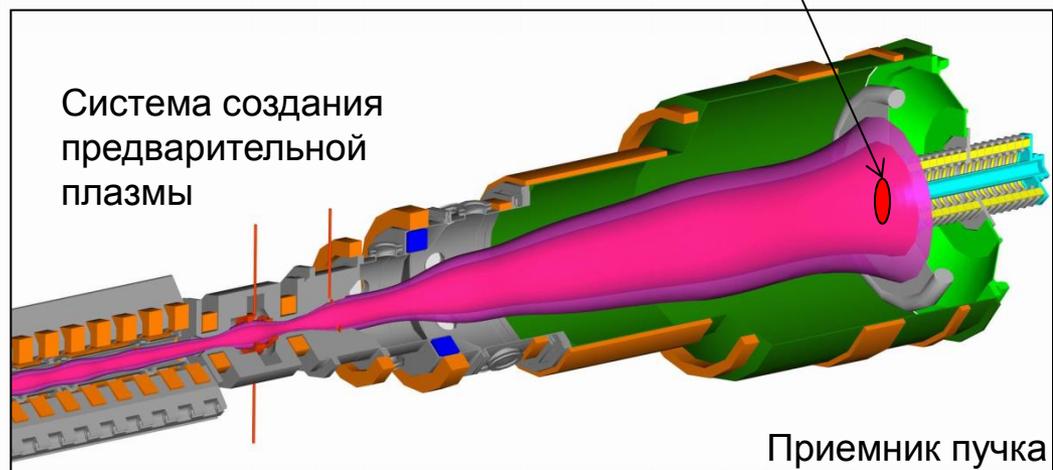
Тип	Установка	Длительность воздействия [мкс]	Плотность энергии [МДж/м ²]	Площадь воздействия [см ²]	Энергия частиц [кэВ]
ЭЛМы типа I	ITER	100 - 1000	1-10	100 000	1-5
Плазменный ускоритель	КСПУ-Х	250	0.2-2.5	250	0.4-0.9
Лазер	FZJ	1000	0.19 - 0.9	7*10 ⁻²	ИК излучение
Электронный пучок	JUDITH II	1000	10	0.2	30-60
Электронный пучок	ГОЛ-3 (длин. импульс)	100-300	1.5 - 2.5	2	55-85

Облучение нагретых мишеней на установке ГОЛ-3

Генератор электронного пучка У-2

Время работы пучка ~ 10 мкс
Энергосодержание пучка ~ 100 кДж
Температура плазмы ~ 1 кэВ
Плотность плазмы ~ 10^{14} см⁻³
Время удержания ~ 1 мс

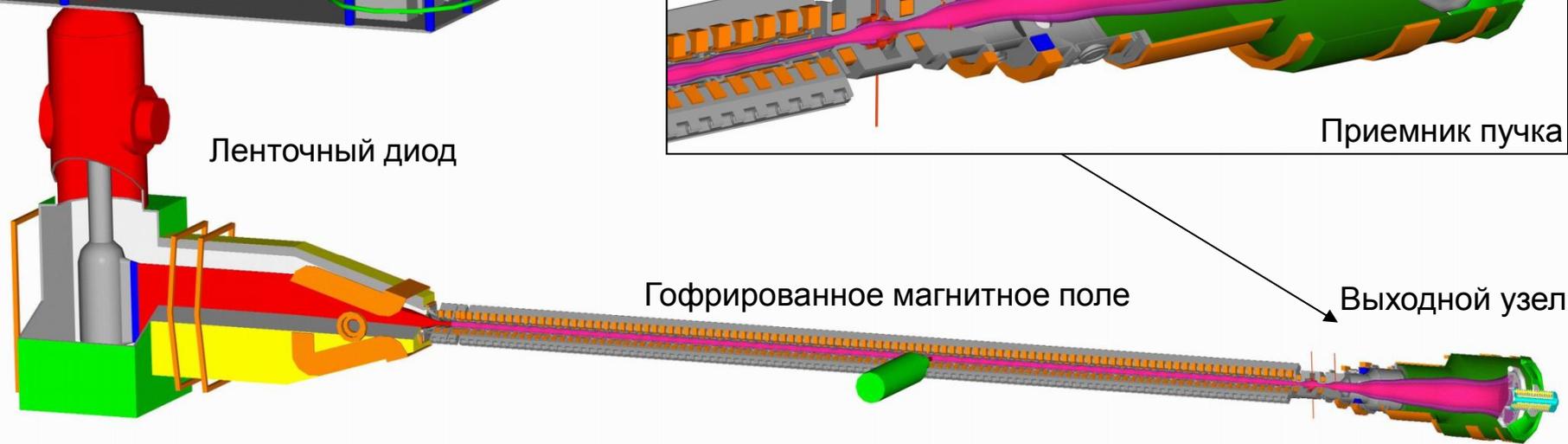
Место установки образцов



Ленточный диод

Гофрированное магнитное поле

Выходной узел



Конструкция мишенедержателя с нагревателем

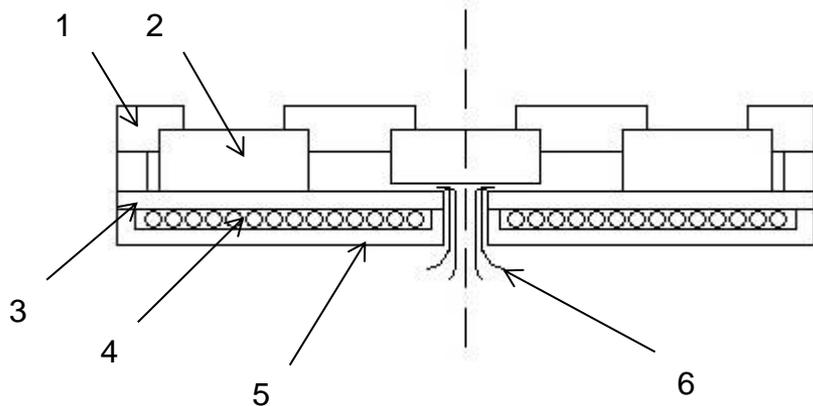
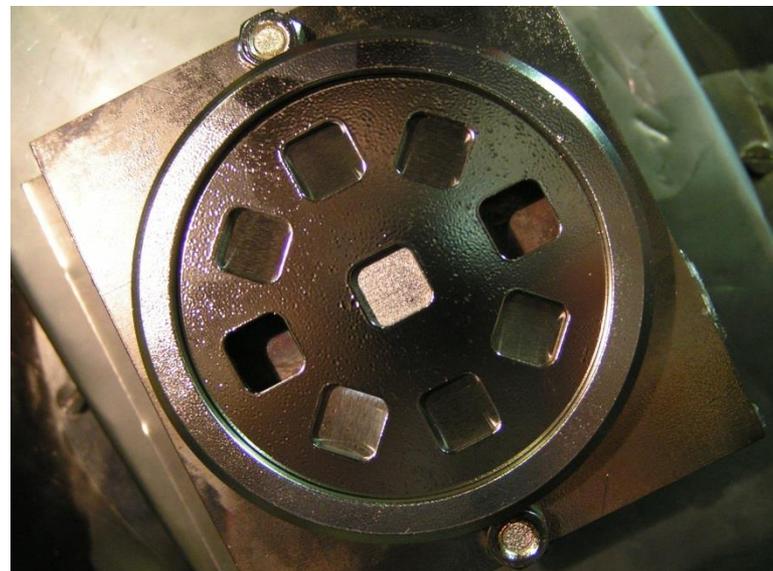
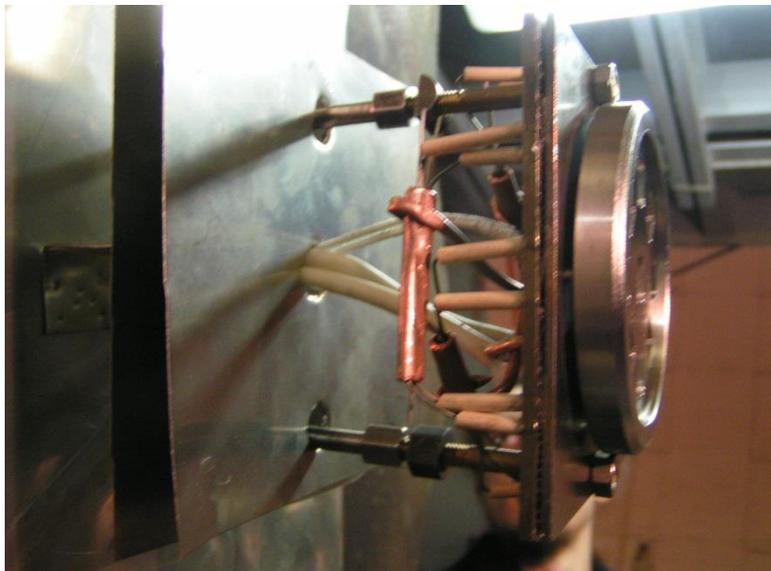


