



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

# **Современное состояние исследований импульсных термоядерных устройств на базе потоков плотной замагниченной плазмы.**

Докладчик: А.М. Житлухин

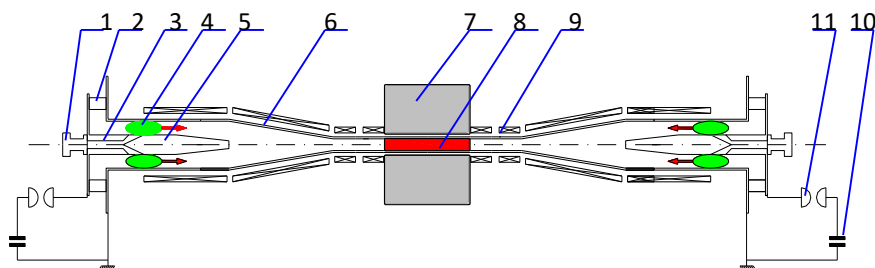


# Содержание

- 1. Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы.**
- 2. Работы, проводимые в лабораториях США. Новые предложения по созданию термоядерного реактора, на базе столкновения сгустков плотной замагниченной плазмы.**
- 3. Работы ГНЦ РФ ТРИНИТИ в кооперации с РФЯЦ ВНИИЭФ и РФЯЦ ВНИИТФ по созданию мощных импульсных источников нейтронов синтеза.**
  - оценки и расчеты нейтронного выхода при встречном столкновении потоков дейтериевой плазмы;
  - результаты экспериментов по генерации нейтронов при встречном столкновении потоков дейтериевой плазмы;
  - конструкция, расчетные характеристики и экспериментальная проверка нового импульсного плазменного ускорителя – импульсного ускорителя плазменных тороидов (ИУПТ);
  - схема нейтронного источника на базе ИУПТ;
  - разработка технологии сжатия лайнеров электрическим током.
- 4. Разработка импульсных плазменных ускорителей большой мощности для создания нейтронного источника.**
- 5. Дорожная карта работ по созданию импульсно-периодического нейтронного источника.**
- 6. Заключение и выводы.**

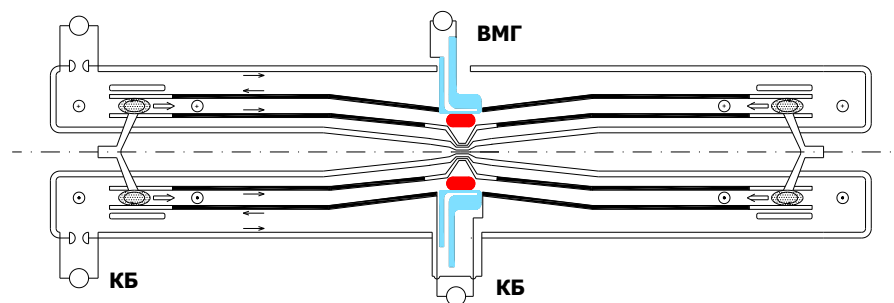
# Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы (1)

**1. Импульсный (в перспективе импульсно-периодический) источник нейтронов синтеза с энергетической ценой нейтрона  $\approx 100$  МэВ на базе встречного столкновения плазменных сгустков для энергетических применений**



1 – импульсный газовый клапан, 2 – изолятор, 3 – канал для подачи газа, 4 – ускоряемый сгусток, 5 – внутренний электрод (катод), 6 – диффузор, 7 – бланкет, 8 – зона столкновения сгустков, 9 – соленоиды, 10 – конденсаторная батарея, 11 – управляемые коммутаторы (разрядники).

**2. Малогабаритный импульсный источник нейтронов синтеза с выходом до  $10^{16}$  Д-Д (в пересчете  $10^{18}$  Д-Т) на базе сжатия предварительно нагретой замагниченной плазмы от плазменных ускорителей для широкого круга задач**



Характеристики генератора нейтронов на базе сжатия замагниченной плазмы:

- объект сжатия – плазменный тороид с тороидальным и полоидальным вмороженным магнитным полем;
- осуществляется квазитрехмерное сжатие плазмы;
- имеет малые габариты (длина  $\sim 3$  м, диаметр  $\sim 1$  м, масса  $\sim 1000$  кг).

# Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы (2)



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

## I. Работы по близким плазменным термоядерным устройствам в США (ЛЛНЛ, ЛАНЛ, СНЛ, Филлипсовская лаборатория)

CGO 100-6028 (11-08)

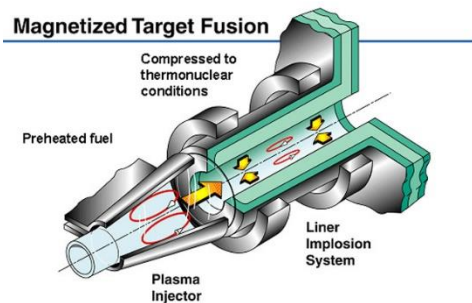
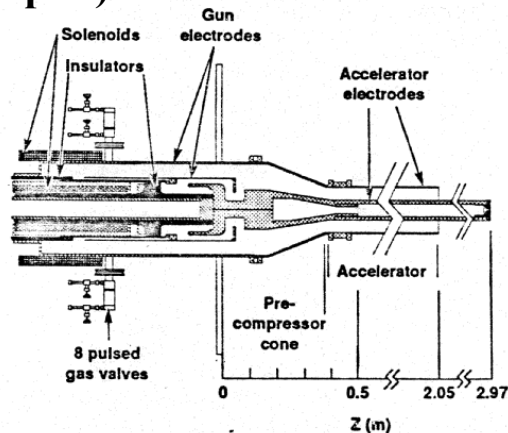


Схема устройства



Ускоритель RACE:  $v=3 \cdot 10^8$  см/с,  
 $W=300$  кДж (ЛЛНЛ)



Установка по сжатию тора в ЛАНЛ, США



Установка Shiva Star - MARAUDER в Филлипсовской лаборатории

### Основные результаты:

- в Филлипсовской лаборатории осуществлено 1000-кратное квази-трехмерное сжатие плазменного компактного тора металлическим лайнером, разгоняемым импульсом тока установки Shiva Star –MARAUDER; достигнута электронная температура  $\sim 400$  эВ;
- в СНЛ получен выход  $1,1 \times 10^{13}$  ДД нейтронов при сжатии плазмы, созданной лазерным излучением, с помощью лайнера, изготовленного из бериллия и разгоняемого импульсом тока от установки Z (MagLIF-experiments).

