

Э.П.КРУГЛЯКОВ

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ КОНЦЕПЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ**

**НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ**



Институт ядерной физики СО РАН им Г.И.Будкера

НЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ ГДЛ ДОСТОИНСТВА:

МОЩНЫЙ ПОТОК ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ D-T РЕАКЦИИ МОЖЕТ БЫТЬ ПОЛУЧЕН ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ «ТЕПЛОЙ» ПЛАЗМЫ И ИНЖЕКЦИИ В НЕЕ БЫСТРЫХ АТОМОВ ДЕЙТЕРИЯ И ТРИТИЯ.

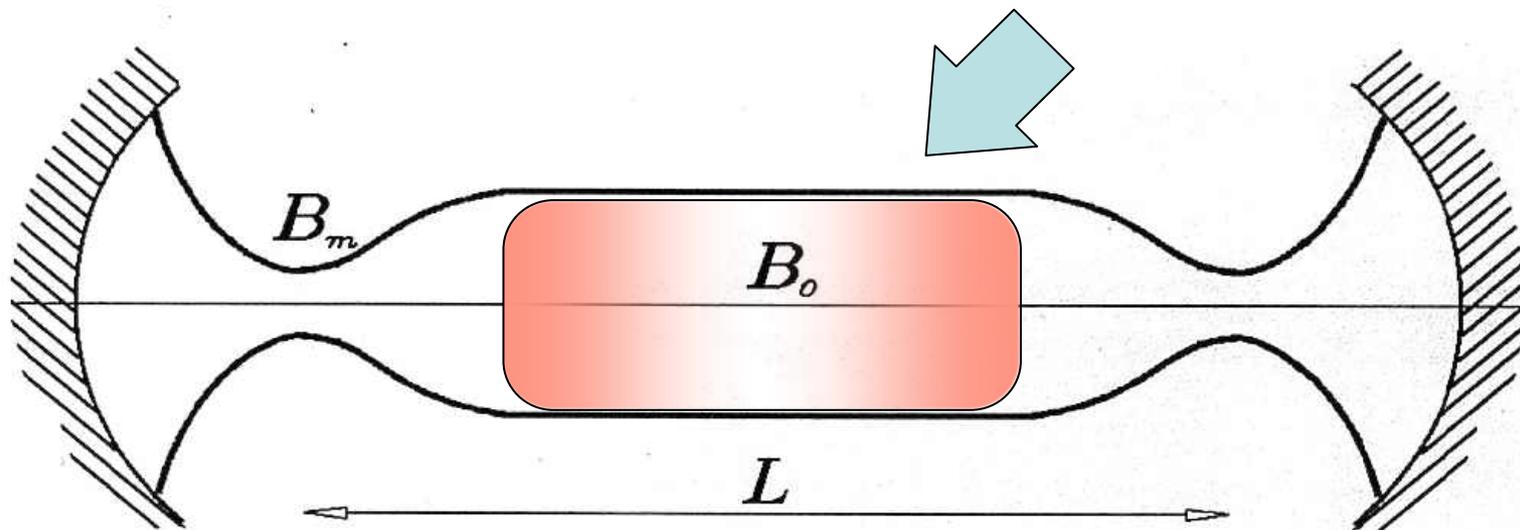
ПРИ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ $W_{эл} = 60 \text{ MW}$ И РАСХОДЕ ТРИТИЯ 150 г/год, ПЛОТНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ЗОНЕ ИСПЫТАНИЙ ($S \sim 1 \text{ м}^2$) ДОСТИГАЕТ 2 МВт/м^2 .

БОЛЬШАЯ ЧАСТЬ ПОВЕРХНОСТИ СТЕНОК ИСТОЧНИКА ПОДВЕРГАЕТСЯ СЛАБОМУ НЕЙТРОННОМУ ОБЛУЧЕНИЮ И НЕ БУДЕТ НУЖДАТЬСЯ В ЗАМЕНЕ.

ПРОСТАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ГЕОМЕТРИЯ РЕЗКО УПРОЩАЕТ ЭКСПЛУАТАЦИЮ ИСТОЧНИКА.

БЛАГОДАря СВОЕЙ ПРОСТОТЕ ОН МОЖЕТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАН В КАЧЕСТВЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОТРАБОТКИ ЛЮБЫХ ЯДЕРНО-ТЕРМОЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА (ГДЛ)

