

P15-2001-285

**ДЕЙТЕРИЕВЫЙ ЛАЙНЕР
И МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ
ИНВЕРСНОГО Z-ПИНЧА**

Направлено в «Журнал технической физики»

Вит. М. Быстрицкий
Калифорнийский университет, США

Вяч. М. Быстрицкий, В. М. Гребенюк, С. С. Паржицкий, Ф. М. Пеньков,
В. А. Столупин
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Я. Возняк
*Факультет физики и ядерной техники Горно-металлургической
академии, Краков, Польша*

Е. Гула
Институт ядерной физики, Краков, Польша

Г. Н. Дудкин, Б. А. Нечаев, В. Н. Падалко
*Научно-исследовательский институт ядерной физики при ТПУ, Томск,
Россия*

Г. А. Месяц
Институт электрофизики, Екатеринбург, Россия

Н. А. Ратахин, С. А. Сорокин
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

1. Введение

Интерес к изучению сильных взаимодействий между легкими ядрами в области инфранизких энергий (\sim кэВ) обусловлен не только возможностью проверки фундаментальных симметрий, но и необходимостью разрешения ряда проблем, существующих в астрофизике [1]. До недавнего времени практически полностью отсутствовала экспериментальная информация о сечениях реакций между легкими ядрами в области инфранизких энергий столкновения эВ – кэВ. Такая ситуация была обусловлена как малой величиной сечений ($10^{-43} - 10^{-32}$ см²) исследуемых реакций в данной области энергий, так и крайне низкой интенсивностью пучков заряженных частиц.

Толчком к экспериментальному изучению ядерных реакций в указанной области энергий послужило предложение нового метода исследований данных реакций, изложенного в работах [1-4]. Предложенный метод основан на использовании высокоинтенсивных радиально конвергируемых ионных потоков, генерируемых в процессе имплозии лайнерной плазмы (формирование прямого Z-пинча). В качестве лайнера в экспериментах использовалась сверхзвуковая полая цилиндрическая струя дейтерия диаметром 15 мм, инжектируемая с помощью сопла Лавала в вакуум, а в качестве мишени - полая струя дейтерия меньшего радиуса по сравнению с радиусом лайнера либо стержень из CD₂, расположенный вдоль оси лайнера. С применением данного метода был выполнен ряд экспериментов [5-9] по изучению ядерной реакции



в области энергий столкновения дейтронов 0.05 – 2.3 кэВ. Были найдены оценки эффективных сечений dd-реакции и значений астрофизического S-фактора в указанном диапазоне энергий. Полученные результаты свидетельствовали о том, что, с одной стороны, предложенная методика заслуживает внимания и может быть эффективно применена для реализации программы изучения ядерных реакций в астрофизической области энергий, а с другой - может рассматриваться как основа ядерно-физической диагностики плазменных процессов. Отметим, что

с использованием данной методики для получения прецизионной информации о характеристиках ядерных реакций (о сечениях и астрофизических S-факторах) необходимо знание с достаточно высокой точностью как энергетического распределения ускоренных ионов лайнера, так и модели кулоновского торможения ионов лайнера в процессе взаимодействия его с мишенью [8-10]. Такое требование продиктовано резкой зависимостью сечения исследуемых ядерных реакций от энергии столкновения, которая в области ультранизких энергий носит экспоненциальный характер¹. Следует отметить и некоторые недостатки предложенного метода исследований ядерных реакций. Из-за возможного развития разного типа неустойчивостей лайнера в процессе его имплозии (например, магнитогиродинамических) возможно появление высокоэнергетических ионов лайнера (20 ÷ 300 кэВ) на уровне $10^{-10} \div 10^{-12}$ от полного числа ускоренных ионов, что, в свою очередь, может приводить к более интенсивному протеканию исследуемых ядерных реакций (фоновый процесс) и, как следствие, к заметному увеличению измеряемого выхода их продуктов. Так как в схеме прямого Z-пинча процессы электродинамического ускорения ионов лайнера и взаимодействия его с мишенью трудноразличимы во времени, то при анализе данных становится проблематичной дискриминация фоновых событий и событий эффекта. К недостаткам описанной методики следует отнести и существующее ограничение (< 3 кэВ) по максимально достижимой энергии ускоренных ионов, обусловленное возрастанием вклада фоновых процессов в измеряемый выход изучаемых ядерных реакций. Для уменьшения вклада фоновых процессов и повышения максимально достижимой энергии ускоренных ионов лайнера до ~ 15 кэВ в работе [11] нами была предложена методика, основанная на формировании инверсного Z-пинча. Получение "высокоэнергетических" ускоренных ионов (6 ÷ 15 кэВ) обусловлено

¹ При извлечении информации об основных параметрах изучаемых реакций используется параметризация зависимости сечения реакции от энергии, которая может быть представлена в виде произведения барьерного множителя, обусловленного кулоновским отталкиванием ядер, и астрофизического S-фактора.

необходимостью сравнения характеристик ядерных реакций, измеренных с помощью классических и плазменных ускорителей².

В схеме инверсного Z-пинча лайнерная плазма ускоряется радиально от оси лайнера, что позволяет: а) дискриминировать по времени процессы электродинамического ускорения лайнера и взаимодействия его с мишенью; б) уменьшить плотность потока плазмы, падающей на мишень; в) существенно упростить проблему измерения средней скорости и распределения ионов лайнера по скоростям при его подлете к мишени. Результаты исследования процесса формирования инверсного Z-пинча [11] свидетельствуют о реальной возможности достаточно надежной дискриминации по времени “полезных” и фоновых событий, а следовательно, о применимости данной методики для изучения ядерных реакций в области инфранизких энергий. Тем не менее и в данном случае – при использовании методики инверсного Z-пинча – получение информации об энергетическом распределении ионов лайнера остается все той же, как было отмечено выше, актуальной и сложной задачей, решение которой, в свою очередь, требует рассмотрения разнообразных методик, обладающих достаточной простотой и высокой надежностью. Попытка решения данной задачи и явилась целью настоящей работы.

2. Постановка эксперимента

Эксперименты проводились в ИСЭ СО РАН с использованием импульсного сильноточного ускорителя СГМ ($I = 950$ кА – ток лайнера, $\tau = 80$ нс – длительность высоковольтного импульса [14]). На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, состоящей из сильноточного генератора, нагрузочного модуля (принципиальный чертеж нагрузочного модуля приведен на рис. 2), детектирующей и диагностирующей аппаратуры.

