

Министерство образования

Российской Федерации

Новосибирский Государственный Университет

Физический факультет

Кафедра Физики Плазмы

Квалификационная работа на соискание степени бакалавра

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ БЫСТРЫХ
НЕЙТРАЛОВ ПРЕЗАРЯДКИ ИЗ ГОРЯЧЕЙ
ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-3

Трунев Юрий Александрович

Научный руководитель

аспирант Шошин А.А.

1. Введение.

С целью исследования перспектив открытых ловушек как термоядерных реакторов, на установке ГОЛ-3 (открытая гофрированная ловушка) проводятся эксперименты по нагреву и удержанию плотной ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) горячей плазмы. Важной задачей на пути достижения термоядерных параметров является получение высокой температуры ионов плазмы [1]. В последние несколько лет был достигнут существенный прогресс, а именно найден эффективный режим нагрева плазмы, что позволяет получать плазму с $T_e \sim 2 \text{ КэВ}$, $T_i \sim 1 \text{ КэВ}$ и временем удержания сотни микросекунд [2]. Это стимулировало активное изучение ионной компоненты плазмы и была поставлена задача по определению температуры ионов. Для решения поставленной задачи на установке ГОЛ-3 используются разные методы: нейтронные диагностики, спектроскопия плазмы, пассивная корпускулярная диагностика. Пассивная корпускулярная диагностика эффективно применялась на различных термоядерных установках с магнитным удержанием [3], в её основе лежит регистрация потоков перезарядных атомов из плазмы и их последующий анализ по массам и энергиям, как известно [4] она обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами исследования ионной компоненты плазмы:

1. бесконтактность метода.
2. анализу подвергаются покидающие плазму быстрые нейтральные атомы, несущие информацию о температуре, и энергетическом распределении ионов в горячей области плазмы.
3. возможность восстановления временной эволюции энергетического спектра и температуры ионов плазмы.

В данной работе экспериментально исследовалась эмиссия быстрых нейтралов перезарядки из плазмы ГОЛ-3, с целью определения энергетического спектра и температуры ионов плазмы, и их временной эволюции в различных режимах работы ГОЛ-3. В экспериментах использовался многоканальный анализатор нейтралов перезарядки разработанный на установке ГОЛ-3 [5].

2. Установка ГОЛ-3.

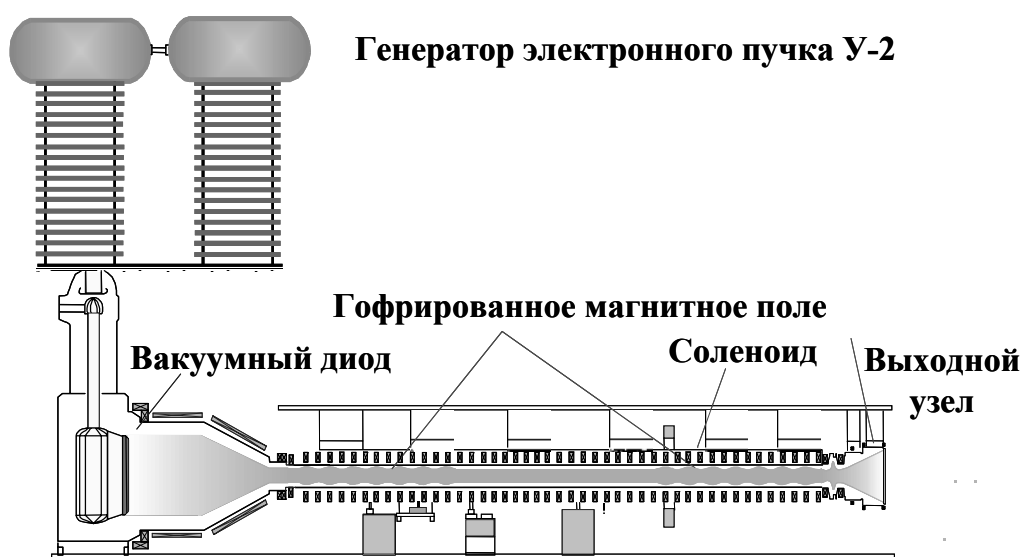


Рис.1: Схема установки ГОЛ-3.

Установка ГОЛ-3 – гофрированная открытая ловушка, предназначенная для удержания плотной горячей плазмы [2]. Установка состоит (см.рис.1) из генератора электронного пучка У-2, 12 метрового соленоида и выходного узла, который включает в себя систему создания предплазмы и приемник пучка. Генератор У-2 позволяет получать мощный релятивистский электронный пучок (РЭП) с энергией электронов ~ 1 МэВ, энергосодержанием до 300 КДж и током ~ 30 кА. Питание соленоида осуществляется с помощью 15 МДж емкостного накопителя что позволяет создавать квазистационарное магнитное поле на оси установки: до 5 Тл в однородной части и до 10 Тл в пробках. Начальное распределение рабочего газа (водорода или дейтерия) вдоль оси установки создается с помощью импульсных клапанов.

Сценарий экспериментов на ГОЛ-3 следующий: в зависимости от конфигурации эксперимента в вакуумную камеру ГОЛ-3 напускается водород или дейтерий ($t = -500$ мс), начальная плотность $n_a \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, с заданным распределением по длине рис.2. После этого создается магнитное поле, в максимуме магнитного поля ($t = -30$ мкс) специальным прямым замагниченным разрядом создается предплазма с температурой $T \sim 1-2$ эВ [6]. В момент $t = 0$ мкс происходит инжекция РЭП в предплазму, в результате коллективного пучково–плазменного взаимодействия происходит возбуждение ленгмюровской

турбулентности, что приводит к нагреву плазмы: $T_e \sim 2-3$ кэВ плотность плазмы $n \sim (0.5-5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, через 10 мкс происходит уменьшение электронной температуры до 200 – 300 эВ [2]. Затем электроны передают энергию ионам плазмы. В режиме с многопробочным магнитным полем и магнитной ямой была предложена следующая модель [7] передачи энергии от электронов к ионам в плазме: искусственная модуляция электронной температуры вдоль плазменного шнура приводит к модуляции давления плазмы, и, как следствие, к макроскопическому движению плазмы. В следствии чего формируются встречные плазменные потоки в ячейках многопробочной ловушки. Перемешивание таких потоков сопровождается нагревом ионной компоненты за счет перекачки поступательной энергии потоков в тепловую за времена порядка одного ион –ионного столкновения.