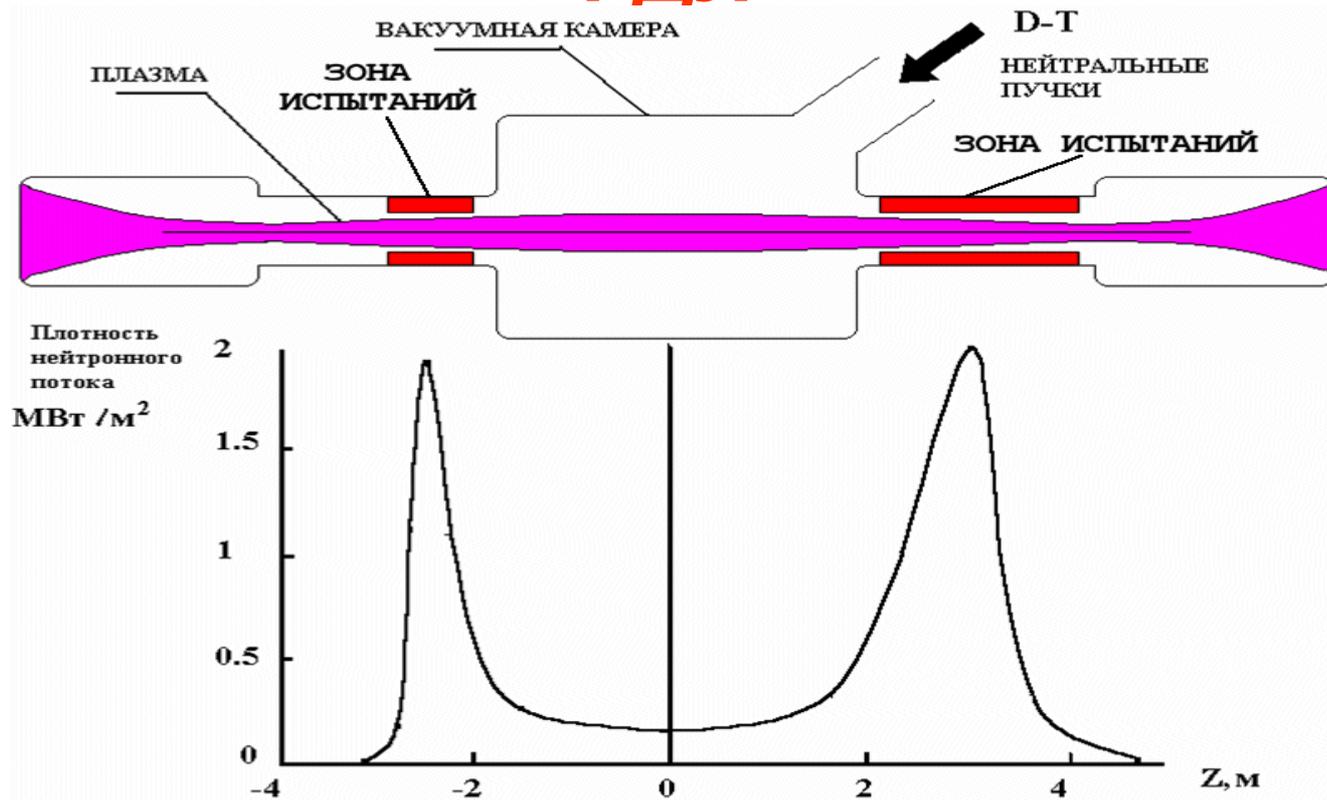


$$\lambda_{ii} < L$$

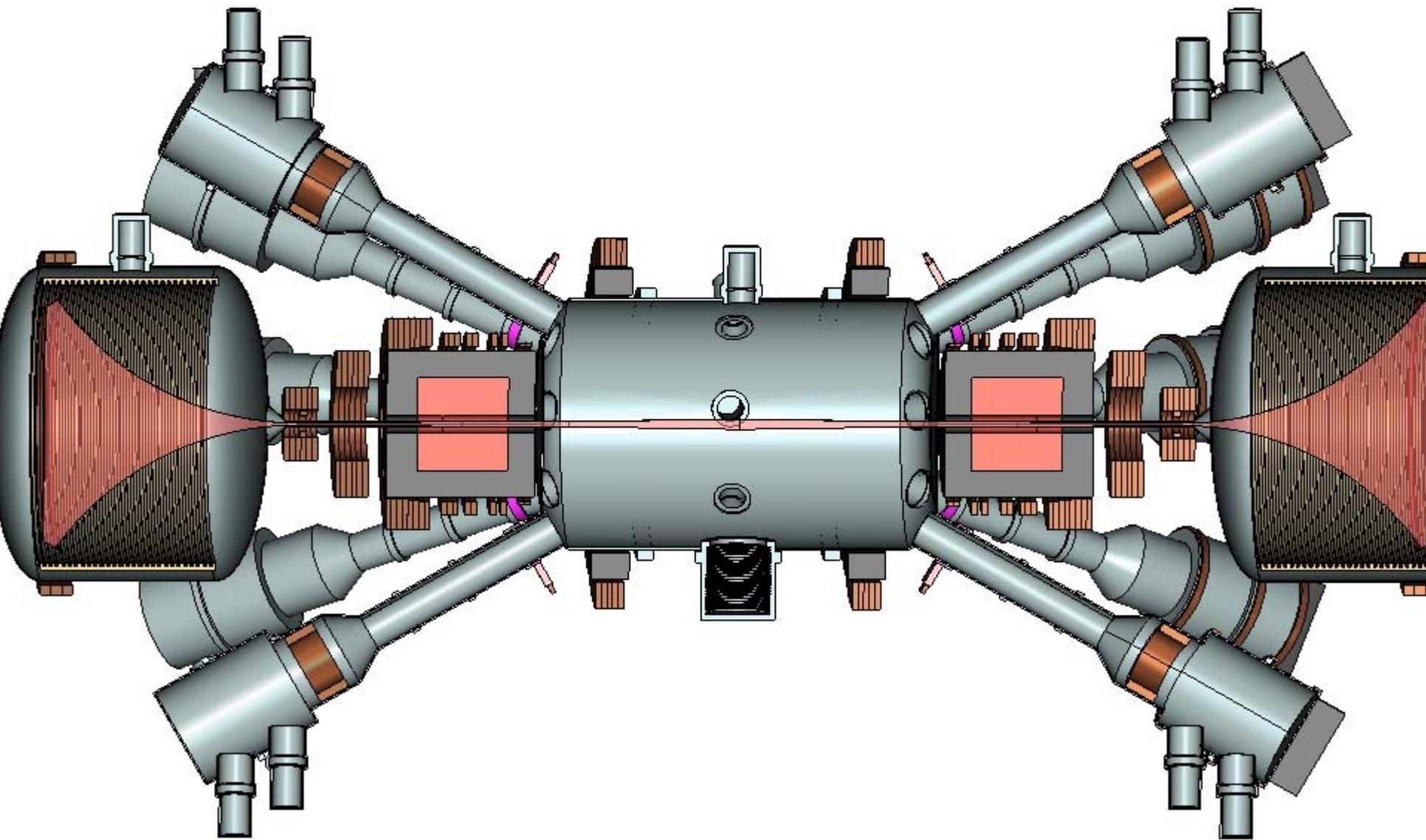
$$\tau \approx \frac{nLS_0}{nv_{Ti}S_m} = R \frac{L}{v_{Ti}}$$