[1. Compact Toroid Formation, Compression, And Acceleration, J.H. Degnan, D.E. Bell, G.P. Baca, M.E. Dearborn, M.R. Douglas, S.E. Englert, T.J. Englert, J.H. Holmes, T.W. Hussey, G.F. Kiuttu, F.M. Lehr, G.J. Marklin, B.W. Mullins, R.E. Peterkin, D.W. Price, N.F. Roderick, E.L. Ruden, P.J. Turchi, IEEE Conference Record - Abstracts, 1992 IEEE International Conference on Plasma.](#)

[2. The field-reversed configuration heating experiment on Shiva Star, C. Grabowski, J. H. Degnan, M. Domonkos, D. Amdahl, E. L. Ruden, G. A Wurden, T. E. Weber, 2016 IEEE International Conference on Plasma Science \(ICOPS\), 2016 | Conference Paper | Publisher: IEEE.](#)

[3. Demonstration of thermonuclear conditions in magnetized liner inertial fusion experiments, M. R. Gomez; S. A. Slutz; A. B. Sefkow; K. D. Hahn; S. B. Hansen; P. F. Knapp; P. F. Schmit; C. L. Ruiz; D. B. Sinars; E. C. Harding; C. A. Jennings; T. J. Awe; M. Geissel; D. C. Rovang; I. C. Smith; G. A. Chandler; G. W. Cooper; M. E. Cuneo; A. J. Harvey-Thompson; M. C. Herrmann; M. H. Hess; D. C. Lamppa; M. R. Martin; R. D. McBride; K. J. Peterson; J. L. Porter; G. A. Rochau; M. E. Savage; D. G. Schlroen; W. A. Stygar; R. A. Vesey Physics of Plasmas 22, 056306 \(2015\) <https://doi.org/10.1063/1.4919394>](#)

# Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы (3)



## II. Прогресс в MagLIF экспериментах на установке Z, СНЛ, США

$N = 2 \times 10^{12}$   
ДД нейтронов



$N = 4,1 \pm 0,8 \times 10^{12}$   
ДД нейтронов



$N = 1,1 \times 10^{13}$   
ДД нейтронов

«Demonstration of thermonuclear conditions in magnetized liner inertial fusion experiments», M. R. Gomez; S. A. Slutz; A. B. Sefkow; K. D. Hahn; S. B. Hansen; P. F. Knapp ; P. F. Schmit; C. L. Ruiz; D. B. Sinars; E. C. Harding; C. A. Jennings; T. J. Awe; M. Geissel ; D. C. Rovang; I. C. Smith; G. A. Chandler; G. W. Cooper; M. E. Cuneo; A. J. Harvey-Thompson; M. C. Herrmann; M. H. Hess; D. C. Lamppa; M. R. Martin; R. D. McBride; K. J. Peterson; J. L. Porter; G. A. Rochau; M. E. Savage; D. G. Schroen; W. A. Stygar; R. A. Vesey *Physics of Plasmas* 22, 056306 (2015) <https://doi.org/10.1063/1.4919394>

«Constraining preheat energy deposition in MagLIF experiments with multi-frame shadowgraphy», Special Collection: Papers from the 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics A. J. Harvey-Thompson; M. Geissel ; C. A. Jennings; M. R. Weis ; M. R. Gomez ; J. R. Fein ; D. J. Ampleford ; G. A. Chandler; M. E. Glinsky; K. D. Hahn; S. B. Hansen; E. C. Harding; P. F. Knapp; R. R. Paguio; L. Perea; K. J. Peterson; J. L. Porter; P. K. Rambo; G. K. Robertson; G. A. Rochau; C. L. Ruiz; J. Schwarz; J. E. Shores; D. B. Sinars; S. A. Slutz; G. E. Smith; I. C. Smith; C. S. Speas; K. Whittemore; D. Woodbury *Physics of Plasmas* 26, 032707 (2019) <https://doi.org/10.1063/1.5086044>

«Performance Scaling in Magnetized Liner Inertial Fusion Experiments» M. R. Gomez ,1,\* S. A. Slutz,1 C. A. Jennings,1 D. J. Ampleford ,1 M. R. Weis ,1 C. E. Myers ,1 D. A. Yager-Elorriaga ,1 K. D. Hahn ,2 S. B. Hansen,1 E. C. Harding,1 A. J. Harvey-Thompson,1 D. C. Lamppa,1 M. Mangan,1 P. F. Knapp,1 T. J. Awe,1 G. A. Chandler,1 G. W. Cooper,1,3 J. R. Fein ,1 M. Geissel ,1 M. E. Glinsky ,1 W. E. Lewis,1 C. L. Ruiz ,1 D. E. Ruiz ,1 M. E. Savage,1 P. F. Schmit ,1 I. C. Smith,1 J. D. Styron,3 J. L. Porter,1 B. Jones,1 T. R. Mattsson ,1 K. J. Peterson ,1 G. A. Rochau,1 and D. B. Sinars , *PHYSICAL REVIEW LETTERS* 125, 155002 (2020), DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.155002

# Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы (4)



## III. Работы по аналогичным плазменным термоядерным устройствам в США (компания Helion Energy)

- The fusion start-up Helion Energy announced a \$500 million funding round on Friday.
- The round was lead by Silicon Valley investor Sam Altman, who put \$375 million into Helion, his largest investment in a start-up ever.
- Helion Energy plans to use the \$500 million to complete the construction of Polaris, its 7th generation fusion facility, which it broke ground on in July, and which it aims to use to demonstrate net electricity production in 2024.



Helion's co-founders: Chris Pihl, chief technology officer (left), David Kirtley, chief executive officer (middle), and George Votroubek, director of research (right)

- Helion Energy wants to produce large amounts of electricity through fusion by 2028.
- Microsoft has agreed to buy 50 megawatts of electricity from Helion, which can power 40,000 homes.
- Helion's chief business officer talked to Insider about how the company plans to make fusion energy.

- Предполагается наработка  ${}^3\text{He}$  и T в ДД реакции.
- Предполагается работа в безнейтронном режиме на реакции  ${}^3\text{He} + \text{D} = {}^4\text{He} + \text{p}$ .
- При выработке энергии не предполагается достижения термоядерной вспышки.

# Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы (5)



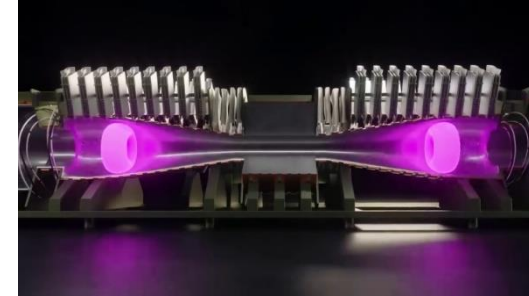
ТРИНИТИ  
РОСАТОМ

## IV. Внешний вид и принцип работы установки Trenta (Helion Fusion)

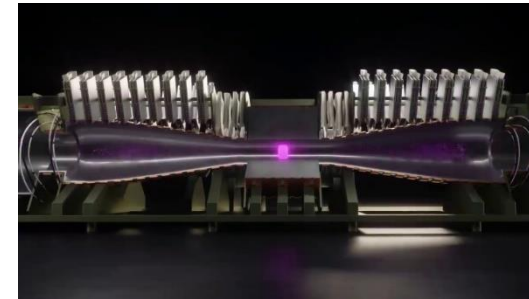


### Установка Trenta 6-го поколения содержит:

- камеры формирования двух компактных тороидов по принципу Р.Х.Куртмуллаева (ГНЦ РФ ТРИНИТИ);
- систему импульсных витков для продольного ускорения и сжатия тороидов;
- конденсаторные батареи питания витков, допускающие работу с частотой 1 Гц;
- центральный  $\Theta$ -пинч для дополнительного сжатия термализованной плазмы.



1. Формируются плазменные тороиды с вмороженным полоидальным полем.
2. За счет временного и пространственного программирования токов в витках ускорителя тороиды ускоряются и сжимаются по длине и по радиусу.



3. Тороиды сталкиваются и сливаются в центральной секции, кинетическая энергия преобразуется в тепловую.
4. Тороиды сжимаются нарастающим продольным магнитным полем витка, параметры плазмы доводятся до термоядерных значений.

# Импульсные термоядерные устройства с использованием потоков плотной замагниченной плазмы (6)



## V. Оценки реализуемости устройства Polaris (Helion Fusion) в качестве энергетического термоядерного реактора

### 1. Достижение положительного энергетического выхода

Условие положительного выхода ДТ -  $n\tau > 10^{14} \text{ с/см}^3$  при  $(T_e + T_i) \geq 20 \text{ кэВ}$ . При  $\tau \approx 100 \text{ мкс}$  это соответствует  $n > 10^{18} \text{ см}^{-3}$  или  $p_{\text{плазмы}} > 3,2 \times 10^4 \text{ атм}$ . Чтобы достичь такого давления виток центрального  $\Theta$ -пинча должен создать магнитное поле с индукцией  $B > 90 \text{ Тл}$ .

Это возможно для ограниченного числа однократных импульсов. Для импульсно-периодической работы необходимо существенно увеличить время жизни компактного тора в сжатом состоянии.

### 2. Решение проблемы слияния двух компактных тороидов

Учитывая высокую скорость сталкивающихся тороидов, возможность их слияния в один без разрушения магнитной конфигурации неочевидна и на данный момент требует экспериментального подтверждения.

### 3. Возможность работы устройства в безнейтронном режиме на реакции ${}^3\text{He} + \text{D} = {}^4\text{He} + \text{p}$

Учитывая на порядок большее требуемое значение температуры плазмы для реакции  ${}^3\text{He} + \text{D} = {}^4\text{He} + \text{p}$  по сравнению с реакцией  $\text{T} + \text{D} = {}^4\text{He} + \text{n}$ , возможность демонстрации положительного выхода энергии в безнейтронном режиме в ближайшей перспективе нереалистична.

## Выводы:

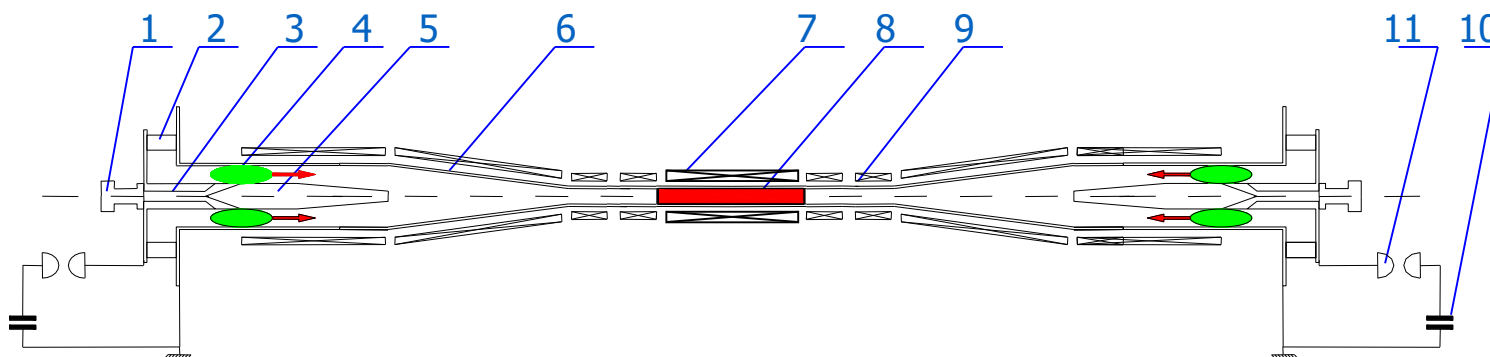
- на создаваемой установке Polaris (Helion Fusion) в период до 2028 года возможно достижение положительного энергетического выхода в  $\text{T} + \text{D} = {}^4\text{He} + \text{n}$  реакции в однократных импульсах;
- для вывода о возможности импульсно-периодической работы требуется провести дополнительный анализ и, по-видимому, она осуществима только при существенном увеличении времени жизни сжимаемого компактного тороида;
- возможность реализации работы устройства в безнейтронном режиме в обозримом будущем нереалистична.



# Работы по созданию импульсных термоядерных устройств с использованием потоков плотной замагниченной плазмы в ГНЦ РФ ТРИНИТИ (ФЦП ЯЭНП, 2013-2015гг, КП РТТН 2020-2024гг.)\*



ТРИНИТИ  
РОСАТОМ



1 – импульсный газовый клапан, 2 – изолятор, 3 – канал для подачи газа, 4 – ускоряемый сгусток, 5 – внутренний электрод (катод), 6 – диффузор, 7, 9 – соленоиды, 8 – зона столкновения сгустков, 10 – конденсаторная батарея, 11 – управляемые коммутаторы (разрядники).

