

**Федеральное агентство
по образованию**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

физический факультет

Кафедра физики плазмы

**Квалификационная работа на соискание
степени магистра**

**ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЗАХВАЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ ПРИ
МОЩНОЙ АТОМАРНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ГДЛ**

Киреенко Андрей Владимирович

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Мурахтин Сергей Викторович

Новосибирск – 2006 год

Введение.

В работе описаны эксперименты по измерению энергосодержания атомарных пучков на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ).

ГДЛ, схема которой приведена на рисунке 1, представляет собой осесимметричный пробкотрон с большим пробочным отношением $R_m \gg 1^1$, плазма на данной установке состоит из двух компонент – мишенной плазмы (8) и быстрых ионов (9) [1].

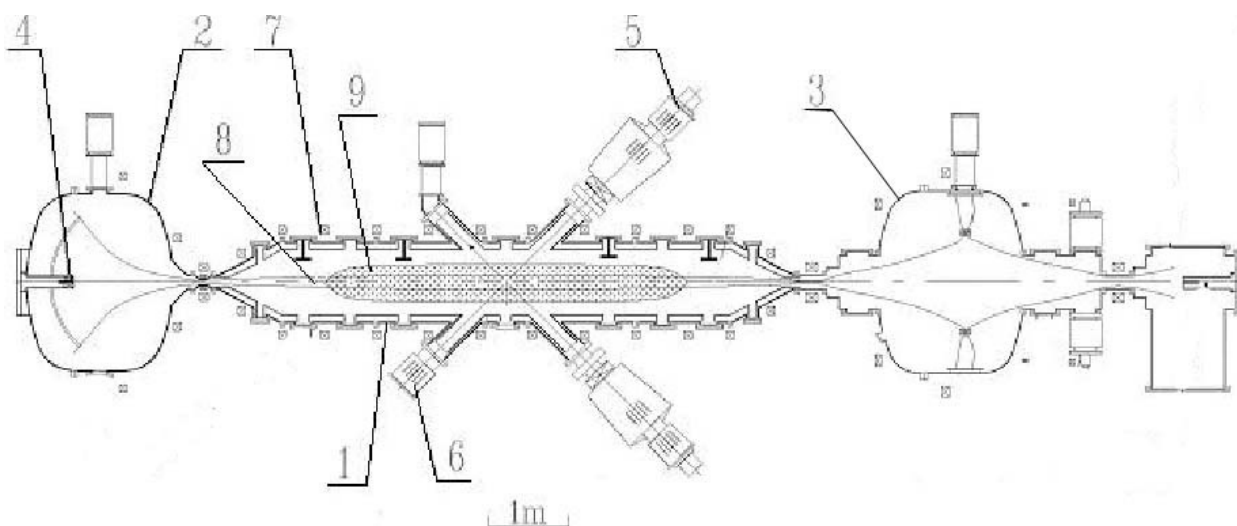


Рис. 1 Установка ГДЛ.

1 – центральная вакуумная камера, 2 – вакуумная камера расширителя, 3 – КАСП, 4 – плазменная пушка, 5 – атомарные инжекторы "СТАРТ-3", 6 – приемники атомарных пучков, 7 – катушки основной магнитной системы, 8 – мишенная плазма, 9 – популяция быстрых ионов.

Схема экспериментов на установке выглядит следующим образом. Мишенная плазма с температурой 5-10 эВ создается плазменной пушкой (4), расположенной в торцевом баке (2) и поступает в центральную часть установки (1) заполняя ее. Длина свободного пробега иона этой плазмы относительно рассеяния в конус потерь много меньше расстояния между пробками, поэтому данная плазменная компонента удерживается в газодинамическом режиме.

После заполнения мишенной плазмой центральной части установки, в нее инжектируются нейтральные частицы с энергией 17кэВ с помощью системы атомарных инжекторов (5), суммарная мощность инжекции примерно 4МВт, длительность инжекции

¹ $R_m = \frac{B_{\max}}{B_0}$ - отношение индукции поля в пробке к его значению в центре пробкотрона.

1мс. В результате захвата высокоэнергичных нейтралов образуется популяция быстрых ионов со средней энергией частиц 8 кэВ. Пробег быстрых ионов относительно рассеянья в конус потерь больше длины установки, поэтому они удерживаются адиабатически. Так как инжекция ведется под углом 45° к оси ГДЛ, то быстрые ионы имеют точки остановки там, где пробочное отношение $R=2$. В точках остановки плотность быстрых частиц имеет выраженный пик и в несколько раз превышает их концентрацию в центре установки. Соответственно вблизи точек остановки ионов может наблюдаться интенсивный поток нейтронов образующихся в ядерных реакциях между быстрыми частицами, что делает возможным конструирование нейтронного источника на базе этой открытой ловушки [2].