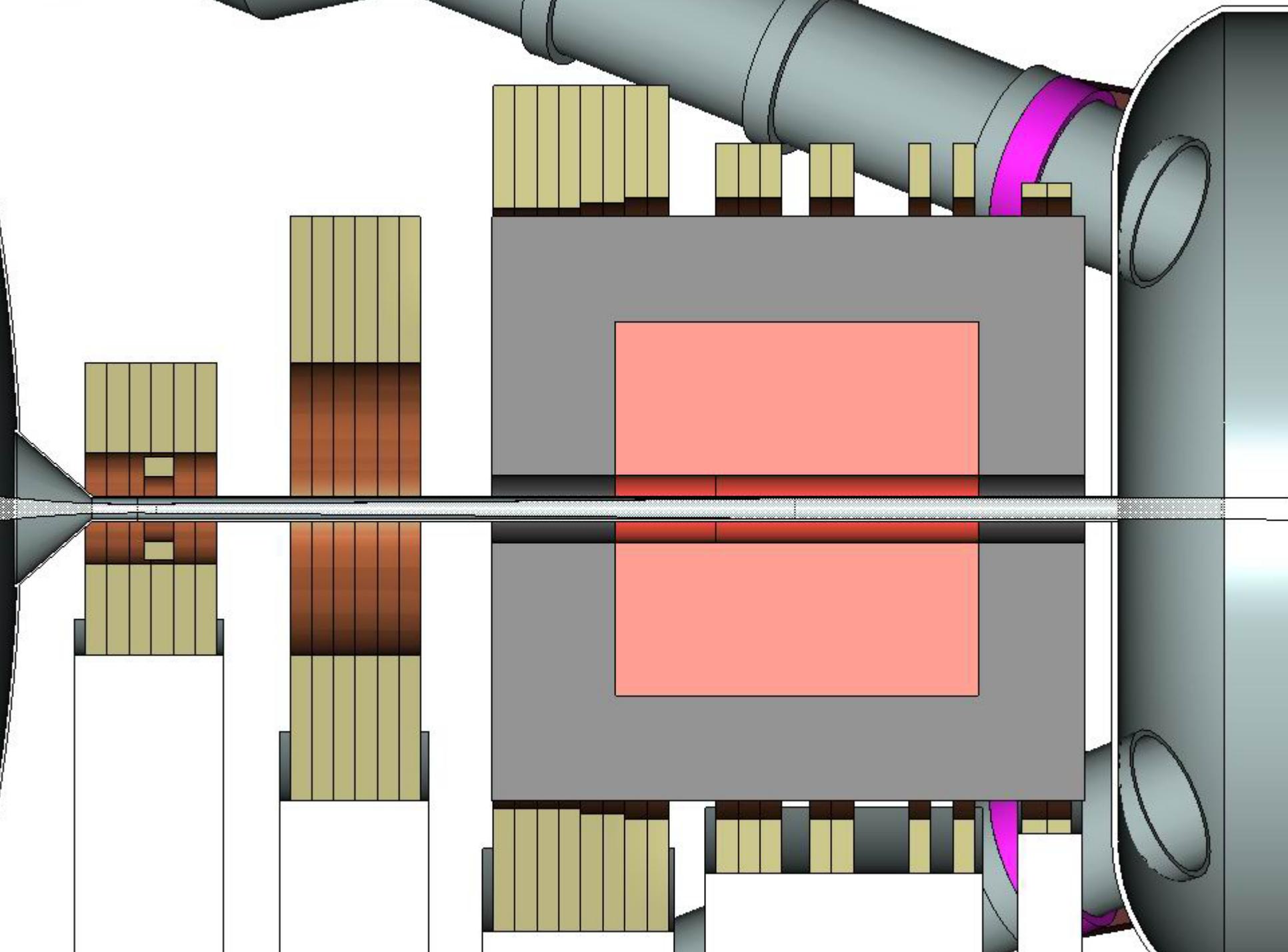
$$R = S_0 / S_m = B_m / B_0 \gg 1$$

Нейтронный источник на основе ГДЛ

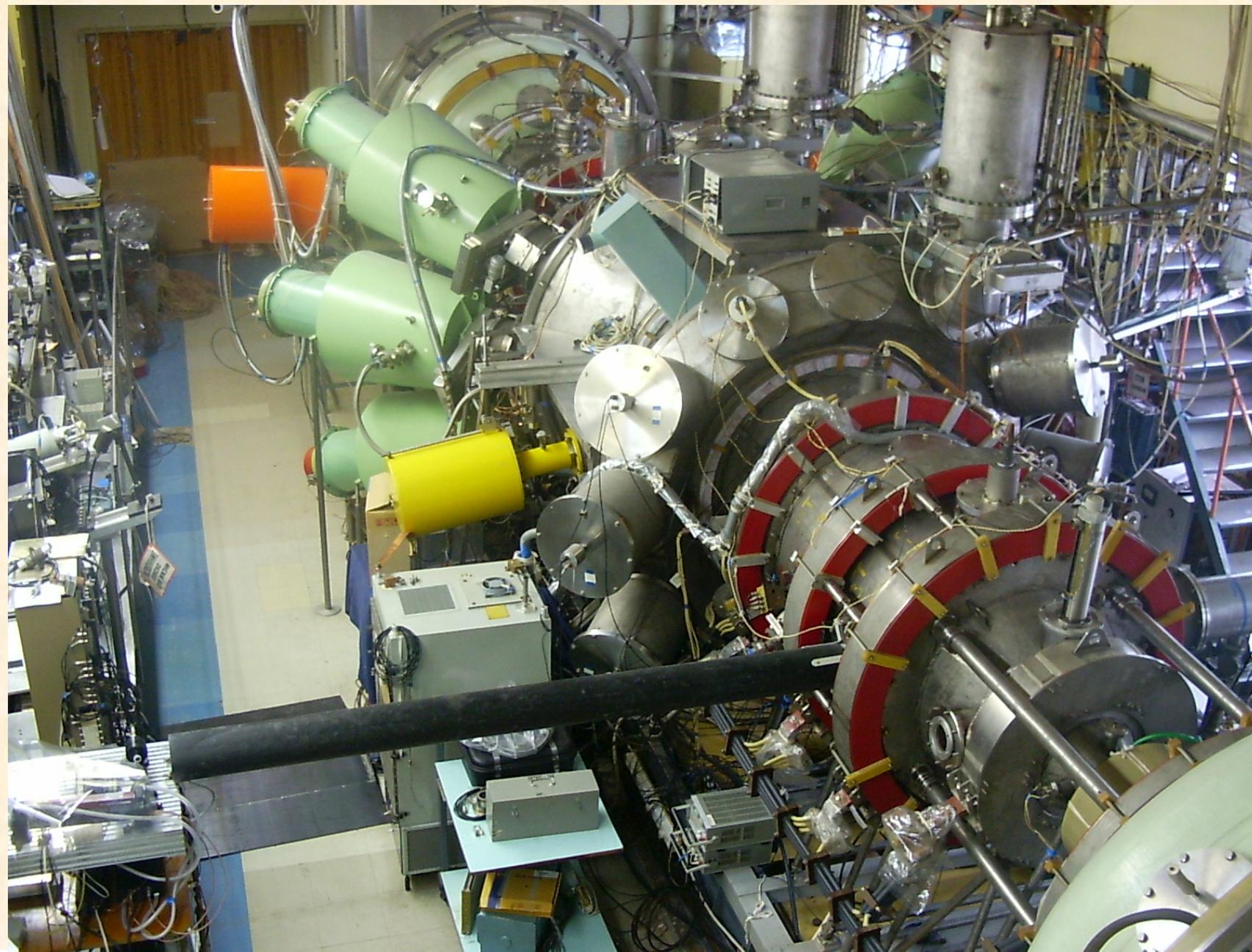


ОСНОВНАЯ ИДЕЯ: КОСАЯ ИНЖЕКЦИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ ВЫСОКОЙ (ДО 100 КЭВ) ЭНЕРГИИ В «ТЕПЛУЮ» ПЛАЗМУ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ, ИХ ЗАХВАТ И ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗКО НЕОДНОРОДНОЙ ПО ДЛИНЕ СИСТЕМЫ ПОПУЛЯЦИИ ДЕЙТОНОВ И ТРИТОНОВ. ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ ЗА СЧЕТ СТОЛКНОВЕНИЙ БЫСТРЫХ D,T ИОНОВ.





ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА (ГДЛ)



***ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ
НИ ГДЛ***

КАК ПРАВИЛО, ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ОСУЩЕСТВЛЯЛАСЬ ПРИ ФИКСАЦИИ СЛЕДУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ

- **ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ $W_e = 60 \text{ МВт}$**
- **ПОЛНАЯ МОЩНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА, $W_n = 2 \text{ МВт}$**
- **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ПРОБКАХ $B_m = 15 \text{ Тл}$
ПРОБОЧНОЕ ОТНОШЕНИЕ $R = 15$.**
- **УГОЛ ИНЖЕКЦИИ $\theta = 30^\circ$**
- **ЭНЕРГИЯ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ D И T, $E_{INJ} = 65 \text{ кВ}$**
- **ДИАМЕТР ПЛАЗМЫ В СРЕДНЕЙ ПЛОСКОСТИ $2a = 20 \text{ см}$**
- **ОТНОШЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ К ЭНЕРГИИ
ИНЖЕКЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ $T_e / E_{INJ} = 10^{-2}$**

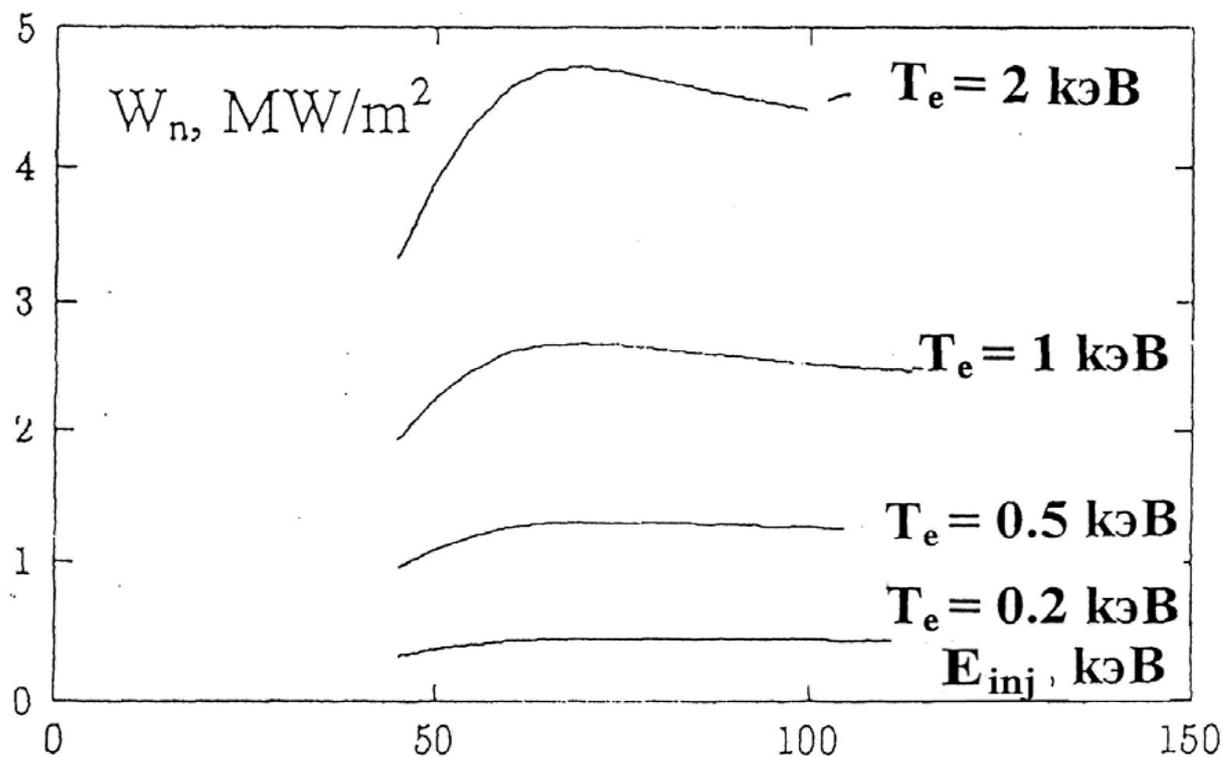
СРАВНЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ 2ХИВ С ПАРАМЕТРАМИ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ГДЛ ДЛЯ ТОЧЕК ОТРАЖЕНИЯ ПЛЕЩУЩИХСЯ ИОНОВ

<i>ПАРАМЕТРЫ</i>	<i>2ХИВ</i>	<i>НИ ГДЛ</i>	
E_{INJ}/T_e	100	100	
ω_{pi}/ω_{Bi}	120	120 (D)	150 (T)
a/ρ	2.5	6.7 (D)	5.4 (T)
n_{cold}/n_{hot}	0.05 - 0.1	0.1	
β	0.1 - 1.0	0.6	

В СЛУЧАЕ 2ХИВ ВО ВСЕЙ ОБЛАСТИ ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗБУЖДЕНИЕ МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НЕ НАБЛЮДАЛОСЬ. ТАКОЙ ЖЕ РЕЗУЛЬТАТ СЛЕДУЕТ ОЖИДАТЬ И В СЛУЧАЕ НИ ГДЛ.

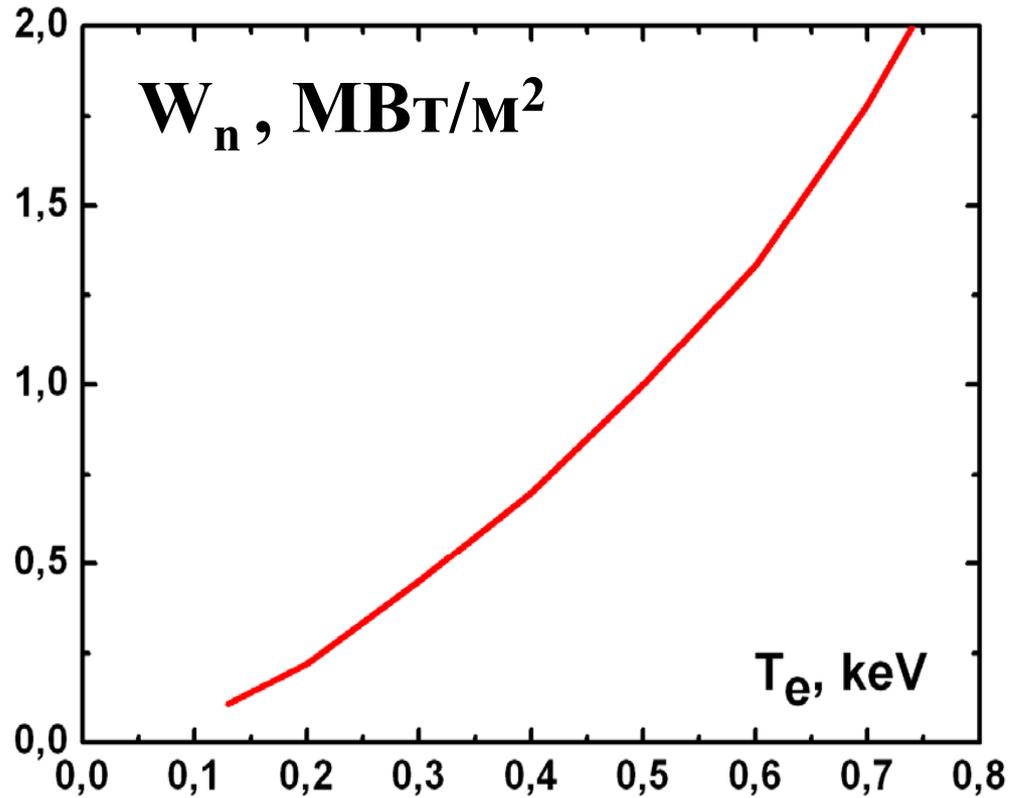
ПРИ РАСЧЕТАХ ПАРАМЕТРОВ НОВОСИБИРСКОГО НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА, КАК ПРАВИЛО, ВЕЛИЧИНА T_e ПОДДЕРЖИВАЛАСЬ НА УРОВНЕ $T_e \sim 10^{-2} E_{INJ}$