Схема мишенедержателя с нагревателем. 1 – маска, 2 – мишень (вольфрам 12x12x5 мм), 3 – подложка, 4 – нихромовый нагреватель, 5 – основание, 6 – термопара.

Нагреватель: нихром $d=0,8$ мм; 8 секций, соединенных параллельно по ~ 0.8 Ом каждая; диэлектрики: слюда и керамические трубки.



Фотографии мишенедержателя в выходном узле

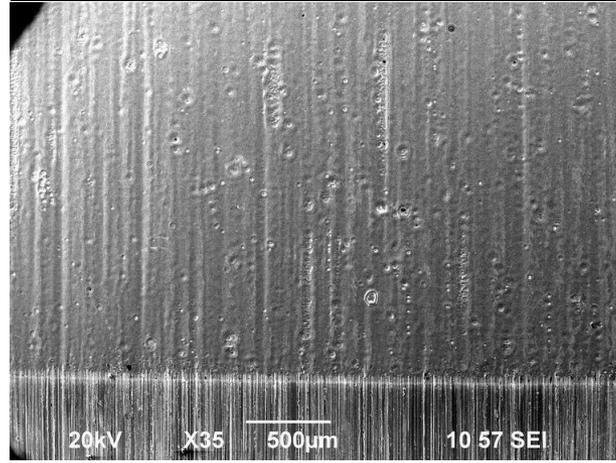
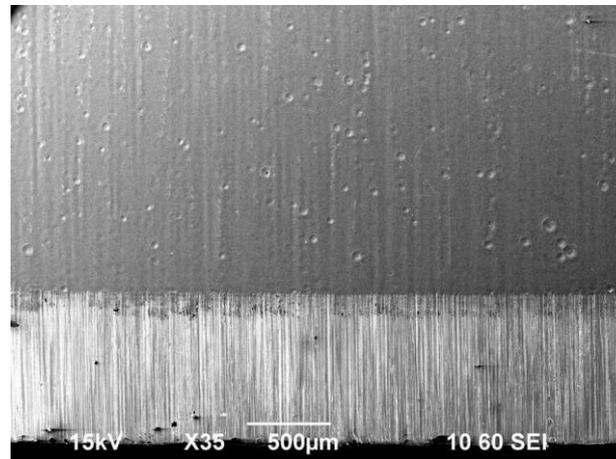
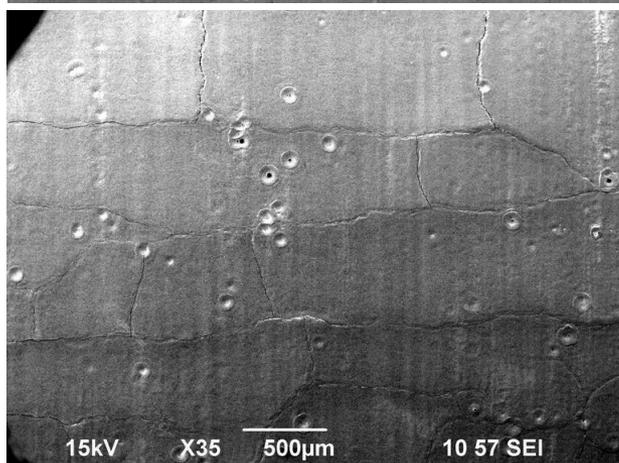
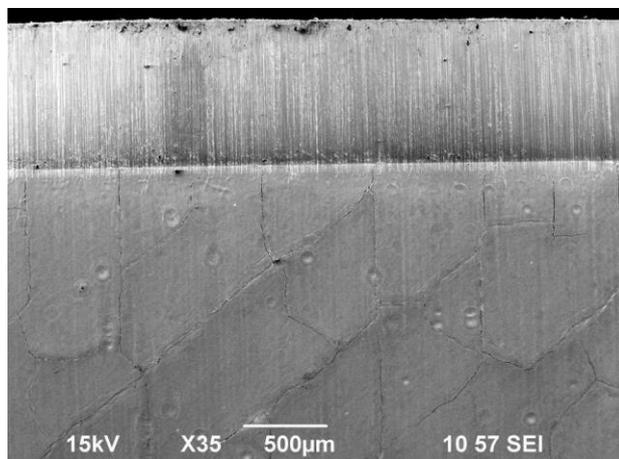
Термо-ЭДС во время выстрелов

20.3 ± 0.7 мВ (510 ± 20 °С)

Поверхность вольфрама после облучения

Снимки со сканирующего электронного микроскопа Jeol JCM5700

Облучение по 10 выстрелов с нагрузкой 1 МДж/м² в каждом



Мишень без предварительного нагрева

Мишень при нагреве до ~500°C

Наблюдаем:

Сеть трещин
~5 кратеров на мм²

Отсутствие трещин
~17 кратеров на мм²

Многоимпульсное облучение на стенде с источником электронов

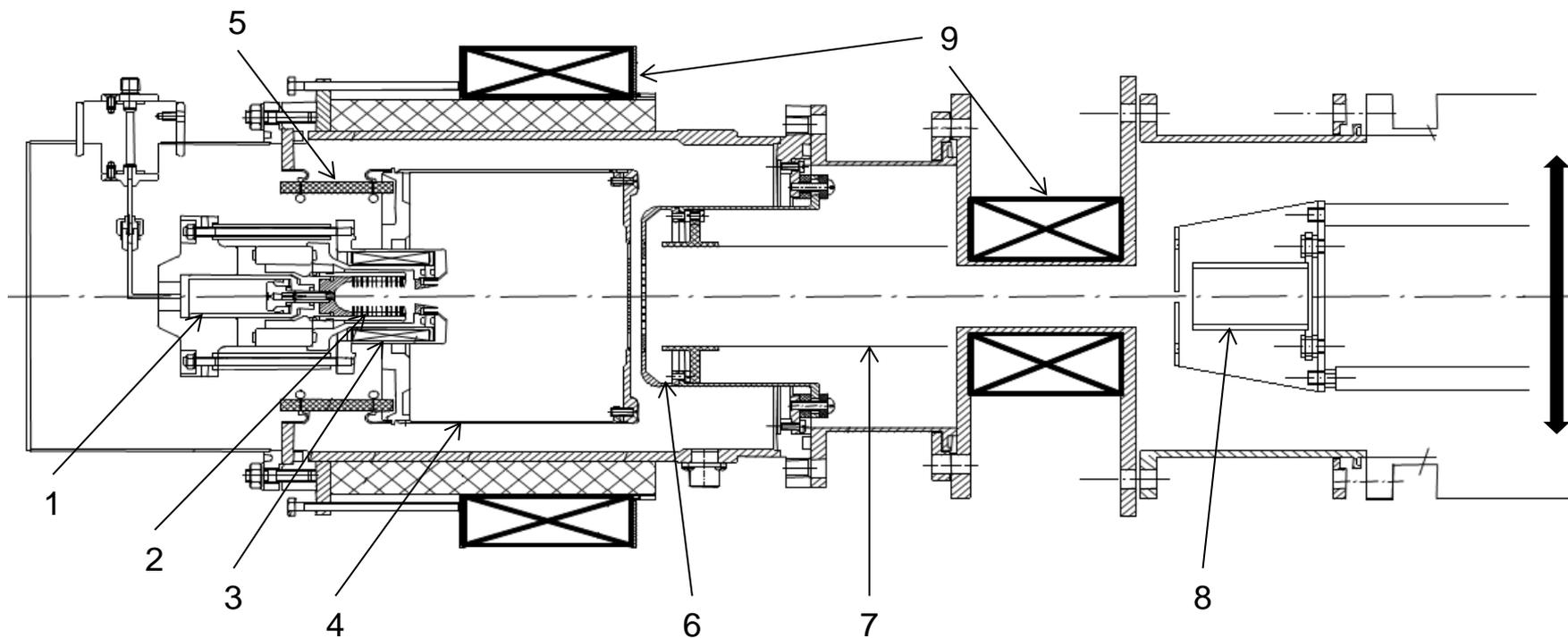
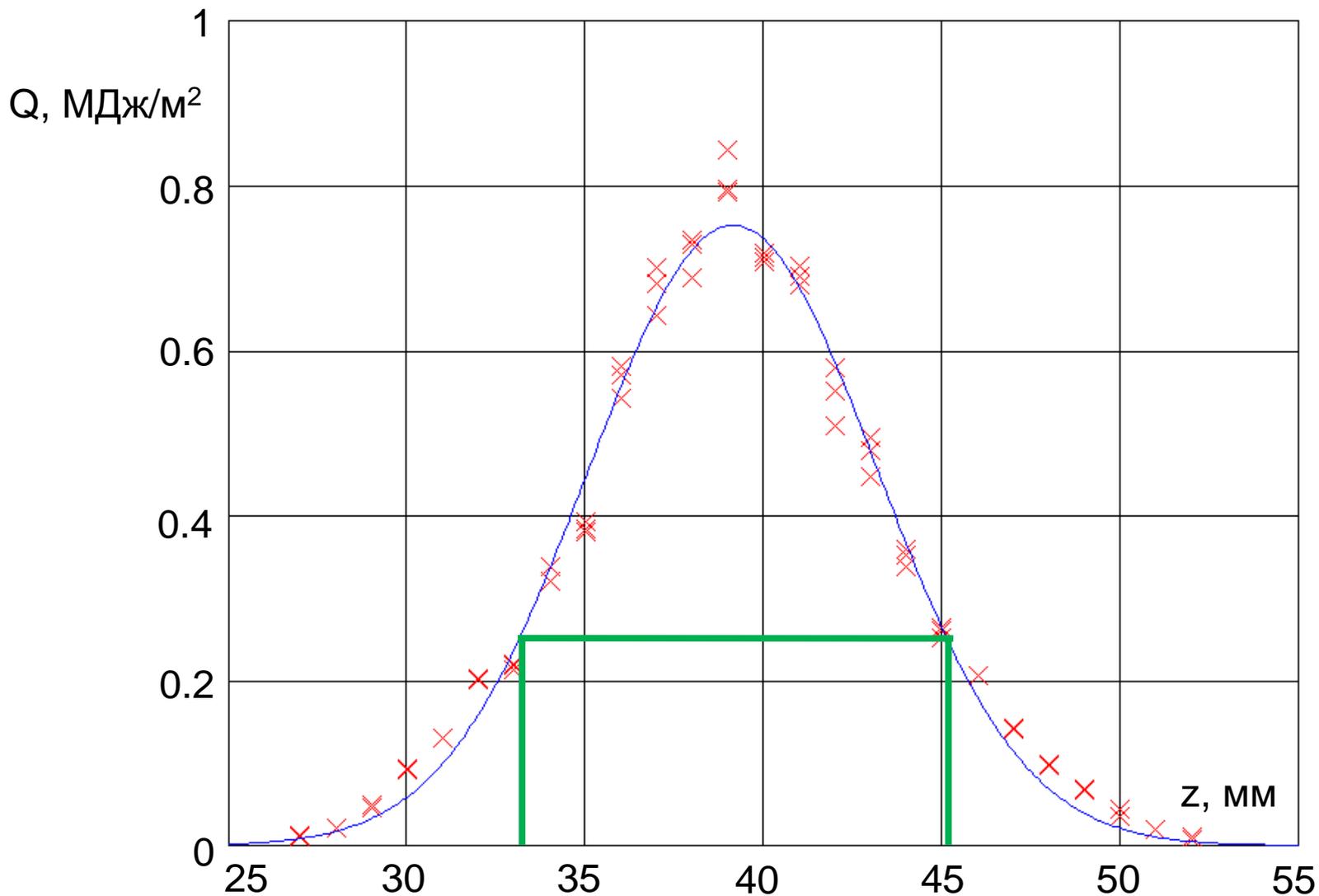


Схема стенда: 1 – импульсный клапан, 2 – дуговой канал, 3 – катушка магнитной изоляции дуги, 4 – экспандер дугового разряда, 5 – керамический изолятор, 6 – анод диода, 7 – труба дрейфа, 8 – цилиндр Фарадея, 9 – катушки магнитного поля.

Результаты измерения плотности энерговыведения



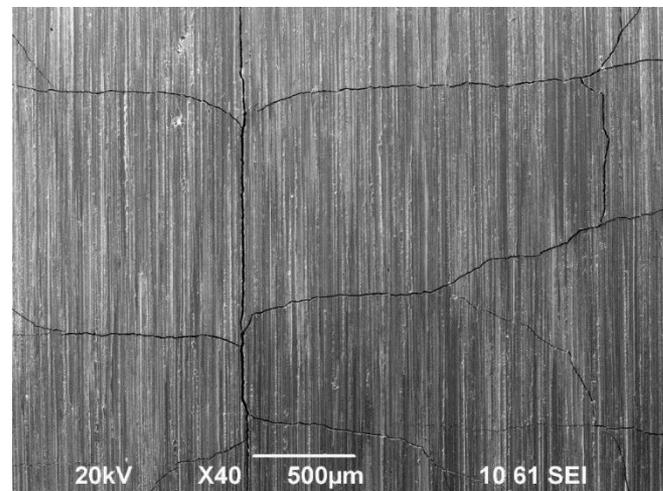
Измерение плотности энерговыведения электронного пучка с ускоряющим напряжением $U=32$ кэВ и длительностью $t=280$ мкс.