## Преимущества схемы столкновения

1. Затрачивается вдвое меньшая энергия по сравнению со схемой с неподвижной мишенью.
2. В 4 раза более высокий нейтронный выход по сравнению с плазменными установками с Максвелловским распределением частиц по энергии.
3. Ускорители с источниками их питания находятся вдали от источников ионизирующего излучения.
4. Камера источника имеет простую цилиндрическую форму и в случае повреждения легко заменяется без разборки всего устройства.

\*Бахтин В.П., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Смирнов В.П., Топорков Д.А., Умрихин Н.М., Фортов В.Е., Черковец В.Е., «Нейтронные источники для гибридных реакторов на основе сталкивающихся сгустков», «АтомТех-2013», НИЯУ МИФИ, 3-4 апреля 2013 года.

# Оценка величины нейтронного выхода при пролете сгустков друг сквозь друга

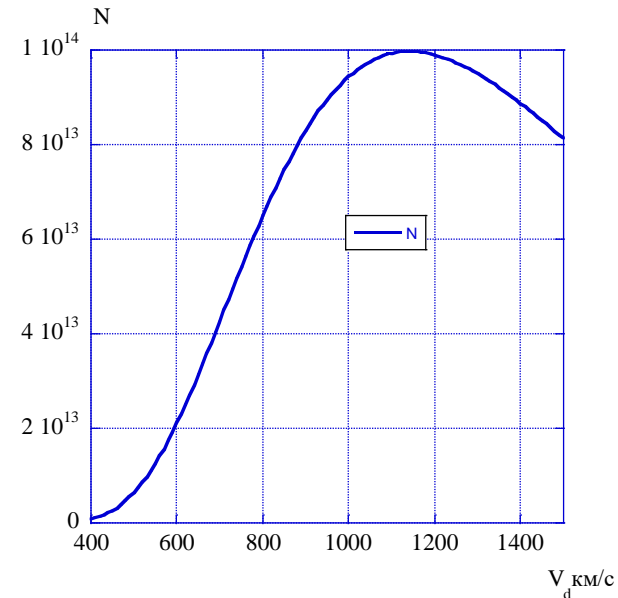


Предполагаем:

- $3/2k(T_i+T_e) \ll 1/2m_d v^2$ ;
- $\lambda_{ii} \gg L$ .

$$\sigma_{dd} = 2,4 \cdot 10^{-19} \frac{1}{E_d} e^{\frac{-1,4 \cdot 10^3}{\sqrt{E_d}}}$$

$$Y_{dd} = 1,2 \cdot 10^{18} \frac{W^2}{E_D^3} \frac{1}{S} e^{\frac{-700}{\sqrt{E_D}}}$$



Расчетная зависимость нейтронного выхода при столкновении сгустков дейтериевой плазмы от скорости дейтронов ( $S=30\text{см}^2$  и  $W=1,6$  МДж).

1. Оптимальная энергия дейтронов – 13 кэВ, скорость –  $1,15 \times 10^6$  м/с.
2. При энергии сгустков 1,6 МДж выход Д-Д нейтронов достигает  $10^{14}$  за импульс.
3. Наличие пологого максимума снижает требования к плазменному ускорителю по наиболее критическому параметру – скорости генерируемого плазменного сгустка.



# Оценка предельных параметров, при которых сгустки еще пролетают друг сквозь друга, оценка потерь энергии на нагрев электронов

## 1. Предельное значение плотности сгустков плазмы

$$\lambda_{dd} = \frac{1}{n\sigma_{90}} \approx \frac{6 \times 10^{12} E_d^2}{n} \gg L; \quad nL \ll 6 \times 10^{12} E_d^2 \approx 10^{21} \text{ см}^{-2};$$
$$n \ll 10^{19} \text{ см}^{-3} \text{ при } L = 100 \text{ см.}$$

## 2. Уровень потерь энергии дейтронов на нагрев электронов

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2m_e T_d - T_e}{M_d \tau_{ei}}; \quad T_e = 1,4 \times 10^{-3} (n_0 T_0 t)^{2/5}; \quad T_e \approx 3 \text{ кэВ при } n = 1,3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ и } L = 1 \text{ м.}$$

1. Если предположить отсутствие неустойчивостей, то до значений нейтронного выхода  $10^{15}$  ДД нейтронов за импульс реализуются режимы, при которых сгустки пролетают друг сквозь друга.
2. Потери энергии на нагрев электронной компоненты заметны и должны быть скомпенсированы увеличением скорости сгустков.
3. В сгустки должны быть заморожены магнитные поля с замкнутыми силовыми линиями, чтобы предотвратить охлаждение электронной компоненты через электронную теплопроводность.

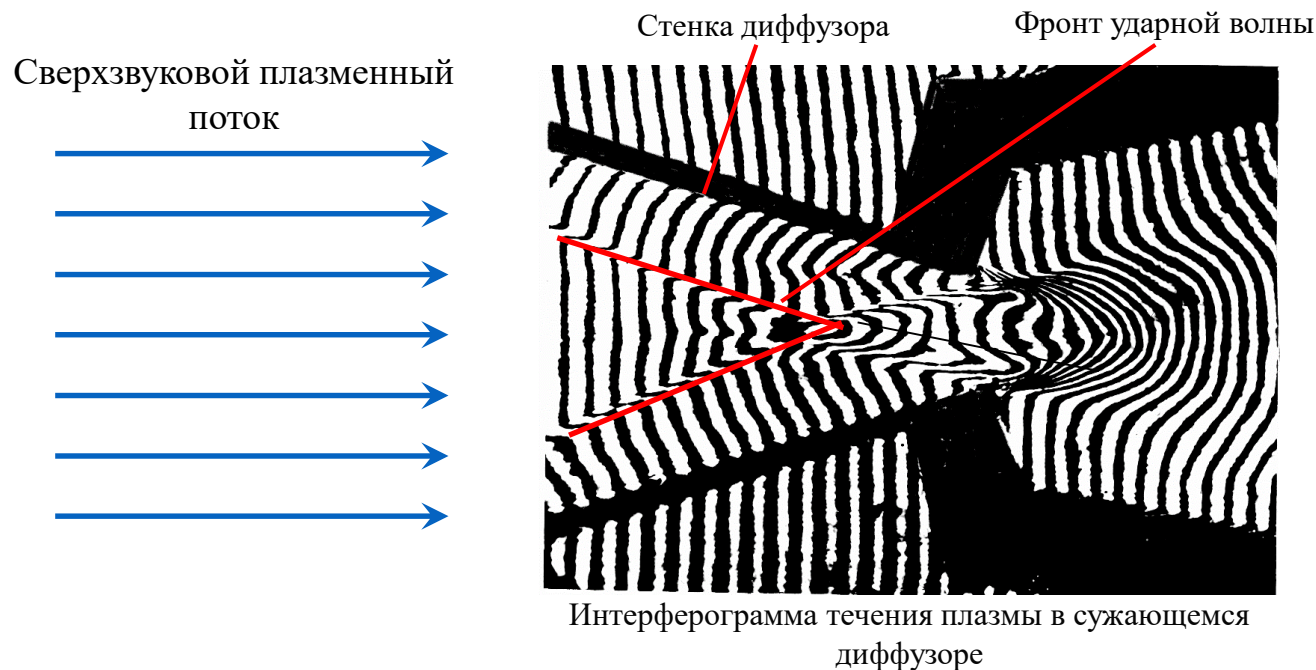
# Возможность сжатия гиперзвуковых плазменных потоков в сужающихся диффузорах