ОПТИМИЗИРОВАННАЯ ПЛОТНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГИИ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕМПЕРАТУР



$U_{\text{optimal}} \approx 65 \text{ keV}$

ПЛОТНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА В НИ ГДЛ КАК ФУНКЦИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ



ОРГАНИЗАЦИИ, ПРИНИМАВШИЕ УЧАСТИЕ В РАЗРАБОТКЕ НИГДЛ

НИИЭФА им. Д.В.ЕФРЕМОВА, Санкт-Петербург

РФЯЦ НИИТФ, Снежинск,

Исследовательский центр Россендорф, Германия

Исследовательский центр Карлсруэ, Германия

Лаборатория Фраскати, Италия

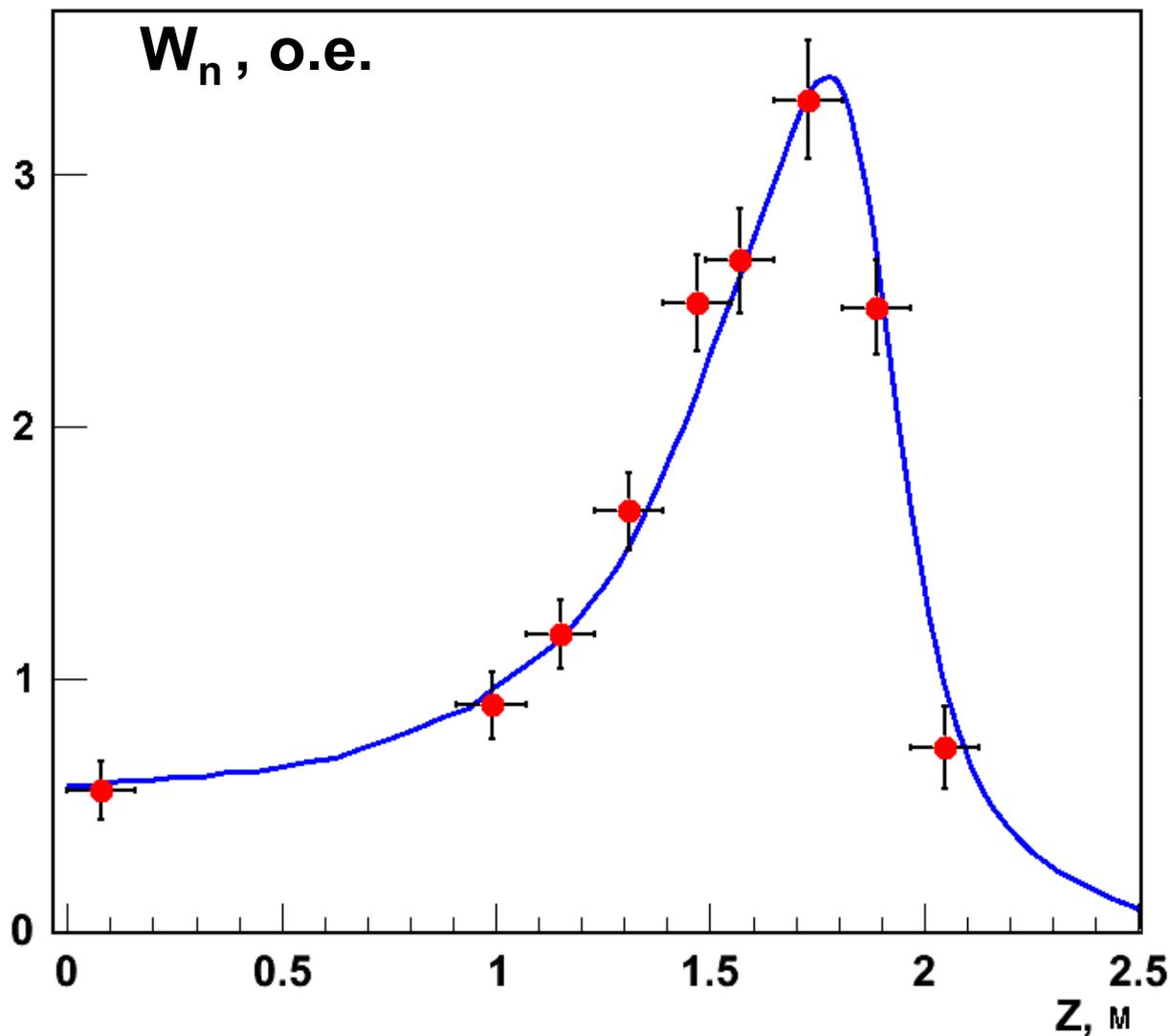
НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ГДЛ

- ВРЕМЯ ЖИЗНИ ПЛАЗМЫ В ГДЛ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ, КОГДА $\lambda < L$, ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ПРОБОЧНОМУ ОТНОШЕНИЮ, R , КАК И ПРЕДСКАЗЫВАЕТ ТЕОРИЯ**
- ПРОДОЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БЫСТРЫХ ПЛЕЩУЩИХСЯ ИОНОВ И ИНТЕНСИВНОСТЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ($D - D$ реакции) НАХОДЯТСЯ В РАЗУМНОМ СООТВЕТСТВИИ С РАСЧЕТАМИ**
- ПРЕДЛОЖЕНЫ И ИССЛЕДОВАНЫ МЕТОДЫ МГД СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ $\beta = 60\%$ ПРИ СОХРАНЕНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННОЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ, БЛИЗКО К ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ ПРЕДЕЛУ.**

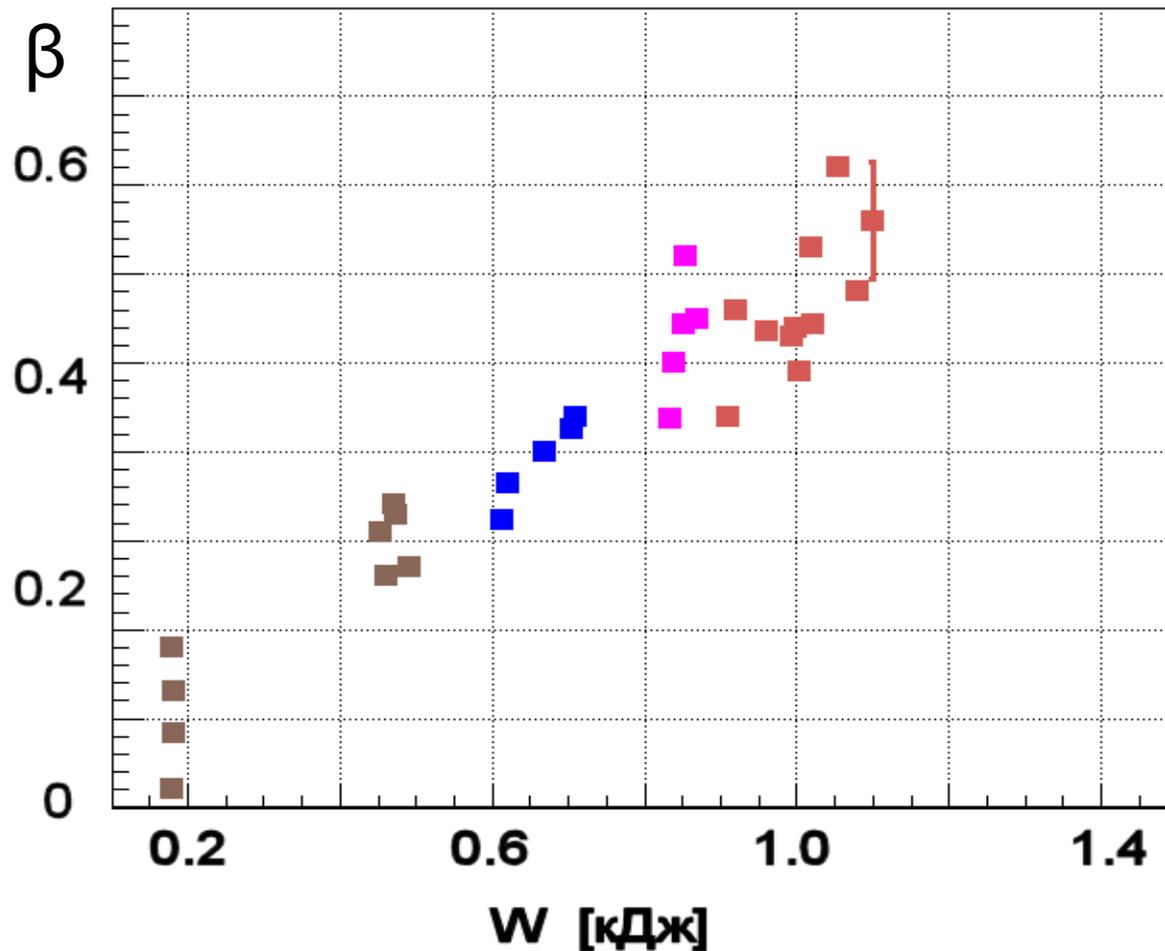
НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ГДЛ