² Наименьшая энергия, при которой измерялось сечение dd-реакции с образованием нейтронов, с использованием классических ускорителей, составляет 6 кэВ в системе центра масс сталкивающихся дейтронов [12-13].

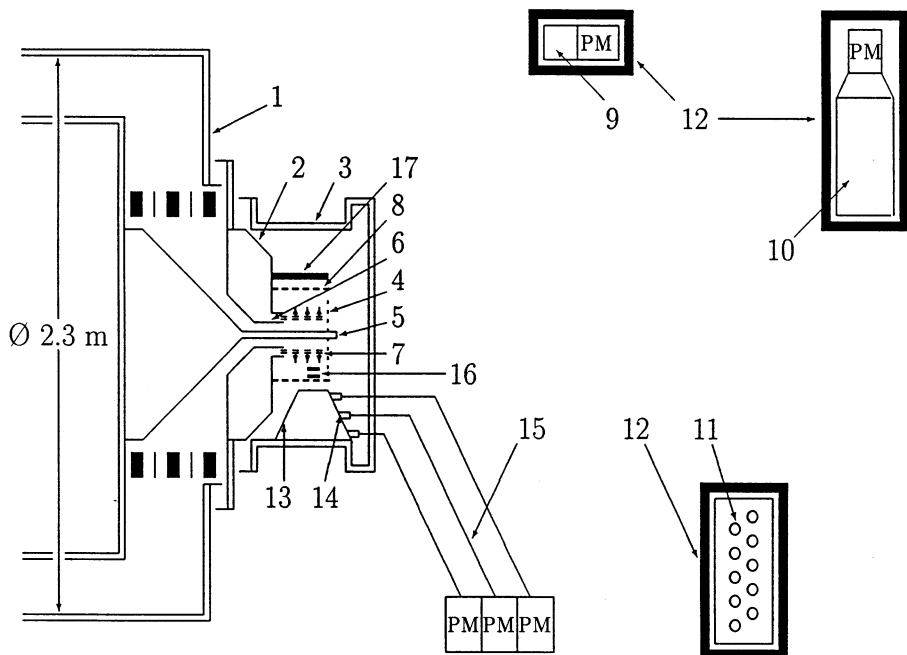


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – сильноточный генератор; 2 – нагрузочный модуль ускорителя; измерительная камера; 4 – сетчатый катод; 5 – обратный токопровод; 6 – сверхзвуковое сопло Лавалья; 7 – лайнер; 8 – токоперехватывающий стержень; 9 – сцинтилляционный детектор (D1); 10 – сцинтилляционный детектор (D2); 11 – детектор тепловых нейтронов (D3); 12 – защита из Pb; 13 – световой конус; 14 – коллиматоры; 5 – световоды; 16 – магнитные зонды dB/dt ; 17 – мишень из CD_2 .
 Электромагнитный клапан не изображен

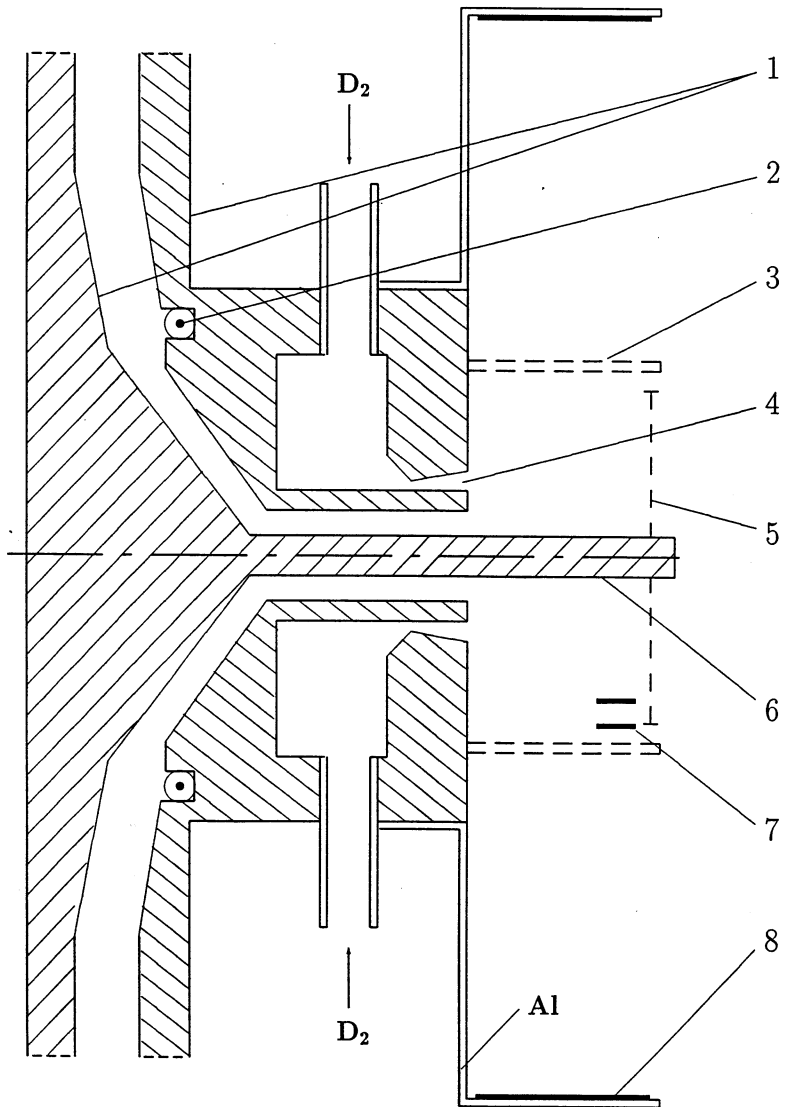


Рис. 2. Схема узла нагрузки для формирования инверсного Z-пинча и расположение детекторов светового излучения:

1 – электроды; 2 – пояс Роговского; 3 – токоперехватывающие стержни; 4 – сопло Лавала; 5 – сетчатый катод; 6 – обратный токопровод; 7 – магнитные зонды; 8 – мишень

2.1. Метод формирования инверсного Z-пинча

Исходный дейтериевый лайнер формируется с помощью сверхзвукового сопла Лаваля 6 (см. рис. 1) и быстродействующего электромагнитного клапана. Сопло располагается на заземленном электроде 1 (см. рис. 2) диода сильноточного генератора. Средний радиус лайнера составляет 15 мм. На пути радиального разлета плазменной оболочки установлена токоперехватывающая структура 8 (ТС), выполненная в виде беличьего колеса радиусом 45 мм из стержней диаметром 1 мм. Радиус установки ТС определяет базу разгона лайнера. Измерение тока, проходящего через лайнер, осуществляется с помощью пояса Роговского (см. рис. 2). Определение массы лайнера производится путем применения нуль-мерной модели движения лайнера с использованием информации как о зависимости тока, протекающего через лайнер, так и о временах появления сигналов с магнитных датчиков (dB/dt), отражающих моменты прохождения токовой оболочки лайнера через данные датчики.