Поверхность мишеней после облучения

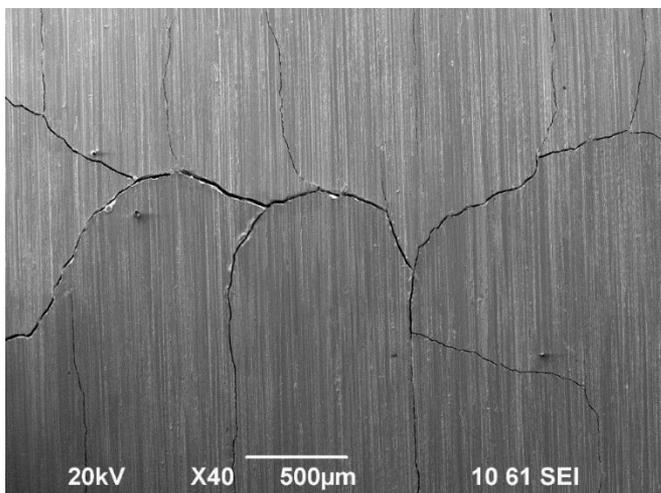
Облучение W мишеней с энергосвободением около 0.75 МДж/м^2 в максимуме с количеством выстрелов 10, 100 и 1000.



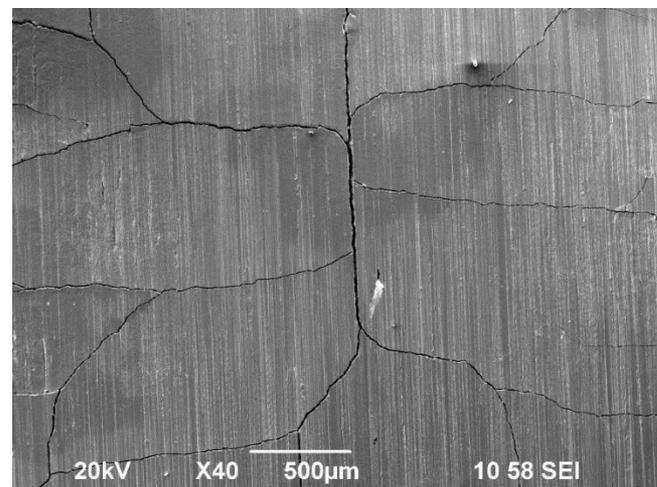
Фото мишеней



10 выстрелов



100 выстрелов

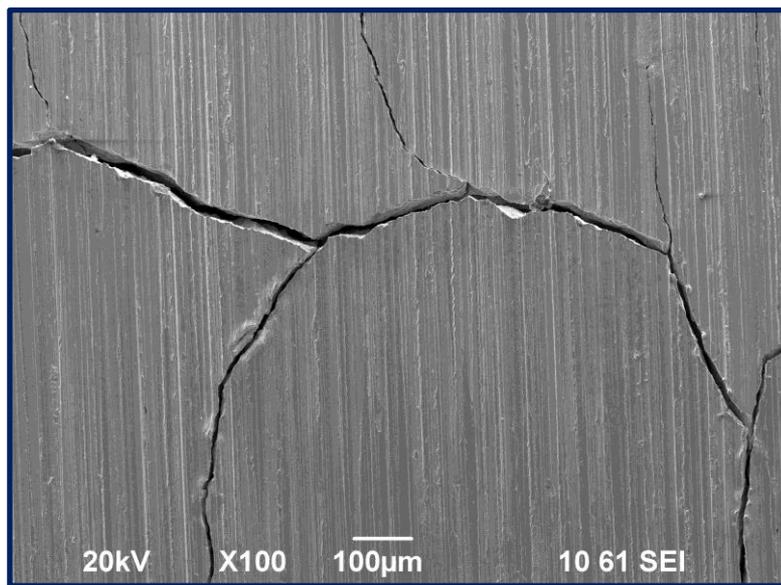
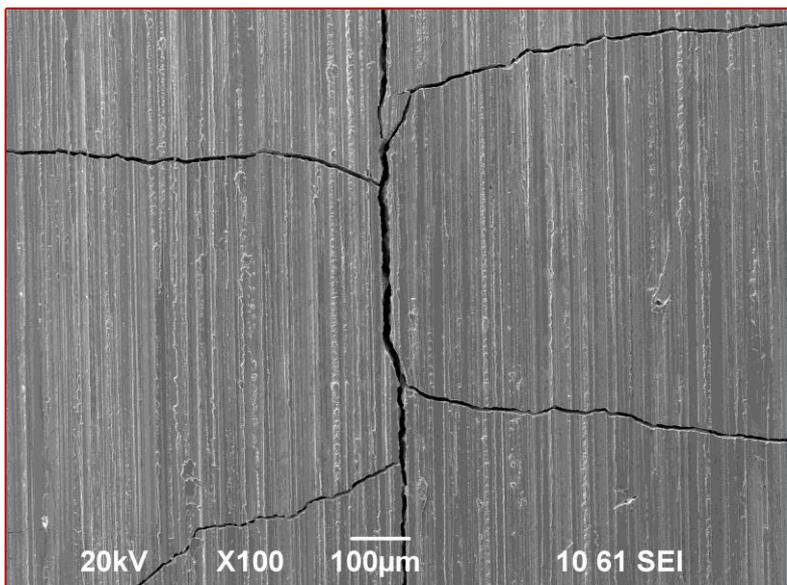
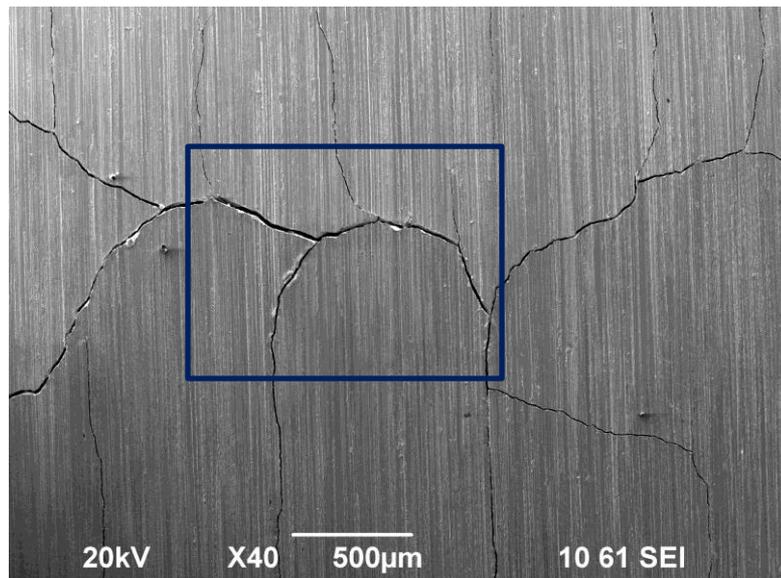
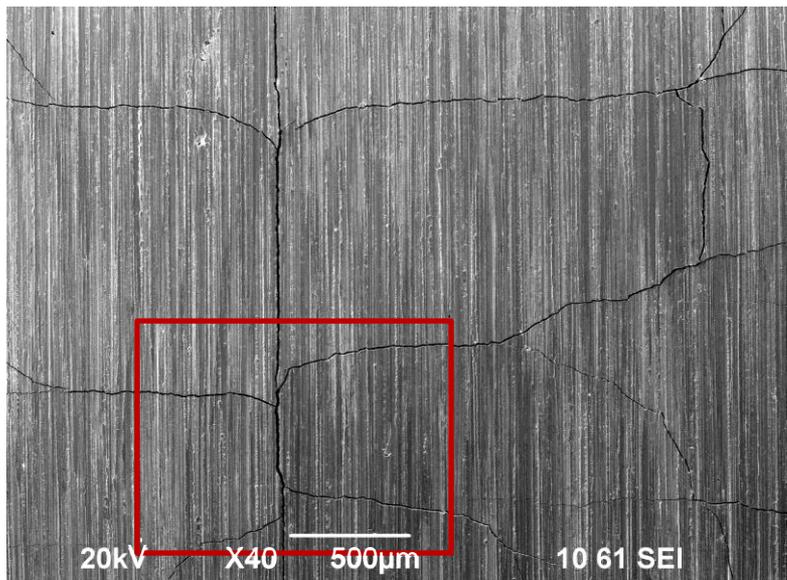


