

Институт сильноточной электроники СО РАН

Наиболее значимые результаты научных исследований, полученные в 2013–2020 гг.

Мощные импульсные источники нейтронов на основе дейтериевых лайнеров

*Авторы: акад. РАН Н. А. Ратахин, акад. РАН Б. М. Ковальчук, к.ф.-м.н. А. В. Шишилов, к.ф.-м.н. В. А. Кокшенин, к.т.н. А. А. Жерлицын, А. Ю. Лабеецкий, Р. К. Чердизов*

Институт сильноточной электроники СО РАН

Совместно с Чешским техническим университетом в Праге, Институтом ядерной физики Академии наук Чешской Республики, Институтом физики Академии наук Чешской Республики, Национальным исследовательским Томским политехническим университетом.

**В экспериментах на уникальной научной установке России мультитераваттном генераторе ГИТ-12 экспериментально продемонстрирована высокоэффективная генерация нейтронов в DD реакции ядерного синтеза в лайнерных схемах при токах до 3 МА. В 2013 году в экспериментах с двухкаскадными дейтериевыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой получен выход  $2,9 \cdot 10^{12}$  нейтронов за импульс при токе через лайнер 2,7 МА. Было подтверждено, что теоретическая зависимость выхода нейтронов пропорционально четвертой степени пикового тока имплозии реализуется при токах более 2 МА. В 2018 году за счет использования взаимодействия потока высокоэнергетических ионов, распространяющихся в сторону катода, с помещенными за катодной сеткой образцами, содержащими дейтерий и литий, при токе  $\sim 3$  МА получено рекордное число нейтронов:  $(1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{13}$  частиц за импульс, что соответствует эффективности генерации  $\sim 10^8$  нейтронов на один джоуль энергии, вложенной в плазму.**

В 2013 году на генераторе ГИТ-12 проведены эксперименты с двухкаскадными дейтериевыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой в микросекундном режиме имплозии (1.7—3.6 МА, 460—930 нс). Целью данных исследований являлось определение эффективности генерации нейтронных импульсов в зависимости от начальных параметров лайнера, получение информации о механизмах генерации нейтронов в дейтериевой плазме.

Нагрузка (рис. 1) представляла собой двухкаскадный дейтериевый лайнер с диаметрами каскадов 80 мм и 30 мм и высотой 23—27 мм. Внешняя плазменная оболочка формировалась на диаметре 350 мм с помощью 48 плазменных пушек. Помимо стандартной диагностики для регистрации динамики имплозии и рентгеновского излучения лайнера, в экспериментах использовался обширный комплекс нейтронной диагностики, состоящий из пузырьковых детекторов, времяпролетных детекторов на основе сцинтиллятора и фотоумножителя, активационного детектора и твердотельных детекторов TasTrak CR-39.

Максимальный выход нейтронов, зарегистрированный в экспериментах, составил  $2.9 \times 10^{12}$  при инжектированной массе лайнера 85 мкг/см, пиковом токе через лайнер 2,7 МА и времени имплозии порядка 700 нс. Большее число нейтронов при сжатии дейтериевых лайнеров было зарегистрировано лишь в экспериментах на установке Z (Sandia National Laboratories, США) при амплитуде тока 17 МА. Анизотропия нейтронного потока в радиальном/аксиальном направлении составляет 1,3. По сравнению с имплозией трехкаскадных дейтериевых лайнеров на генераторе ГИТ-12 нейтронный выход увеличился на порядок. Выход порядка  $2 \times 10^{12}$  нейтронов при токе 2,7 МА соответствует зависимости  $Y_n \sim I^4$ , полученной на различных установках типа плазменного фокуса. Максимальная энергия нейтронов в радиальном и аксиальном направлениях, зарегистрированных времяпролетными детекторами, составляет 15 МэВ и 22 МэВ, соответственно. Детекторы CR-39, расположенные на оси пинча регистрировали дейтроны с энергиями до 39 МэВ (или протоны с энергией до 28 МэВ). Наблюдаемые выходы нейтронов можно объяснить

надтепловым распределением дейтронов по энергиям и замагниченностью дейтронов с энергией порядка 1—2 МэВ в плазме лайнера.

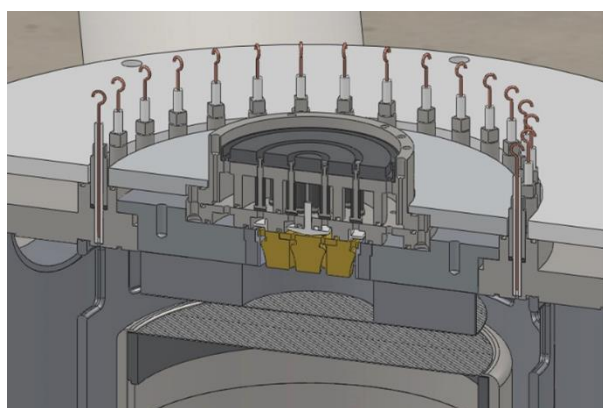


Рис. 1. Узел нагрузки генератора ГИТ-12 для проведения экспериментов с двухкаскадными газовыми лайнерами с внешней плазменной оболочкой