Контроль за процессом ускорения лайнера осуществляется с помощью двух dB/dt –зондов, установленных на радиусах 23 и 34 мм.

2.2. Метод измерения энергетического распределения дейтронов лайнера

Предлагаемый метод основан на регистрации оптического излучения радиально движущегося от оси дейтериевого лайнера. Излучение лайнера происходит за счет следующих процессов: перезарядки ионов дейтерия на молекулах (атомах) остаточного газа в измерительной камере ускорителя с последующим излучением H_{α} - и H_{β} -линий дейтерия (линий Бальмера) с длиной волны 656.5 и 486 нм соответственно; рекомбинационных процессов; тормозного излучения. В эксперименте для выделения линий Бальмера использовались стеклянные оптические фильтры в сине-зеленой и красной областях спектра. Три детектора оптического излучения LD1, LD2 и LD3 были установлены по радиусу за ТС в направлении разбега лайнера от его оси (см. рис. 1). Расстояние от ТС до детектора LD1, а также расстояние между

детекторами LD1 – LD2 и LD2 – LD3 составляло 50 мм. Детекторы оптического излучения представляют собой сборку, состоящую из коллиматора, кварцевого световода и фотоэлектронного умножителя. Диаметр и длина коллиматора составляли 4 и 14 мм соответственно. Диаметр кварцевого световода 200 мкм, а длина 7 м. Для защиты оптических детекторов от достаточно интенсивного фонового светового излучения, обусловленного пробоем газовой струи, инжектируемой в диод, коллиматоры располагались в овальном усеченном конусе, изготовленном из светозащитного непроводящего материала. Размеры конуса: диаметр входного отверстия 20 мм, высота 220 мм, основание конуса – большая ось 110 мм, а малая – 40 мм. Идеология измерения энергетического распределения ионов лайнера основана на связи как времен появления сигналов с оптических датчиков, установленных на определенных расстояниях от ТС, так и длительностей данных сигналов, определяемых длительностью светового импульса, являющейся функцией от расстояния относительно токоперехватывающих стержней. При таком подходе распределение ионов лайнера по энергии может быть в упрощенном виде представлено как

$$\Delta t \approx 16.09 \cdot L \cdot (1/E)^{1/2} (\Delta E/E), \quad (2)$$

где Δt (нс) - ширина на полувысоте светового импульса с датчика, установленного на расстоянии L (см) от ТС (предполагается, что по достижении лайнером ТС происходит перехват тока лайнера токоперехватывающей структурой и дальнейший разбег лайнера происходит без ускорения и представляет собой свободное движение бестоковой оболочки); E , ΔE – наиболее вероятная энергия ионов лайнера в (кэВ) и полная ширина их энергетического распределения на расстоянии L от ТС. Таким образом, уширение сигналов со световых датчиков по мере удаления лайнера от ТС характеризует собой соответствующий энергетический разброс ионов лайнера. Следует отметить некоторые постулаты приведенной выше идеологии. Во-первых, предполагается, что протяженность в пространстве источника светового излучения H_α - и H_β -линий однозначно соответствует распределению ионов лайнера. Такой постулат базируется на предположении, что все ионы лайнера независимо от их начального положения по радиусу (в момент прикладывания высоковольтного импульса к газовому лайнеру

его толщина по радиусу составляет $\sim 1-2$ см) начинают одновременно ускоряться. Во-вторых, предполагается, что, измеряя интенсивность H_{α} - и H_{β} -линий, мы получаем информацию о распределении плотности ионов по радиусу лайнера. Такое предположение справедливо при условии термодинамического равновесия между ионами лайнера и возбужденными нейтралами, излучающими H_{α} - и H_{β} -линии. Измерения параметров лайнера были выполнены с использованием осциллографов TEKTRONIX. Сигналом "TRIGGER" являлся импульс тока высоковольтного генератора.

2.3. БолOMETрические исследования динамики разгона лайнера

Целью болOMETрических исследований является измерение плотности потока энергии ΔW в радиально разлетающемся сгустке плазмы. В настоящем эксперименте измерение данной величины производилось фольговым болOMETром. Методика болOMETрических измерений сводится к определению энергии ионов лайнера, падающих на фольгу, по нагреву и соответствующему изменению ее электрического сопротивления.

Схема болOMETрических измерений включает в себя генератор опорного тока, фольговый болOMETр и регистрационный канал на базе осциллографа TEKTRONIX.

Генератор опорного тока состоит из искусственной формирующей линии с волновым сопротивлением ~ 2 Ом, которая с помощью быстрого тиристора коммутируется на согласованную активную нагрузку ~ 2 Ом.

Фольговый болOMETр, имеющий собственное сопротивление $\sim 0.05 - 0.1$ Ом, включается в измерительную электрическую цепь последовательно с нагрузочным резистором. В качестве фольгового болOMETра использовалась полоска из медной фольги длиной $l = 45$ мм, шириной 2 мм и толщиной $\delta = 17.5$ мкм. Данная полоска устанавливалась параллельно оси лайнера на радиусе $r = 360$ мм. Амплитуда и длительность импульса опорного тока, имеющего квазипрямоугольную форму, составляют: ~ 60 А и ~ 10 мкс, что, в свою очередь, гарантировало пренебрежимо малый джоулевый нагрев фольги.