Экспериментальная программа ГДЛ ориентирована на физическое обоснование концепции нейтронного источника на основе газодинамической ловушки [3,4]. Одним из пунктов программы является исследование поведения быстрых ионов, изучение энергетического и материального баланса плазмы. Мощные атомарные пучки являются источником нагрева плазмы и поставщиком быстрых частиц, кроме того, большинство параметров плазмы напрямую зависят от вложенной в нее энергии, поэтому измерение параметров пучков и энергии захваченной плазмой при атомарной инжекции является важной задачей в эксперименте на ГДЛ.

В настоящее время захваченная плазмой энергия определяется косвенно с помощью вторично-эмиссионных детекторов находящихся в приемниках атомарных пучков (6) напротив каждого из инжекторов [5]. Перед началом экспериментов делается так называемый “фоновый” выстрел – эксперимент, в ходе которого установка не заполняется мишенной плазмой и производится инжекция пучков. В “фоновом” выстреле все инжектируемые нейтральные частицы попадают в приемники пучков, и измеряется вторично-электронный ток с детекторов, полученный сигнал $J_0(t)$ записывается в память компьютера. Затем при экспериментах с плазмой так же измеряется вторично-электронный ток с детекторов, по полученному сигналу тока $J_1(t)$ рассчитывается коэффициент ослабления пучка

$$k(t) = \frac{J_0(t) - J_1(t)}{J_0(t)} \quad (1).$$

По известному коэффициенту ослабления вычисляется мощность, захваченная в плазму по следующей формуле:

$$P(t) = k(t)E(t)I(t)\gamma \quad (2),$$

Где $E(t)$ – измеряемое ускоряющее напряжение (то есть энергия инжекции), $I(t)$ – ток пучков инжекторов, γ - коэффициент перезарядки в газовой мишени. Погрешность таких измерений $\sim 15\%$ (как указано в [5]) и определяется неконтролируемыми временными

изменениями параметров инжекторов, нестабильностью работы газовой мишени и зависимостью коэффициента вторичной эмиссии от плотности тока нейтральных частиц.

В данной работе описаны эксперименты по измерению энергосодержания атомарных пучков с помощью проволочных калориметров. Данная диагностика представляет собой набор проволочек помещаемых на пути пучка, энергосодержание пучка прошедшего через диагностику определяется по поглощенному проволочками количеству тепла, которое в свою очередь определяется по изменению их сопротивления в результате нагрева пучком. Этот калориметр имеет ряд достоинств в сравнении с калориметрами, для измерения температуры которых используются термопары. Основное достоинство проволочного калориметра – это его высокая прозрачность (более 99%), позволяющая производить измерение энергосодержания пучка до взаимодействия его с мишенной плазмой без внесения в пучок существенных возмущений. Кроме того, такой калориметр имеет временное разрешение около 50мкс , что много меньше временного разрешения термопарных калориметров (их временное разрешение не менее 10мс)[6]. Недостатком проволочного калориметра является отсутствие системы охлаждения, которая необходима для сохранения калориметра от плавления при измерениях энергосодержания мощных атомарных пучков секундных длительностей используемых для нагрева плазмы в современных токамаках. Но система охлаждения не требуется, когда длительность пучка не превышает десятка миллисекунд, что и имеет место на ГДЛ.

Установив по два проволочных калориметра на каждый из нагревных инжекторов (один на выходе из инжекторного тракта, другой перед приемником пучка) можно непосредственно измерять ослабление пучков в плазме, и тем самым определять захваченную ей энергию. Причем энергосодержание исходного и ослабленного пучка определяется в одном и том же выстреле инжектора, поэтому нет погрешности связанной с временными изменениями параметров инжекторов от выстрела к выстрелу.

1. Проволочный калориметр.

1.1. Описание конструкции калориметра и методика измерения.

Проволочный калориметр – это рамка, на которой закреплена сетка, состоящая из параллельно натянутых вольфрамовых проволочек диаметром d находящихся на одинаковом расстоянии ΔX одна от другой (рис. 2 сверху). Калориметр помещается на пути мощного атомарного пучка, который, проходя через проволочную сетку, нагревает ее, что приводит к изменению ее сопротивления. Измеряя сопротивление проволочек можно рассчитать энергосодержание нагревающего их пучка по следующей схеме. Изменение удельного сопротивление металла ρ при его нагреве описывается выражением