- ПРОВЕДЕНА МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНЖЕКТОРОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ, ПОЗВОЛИВШАЯ ПОДНЯТЬ ЭЛЕКТРОННУЮ ТЕМПЕРАТУРУ ПЛАЗМЫ И УВЕЛИЧИТЬ ЭНЕРГИЮ ИНЖЕКЦИИ.**
- ПРОДЕМОНСТРИРОВАНА ВОЗМОЖНОСТЬ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО (ДО ПЯТИ РАЗ) ПОДАВЛЕНИЯ ПОТОКА ВЫТЕКАЮЩЕЙ ПЛАЗМЫ ИЗ ЛОВУШКИ.**
- ИССЛЕДОВАНЫ УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В «ТЕПЛОЙ» ПЛАЗМЕ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА УСИЛЕННОЕ РАССЕЯНИЕ БЫСТРЫХ ИОНОВ В КОНУС ПОТЕРЬ (АЛЬФВЕНОВСКАЯ ИОННО - ЦИКЛОТРОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ). ПОКАЗАНО, ЧТО ПРИ ПЛАНИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРАХ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА МИКРОНЕУСТОЙЧИВОСТЬ НЕ ВОЗБУЖДАЕТСЯ.**

ПРОФИЛЬ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА (D-D РЕАКЦИЯ) В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ОСТАНОВКИ В ГДЛ

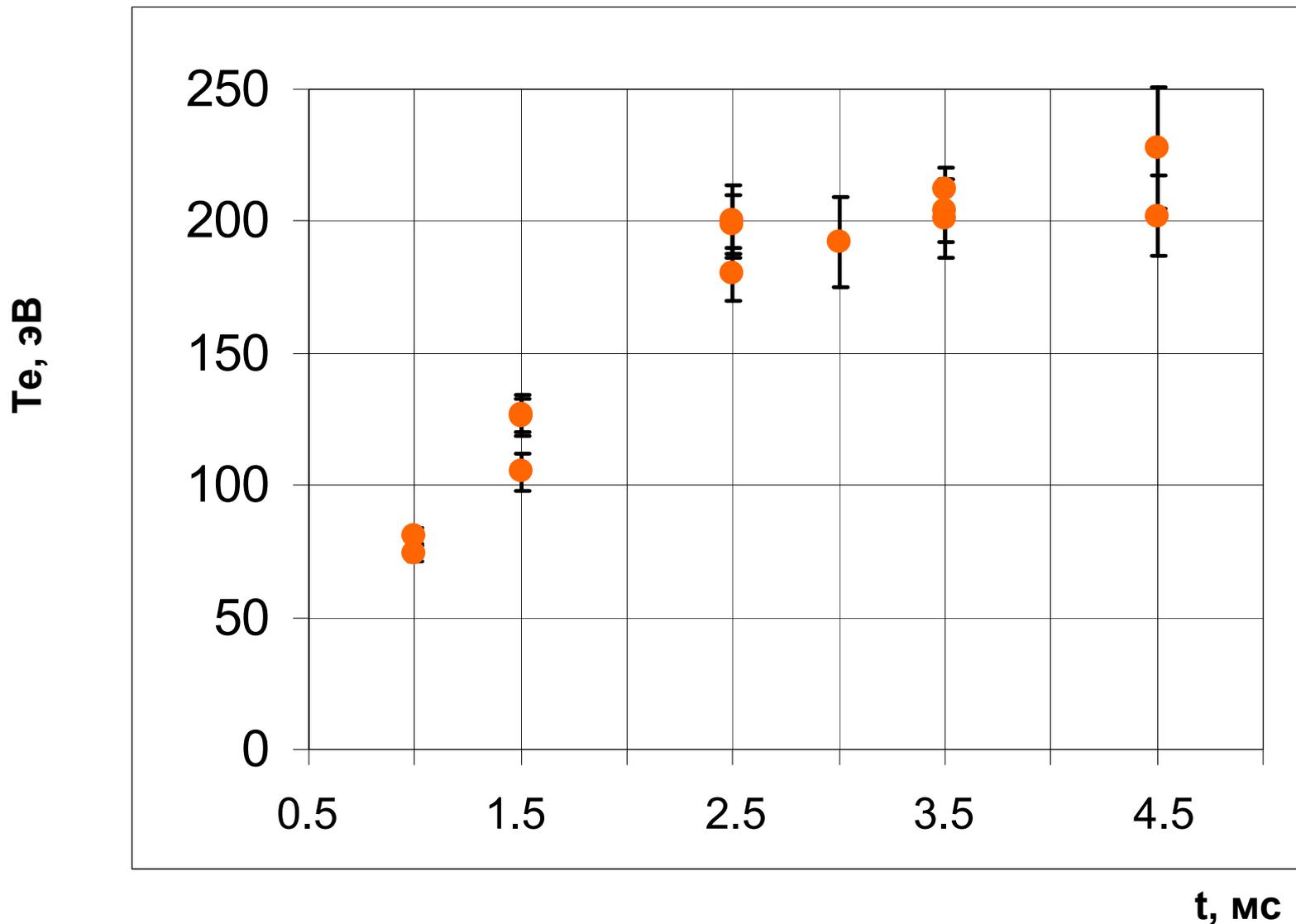


Режим с максимальным β : D⁰ - пучки, H - плазма



Зависимость $\beta = 8\pi \cdot n(T_e + T_i)/B^2$ от полной энергии горячих ионов
(измерено при помощи пучково – спектроскопической диагностики, основанной на динамическом эффекте Штарка, в области остановки горячих ионов на оси плазменного столба)

Режим с максимальным значением T_e : D^0 - пучки, D - плазма



Временной ход температуры электронов

(измерено при помощи системы лазерного рассеяния в центральной плоскости ловушки в центре плазменного столба)

Компактный пробкотрон на ГДЛ

Камера КП:

$L=30$ см, $d=70$ см.

Магнитная система:

$B_0=2.4$ Тл, $B_m=5.2$ Тл

Мишенная плазма:

водород, $n_0 \approx 10^{13}$ см⁻³,

$T_e \approx 70$ эВ, $a=9$ см.

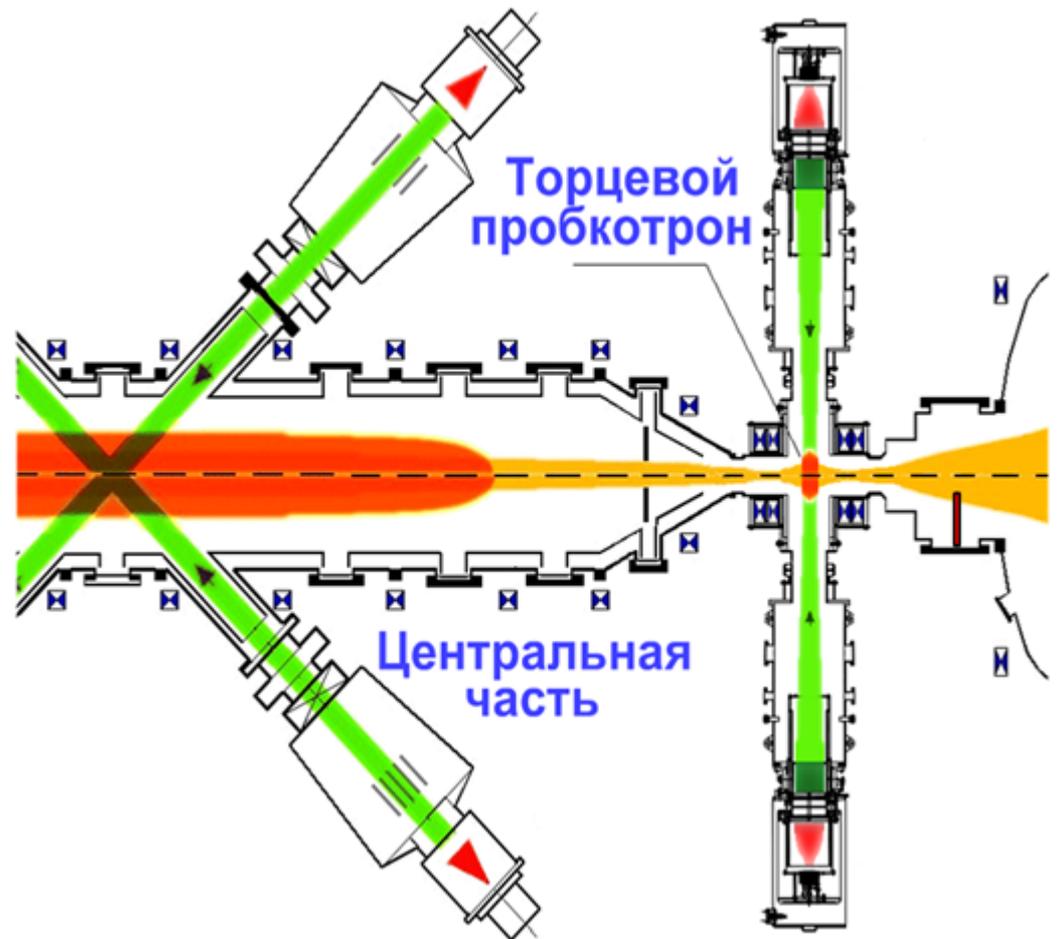
Инжекционная система:

водород или дейтерий

$E_0=20$ кэВ, $\theta=90^\circ$,

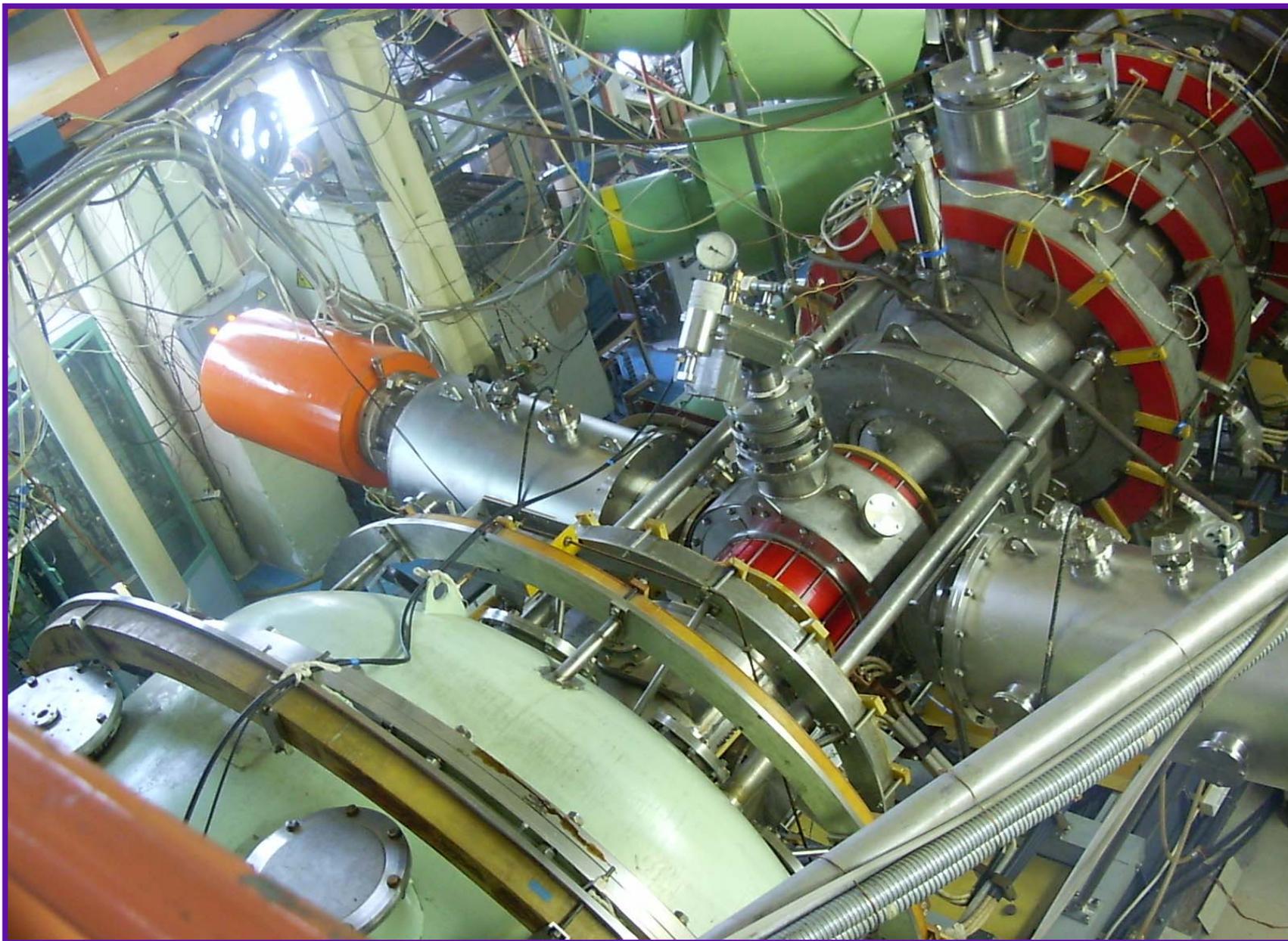
$P_{inj} \approx 1$ МВт,

$\tau_{inj}=4$ мс

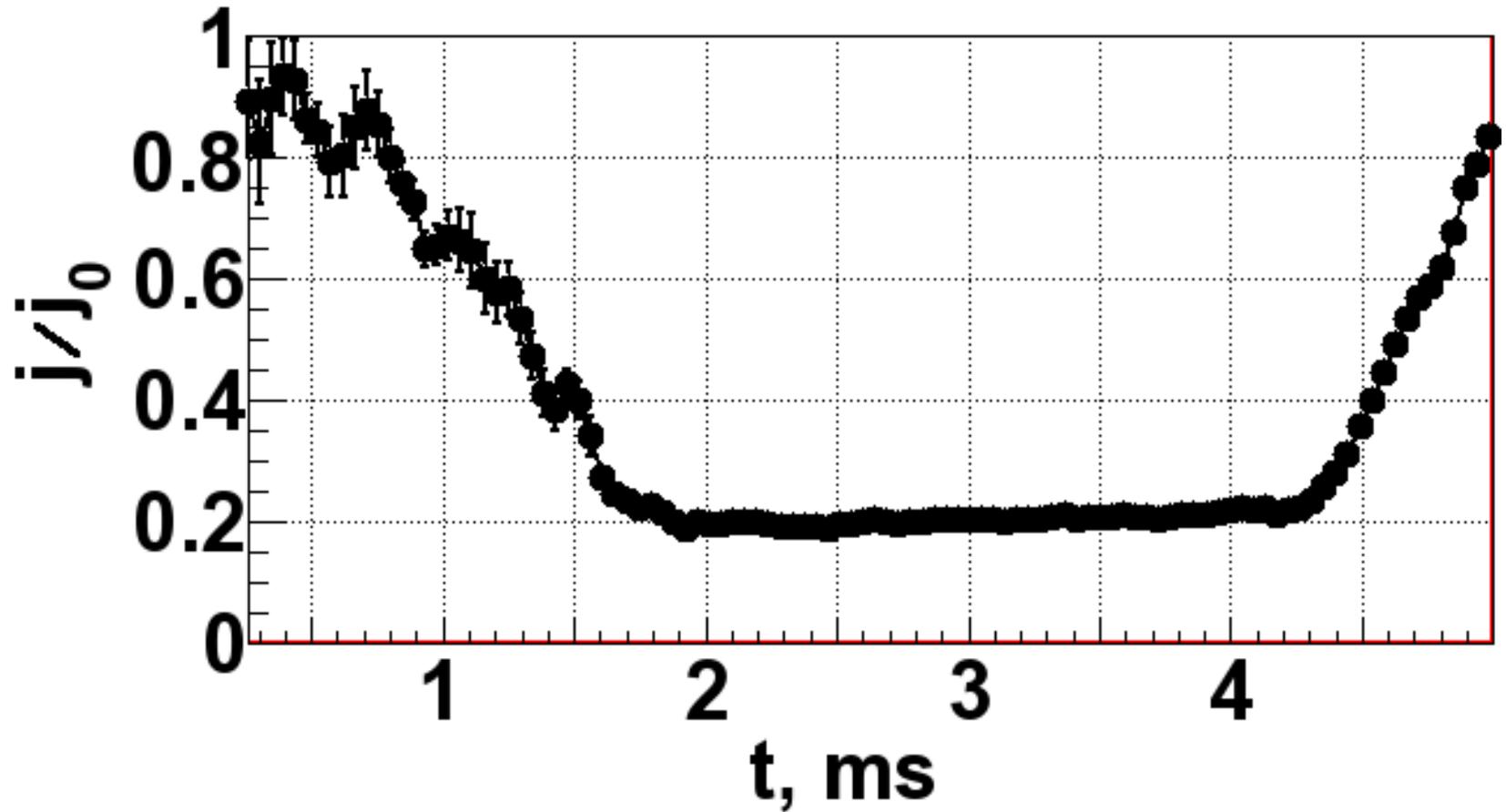


Экспериментально наблюдались колебания потенциала плазмы на частоте вблизи ионно-циклотронной частоты в области плазмоида.