1000 выстрелов

Уширение трещин при увеличении количества выстрелов

10 выстрелов

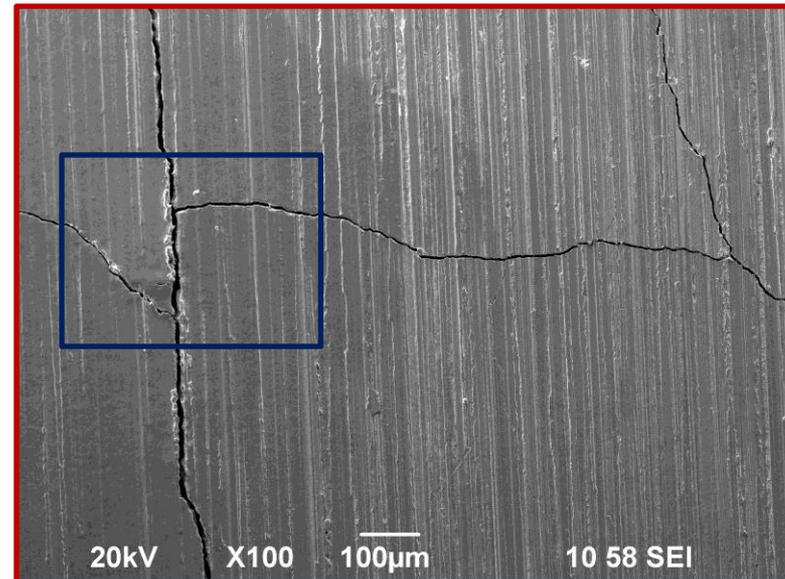
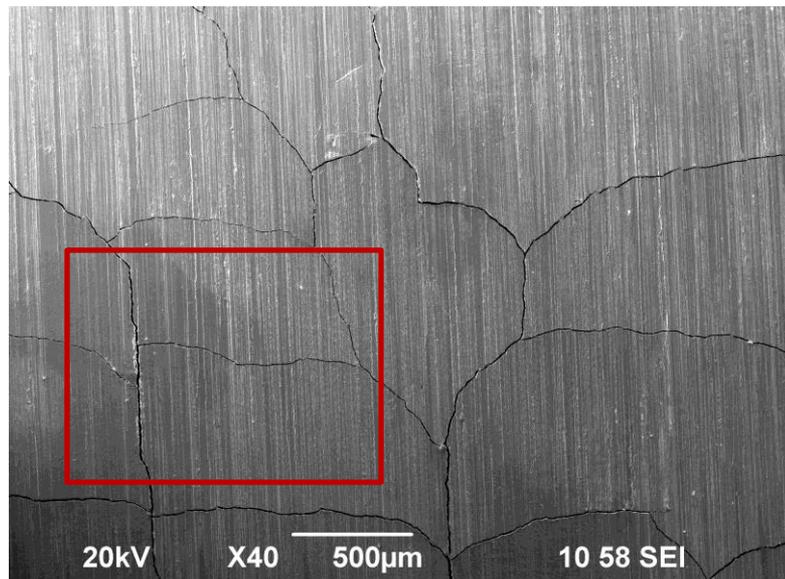
100 выстрелов



Сеть тонких трещин

Трещины в ~2-3 раза шире

Оплавление приповерхностного слоя 1000 выстрелов



Вблизи крупных трещин обнаружено плавление небольшого поверхностного слоя.