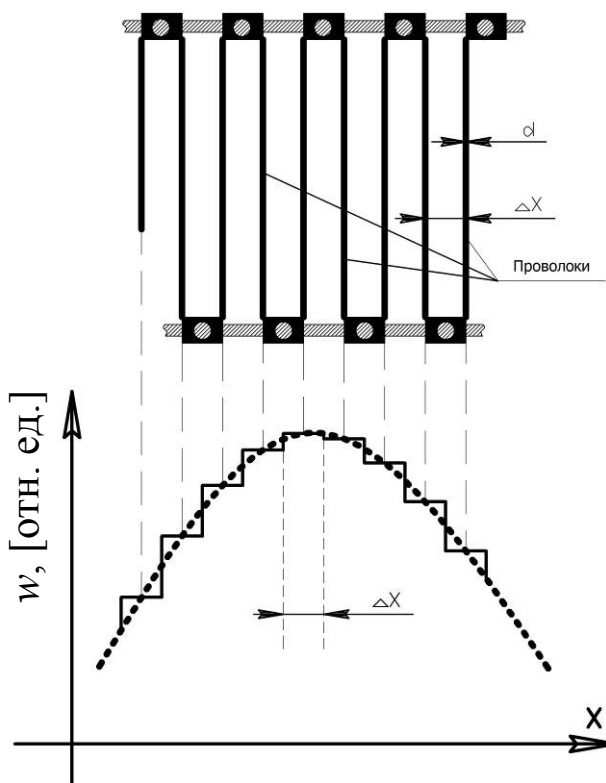


Рис. 2

w – плотность энергосодержания пучка.

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (3),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление до начала нагрева, α – температурный коэффициент сопротивления, а ΔT – изменение температуры металла в результате нагрева. Используя 3 можно написать выражение для сопротивления одной проволочки

$$\begin{aligned} R &= \int_L \frac{\rho(l)}{S} dl = \int_L \frac{\rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T(l))}{S} dl = \\ &= \frac{\rho_0 L}{S} + \frac{\alpha \rho_0}{S} \int_L \Delta T(l) dl = R_0 + \Delta R \end{aligned} \quad (4),$$

где l - координата вдоль проволоки, L и S – ее длина и площадь сечения, а R_0 и ΔR сопротивление до нагрева пучком и изменение сопротивления в результате этого нагрева соответственно. Энергия поглощенная проволокой $E_{п}$ рассчитывается по изменению ее сопротивления по формуле:

$$E_{II} = \int_L c \cdot m \cdot \Delta T(l) dl = \int_L c \rho_{\text{вещ}} S \cdot \Delta T(l) dl = c \rho_{\text{вещ}} S \cdot \int_L \Delta T(l) dl = \frac{c \rho_{\text{вещ}} S^2}{\alpha \rho_0} \cdot \Delta R \quad (5),$$

где m – масса единицы длины проволоки, $\rho_{\text{вещ}}$ и c – ее плотность и удельная теплоемкость. То есть для измерения энергии поглощенной проволокой достаточно померить ее сопротивление до нагрева пучком и после него.

Теперь по измеренной энергии поглощенной проволокой надо рассчитать полное энергосодержание пучка, ведь проволочная сетка поглощает только его малую часть равную отношению площади проволоки $L \cdot d$ к площади секции рамки прилегающей к ней $L \cdot \Delta X$ (рис. 2). Энергосодержание пучка $E_{\text{пуч}}$ выражается через энергию поглощенную проволоками по формуле:

$$E_{\text{пуч}} = \frac{\Delta X}{d} \cdot \sum_{\text{по всем проволочкам рамки}} E_{II} = \frac{c \rho_{\text{вещ}} S^2}{\alpha \rho_0} \cdot \frac{\Delta X}{d} \cdot \sum_{\text{по всем проволочкам рамки}} \Delta R \quad (6).$$

Суммирование можно выполнить, соединив все проволоки последовательно $\Delta R_{\Sigma} = \sum \Delta R$ (ведь тогда их сопротивления складываются), что и было сделано в эксперименте. Снизу на рисунке 2 произведено графическое сравнение истинного энергосодержания пучка с его энергосодержанием получающимся при расчете по формуле 6. На графике изображены две кривые. Кривая изображенная пунктиром – это профиль энергосодержания пучка, который был бы на сплошной пластине установленной вместо проволочного калориметра, интеграл по этому профилю (площадь лежащая под кривой) – полное энергосодержание пучка. Площадь лежащая под другой сплошной ломанной кривой – это результат расчета энергосодержания пучка по формуле 4 (площадь столбца шириной ΔX

равняется $\frac{\Delta X}{d} \cdot E_{II}$). Таким образом, замена сплошного калориметра, целиком поглощающего пучок, проволочным эквивалентна замене интегрирования суммированием. Как видно из графика на рисунке 2 площади под кривыми практически совпадают, если расстояние между соседними проволоками мало по сравнению с характерной шириной пучка, погрешность измерений энергосодержания пучка в этом случае будет определяться температурной нестабильностью констант в выражении 6. Точное выражение для погрешности связанной с изменением профиля плотности тока на расстояниях между проволоками будет получено в пункте погрешности измерений.