Компактный пробкотрон на ГДЛ

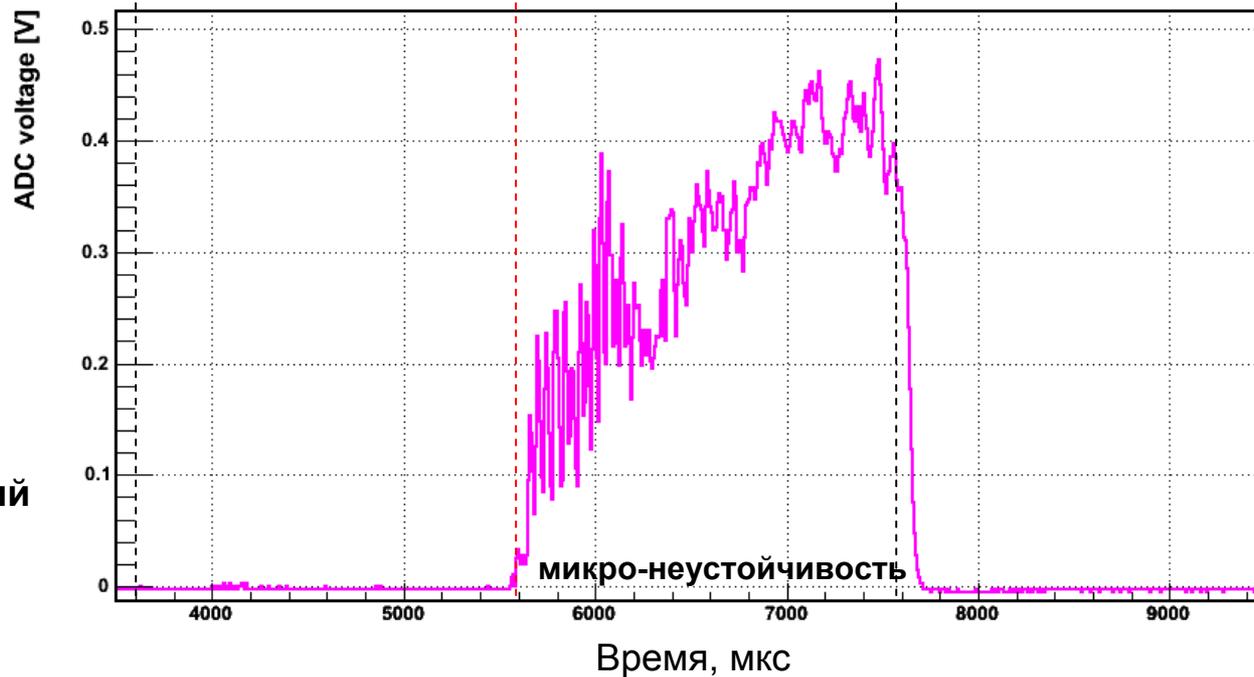
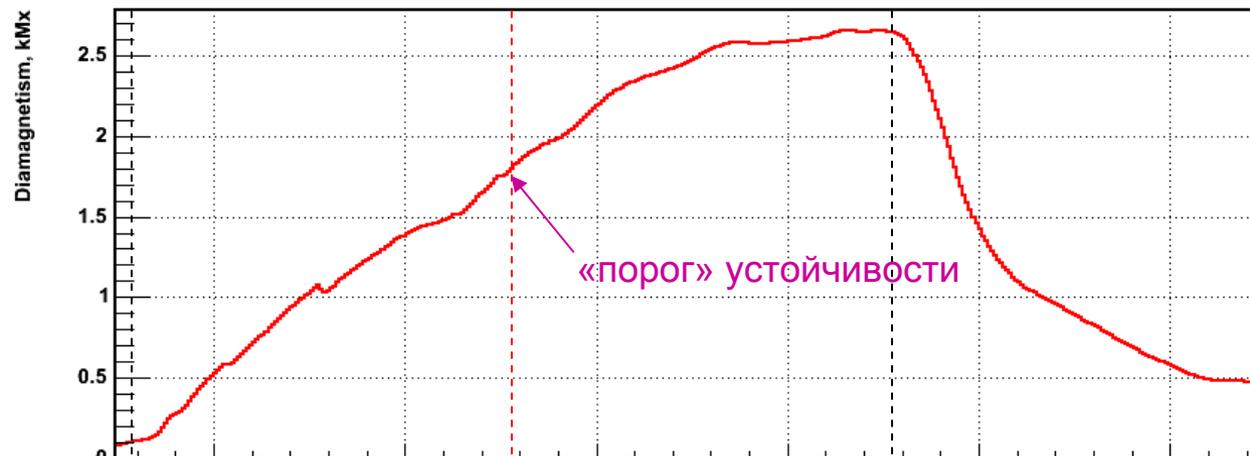


AMBIPOLAR PLUGGING OF ION FLUX FROM GDT DURING NB INJECTION IN COMPACT MIRROR CELL



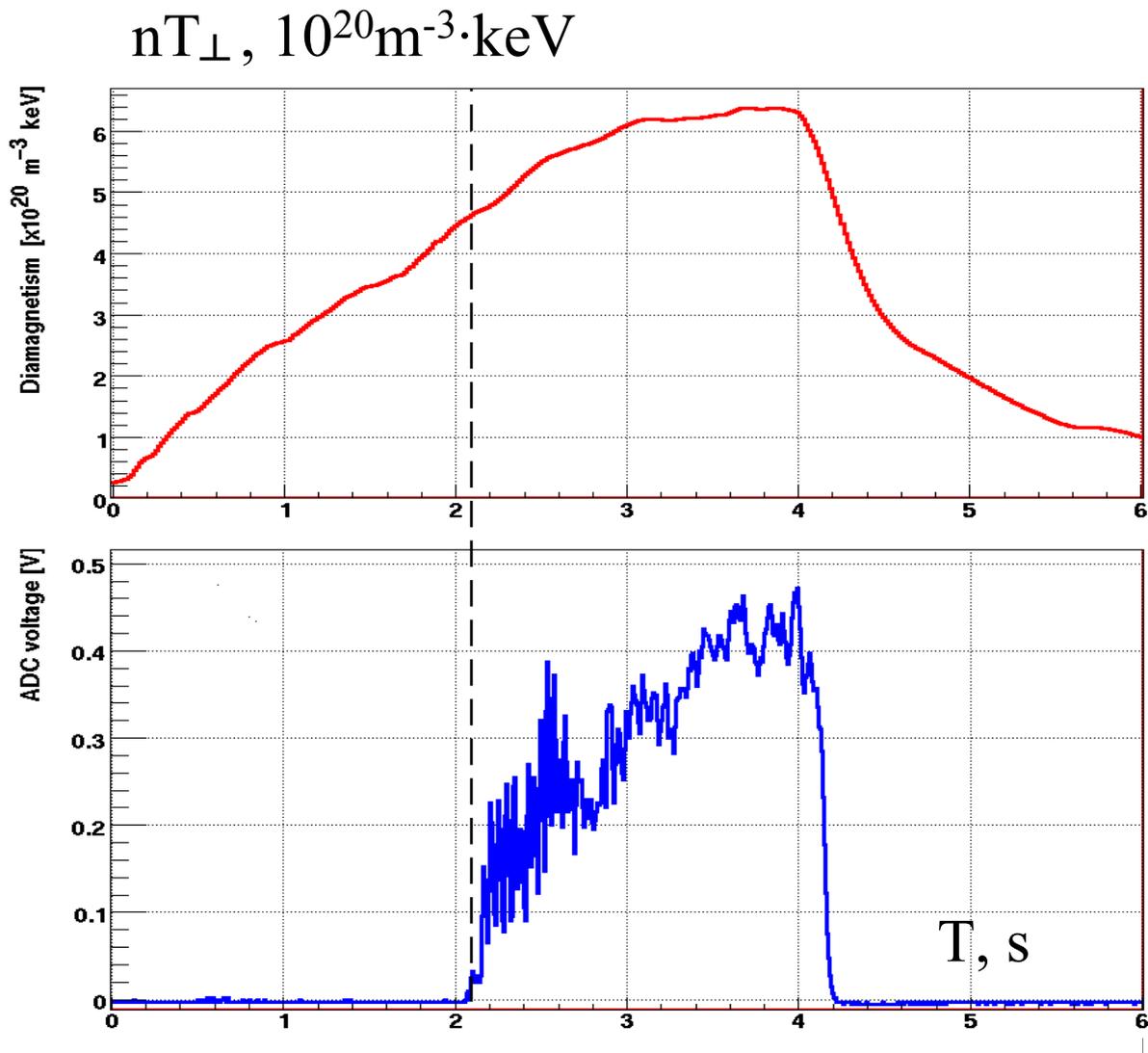
Пороговый характер колебаний

Диамagnetизм
(энергосодержание)
быстрых ионов в КП



Амплитуда ВЧ-колебаний
на магнитном зонде.

EXCITATION OF ALFVEN ION CICLOTRON INSTABILITY DURING ACCUMULATION OF FAST ANISOTROPIC IONS IN COMPACT MIRROR CELL



UPPER TRACE IS ENERGY CONTENT OF FAST IONS.

BELOW – DEMONSTRATION OF THRESHOLD NATURE OF AIC INSTABILITY

СТАЦИОНАРНЫЕ МОЩНЫЕ ИНЖЕКТОРЫ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