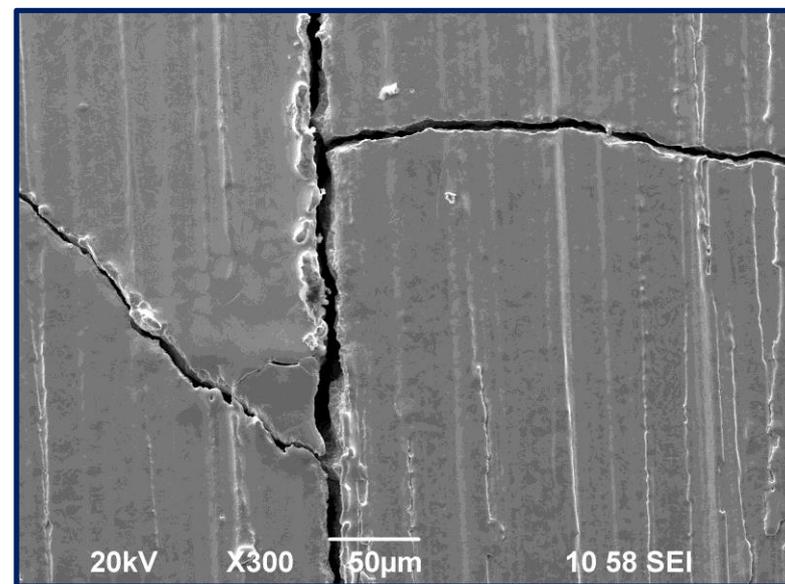
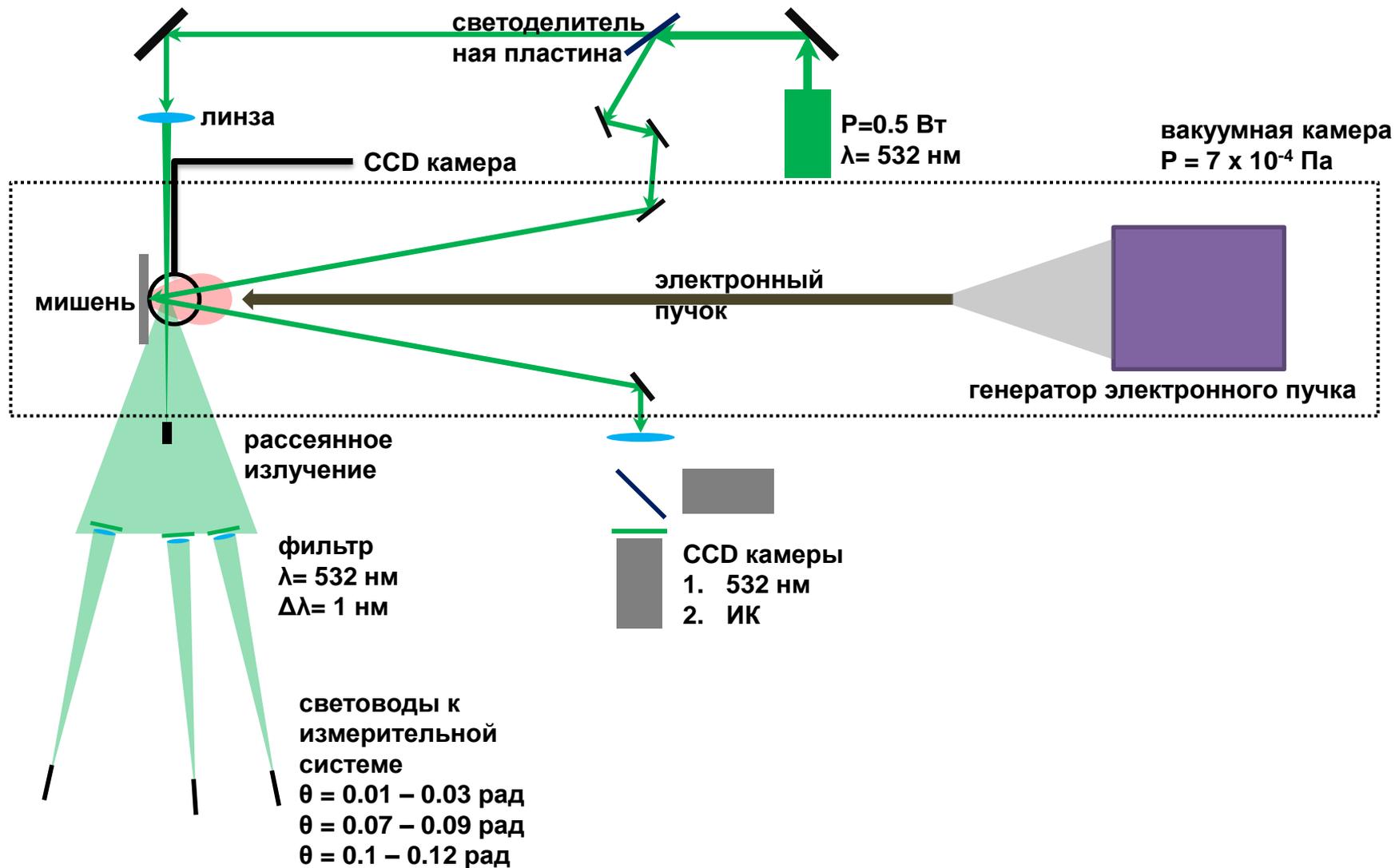
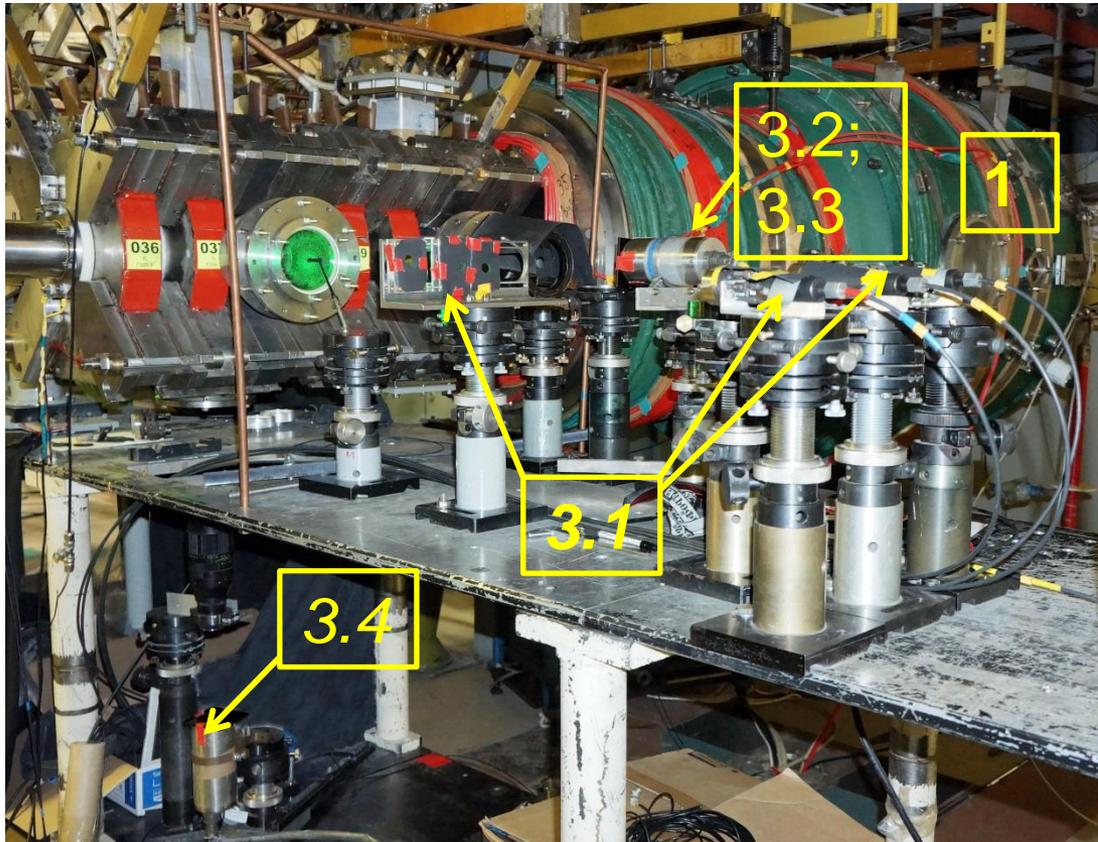