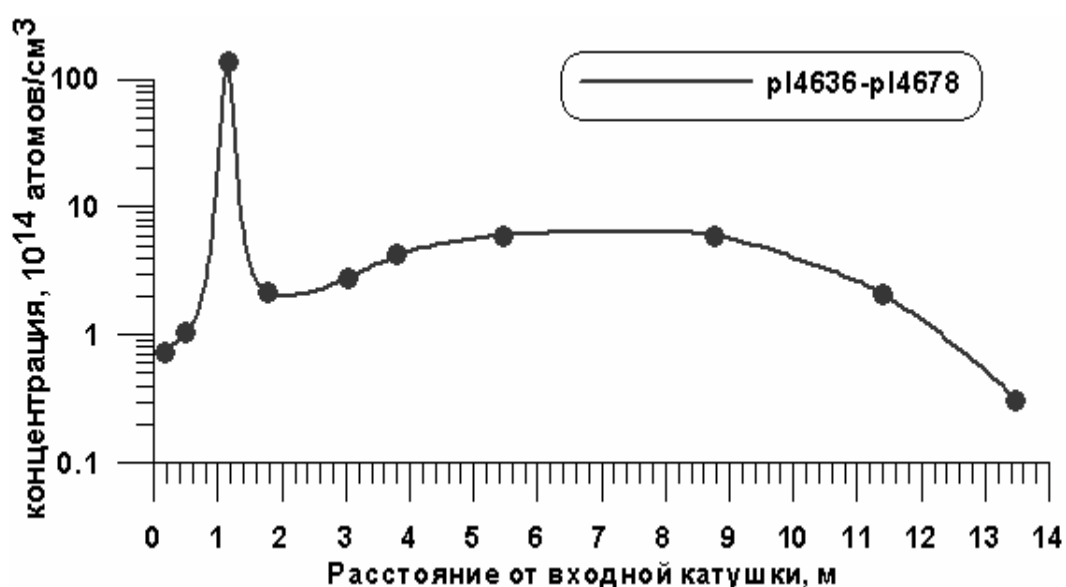


Рис.2, Начальное распределение дейтерия вдоль вакуумной камеры ГОЛ-3, в серии выстрелов 4636- 4678.

3. Расчет ослабления потока нейтралов перезарядки из плазмы ГОЛ-3.

Использование пассивных методов определения энергетического распределения быстрых нейтралов перезарядки или температуры ионов в плазме требует понимания механизма появления нейтральных атомов в различных областях плазмы, а также процессов столкновений, которые определяют перенос нейтральных частиц внутрь плазмы.

Важной задачей при использовании пассивной корпускулярной диагностики, является определение ослабления потока горячих перезарядных атомов из центральной области на пути к детектору анализатора, за счет столкновительных процессов. Как показано в [4] ослабление потока перезарядных атомов, в зависимости от энергии атома определяется как:

$$\text{Ослабление} = - \sum_{j,k} \int_r^a \sigma_{k,j}(E_j) f(E_j, r') dE_j dr' \quad (1)$$

- где j нумерует сорт частиц - электроны, дейтоны, протоны и т.д., сумма по k означает суммирование по всем столкновительным процессам, a - радиус плазмы, E_j - энергия частицы j , r -радиус образования перезарядного атома в плазме. Эта формула может быть представлена в явной форме:

$$\begin{aligned} \text{Ослабление из центра плазмы} = K(E, T_e, nl) = \exp(-nl[\sigma_{cx}(E) + \sigma_{ip}(E) + \\ + \langle \sigma_{ie} v_e \rangle (T_e) / v_a(E)]) \end{aligned} \quad (2)$$

,где nl - линейная плотность плазмы вдоль линии наблюдения анализатора, $\sigma_{cx}(E)$ -сечение перезарядки на протонах плазмы, $\sigma_{ip}(E)$ -сечение ионизации протонами плазмы, $\langle \sigma_{ie}(E) v_e \rangle$ -скорость ионизации электронами, усредненная по функции распределения Максвелла, $v_a(E)$ - скорость перезарядного атома. Сечения всех процессов были взяты из [10,11,12], и изображены на рис.3. Видно что основные процессы ослабляющие поток из центра плазмы это перезарядка и ионизация электронным ударом. На рис.4 построен график зависимости коэффициента ослабления $K(E, T_e, nl)$ от энергии перезарядных атомов выходящих из центра плазмы, для различных плотностей плазмы. Плотность плазмы оказывает существенное влияние, на $K(E, T_e, nl)$. Поэтому регистрация нейтралов перезарядки будет сильно затруднена, в режимах с плотностью плазмы выше, чем 10^{15} см^{-3} .