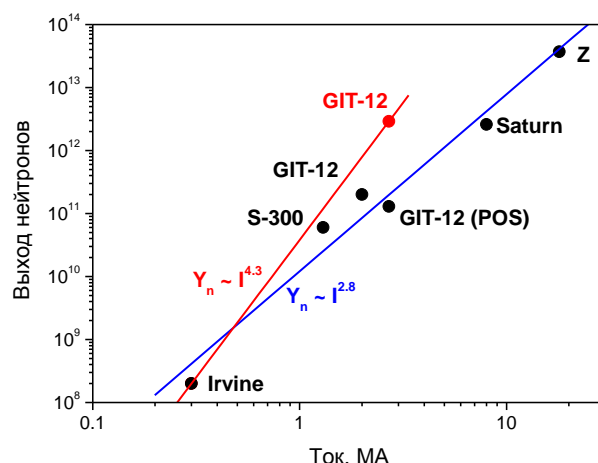


Рис. 2. Зависимость выхода нейтронного излучения от пикового тока импльсии в экспериментах на различных генераторах

Для более полного понимания процессов, происходящих в Z-пинче при генерации нейтронов, были исследованы потоки ионов, возникающих в финальной стадии импльсии.

Для характеристики пространственного распределения потоков ионов в плоскости катода была применена методика, основанная на использовании генерирующих нейтроны образцов. В экспериментах использовались образцы LiF с естественным преобладанием изотопа  ${}^7\text{Li}$ . Характерный пик нейтронов с энергиями более 10 МэВ, образующихся в реакции  ${}^7\text{Li}(d,n)$ , отчетливо регистрируется времяпролетными детекторами (рис.3(c,d)). Образцы LiF располагались на расстоянии 0, 3, 6, 10, 12, 16 и 26 мм от оси пинча (рис.3(a)). Положение образцов по отношению к центру ионного пучка контролировалось с помощью ионной камеры-обскуры (рис.3(b)). На рис. 3(c,d) показаны сигналы времяпролетных детекторов, находящихся на расстоянии 2 м и 25.79 м, в двух выстрелах, в которых образцы LiF располагались на расстоянии 3 и 16 мм от оси пинча.

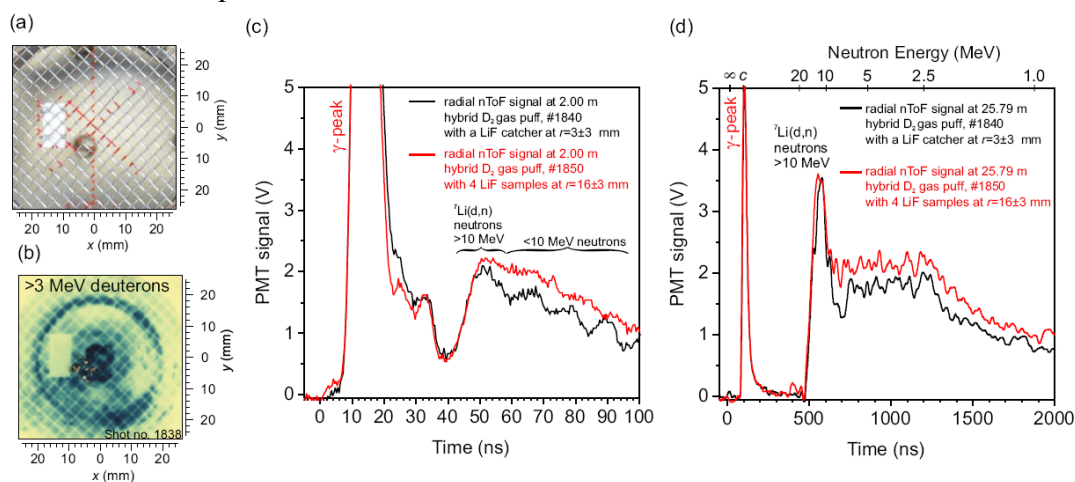


Рис. 3. Фотография (a) и изображение, полученное с помощью ионной камеры обскуры (b), катодной сетки и образца LiF. Сигналы времяпролетных детекторов, установленных на дистанции 2 м (c) и 25.79 м (d) от пинча, в выстрелах с образцами LiF, расположенных на расстоянии 3 мм и 16 мм от оси пинча.

Данные измерения показывают, что нейтроны в реакции  ${}^7\text{Li}(d,n)$  образуются практически одновременно в образцах, расположенных на разном расстоянии от оси пинча,

и спектр дейтронов, участвующих в реакции не имеет существенных различий. Это позволяет сделать предположение, что выход нейтронов из образцов LiF пропорционален количеству ускоренных ионов в месте расположения образца.