Схема стенда для материаловедческих исследований



Стенд по изучению эрозии поверхности вольфрама



1. Электронный пучок

1.1. Мощность 4 МВт

1.2. Длительность до 0.3 мс

1.3. Нагрузка 2,5 МДж/м²

2. Магнитное поле 0.22 Тл

3. ДИАГНОСТИКИ

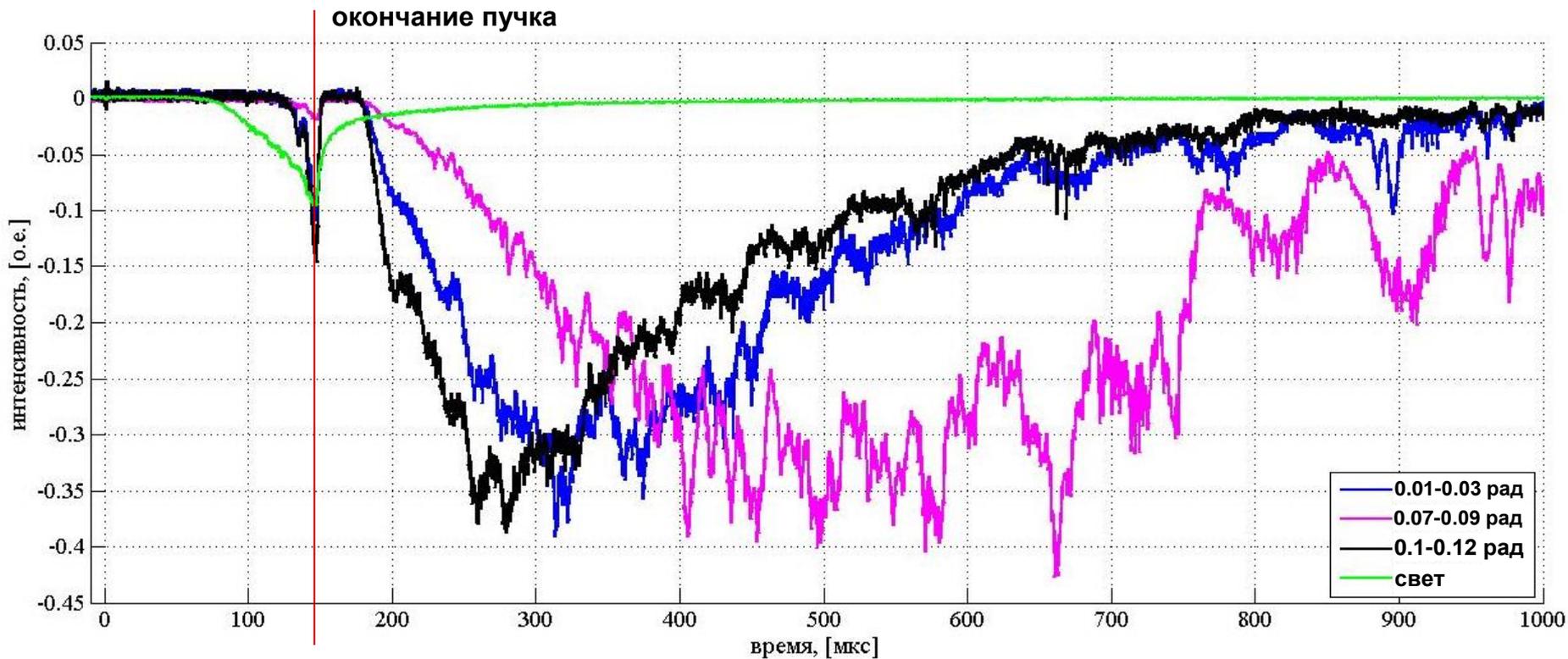
3.1. 3 канала рассеяния на микрочастицах непрерывного лазера

3.2. CCD-камера для съятия картины температуры поверхности

3.3. CCD-камера для снимка рассеяния лазера на поверхности мишени

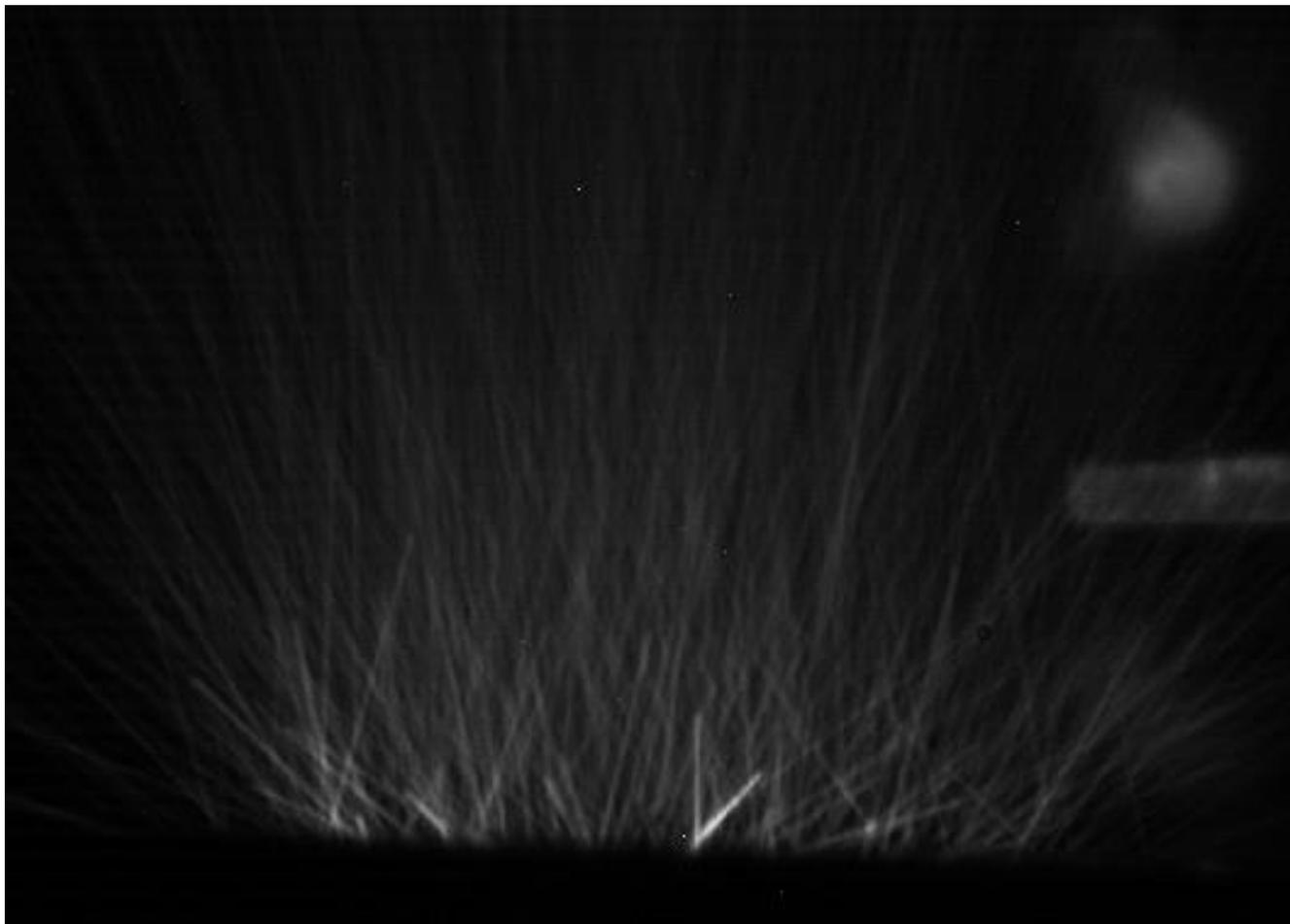
3.4. CCD-камера для снимка разлета капель вольфрама