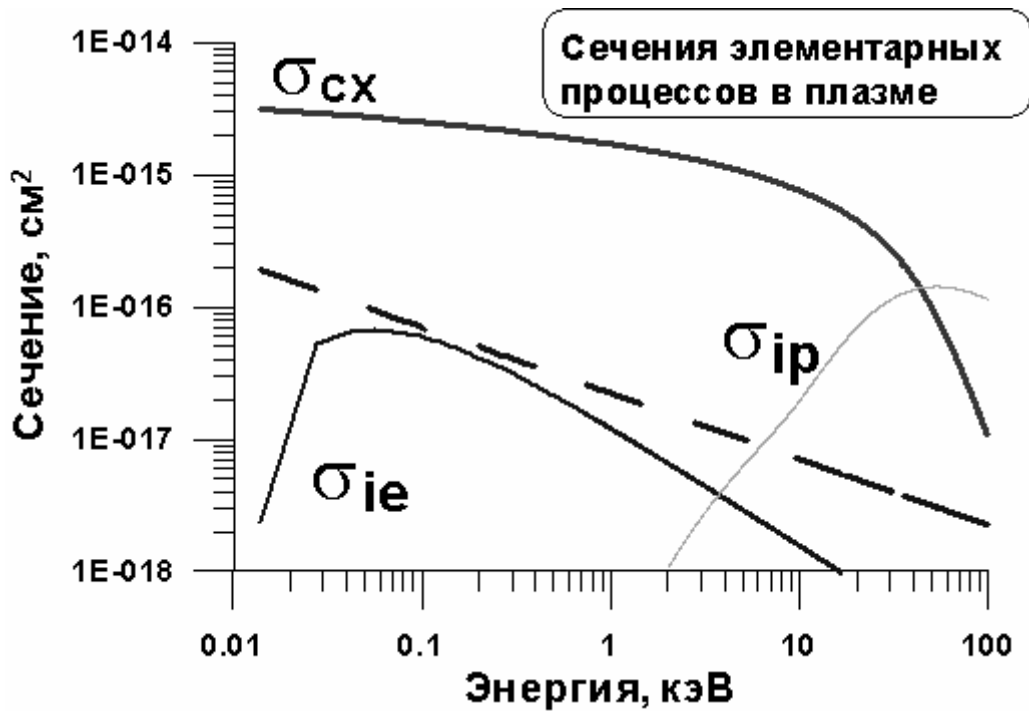


рис.3, $\sigma_{cx}(E)$ -сечение перезарядки нейтрального водорода на протонах плазмы, $\sigma_{ip}(E)$ -сечение ионизации водорода протонами плазмы, пунктирная линия $\langle \sigma_{ie}(E)v_e \rangle / v_a$ -эффективное сечение ионизации водорода электронами, усредненная по функции распределения Максвелла с $T_e = 100$ эВ, v_a - скорость нейтрального атома .

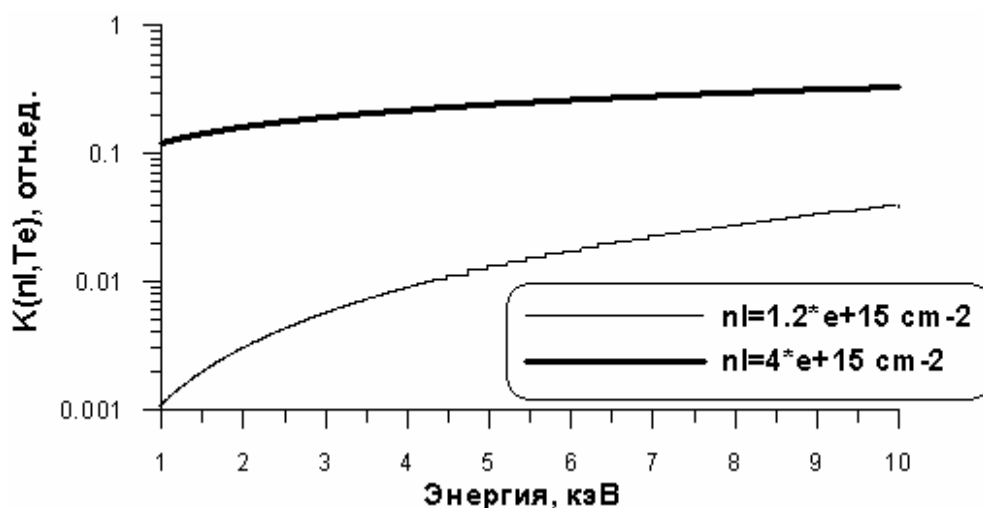


Рис.4, Ослабление потока перезарядных атомов при прохождении из центра плазмы на периферию.

4. Эксперименты по регистрации эмиссии быстрых нейтралов перезарядки из плазмы ГОЛ-3.

Для исследования эмиссии быстрых нейтралов перезарядки на установке ГОЛ-3 использовался пятиканальный 45° электростатический анализатор. Принцип действия такого анализатора основан на разделении частиц по энергиям, входящих в однородное тормозящее электрическое поле под углом 45° [13,15,16].

Пусть имеется плоский конденсатор, одна из пластин которого находится под нулевым потенциалом, а другая под положительным потенциалом U_a , а расстояние между пластинами будет d . Тогда поток ионов с энергией E и зарядом $q=Ze$, входящий через щель в пластине с нулевым потенциалом под углом 45° , будет двигаться по параболе и возвратится снова к пластине с нулевым потенциалом на некотором расстоянии l . Дальность полета ионов определяется соотношением:

$$l = 2 \frac{d}{U_a} \frac{E}{q} \quad (3)$$

Величина l прямо пропорциональна энергии ионов E (при заданном расстоянии между входной и выходной щелью анализатора) и не зависит от массы ионов. Таким образом располагая выходные щели анализатора на различных расстояниях от входной, можно разлагать входящий поток ионов в спектр по энергии.