Выход нейтронов в расчете на  $1 \text{ см}^2$  из образцов LiF, расположенных на различном расстоянии от оси пинча показан на рис.4(a). Видно, что нейтронный выход падает, при удалении образца от оси пинча. Однако выход нейтронов на большем радиусе можно увеличить, если использовать образец большей площади. Рисунок 4(b) показывает выход нейтронов из образца LiF шириной 1 мм и длиной  $2\pi R$  в зависимости от радиуса R. Выход остается практически постоянным до радиуса 12 мм, а затем начинает спадать.

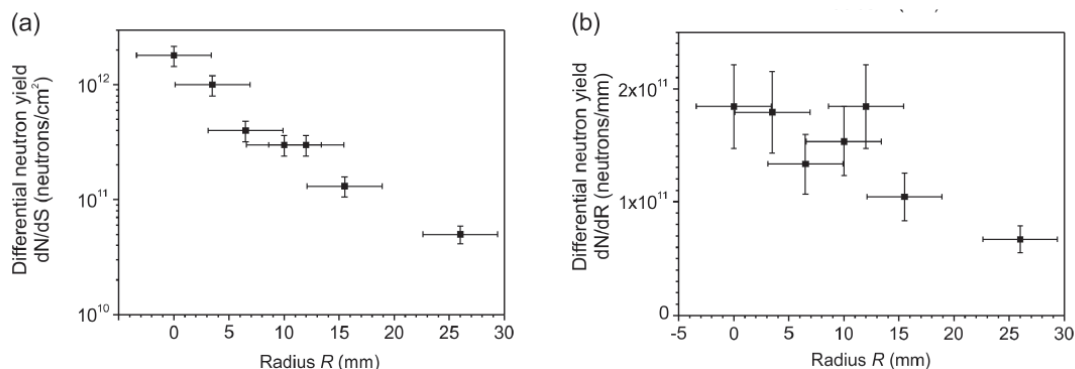


Рис. 4 (a) Выход нейтронов в расчете на  $1 \text{ см}^2$  из образца LiF, расположенного на разных радиусах от оси пинча. (b) Выход нейтронов из образца LiF шириной 1 мм и длиной  $2\pi R$ , расположенного на радиусе R.

Полученные данные о пространственном распределении потока дейтронов в плоскости катода позволили увеличить выход нейтронного источника за счет использования нейтронно-генерирующих образцов. Для этого под катодной сеткой был размещен диск дейтерированного полиэтилена диаметром 35 мм и толщиной 0.4 мм. В центре диска располагался небольшой образец LiF толщиной 1 мм. Взаимодействие потока высокоэнергетических ионов, распространяющихся в сторону катода, с образцами позволило в 2018 году увеличить выход нейтронов в эксперименте до  $(1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{13}$ .

## Публикации

1. D. Klir., A.V. Shishlov, V.A. Kokshenev, P. Kubes, A.Yu. Labetsky, K. Rezac, J. Cikhardt, F.I. Fursov, B.M. Kovalchuk, J. Kravarik, N.E. Kurmaev, N.A. Ratakhin, O. Sila and J. Stodulka Characterization of neutron emission from mega-ampere deuterium gas puff Z-pinch at microsecond implosion times // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 55, 085012, 11 pages (2013).
2. D. Klir, V.A. Kokshenev, P. Kubes, A.Yu. Labetsky, M. Paduch, K. Rezac, A.V. Shishlov Search for Drive Parameter of Neutron-Optimized Z-Pinches and Dense Plasma Foci // *IEEE Transactions on Plasma Science*, Volume: 41, Issue: 11, pages 3129 - 3134 (Nov. 2013).
3. D. Klir, A.V. Shishlov, V.A. Kokshenev, P. Kubes, K. Rezac, R.K. Cherdizov, J. Cikhardt, B. Cikhardtova, G.N. Dudkin, F.I. Fursov, T. Hyhlik, J. Kaufman, B.M. Kovalchuk, J. Krasa, J. Kravarik, N.E. Kurmaev, A.Yu. Labetsky, V. Munzar, H. Orcikova, V.N. Padalko, N.A. Ratakhin, O. Sila, J. Stodulka, K. Turek, V.A. Varlachev, and R. Wagner "Ion acceleration mechanism in mega-ampere gas-puff z-pinches" // *New Journal of Physics*, Volume 20, Issue 5, May 2018, 053064. DOI: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aac545>
4. D. Klir, A.V. Shishlov, V.A. Kokshenev, P. Kubes, K. Rezac, S. Buryskova, R.K. Cherdizov, J. Cikhardt, B. Cikhardtova, G.N. Dudkin, J.T. Engelbrecht, F.I. Fursov, S.L. Jackson, J. Krasa, J. Kravarik, N.E. Kurmaev, V. Munzar, V.N. Padalko, N.A. Ratakhin, O. Sila, K. Turek, V.A. Varlachev, R. Wagner "Acceleration of protons and deuterons up to 35 MeV and generation of 1013 neutrons in a megaampere deuterium gas-puff z-pinch" // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 61 (2019) 014018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aadc99>