Поток энергии лайнерной плазмы, приходящейся на 1 см^2 поверхности медной фольги, связан с относительным изменением напряжения на ней $\Delta U/U$ следующим образом:

$$\Delta W(\text{Дж/см}^2) = C_p \cdot \rho \cdot \delta/\alpha \cdot \Delta U/U = 1.56 \cdot \Delta U/U, \quad (3)$$

$$\Delta U/U = \alpha \Delta T,$$

где C_p , α - удельная теплоемкость и температурный коэффициент сопротивления медной фольги ($C_p = 0.39 \text{ Дж/(г } ^\circ\text{C)}$; $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); ρ - плотность меди ($\rho = 8.93 \text{ г/см}^3$); ΔT - изменение температуры медной фольги при поглощении потока энергии лайнера, падающего на нее. Формула (3) получена в приближении линейной зависимости между величинами ΔU и ΔW , которая реализуется при условии постоянства величин C_p и α в диапазоне изменения температуры фольги ΔT . Согласно численным значениям величин C_p и α формула (3) справедлива в диапазоне изменения температур $\Delta T \leq 300 \text{ К}$, который и реализуется в условиях настоящих измерений. При $\Delta T \leq 300 \text{ К}$ представленная конструкция болометра позволяет измерять потоки энергии ускоренной плазмы до величины $\Delta W = 1.8 \text{ Дж/см}^2$. Точность измерения болометром определяется в основном точностью электрических измерений и неопределенностью коэффициента поглощения фольгой энергии частиц лайнера. Возможность измерения энергии потока легких ионов (H^+ , He^+ , Li^+) обоснована сравнительно небольшими значениями коэффициента отражения ($< 20 \%$) падающих на поверхность частиц с энергией от нескольких сотен эВ до десятков кэВ. "Катодное" распыление материала болометра не влияет существенно на точность измерений, так как коэффициент распыления, как правило, не превышает единицы, а средняя энергия распыления частиц - нескольких эВ.

Необходимо также отметить, что условие малого нагрева фольги болометра опорным током накладывает ограничение на величины падения напряжения на фольге U (единицы вольт) и изменения напряжения ΔU ($\sim 1 \text{ В}$). Существуют некоторые затруднения при измерении такого уровня сигналов в условиях больших электромагнитных наводок, возникающих при срабатывании сильноточного генератора. Для подавления такого типа наводок регистрирующий

осциллограф и генератор опорного тока помещались в специальный экранирующий бокс. Электропитание на них подавалось через сетевой фильтр. Сигнальные кабели помещались в дополнительную экранирующую оплетку. Синхронизация срабатывания (запуска) сильноточного генератора и генератора опорного тока производились с помощью 6-канального генератора задержанных импульсов ГИ-1.

На рис. 3 в качестве примера приведен сигнал с болометра, полученный в одном из выстрелов (кривая 1). На этом же рисунке отражен и опорный сигнал, зарегистрированный при срабатывании сильноточного генератора (кривая 2).

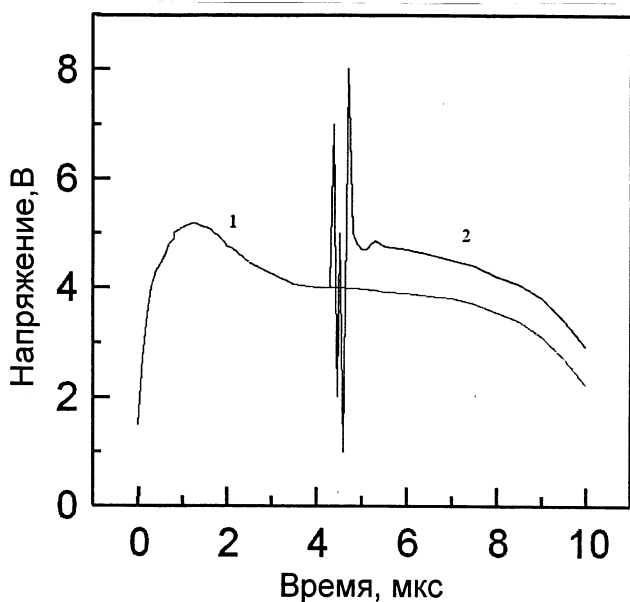


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с болометра: 1 – опорный сигнал на выходе болометра; 2 – сигнал с болометра при срабатывании сильноточного генератора

Момент появления всплесков на опорном сигнале совпадает со срабатыванием сильноточного генератора, а природа их связана как с переходным процессом в цепи генератора опорного тока при быстром изменении сопротивления, так и с частичным шунтированием активного элемента потоком плазмы. Измерение

величины $\Delta U/U$ производилось с задержкой $\Delta t > 1$ мкс относительно момента срабатывания высокоточного генератора, т.е. по завершении переходных процессов в электрических цепях. Как видно из рис. 3, приращение напряжения $\Delta U/U$ практически постоянно до конца развертки осциллографа, что позволяет с хорошей точностью определить нагрев фольги и, следовательно, плотность потока энергии в месте расположения элемента (фольги).

В данном выстреле величина $\Delta U/U = 0.26$, что соответствует плотности потока энергии лайнерной плазмы $\Delta W = 1.56 \cdot \Delta U/U = 0.4$ Дж/см² и потоку энергии, поглощенной мишенью, $E = \Delta W \cdot S = 400$ Дж ($S = 2\pi r^2 = 1017$ см² – площадь мишени, расположенной вокруг лайнера). Нуль-мерные расчеты динамики разгона лайнера с использованием показаний магнитных зондов, установленных на пути разгона лайнера, свидетельствуют том, что энерговклад в кинетическую энергию лайнера составляет ~ 1 кДж (масса лайнера ~ 8 мкг, длина 20 мм, конечная скорость разгона лайнера $\sim 5 \cdot 10^7$ см/с). Следовательно, мишень длиной 45 мм, расположенная вокруг лайнера на радиусе 360 мм, поглощает ~ 40 % кинетической энергии лайнера. В следующем выстреле болометр, оставаясь на том же радиусе, был смещен вдоль оси лайнера на 5 см. Измеренный поток энергии в этом случае составил ~ 200 Дж. Из полученных результатов следует, что разлетающийся поток плазмы имеет довольно строгую радиальную направленность и его ширина вдоль оси лайнера на радиусе 36 см может быть оценена в 10 – 15 см, а измеренная кинетическая энергия потока плазмы находится в согласии с результатами нуль-мерного расчета.

2.4. Диагностика лайнера с использованием детекторов нейтронов

Для измерения энергии нейтронов из dd-реакции, образующихся как в процессе взаимодействия лайнера с мишенью, так и за счет нестабильностей в процессе его ускорения, использовалась методика регистрации нейтронов по времени пролета.