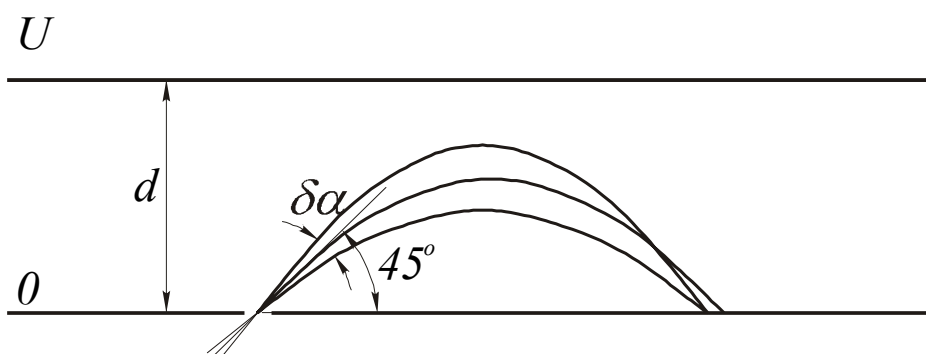


Рис.5, Траектория пучка ионов с угловым разбросом $\delta\alpha$ входящих в тормозящее поле анализатора $E=U/d$.

Разрешающая способность такого анализатора как показано в работах [13,15,8], определяется соотношением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta l_0 + \Delta l_n}{l_n} \quad (4)$$

где Δl_0 - ширина входной щели, Δl_n - ширина n-ой выходной щели, l_n - расстояние между входной и n-ой выходной щелями. Если ширины всех выходных щелей сделать одинаковыми, то при заданном анализирующем напряжении все каналы вырезают одинаковый интервал по энергии ΔE . Угол влета 45° обеспечивает фокусировку по углу первого порядка. Это значит, что если входящий поток ионов имеет некоторый угловой разброс $\Delta\alpha$, то при достаточно не больших $\Delta\alpha \leq 5^\circ$, можно считать что он не влияет на разрешение анализатора т.е. $\frac{dl}{d\alpha} = 0$.

Схема используемого пятиканального анализатора быстрых нейтронов перезарядки представлена на рис.6. Анализатор состоит из следующих узлов: транспортный канал с диафрагмами, камера обдирки, 45° электростатический анализатор, ВЭУ и АЦП.

Анализатор расположен на расстоянии 3,1 м от входной катушки ГОЛ-3 (28-29 катушка). Методика измерений следующая: горячие ионы плазмы перезаряжаются на нейтралах плазмы, вылетают из плазменного столба, проходят по транспортному каналу в камеру обдирки, где конвертируются в ионы, которые разделяются по энергиям в поле 45° -го электростатического анализатора и попадают на ВЭУ, сигнал с ВЭУ усиливается и записывается на АЦП333.

Для преобразования быстрых атомов в ионы используется камера обдирки. В качестве обдирочного газа в камере обдирки используется воздух, который напускается через игольчатый натекагель. Напуск воздуха стационарный. Давление в камере обдирки измеряется ионизационным вакуумметром. Рабочее давление воздуха в камере обдирки $5,6 \cdot 10^{-2}$ Па. Данные по эффективности обдирки были взяты из работы [14]. Для защиты от сильных магнитных и электрических наводок корпус анализатора (размеры $20 \times 25 \times 60$ см) и камера обдирки выполнены из стали “армко” и Ст3. с высокой магнитной проницаемостью. Расстояние между пластинами 9,8 см. На отклоняющую пластину подается анализирующее напряжение U_a . Входная щель, и пять выходных щелей, которые покрыты мелкоячеистой сеткой высокой прозрачности, для устранения искажения электрического поля анализатора. На

передней стенке анализатора напротив выходных щелей находятся ВЭУ (вторичные электронные умножители). Напряжение на ВЭУ, и напряжение на отклоняющую пластину, подводится через специальные высоковольтные вводы. Сигнальные выходы с ВЭУ, осуществляются через помехозащищенные разъемы. Для защиты от наводок использовались коаксиальные кабели с двойной оплёткой. Сигналы с ВЭУ регистрируются с помощью АЦП333 (до модернизации использовались АЦП122s) с временным разрешением 2 мкс в четырех канальном режиме (0.5 мкс в одноканальном режиме), выполненного в стандарте КАМАК. АЦП333 и ВВИ (высоковольтный источник) для питания ВЭУ, расположены в подвале, в металлическом экране-боксе, там же расположен регулируемый источник напряжения для отклоняющей пластины анализатора.