1. Выражение для предельной степени сжатия сверхзвукового плазменного потока в диффузоре:

$$\frac{\rho_{\max}}{\rho_0} = \left[ \frac{2 + (\gamma - 1)M_0^2}{2 + (\gamma - 1)} \right]^{\frac{1}{\gamma - 1}}$$

2. Эксперимент по сжатию сверхзвукового плазменного потока в диффузоре:

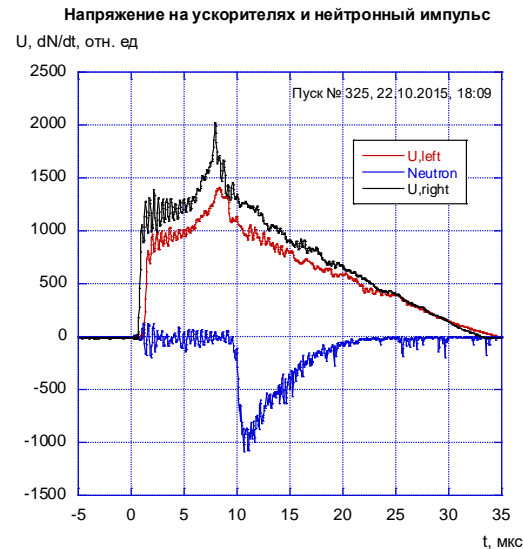


Экспериментально продемонстрирована возможность 30-ти кратного по сечению сжатия плазменных сгустков в диффузорах.

# Параметры нейтронного излучения при встречном столкновении плазменных потоков



Внешний вид стенда



Оциллограммы напряжения на ускорителях и интенсивности нейтронного излучения



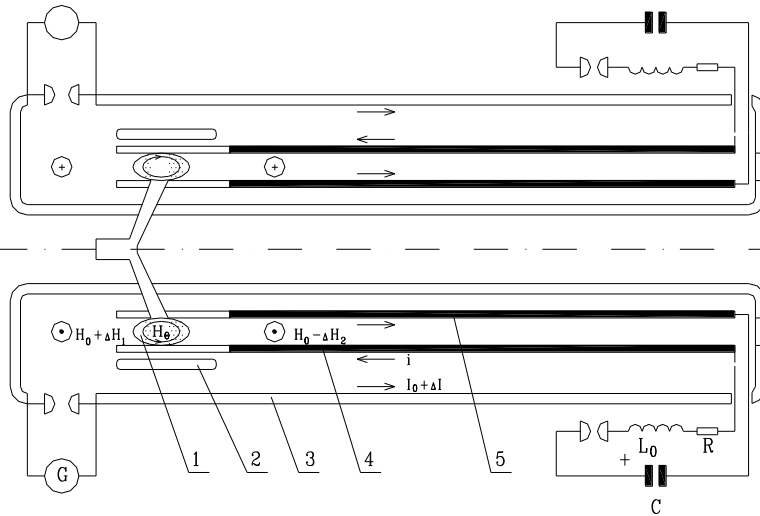
Зависимость выхода ДД нейтронов от энергозапаса в емкостных накопителях

1. Нейтронный выход соответствует формуле:  $Y_{dd} = 1,2 \times 10^{18} \frac{W^2}{E_d^3} \frac{1}{s} e^{\frac{-700}{\sqrt{E_d}}}$  и достиг величины  $(3-5) \times 10^{11}$  Д-Д нейтронов за импульс.
2. Ширина нейтронного импульса составляет 8 мкс по уровню 0,1 – 0,9.
3. Крайне желательно увеличить эффективность плазменного ускорителя.

# Плазменный ускоритель нового типа – импульсный ускоритель плазменных тороидов (ИУПТ)



Схема ускорителя



1 – тороид с замороженным магнитным полем, 2 – виток генерации тороидального тока, 3 – тороидальная катушка, 4-5 – электроды ускорителя.

Система уравнений ускорения тороида

$$\frac{di}{dt} = (L_0(u - iR) - v \frac{dL}{dz}(L_0 I_0 - (L_0 - 2L)i)) / (L(L_0 - L) + L^* L_0)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{i}{C}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dL}{dz} (2iI_0 - i^2 (1 - 2 \frac{L}{L_0})) / 2M$$

$i, u, v, L, z$  – текущие величины разрядного тока, напряжения на батарее, скорости сгустка, индуктивности зазора и продольной координаты;