Сигналы рассеяния на микрочастицах



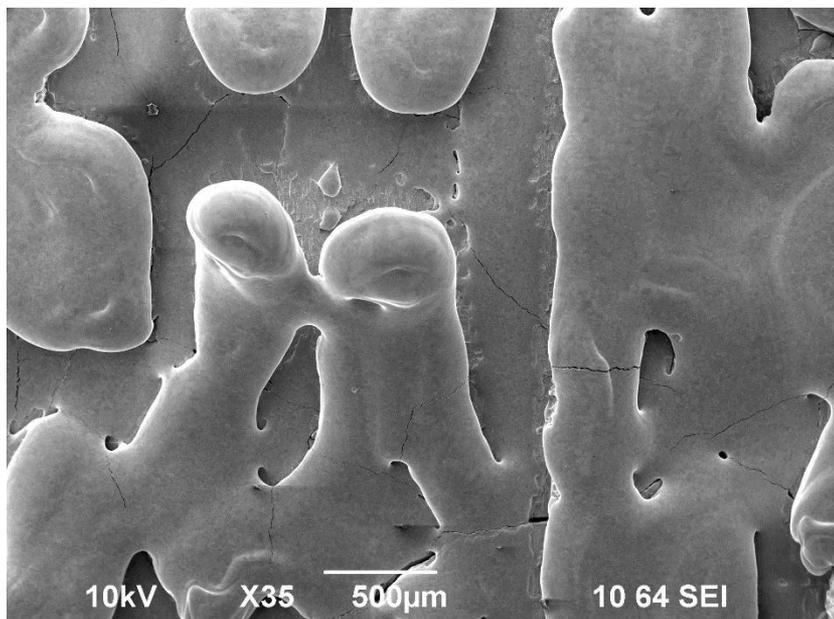
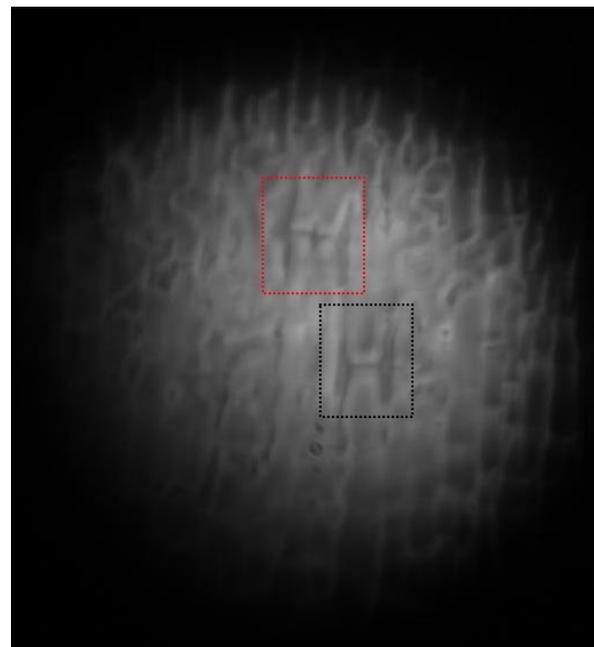
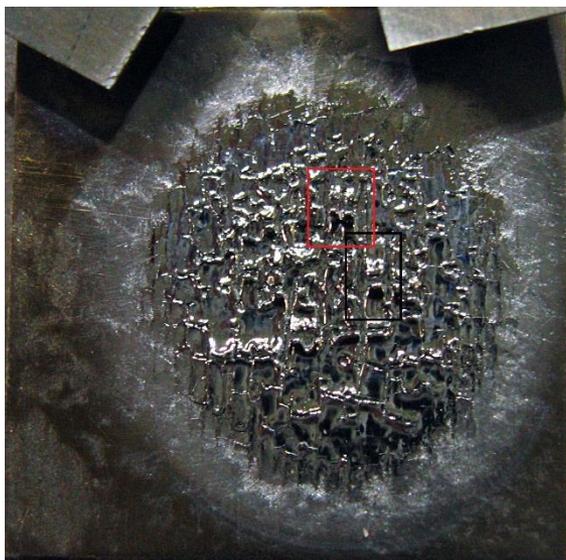
Полный энерговклад ~ 350 Дж
Длительность ~ 140 мкс

Снимок капель вольфрама



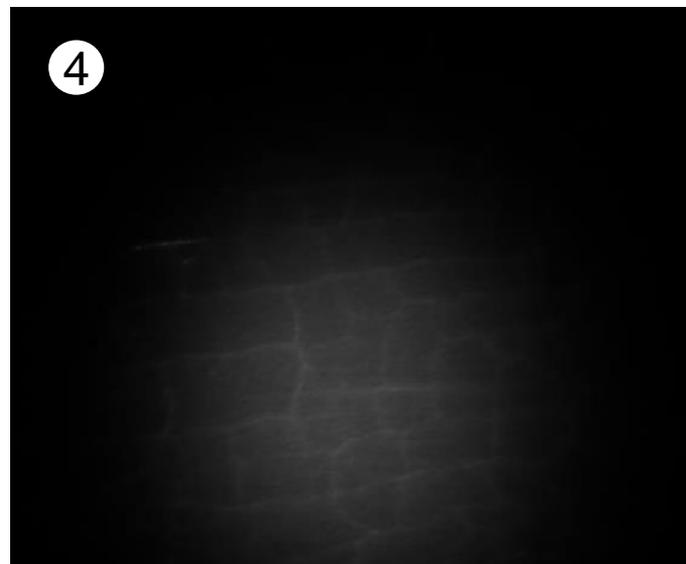
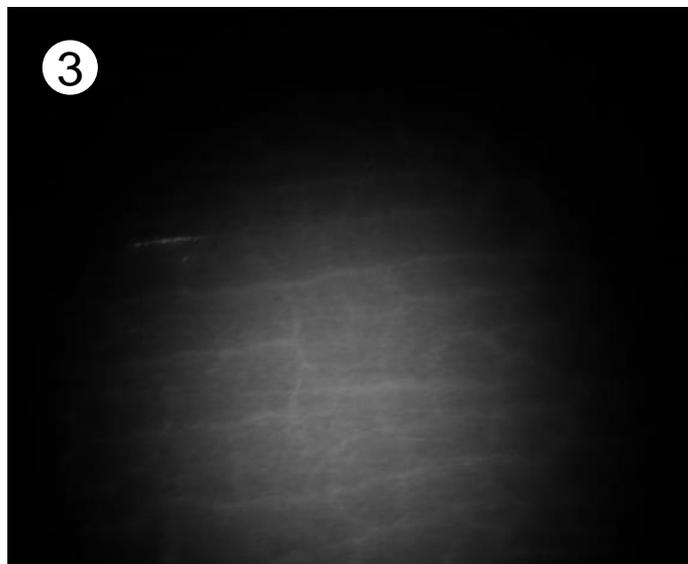
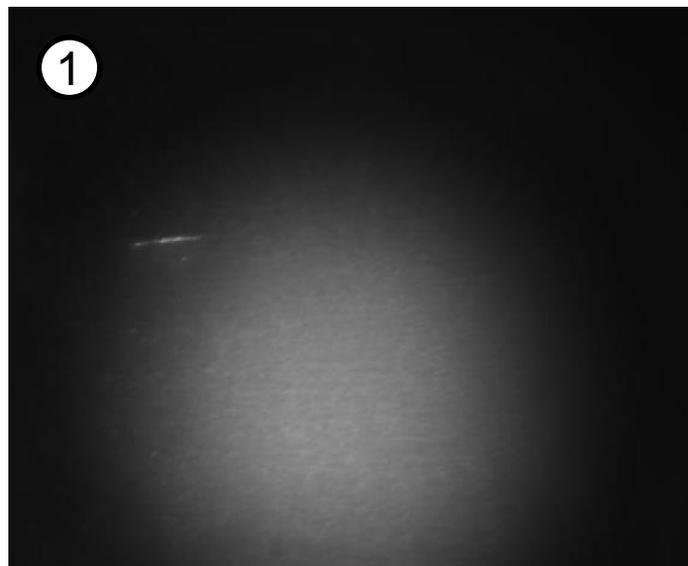
Полный энерговклад ~530 Дж
Длительность ~124 мкс

Снимки мишени во время выстрела и после



~100 выстрелов
Полный энерговклад $200 \div 600$ Дж
Длительность $80 \div 150$ мкс

Снимки мишени во время выстрела в ИК-спектре



4 последовательных выстрела. Полный энерговклад ~180 Дж.
Длительность 130 мкс

Спасибо за внимание!