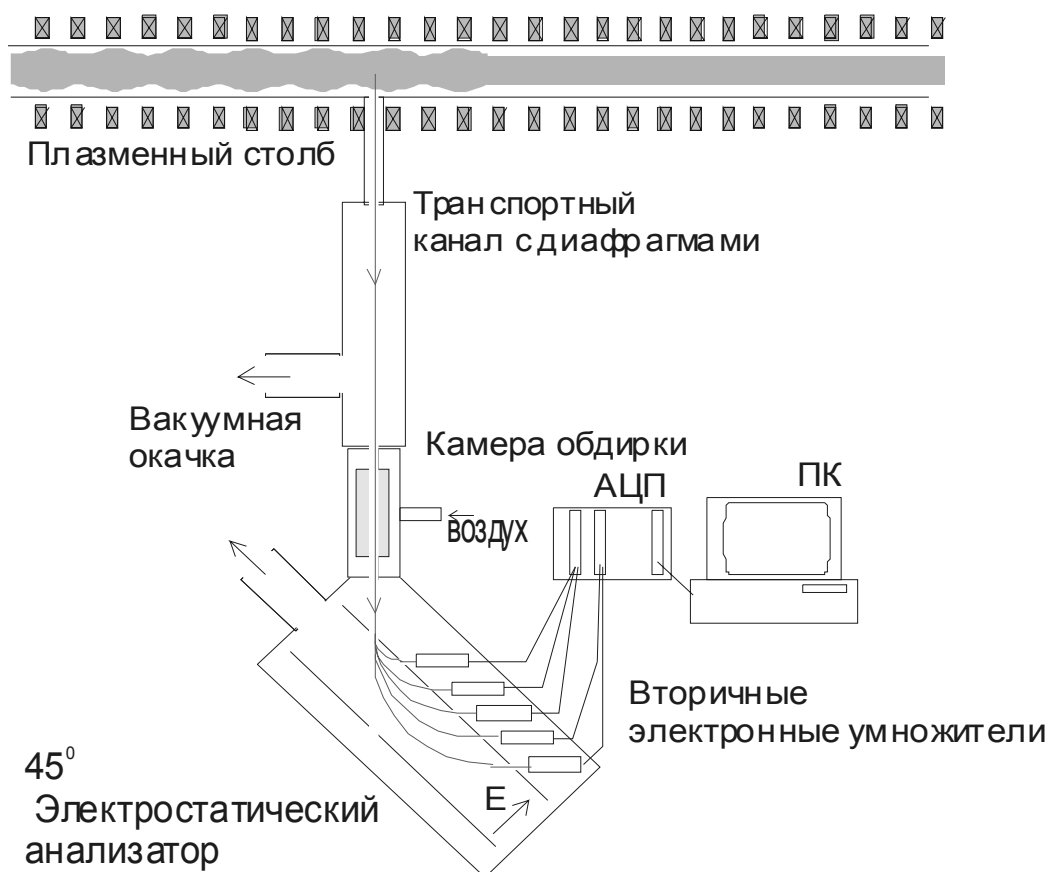


Рис.6, Схема эксперимента по регистрации горячих нейтралов перезарядки на установке ГОЛ-3

Чтобы получить формулу для восстановления энергетического спектра нейтралов перезарядки по сигналам ВЭУ, представим вывод аналогично работе

[14]. Амплитуда сигналов с ВЭУ $A(t)$ в момент времени t_0 пропорциональна току нейтралов перезарядки поступающих из плазмы:

$$A(t_0) \sim C \cdot \Delta J_{cx}(E, t_0) \cdot \alpha(E) \cdot \gamma^+(E) \quad (5)$$

-где C -некоторая константа не зависящая от энергии, $\Delta J_{cx}(E, t_0)$ - ток нейтралов перезарядки с энергией E , в момент времени t_0 , $\alpha(E)$ -эффективность обдирки, $\gamma^+(E)$ -коэффициент вторичной эмиссии первого динода ВЭУ.

В свою очередь ток нейтралов перезарядки можно связать с их функцией распределения по энергии соотношением:

$$\Delta J_{cx}(E, t_0) \sim C \cdot \int dE \cdot \sqrt{2E/M} \cdot \frac{dn_{cx}}{dE}(E, t_0) \quad (6)$$

учитывая коэффициент ослабления $K(E, T_e, nl)$ потока нейтралов вследствие столкновительных процессов в плазме и транспортном канале за счет столкновений с молекулами водорода (дейтерия), получим окончательную формулу:

$$\frac{dn_{cx}}{dE}(E, t_0) = C \cdot \frac{A(t_0)}{E^{3/2} \cdot \alpha(E) \cdot \gamma^+(E) \cdot K(E, T_e, nl)} \quad (7)$$

где учтено что разрешение одного канала анализатора по энергии $\Delta E \sim const \cdot E$ (см. формулу (4)).

Как показано в [9,14] для получения функции распределения ионов плазмы по энергиям, найденный спектр нейтралов перезарядки нормируется на сечение перезарядки $\sigma_{cx}(E)$:

$$\frac{dn_i}{dE}(E, t_0) \sim \frac{1}{\sigma_{cx}(E)} \cdot \frac{dn_{cx}}{dE}(E, t_0) \quad (8)$$

Необходимо заметить экспериментальные сложности при использовании данного метода связанные с особенностями экспериментов на установке ГОЛ-3:

1. высокая плотность плазмы ГОЛ-3 ($n \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), при таких плотностях выход быстрых атомов из центральной области затруднен, т.е. полученные данные носят интегральный характер и требуют дополнительной обработки.
2. наличие сильных электромагнитных наводок на установке ГОЛ-3 в течение выстрела.
3. сложность интерпретации данных анализатора, связанная с необходимостью знания о радиальном распределении плотности плазмы, электронной температуры (т.е. вдоль линии наблюдения анализатора) и т.д.

4. Результаты экспериментов.

Эксперименты по регистрации быстрых нейтралов перезарядки велись в различных режимах работы на установке ГОЛ-3. Основными параметрами изменяемыми в ходе экспериментов являются: конфигурация магнитного поля, плотность напускаемого рабочего газа (водород или дейтерий) и его распределение вдоль установки, энергосодержание, ток и энергия электронов РЭП. Это существенно влияет на параметры получаемой плазмы. Однако экспериментально было обнаружено, что сигналы ВЭУ имеют характерные особенности, связанные с общим сценарием экспериментов на ГОЛ-3. На рис.7 представлен типичный сигнал полученный анализатором в ходе экспериментов, выстрел РС4832. Время отсчитывается от начала инъекции РЭП в плазму.

От 0 до -30 мкс создается предплазма, от 0 до 4-6 мкс наводка от срабатывания генератора У-2.

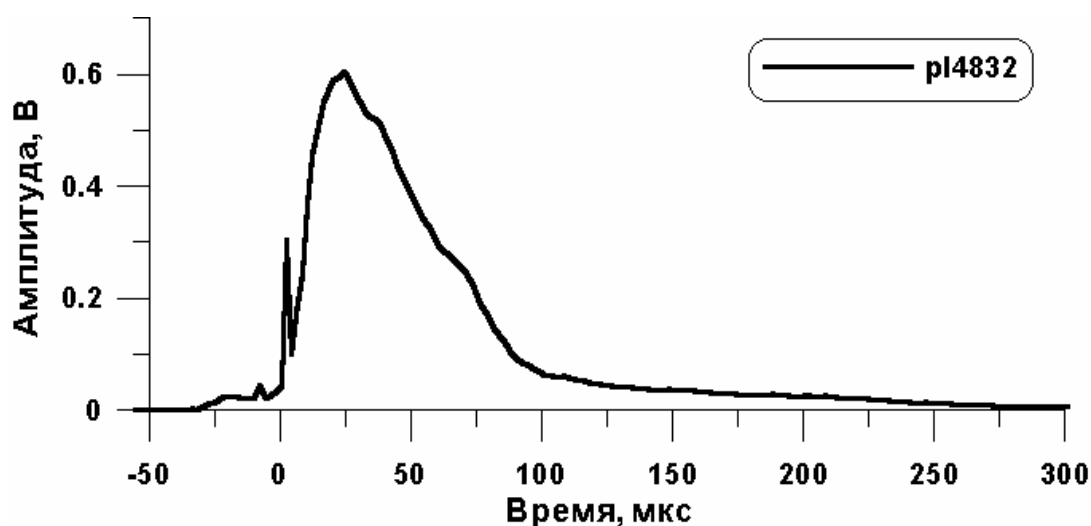


Рис.7, Сигнал с первого канала анализатора, анализирующее напряжение 7 кВ.