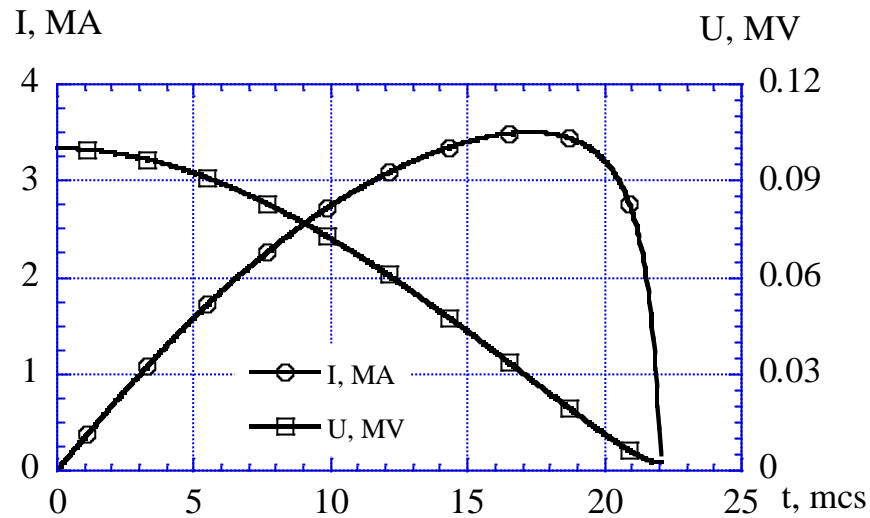
$I_0$  – полный стационарный ток в тороидальной катушке (ампер-витки),  $L_0$  – индуктивность тороидальной катушки, пересчитанная на полный ток в катушке,  $M$  – масса сгустка,  $L^*$  – индуктивность источника питания ( $L(0) \gg L^*$ ),  $R$  – активное сопротивление разрядного контура. .

1. Объектом ускорения в новом ускорителе является плазменный тороид, аналогичный плазменному шнуру токамака.

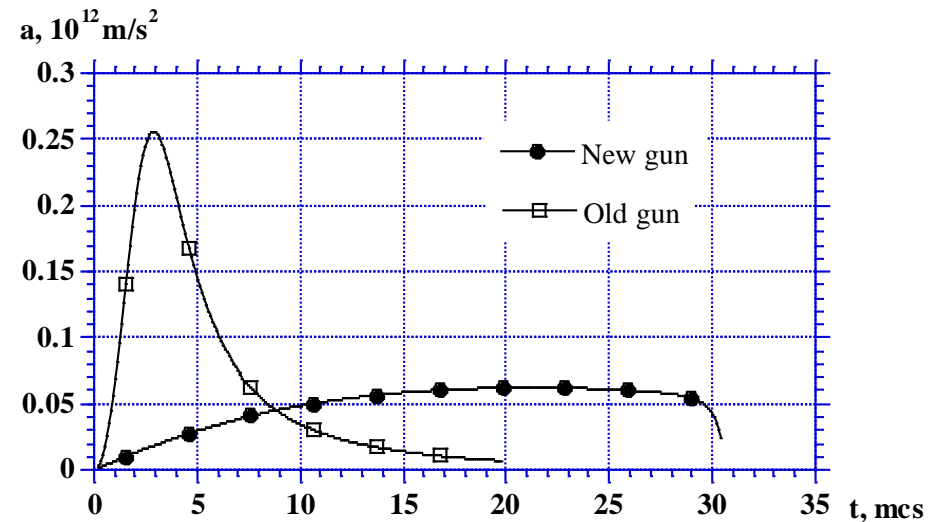
2. На выходе ИУПТ плазменный тороид должен пройти сквозь решетку из токонесущих стержней.



# Расчетные кривые для ИУПТ и их сравнение с расчетными кривыми для классического ускорителя



Расчетные кривые разрядного тока и напряжения на конденсаторном накопителе для ИУПТ



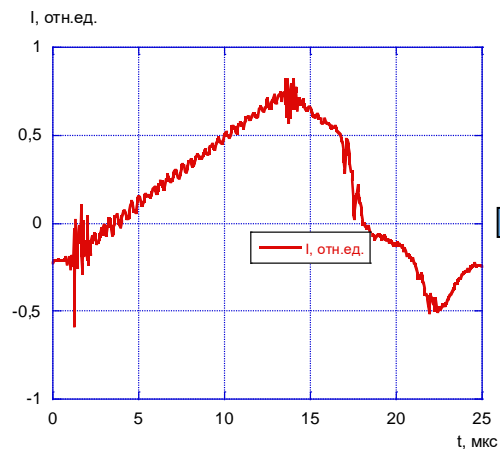
Расчетные кривые ускорения в ИУПТ и ускорителе традиционной конструкции

1. ИУПТ обладает расчетной эффективностью, приближающейся к 1.
2. ИУПТ обеспечивает наиболее оптимальную динамику ускорения с точки зрения сохранения начальной конфигурации магнитного поля, вмороженного в сгусток, и сохранения компактности ускоряемого сгустка.
3. Существует проблема сохранения магнитной конфигурации и эффективности при прохождении сквозь решетку токонесущих стержней на выходе ИУПТ.

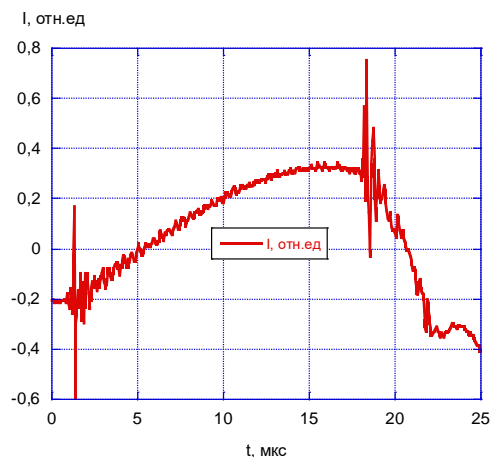
# Экспериментальные результаты исследования ИУПТ



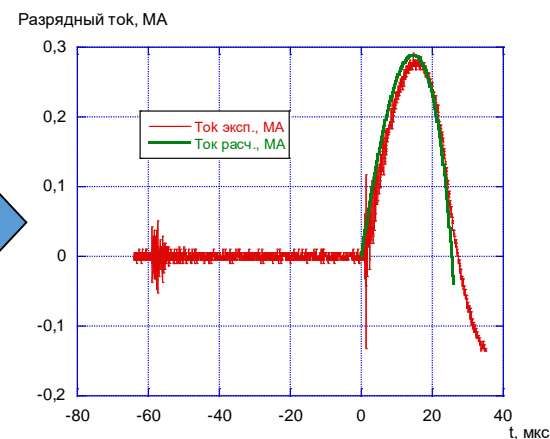
Разрядный ток ИУПТ без индуцированного тороидального тока



Разрядный ток ИУПТ при включении тороидального тока



Экспериментальный и расчетный разрядный ток ИУПТ в согласованном режиме (за счет увеличения массы тороида)