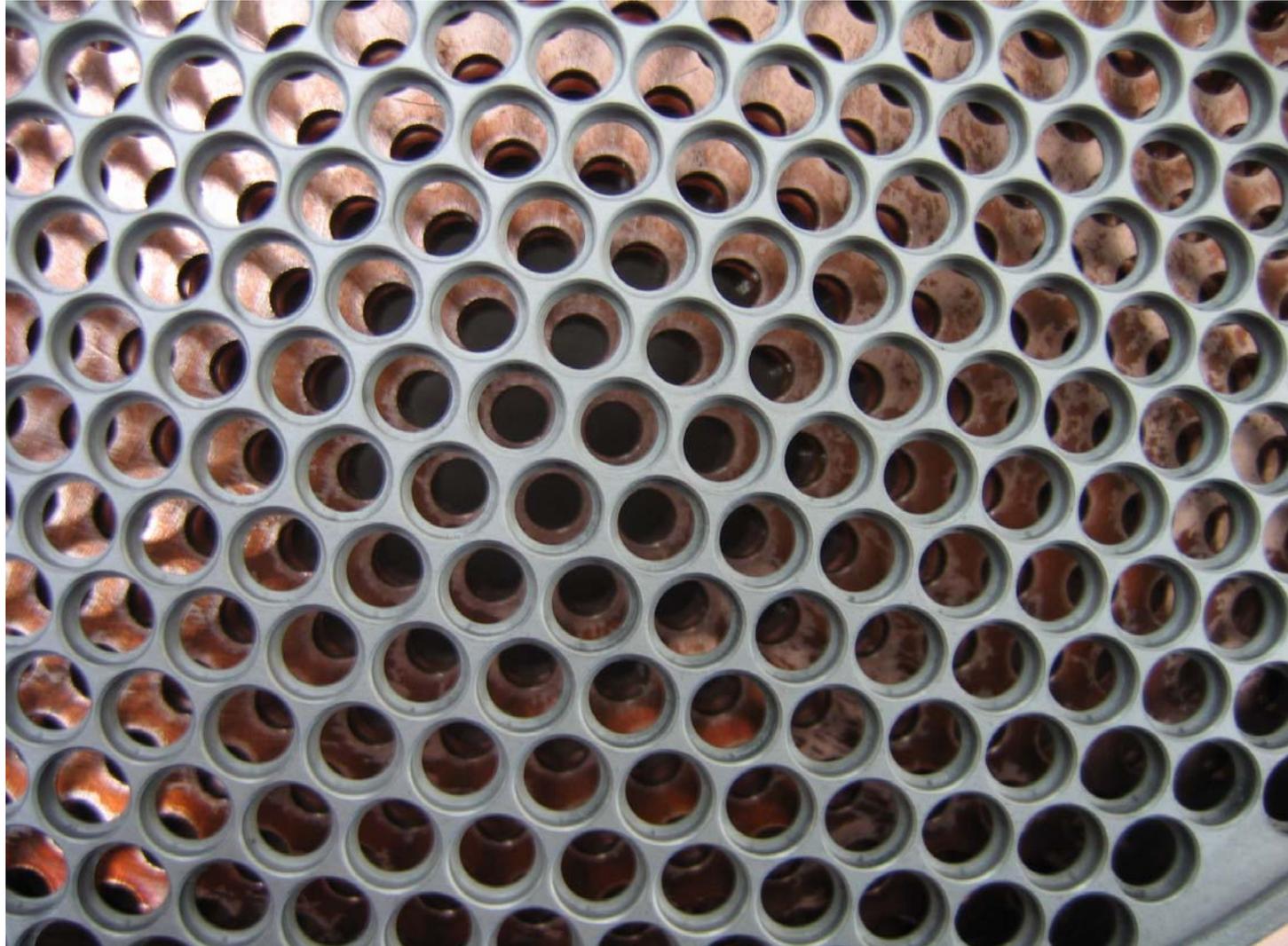
КЛЮЧЕВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА ЯВЛЯЮТСЯ МОЩНЫЕ ИНЖЕКТОРЫ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ (С ФОКУСИРОВКОЙ ПУЧКОВ В ПЛАЗМЕ!)

В ИЯФ СО РАН им Г.И.БУДКЕРА ИМЕЕТСЯ ВДУШИТЕЛЬНЫЙ ЗАДЕЛ В ЭТОМ НАПРАВЛЕНИИ.

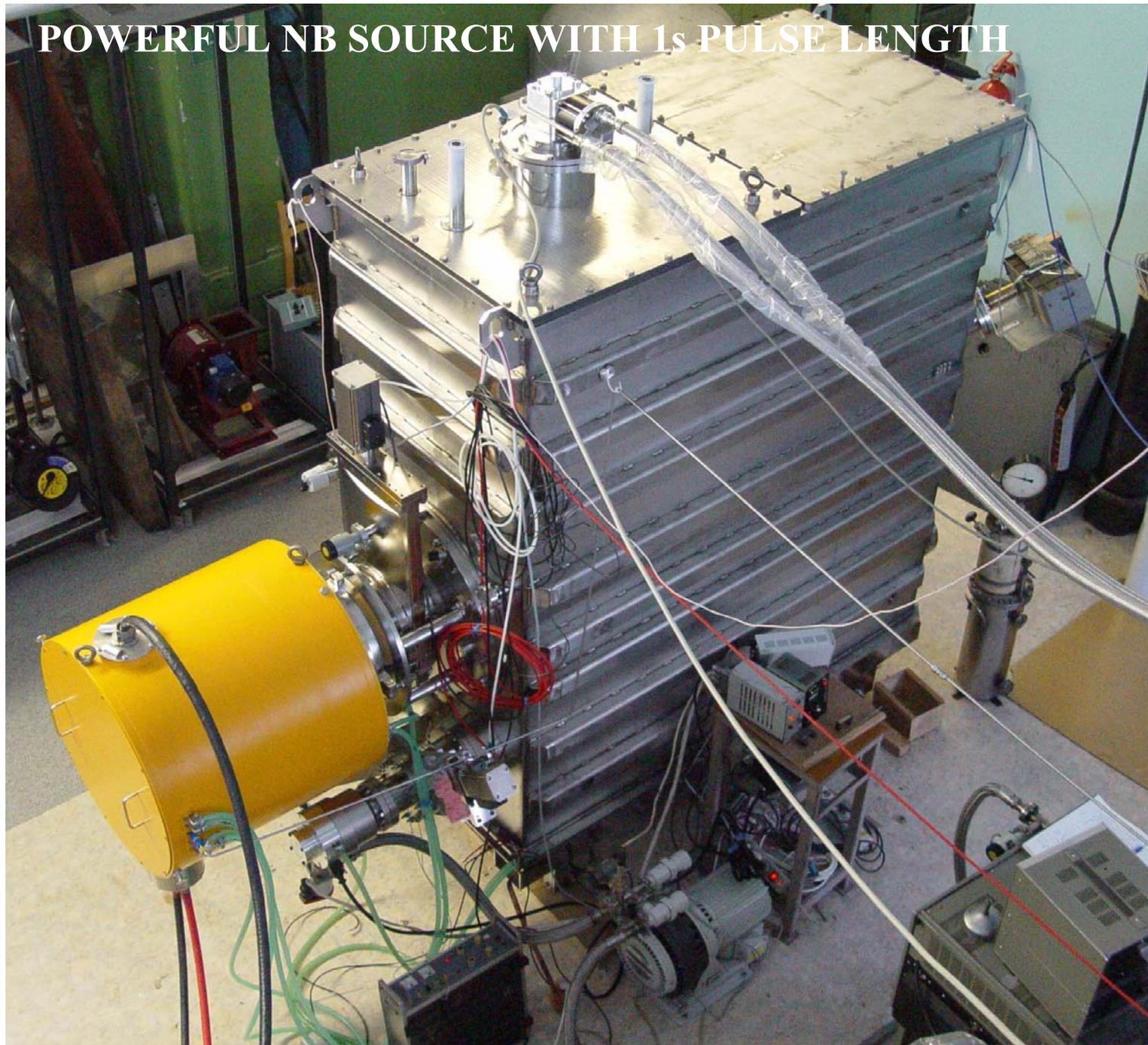
- 1. Разработаны и функционируют во многих лабораториях мира источники с энергиями 20-65 кэВ с мощностью, близкой к 1 МВт и длительностью 1-10 с.**
- 2. Завершается сборка первого стационарного инжектора для стелларатора Wendelstein 7-X (~1 МВт, 1000с, с фокусировкой)**
- 3. Накопленный опыт и предварительный анализ позволяют утверждать, что возможно создание стационарного инжекторного модуля с энергией атомарного пучка 40-100 кэВ и мощностью 2-3МВт.**

ИМЕЕТСЯ НЕПЛОХОЙ ЗАДЕЛ, ОТНОСЯЩИЙСЯ К ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ИОНАМ. НА ОСНОВАНИИ ИМЕЮЩЕГОСЯ ОПЫТА МОЖНО ГОВОРИТЬ О СОЗДАНИИ СТАЦИОНАРНОГО МОДУЛЯ НА 1 МВ, 5-10 МВт.

СЕТОЧНЫЙ УЗЕЛ ИОННОЙ СИСТЕМЫ ИНЖЕКТОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ



POWERFUL NB SOURCE WITH 1s PULSE LENGTH



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

НА ОСНОВАНИИ ВЫПОЛНЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, СРАВНЕНИЯ БЕЗРАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ $2X_{IB}$ И НИ ГДЛ А ТАКЖЕ МНОГОЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ МОЖНО СДЕЛАТЬ ВЫВОД О ТОМ, ЧТО НИКАКИХ ФИЗИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ, ПРЕПЯТСТВУЮЩИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЮ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА С $W_n=2\text{МВт/м}^2$.

ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ДЕМОНСТРАЦИИ ОСУЩЕСТВИМОСТИ ИСТОЧНИКА С $W_n = 0.5 \text{ МВт/м}^2$ ТРЕБУЕТСЯ УВЕЛИЧИТЬ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЛОВУШКЕ, И ЭТО БУДЕТ СДЕЛАНО.

ДЕМОНСТРАЦИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА $W_n=2\text{МВт/м}^2$ ПОТРЕБУЕТ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ.

ВОЗМОЖНОСТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКА ПРИ РАБОТЕ В ОБЛАСТИ $Te/E_{INJ} > 10^{-2}$ МОЖЕТ БЫТЬ ИССЛЕДОВАНА БЕЗ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА ИМЕЮЩЕЙСЯ УСТАНОВКЕ.