Затем сотни микросекунд продолжается эмиссия нейтралов перезарядки из плазмы ГОЛ-3. Максимум сигналов наблюдается через 10-50 мкс после инъекции пучка. Длительность сигнала, и положение максимума зависит от режима экспериментов на ГОЛ-3. На рис.8, представлена статистика по серии выстрелов 4636-4678, построенная по амплитудам сигналов первого ВЭУ, в момент $t = 30$ мкс и $t = 50$ мкс, после инъекции пучка, в зависимости от анализирующего напряжения.

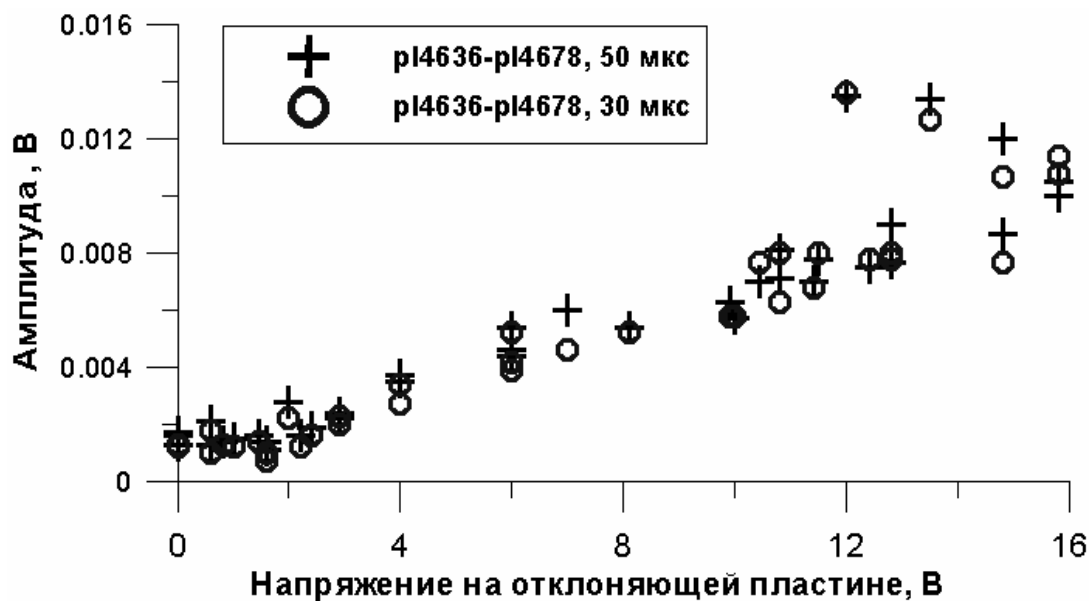


Рис.8, График зависимости амплитуды сигнала ВЭУ от анализирующего напряжения в выстрелах 4636- 4678, амплитуда сигнала в момент $t=30$ мкс после инъекции пучка-кружки, $t=50$ мкс-кресты.

Построенный по этим данным энергетический спектр горячих нейтралов перезарядки $\frac{dn_{cx}}{dE}(E)$ представлен на рис.9, в логарифмическом масштабе. При вычислении спектра использовалась формула (7).

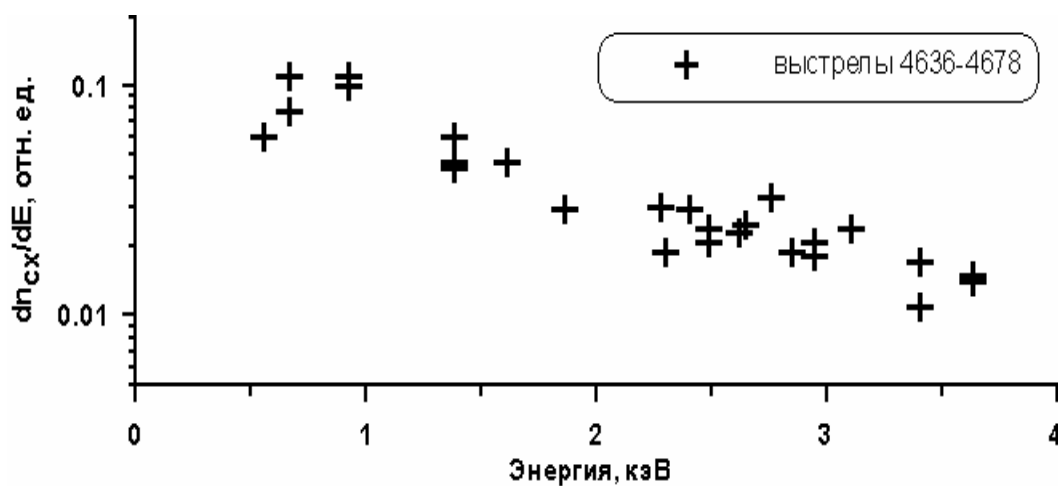


Рис.9, Спектр горячих нейтралов перезарядки в момент $t = 50$ мкс после инъекции пучка, построенный по серии выстрелов 4636-4678.