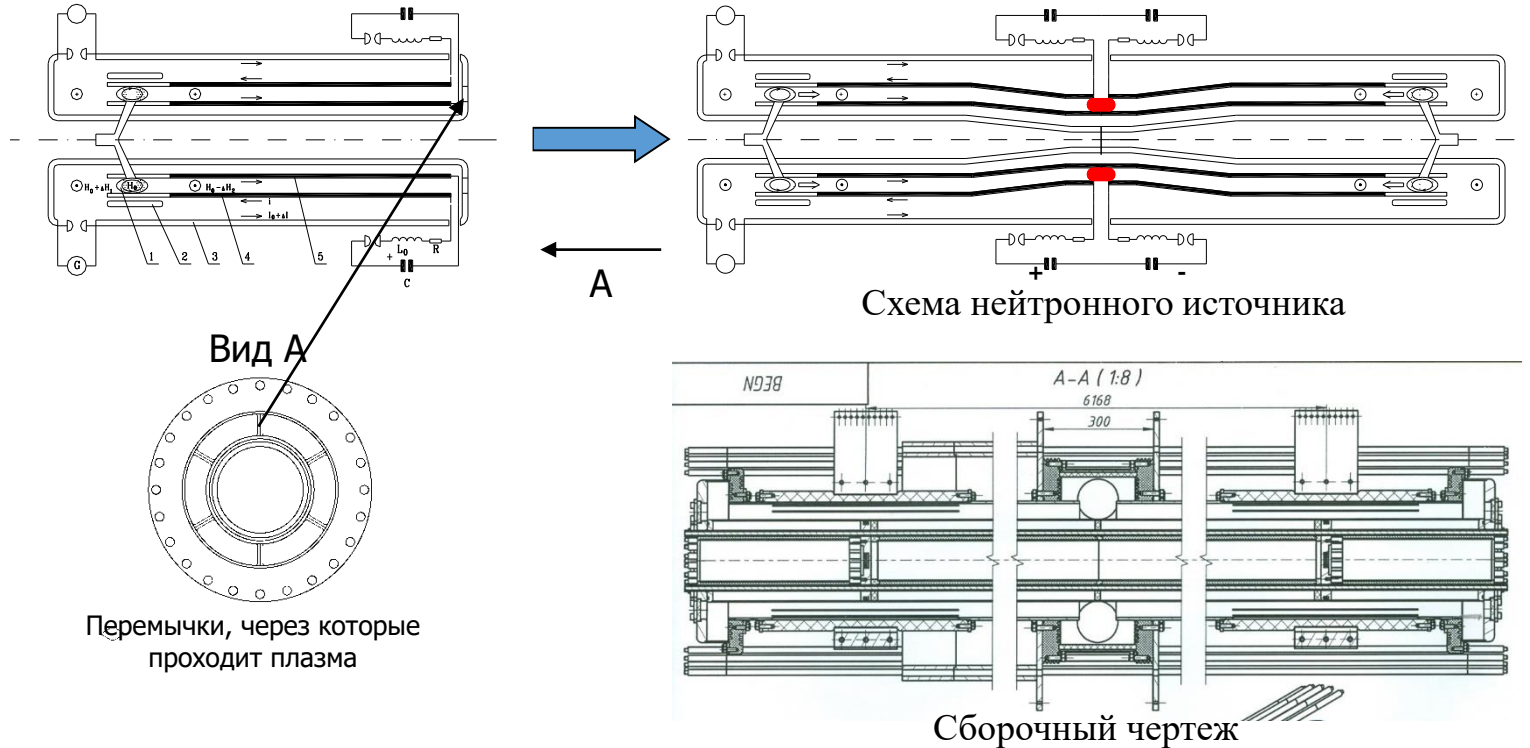


Лабораторный образец ИУПТ с источниками питания

1. Возбуждение тороидального тока – необходимый элемент функционирования ИУПТ.
2. При согласовании с источником питания экспериментальный разрядный ток ИУПТ полностью совпадает с расчетным.
3. Эффективность ИУПТ вышла на уровень 0,8-0,9.



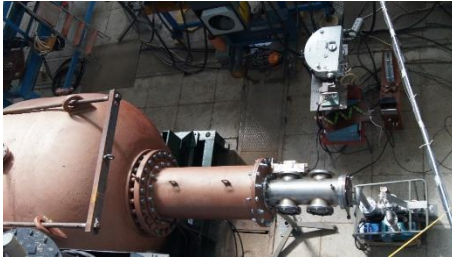
# Нейтронный источник на базе ИУПТ (схема и чертеж)



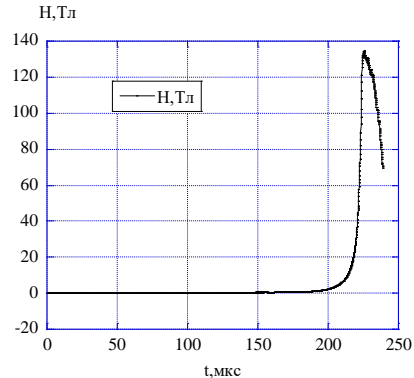
1. При последовательном соединении двух ИУПТ исчезают перемычки, через которые должна проходить плазма!
2. На вновь создаваемой экспериментальной базе (зд.124, 125) выход ДД нейтронов может достигнуть  $10^{15}$  за импульс.



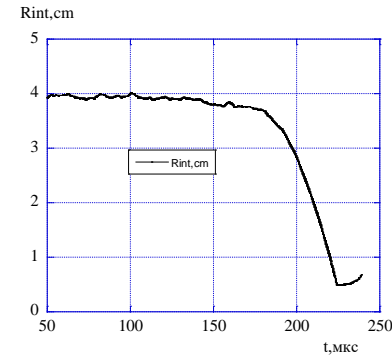
# Разработка технологии сжатия лайнеров электрическим током



Стенд по сжатию металлических оболочек импульсом тока от ВМГ



Динамика изменения магнитного поля внутри оболочки при  $B_0=1,6$  Тл



Динамика изменения радиуса оболочки в процессе сжатия



Алюминиевая оболочка после цикла сжатие-обратное расширение

1. Отработана технология изготовления металлических оболочек, которая обеспечивает идеальную симметрию их сжатия электрическим током от взрывомагнитного генератора с фронтом нарастания от 15 до 50 мкс.
2. Разработан узел сжатия оболочек током от взрывомагнитного генератора, получены степени сжатия алюминиевых оболочек диаметром 80 мм и длиной 300 мм, превышающие 100 по объему.
3. Обеспечены условия проведения экспериментов по созданию малогабаритного источника нейтронного излучения с выходом до  $10^{16}$  ДД нейтронов за импульс.