Детектирование нейтронов (см. рис. 1) из реакции (1) осуществлялось двумя сцинтилляционными детекторами D1 и D2 на основе пластических

сцинтилляторов ($d = 5.3$ см, $l = 5.0$ см ; $d = 10$ см, $l = 20$ см соответственно) и детектором тепловых нейтронов D3 (сборка из 10 пропорциональных BF_3 счетчиков, помещенных в полиэтиленовый замедлитель). Детекторы D1, D2 и D3 были установлены от оси лайнера на расстояниях 246, 410 и 277 см соответственно. Для подавления загрузки детекторов D1 – D3 мощным рентгеновским и тормозным излучением они окружались защитой из Pb толщиной 5 см. Эффективности регистрации нейтронов детекторами D1 – D3 составляли $2 \cdot 10^{-6}$, $4 \cdot 10^{-6}$ и $4.3 \cdot 10^{-6}$ соответственно.

3. Анализ и обсуждение результатов

3.1. Детекторы оптического излучения

На рис. 4 в качестве примера приведены осциллограммы импульсов с детекторов оптического излучения в “выстреле” №3 (в дальнейшем “выстрелом”

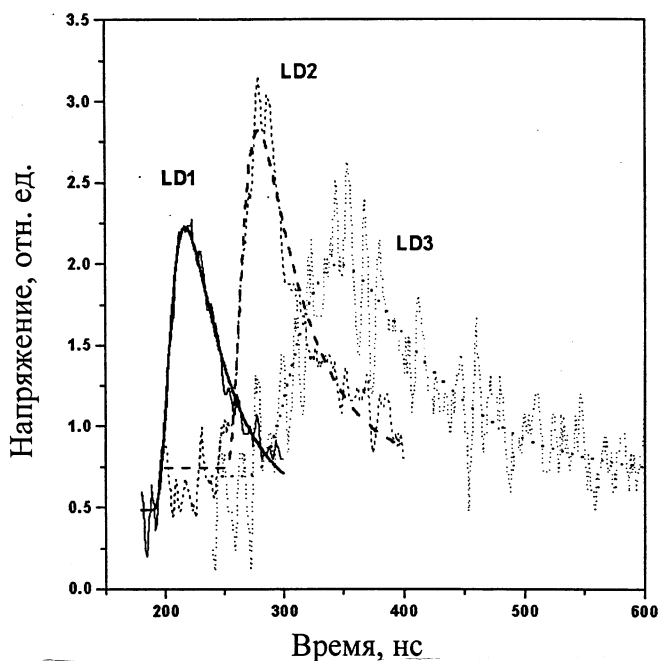


Рис. 4. Осциллограммы сигналов со световых датчиков LD1, LD2 и LD3, полученные в выстреле № 3

называется акт срабатывания ускорителя), а также результаты их аппроксимации “импульсной” функцией. Временной сдвиг между вершинами импульсов с оптических датчиков соответствует средней скорости лайнера. Используя эту информацию как базовую, нетрудно преобразовать зависимости напряжения на выходе оптических датчиков от времени в соответствующие распределения ионов лайнера по энергии (см. рис. 5). Согласно динамике движения бестокового

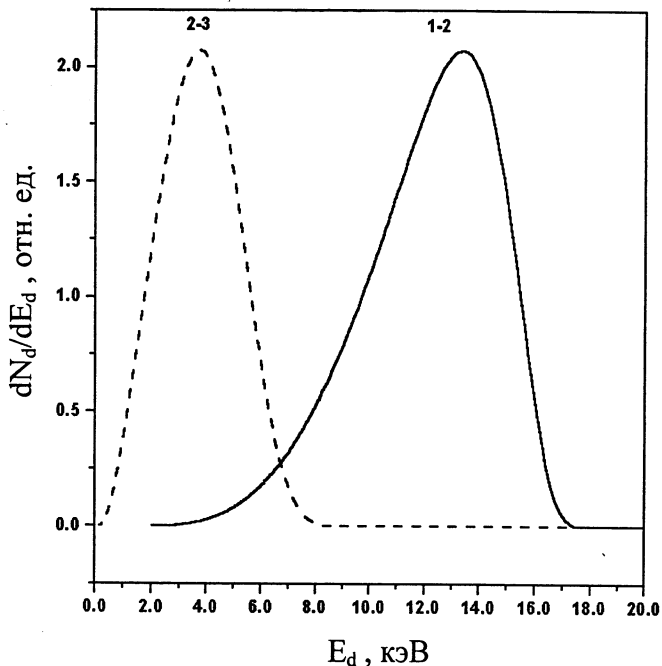


Рис. 5. Энергетические распределения дейтронов лайнера в выстреле № 3, соответствующие промежуткам 1 – 2 и 2 – 3

лайнера, в принципе, сдвиги сигналов между детекторами LD1 и LD2, а также между детекторами LD2 и LD3 должны быть равны. В связи с этим, для проверки столь очевидного заключения, обработка осциллограмм с оптических датчиков производилась отдельно для интервалов 1 – 2 и 2 – 3.

Картина формирования светового излучения может выглядеть следующим образом. Имея некоторое начальное энергетическое распределение ионов после

прохождения токоперехватывающих стержней, лайнер, расширяясь радиально в среде остаточного газа ($n \sim 10^{13}$ атом/см³), испытывает процесс перезарядки ионов на атомах остаточного газа, в основном азота:

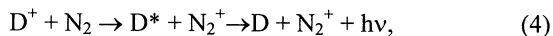
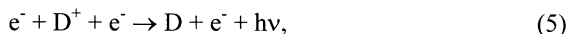


Таблица 1. Результаты обработки осциллограмм импульсов с детекторов оптического излучения