Энергетическое распределение ионов плазмы (рис.10) вычислялось в соответствии с формулой (8). Температура ионов определялась по наклону кривой построенной методом наименьших квадратов, в предположении что функция распределения ионов по энергиям – Максвелловская, т.е.

$\frac{dn_i}{dE}(E) = const \cdot \sqrt{E} \cdot T^{-3/2} \cdot \exp(-\frac{E}{T})$. Определенная таким образом температура ионов составила $T_i = 1,3$ кэВ .

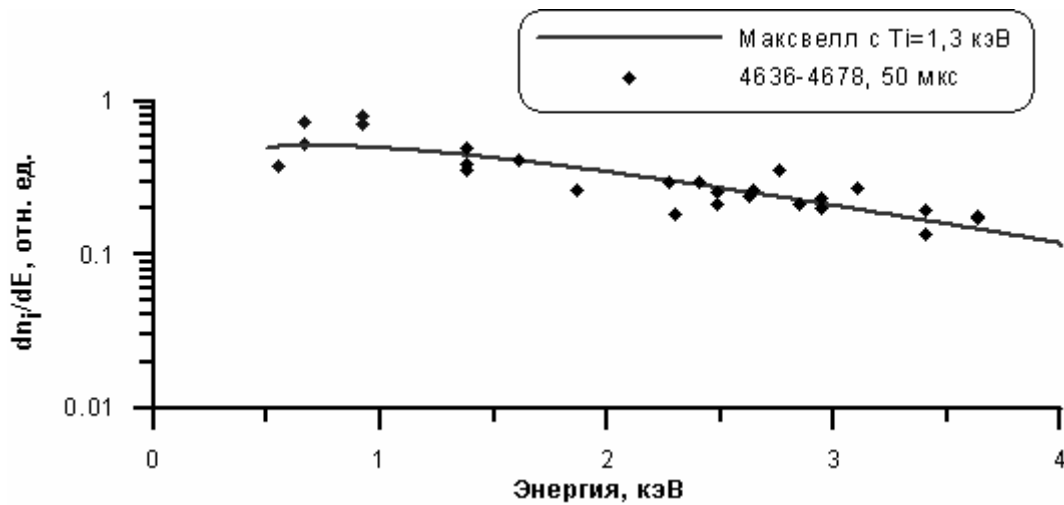


Рис.10, Рассчитанное по экспериментальным данным распределение ионов по энергиям (кресты), максвелловская функция распределения с $T_i = 1,3$ кэВ (сплошная кривая).

Энергетическое распределение ионов плазмы в горячей области восстанавливалось с учетом функции $K(E, T_e, n_l)$, моделирующей ослабление потока нейтралов перезарядки из центра плазмы. Линейная плотность задавалась исходя из начального распределения дейтерия по длине установки (см. рис.2), в серии выстрелов 4636-4678, которое создавалось двумя клапанами: на входе установки (10 катушка), и центре (63 катушка), при таком распределении вдоль линии наблюдения анализатора ($z=3,1$ м), линейная плотность была благоприятной для регистрации нейтралов перезарядки из горячей области $n_l \sim 6 \cdot 10^{14} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Временная эволюция $\frac{dn_i}{dE}(E)$ была рассмотрена: по двум точкам: 30 и 50 мкс после инжекции пучка (рис.7). В определяемая по $\frac{dn_i}{dE}(E)$, ионная температура меняется слабо и составляет величину $T_i \sim 1$ кэВ. Такое поведение ионной температуры подтверждается данными диамагнитных датчиков (рис.12), давление плазмы $n_i T_i + n_e T_e$ сначала резко возрастает до 10^{15} кэВ/см³, а затем спадает до $\sim 3,5 \cdot 10^{14}$ кэВ/см³, после чего свыше 200 мкс остается практически постоянным.

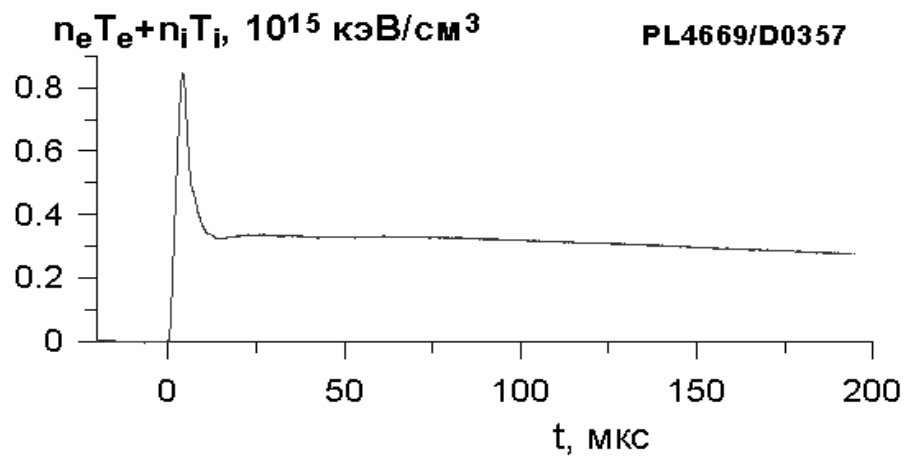


Рис.11, Давление плазмы измеренное диамагнитным датчиком на расстоянии ~ 60 см от входной щели анализатора.

5. Обсуждение результатов.