## **Разработка импульсных плазменных ускорителей большой мощности КП РТТН 2020-2022гг.**

- 1. Разработан изготовлен и испытан лабораторный образец импульсного плазменного ускорителя для ускорения сгустков массой до 2 мг до скоростей  $(5-10) \times 10^5$  м/с.**
- 2. Разработаны изготовлены и испытаны камера транспортировки и камера встречного взаимодействия плазменных сгустков.**
- 3. Создан источник питания лабораторного образца импульсного плазменного ускорителя с энергозапасом до 2МДж и рабочим напряжением до 50 кВ.**
- 4. Создан диагностический комплекс для измерения параметров плазмы и нейтронного излучения, включающий абсолютно калиброванные нейтронные детекторы и нейтронные коллиматоры.**



# Дорожная карта работ по созданию импульсно-периодического нейтронного источника за период 2013-2030гг.

2013-2015 (ЯЭНП)

При встречном столкновении плазменных потоков получены нейтронные выходы до  $5 \times 10^{11}$  ДД нейтронов за импульс.

Разработан и испытан импульсный ускоритель плазменных тороидов (ИУПТ) с эффективностью 0,7-0,8.

Разработан и испытан комплекс для более чем 100-кратного сжатия металлических оболочек током от ВМГ.

2020-2021 (РТТН)

Создан и испытан лабораторный образец плазменного ускорителя на генерацию плазменных потоков со скоростью 800-1000 км/с и энергией 250-500 кДж.

Созданы и испытаны 2 емкостных накопителя питания ускорителей с общим энергозапасом 4 МДж и рабочим напряжением 50 кВ.

2022-2023 (РТТН)

Создан экспериментальный образец нейтронного источника на базе экспериментальных образцов плазменных ускорителей.

Создан диагностический комплекс для измерения параметров плазмы и нейтронного излучения.

Проведены эксперименты по столкновению плазменных потоков.

2024-2025 (РТТН)

В результате реконструкции зд. 124 и зд. 125 создана экспериментальная база с общей энерговооруженностью 50 МДж, включая возможность использования ВМГ.

Создан экспериментальный образец нейтронного источника на базе ИУПТ.

Проведены эксперименты с целью достижения высокого нейтронного выхода.

2026-2027 (РТТН)

Создан ИУПТ на генерацию плазменных тороидов с энергосодержанием до 3 МДж.

Создан импульсный нейтронный источник на столкновении плазменных тороидов с энергосодержанием до 3 МДж и проведены эксперименты по получению повышенного нейтронного выхода.

2028-2030 (РТТН)

Разработан, создан и испытан лабораторный образец импульсно-периодического источника ДД нейтронов с частотой 0,02 Гц.

# Заключение



1. В ведущих лабораториях США стабильно ведутся работы над МТФ системами, использующими потоки плотной замагниченной плазмы, в которых демонстрируется существенный прогресс.
2. Частная компания США (Helion Fusion) объявила о завершении в 2028 году разработки термоядерного реактора на базе столкновения компактных тороидов (формируемых по схеме Р.Х. Куртмуллаева, ГНЦ РФ ТРИНИТИ) и последующего дожатия термализованной плазмы  $\Theta$ -пинчом. Привлечены частные инвестиции в размере \$500млн.
3. В ГНЦ РФ ТРИНИТИ сформулирована программа и, начиная с 2013 года\*, в кооперации с РФЯЦ ВНИИЭФ, РФЯЦ ВНИИТФ и институтами РАН ведутся работы по аналогичным системам в рамках Федеральных программ ЯЭНП и РТТН( ФПЗ). В ходе этих работ:
  - расчетным путем и экспериментально доказана эффективность применения схемы столкновения плазменных сгустков для генерации нейтронов синтеза;
  - предложен, разработан и изготовлен первый опытный образец плазменного ускорителя нового типа – импульсный ускоритель плазменных тороидов (ИУПТ);
  - экспериментально продемонстрирована эффективность ИУПТ на уровне 0,8 – 0,9;
  - разработана эффективная схема мощного импульсного нейтронного источника на базе столкновения плазменных тороидов, генерируемых ИУПТ;
  - разработана технология дополнительного сжатия термализованной плазмы  $\Theta$ -пинчом, питаемым от ВМГ, или металлической оболочкой, разгоняемой импульсами тока от ВМГ;
  - разработан, изготовлен и испытан лабораторный образец мощного импульсного плазменного ускорителя для ускорения сгустков массой (1 – 2) мг до скоростей  $(5-10) \times 10^5$  м/с;
  - реконструируются зд.124 и зд. 125 с созданием в 2024 году энергетической базы с энерговооруженностью 50 МДж, включая возможность использования ВМГ с массой ВВ до 15 кг.
4. В новой экспериментальной базе заложена возможность дополнительного сжатия термализованной плазмы для существенного увеличения выхода термоядерной реакции.
5. Опираясь на осуществленные разработки, и обладая экспериментальной базой, ГНЦ РФ ТРИНИТИ и кооперация займут ведущее место в мире по термоядерным разработкам данного направления.



## Выводы

- 1. Большой объем исследований, выполняемых ведущими мировыми лабораториями, вовлечение в исследования частных компаний, возрастающий интерес к результатам работ со стороны частных инвесторов свидетельствуют о перспективности разработок в области создания импульсных термоядерных устройств, использующих потоки замагниченной плазмы.**
- 2. Создание новой высоко энерговооруженной экспериментальной базы в ГНЦ РФ ТРИНИТИ позволит кооперации организаций ГК «Росатом», НИЦ «Курчатовский институт», РАН и учреждений Минобрнауки на два-три десятилетия занять положение одного из мировых лидеров в области разработок данных термоядерных устройств.**
- 3. На основании растущей заинтересованности к результатам исследований, а также очевидного прогресса в разработке термоядерных устройств на базе высокоскоростных потоков замагниченной плазмы в России и за рубежом целесообразно рекомендовать продолжить исследования данного направления как в ближайшей перспективе в рамках комплексной программы РТТН до 2030 года, так и в последующий период.**

**Спасибо  
за внимание**