№ выстрела	1	2	3	4	5	6	7
$T_2 - T_1$, нс	56	43	45	59	45	71	70
$T_3 - T_2$, нс	76	96	84	76	70	70	72
$\Delta T_2 - \Delta T_1$, нс	--	11	10	51	16	40	50
$\Delta T_3 - \Delta T_2$, нс	45	77	60	37	28	35	55
V_{21} , 10^7 см/с	8.9 ± 0.4	11.6 ± 0.9	11.1 ± 0.6	8.4 ± 0.3	11.1 ± 0.6	7.0 ± 0.2	7.1 ± 0.3
E_{21} , кэВ	8.2 ± 0.7	13.9 ± 1.5	12.8 ± 1.4	7.4 ± 0.6	12.8 ± 1.4	5.1 ± 0.3	5.2 ± 0.4
ΔE_{21} , кэВ	-- --	7.1 ± 2.5	5.7 ± 2.0	12.9 ± 0.8	9.1 ± 2.0	5.8 ± 0.5	8.2 ± 0.5
V_{32} , 10^7 см/с	6.5 ± 0.2	5.2 ± 0.1	5.9 ± 0.2	6.5 ± 0.2	7.1 ± 0.3	7.1 ± 0.3	6.9 ± 0.2
E_{32} , кэВ	4.5 ± 0.3	2.8 ± 0.1	3.6 ± 0.2	4.5 ± 0.3	5.3 ± 0.4	5.3 ± 0.4	4.9 ± 0.3
ΔE_{32} , кэВ	3.9 ± 0.4	2.8 ± 0.2	3.9 ± 0.3	3.2 ± 0.4	3.1 ± 0.5	3.9 ± 0.5	4.8 ± 0.4

T_1, T_2, T_3 - времена, соответствующие амплитудам импульса напряжения на выходе детекторов LD1, LD2 и LD3; $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ - полная ширина на полувысоте импульсов с детекторов; V_{21}, V_{32} - скорость дейтронов, определяемая из временного сдвига импульсов двух соседних детекторов; E_{21}, E_{32} , - энергия дейтронов, соответствующая скоростям V_{21}, V_{32} ; $\Delta E_{21}, \Delta E_{32}$ - полная ширина на полувысоте энергетического распределения дейтронов, определяемая из уширения импульсов между двумя детекторами; точность оценок T_1, T_2, T_3 - 2.0 нс, $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ - 3.0 нс. Прочерк в колонках означает отсутствие соответствующей информации

а также процессы тормозного излучения и ударно-радиационной рекомбинации [15]



Эти процессы определяют как картину формирования светового излучения лайнера, так и дискрипанс между значениями параметров лайнера, извлеченных из анализа данных для интегралов 1 – 2 и 2 – 3 (см. табл. 1). Данный дискрипанс может быть объяснен тем, что на расстояниях не более 5 - 10 см от ТС интенсивность светового излучения (процесс (4)) определяется в основном “быстрой” компонентой лайнера (ее доля составляет единицы процентов от полного числа ионов лайнера). Такой вывод следует из вида зависимости сечения процесса (4) от энергии ионов и из того факта, что атомарная концентрация азота в области пространства, через которую прошла быстрая компонента лайнера,

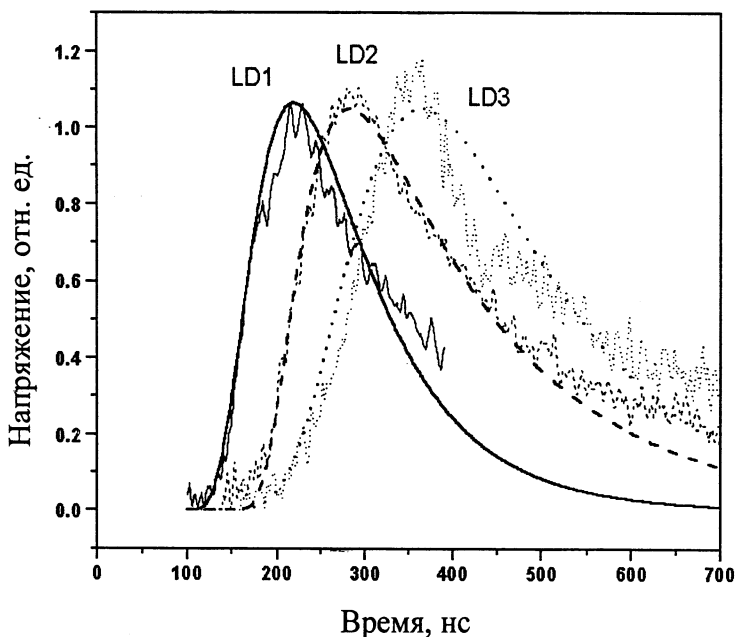


Рис. 6. Оциллограммы сигналов со световых датчиков LD1 – LD3, полученные в выстреле №7

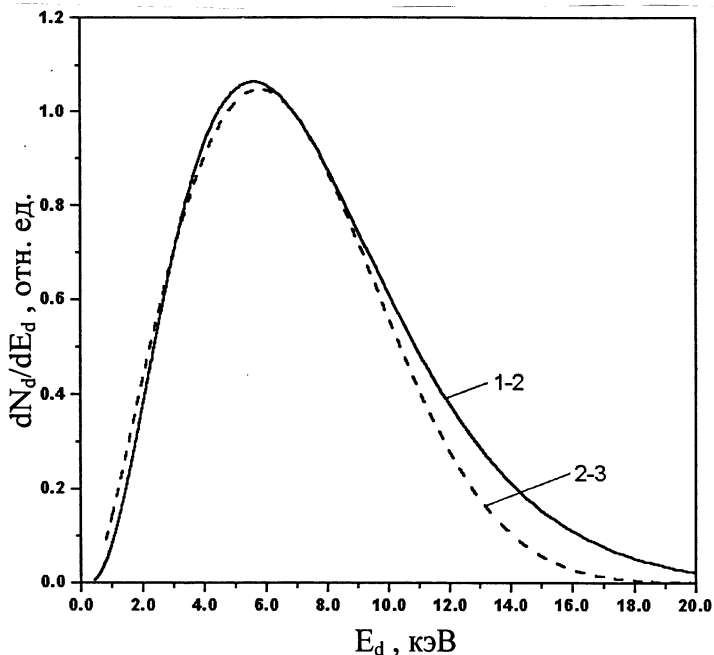


Рис. 7. Энергетические распределения дейтронов лайнера в выстреле № 7 при смещенном положении детекторов светового излучения относительно токоперехватывающих стержней. Смещение относительно первоначального положения составляет 5 см. Сплошная линия – промежуток 1 – 2; пунктирная линия – промежуток 2 – 3

существенно меньше первоначальной. Быстрые возбужденные атомы дейтерия (см. процесс (3)) излучают свет с постоянной времени ~ 10 нс и далее движутся в среде как нейтральные атомы, возбуждение которых возможно за счет протекания процессов $e^- + D \rightarrow D^* + hv$; $e^- + D \rightarrow D^* + e^-$ [15]. Следует отметить, что сечение данных процессов ($\sigma \leq 10^{-17}$ см²/атом) существенно меньше вероятности процесса (4).