Наблюдаемая сразу после инъекции РЭП в плазму эмиссия горячих нейтралов перезарядки подтверждает модель нагрева ионов за счет модуляции электронной температуры вдоль плазменного столба [1]: так как при классическом режиме нагрева время появления горячих ионов определяется кулоновской частотой электрон - ионных соударений и составляет величину $\sim 10^{-3}$ с, а характерные времена нагрева для режима с гофрированным магнитным полем, порядка одного ион-ионного столкновения (10^{-6} – 10^{-5} с) [1]. Сигналы анализатора достигают своего максимума за 10–50 мкс после инъекции пучка, т.е. близко к времени ион-ионных столкновений за которое происходит максвеллизация ионов во встречных потоках в отдельной ячейке многопробочной ловушки. Регистрация нейтронного излучения вдоль всей установки [1,2] подтверждает что происходит нагрев всей ионной компоненты плазмы. Эти факты оправдывают предположение о том, что регистрируемый распределение ионов $\frac{dn_i}{dE}(E)$ близко к максвелловскому. Величина ионной температуры $T_i \sim 1$ – 1.5 кэВ определяемая по спектру нейтралов перезарядки, в режиме с пониженной плотностью плазмы в месте расположения анализатора дает хорошее соответствие с нейтронными и спектроскопическими диагностиками [2]. Временная эволюция температуры ионов плазмы согласуется с временным ходом давления плазмы.

6. Выводы.

Проведена модернизация многоканального анализатора, число каналов увеличено с двух до пяти, что позволит регистрировать спектр нейтралов перезарядки в одном выстреле.

Представлена модель для восстановления энергетического распределения ионов в горячей области плазмы ГОЛ-3.

Исследована эмиссия быстрых нейтралов перезарядки из горячей плазмы ГОЛ-3.

Обнаружено:

Эмиссия горячих нейтралов перезарядки наблюдаемая сразу после инъекции РЭП в плазму, подтверждает модель нагрева ионов за счет модуляции электронной температуры вдоль плазменного столба.

Благоприятными для регистрации нейтралов перезарядки были режимы работы с пониженной плотностью ($\sim 10^{14}$ см⁻³) в области наблюдения анализатора.

Энергетическое распределение ионов плазмы в горячей области, остается практически неизменным десятки микросекунд.

По серии выстрелов определена температура ионов в горячей области плазмы, которая в результате измерений и расчетов составила величину $T_i \sim 1-1,5$ кэВ, что находится в согласии с другими ионными диагностиками на установке ГОЛ-3.

7. Литература.

1. Р.Ю. Акентьев, А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В.Бурдаков, Э.Р.Зубаиров,В.Г.Иваненко, И.А. Иванов, М.В.Иванцовский, В.С. Койдан, В.В.Конюхов, А.Г.Макаров, К.И. Меклер, В.С.Николаев, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.В. Полосаткин, С.Л.Синицкий, В.Д.Степанов, Ю.С.Суляев, А.А.Шошин, Эксперименты по изучению плазмы в отдельных ячейках многопробочной ловушки ГОЛ-3, Препринт ИЯФ-2002-72.
2. R.Yu. Akentjev, A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, M.V. Ivantsivsky, V.S. Koidan, V.V. Konyukhov, A.G. Makarov, K.I. Mekler, S.S. Perin, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky, V.D. Stepanov, Yu.S. Sulyaev, A.A. Shoshin, Eh.R. Zubairov. Multimirror Open Trap GOL-3: recent results // Transactions of Fusion Technology Vol.43, No 1T, Jeju Island, Korea, 2003, p.30-36.
3. Петров М.П.. Корпускулярная диагностика квазистационарной термоядерной плазмы, Физика плазмы, 1976, т.2, с371-389.
4. Барнет К., Харрисон М. Прикладная физика атомных столкновений. М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Бурдаков А.В., Койдан В.С., Шошин А.А. . Исследование эмиссии быстрых нейтралов перезарядки из горячей плазмы на установке ГОЛ-3. // Тезисы докладов XXX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород, 2003, стр.84.
6. V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V.Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F.Rovenskikh. Long linear discharge in corrugated magnetic field. - Novosibirsk, 2001. 9 с. - (Preprint / Budker INP 2001-17).
7. A.V. Arzhannikov, V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, I.A. Ivanov, V.S. Koidan, K.I. Mekler, S.V. Polosatkin, V.V. Postupaev, A.F. Rovenskikh, S.L. Sinitsky. Dynamics of Ions of a Beam-Heated Plasma in a Cell of Multimirror Open Trap // Transactions of Fusion Technology Vol.43, No 1T, Jeju Island, Korea, 2003, p.172-176.
8. Давыденко В. И., Иванов А. А., Вайсен Г. Экспериментальные методы диагностики плазмы. Часть 1. НГУ. Новосибирск, 1999.
9. Диагностика термоядерной плазмы. / Под ред. С.Ю. Лукьянова. М.: Энергоатомиздат, 1985.

10. C. F. Barnett et al. Physics division atomic data for controlled fusion research. Oak Ridge National Laboratory. 1977.
11. R.K. Janev, W.D.Langer, K. Evans and D.E. Post, Jr., "Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas," Springer Series on Atoms and Plasmas, Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg, New York) 1987.
12. "Cross sections for Collision processes of Hydrogen Atoms with Electrons, Protons and Multiply Charged Ions", Atomic and Plasma-Material Interaction Data for Fusion, a Supplement to the journal Nuclear Fusion, Vol. 4, 1993.
13. Афанасьев В.П., Явор С.П. Электростатические анализаторы для пучков заряженных частиц. М.: Наука, 1978.
14. Койдан В.С. Исследование динамики нагрева плазмы продольным током в турбулентном режиме. Дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат.наук. ИЯФ. Новосибирск, 1971.
15. Койдан В.С., Многоканальный анализатор ионов и быстрых атомов перезарядки. Препринт 19-70, Новосибирск, ИЯФ, 1970.

Оглавление

1. Введение. 2
2. Установка ГОЛ-3. 3
3. Физика атомных процессов в плазме ГОЛ-3. 5
4. Эксперименты по регистрации эмиссии быстрых нейтралов
перезарядки из плазмы ГОЛ-3. 7
5. Результаты экспериментов. 11
6. Обсуждение результатов. 15
7. Выводы. 16
8. Литература. 17