На расстояниях от ТС больше 10 см основная доля оптического излучения будет определяться процессами (5) и (6) для “медленной” компоненты лайнера. Для проверки гипотетической модели возникновения светового излучения все три детектора оптического излучения в выстрелах № 6, 7 были отодвинуты на 5 см от

ТС по сравнению с первоначальным их положением. На рис. 6 представлены осциллограммы сигналов с трех оптических детекторов в выстреле №7 и их аппроксимация “импульсной функцией”. На рис. 7 приведено энергетическое распределение дейтронов в выстреле №7, полученное в результате совместного анализа осциллограмм, представленных на рис. 6. Как видно из рис. 7, наиболее вероятные значения энергии дейтрона и энергетический разброс дейтронов лайнера, найденные из анализа данных для промежутков 1 – 2 и 2 – 3, находятся в хорошем согласии. Такое совпадение результатов для двух смещенных последовательных промежутков свидетельствует о правоте изложенной выше гипотезы формирования источников оптического излучения при разгоне дейтериевого лайнера. Из данных табл. 1 видно, что от выстрела к выстрелу наблюдается достаточно большой разброс дейтронов лайнера по энергии (50 – 100 %). Причиной этого может являться следующее: неоптимальное соотношение между массой газовой струи в зазоре анод-катод и величиной тока нагрузки (лайнера); недостаточно точное согласование времен срабатывания высоковольтного разрядника, генератора импульсных напряжений и электромагнитного клапана. Эти вопросы требуют дальнейших исследований и методических усовершенствований.

3.2. Нейтронные детекторы

На рис. 8 приведена осциллограмма со сцинтилляционного нейтронного детектора D2, полученная в выстреле № 5. Мишень располагалась вокруг лайнера и представляла собой медную цилиндрическую оболочку радиусом 185 мм и длиной образующей 40 мм, внутренняя поверхность которой была покрыта CD₂. Первый импульс обусловлен регистрацией тормозного излучения, природа которого может быть связана либо с начальным пробоем промежутка анод-катод нагрузочного модуля ускорителя (ускорение электронов дейтериевой плазмы до энергий, соответствующих амплитуде высоковольтного импульса, с последующим их взаимодействием с веществом анода и стенок измерительной камеры), либо с процессом установления магнитной изоляции в вакуумной линии

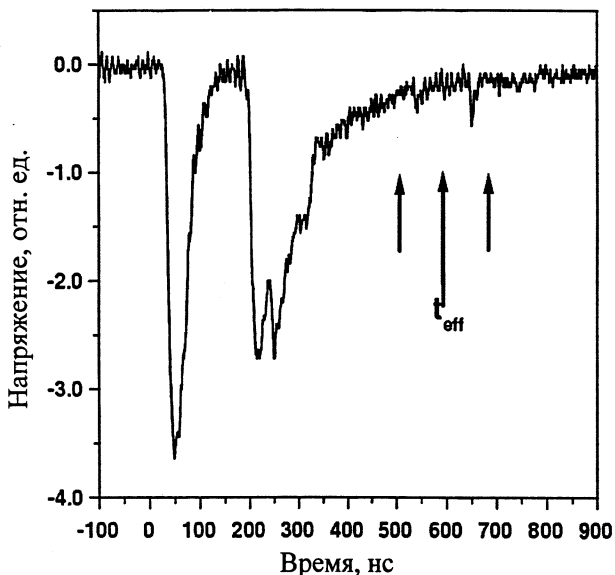


Рис. 8. Осциллограмма сигнала с нейтронного детектора D2, полученная в выстреле № 5

передачи к узлу нагрузки. Наличие же второго импульса на осциллографе обусловлено регистрацией фонового нейтронного излучения, возникающего за счет протекания реакции (1) в процессе электродинамического разгона лайнера (появление высокоэнергетической компоненты дейтронов за счет возможного развития магнитодинамической неустойчивости лайнера) [11]. Временной интервал между моментами появления первого и второго импульса характеризует собой время пролета нейтроном из реакции (1) расстояния l от оси лайнера до сцинтилляционного детектора D2:

$$\Delta t(\text{нс}) = t_n - t_\gamma, \quad (7)$$

где t_n , t_γ - времена пролета нейтроном и γ -квантом тормозного излучения базы между осью лайнера и детектором D2. Зная величину L , используя уравнение (7) в предположении одновременной генерации γ -квантов и нейтронов, нетрудно определить максимальную энергию нейтронов, регистрируемых детектором D2, установленным под углом 56° к направлению анод-катод нагрузочного модуля.

Соответствующая же энергия дейтронов, ускоренных в результате развития магнитогиродинамических неустойчивостей, определялась согласно кинематике реакции (1).

Таблица 2. Характеристики потока дейтронов и фонового нейтронного излучения

№ выстрела	1	2	3	4	5	6	7
t_n нс	174±3	175±3	172±3	181±3	179±3	170±3	178±3
E_n , МэВ	2.90 ±0.10	2.87 ±0.10	2.97 ±0.11	2.68 ±0.09	2.74 ±0.09	3.04 ±0.11	2.77 ±0.09
E_d , кэВ	+118 310 -101	+113 274 -95	+132 386 -112	+76 103 -58	+89 152 -71	+141 470 -122	+95 179 -77

t_n – время пролета нейтроном расстояния от оси лайнера до детектора D2; E_n , E_d – максимальная энергия нейтронов и дейтронов.

В табл. 2 представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных по описанной нами методике. Следует отметить, что максимальные значения величин E_d и E_n находятся в согласии с результатами работы [16]. Что касается измерения фоновых нейтронных потоков в выстрелах 1 ÷ 3 и 6 ÷ 7 (без наличия мишени из CD_2), то величины их, как было показано в работе [11], пропорциональны отношению I^2_L/m_L (I^2_L , m - ток и масса лайнера). В настоящее время проводится анализ данных, полученных в выстрелах 4, 5, по определению выхода “мишенных” нейтронов, образовавшихся в результате взаимодействия дейтронов лайнера с дейтериевой мишенью (временной диапазон, соответствующий регистрации “мишенных” нейтронов, указан стрелками на осциллограмме, приведенной на рис. 8).

5. Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработан простой метод оптической диагностики динамики движения лайнера в схеме формирования инверсного Z-пинча.
2. Исследованы характеристики 3-канальной системы детектирования оптического излучения, позволяющей с помощью времяпролетной методики измерять энергетическое распределение ионов лайнера.
3. С помощью сцинтилляционных детекторов определены максимальные энергии ускоренных дейтронов, возникающих в процессе развития магнитогидродинамических неустойчивостей и определяющих интенсивность фонового нейтронного излучения.
4. Совместный анализ данных, полученных с помощью оптических датчиков, магнитных зондов и нейтронных детекторов, а также использование результатов болометрических измерений позволит получать прецизионную информацию об энергетическом распределении ионов лайнера.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ИСЭ СО РАН Е.Н.Волкову, В.И.Махрину и В.А.Синебрюхову за обеспечение нормальной работы ускорителя и помощь при проведении измерений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-02-17203) и фонда Полномочного Представителя Польши в ОИЯИ.

Список литературы

1. V.B.Belyaev, A.Bertin, Vit.M.Bystritsky et al., Nucleonika 40 (1995) 85.
2. V.B.Belyaev, Vyach.M.Bystritsky, O.I.Kartavtsev et al., JINR preprint D15-92-324, Dubna, 1992.
3. V.M.Bystritsky, V.M.Grebenyuk, S.S.Parzhitski et al., JINR preprint D15-96-11, Dubna, 1996.

4. V.M.Bystritsky, V.M.Grebenyuk, S.S.Parzhitski et al., *Nucleonika* 42 (1997) 775.
5. T.Bulgakov, Vit.M.Bystritskii, G.Mesyats et al., Proc. of the 11 th Intern. Conference on High Power Particle Beams "Beams 96", Prague, Czech Republic, June 10-14. V.2, p.917.
6. Vit.M.Bystritskii et al., Albuquerque. NM. USA. 3-6 july 1995. Edited by: W.L.Baker, G. Coperstein. New York. NY. USA: IEEE. 1995. p.1215.
7. T.L.Bulgakov, Vit.M.Bystritskii, Viach.M.Bystritsky et al., *Phys. of Atomic Nuclei*. 60 (1997) p.1217.
8. V.M.Bystritsky, V.M.Grebenyuk, S.S.Parzhitski et al., *Laser and Particle Beams*. 18 (2000) p.325.
9. V.M.Bystritskii, V.M.Bystritsky, S.Chaikovsky et al., *Kerntechnik*. 66 (2001) p.42; V.M.Bystritskii, V.M.Bystritsky, S.Chaikovsky et al., *Physics of Atomic Nuclei*. 64 (2001) p.855.
10. V.M.Bystritsky, F.M.Pen'kov, JINR preprint D15-2000-293, Dubna, 2000. Submitted to *Physics of Atomic Nuclei*.
11. V.M.Bystritsky, V.M.Grebenyuk, S.S.Parzhitski et al., *NIM*. 455A (2000) p.706.
12. A.Krauss, H.W.Becker, H.P.Trautvetter et al., *Nucl. Phys.* A465 (1987) p.150.
13. N.Jarmie, R.E.Brown, R.A.Hardekopf et al., *Phys. Rev.* C29 (1984) p. 2031.
14. А.В.Лучинский, В.И.Махрин, Н.А.Ратахин и др., *Известия вузов, серия физика*, 38 (1995) с.52.
15. C.F.Barnett, M.F.A.Harrison, *Applied Atomic Collision Physics Plasmas*, Academic Press. Inc, 1984.
16. R.Aiaga-Rossel et al., *Proceedings on Dense Z-Pinches: Fourth Intern. Conf.* 1997. p.61.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 декабря 2001 года.

Представлено описание методики и результаты измерения энергетического распределения ионов дейтериевого лайнера, ускоренного в схеме инверсного Z-пинча: плазма лайнера электродинамически ускоряется от его оси. Знание энергетического распределения дейтронов крайне важно для правильной интерпретации результатов экспериментов по исследованию dd -реакции в области инфранизких энергий с использованием лайнерной плазмы. Эксперименты проводились на сильноточном импульсном ускорителе ($I=950$ кА, $\tau=80$ нс) Института сильноточной электроники СО РАН (Томск, Россия). Лайнер в начальном состоянии представлял собой сверхзвуковую полую струю дейтерия диаметром 15 мм и длиной 20 мм. Измерение характеристик лайнера производилось с помощью детекторов его оптического излучения (детекторов H_{α} - и H_{β} -линий дейтерия) и магнитных зондов, установленных по радиусу разгона лайнера. С помощью сцинтилляционных спектрометров и ${}^3\text{He}$ -счетчиков измерялась интенсивность нейтронного излучения, обусловленного протеканием ядерной реакции $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$.

Результаты исследований свидетельствуют о возможности применять достаточно простой метод измерения параметров лайнера, ускоренного до энергий 3–6 кэВ, используя при этом совместный анализ данных, полученных с помощью магнитных зондов оптических датчиков и нейтронных детекторов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

A description of the methods and results of the measurements of the ion energy distribution of the deuterium liner accelerated in the inverse Z-pinch configuration are presented — the liner plasma is radially accelerated from the outward small radius. The knowledge of the experiment deuterium energy distribution is crucially important for correct interpretation of the results on the study of the dd -reaction at infralow collision energies using the liner plasma. Experiments were fulfilled in the HCEI (Tomsk, Russia) at a nanosecond pulsed high current generator ($I=950$ kA, pulse duration $\tau=80$ ns). The hollow deuterium liner of 20 mm length was accelerated from the initial radius of ~ 15 mm to 45 mm. Measurement of the liner characteristics was produced by means of the light detectors (detection of H_{α} and H_{β} deuterium lines) and magnetic B-dot probes, placed on the various radii of the expanding liner. Besides, the measurement of the neutron radiation intensity due to reaction $d+d \rightarrow {}^3\text{He}+n$ was fulfilled.

The results of the investigations have shown the possibility of applying a sufficiently simple method for measurement of liner parameters accelerated up to energy 3–6 keV, by using the joint data analysis obtained by means of the magnetic probes, optical sensors and neutron detectors.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор А. Н. Шабашова. Макет Н. А. Киселевой

Подписано в печать 21.03.2002

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,75

Тираж 300. Заказ 53190. Цена 1 р. 75 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области