Следует сказать, что с помощью проволочного калориметра возможно не только измерение суммарного энергосодержания пучка за весь период инъекции, но также и мощности инъекции. Временное разрешение определяется временем выравнивания

температуры по толщине проволоки, необходимо, чтобы она была одинакова по сечению S . Можно получить оценку на характерное время выравнивания $\tau_{хар}$ из уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{T}{\tau_{хар}} = a \cdot \frac{T}{d^2} \quad \Rightarrow \quad \tau_{хар} = \frac{d^2}{a} \quad (7),$$

где d – диаметр проволоки, а λ и a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала проволоки. В эксперименте использовалась вольфрамовая проволока диаметром 50 мкм (у вольфрама $a = 0.57 \text{ см}^2 / \text{сек}$), значит, температура выравнивается примерно за 50 мкс , что много меньше 1 мс (длительность инжекции нагревных пучков на ГДЛ).

1.2. Результаты первых экспериментов.

Для измерения энергии захваченной в плазму при мощной атомарной инжекции в эксперименте SHIP (Synthesized Hot Ions Plasmoid) [9], который проводился на установке ГДЛ, в камеру мини-пробкотрона были установлены два проволочных калориметра (рис.3). Калориметр №1 был предназначен для измерения энергосодержания пучка на

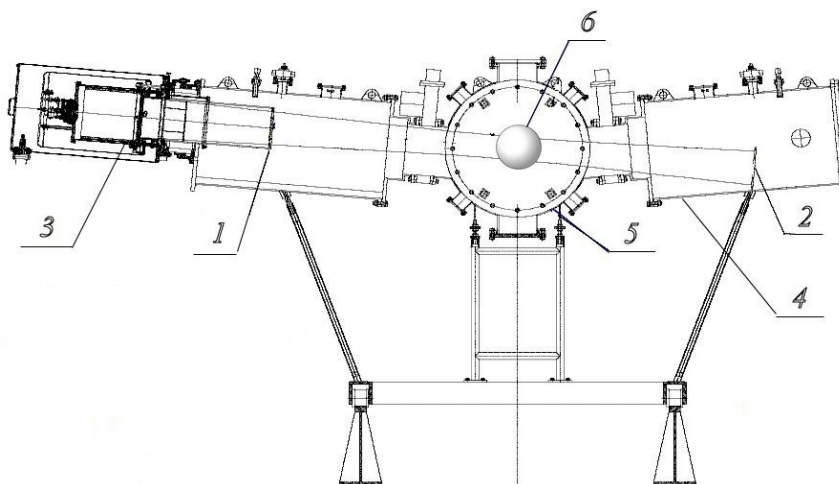


Рис. 3 Камера мини-пробкотрона.

1 – калориметр №1, 2 – калориметр №2, 3 – инжектор "СТАРТ-5",
4 – приемник пучка, 5 – вакуумная камера мини-пробкотрона, 6 – SHIP.

выходе инжектора до его попадания в плазму, второй должен был мерить энергосодержание этого же пучка после его прохождения сквозь плазму. Разница этих двух энергосодержаний есть энергия, захваченная плазмой. Измерение сопротивления

проволаки осуществлялось с помощью измерения тока текущего через проволоку и напряжения на ней (рис 4). Типичные осциллограммы тока и напряжения с калориметра показаны на рисунке 5. Инжекция пучка идет с 3.5 мс до 4.5 мс (в это время виден бросок напряжения на проволоке и на балластном сопротивлении). Из-за броска напряжения было невозможно отслеживать изменение сопротивления проволоки во время инъекции и, следовательно, измерять мощность пучка, поэтому была измерена только интегральная величина энергосодержания пучка за весь период его существования. Во время измерений ток через проволоку I_{np} поддерживался постоянным (на графике видно, что он одинаков до и после нагрева проволоки пучком), напряжение же на проволоке после инъекции растет на величину ΔU из-за увеличения ее сопротивления на величину $\Delta R_z = \Delta U / I_{np}$.

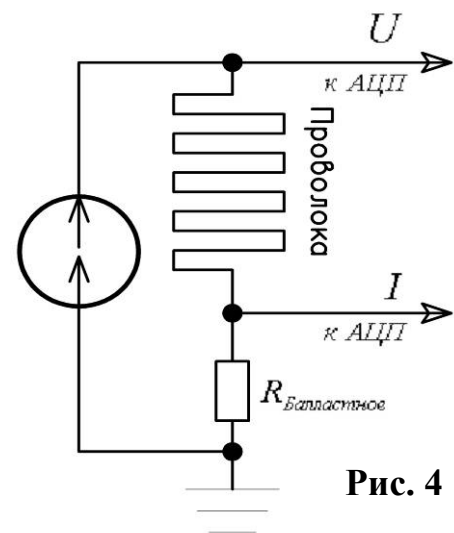


Рис. 4

Расчет энергосодержания пучка по изменению сопротивления первого калориметра дал

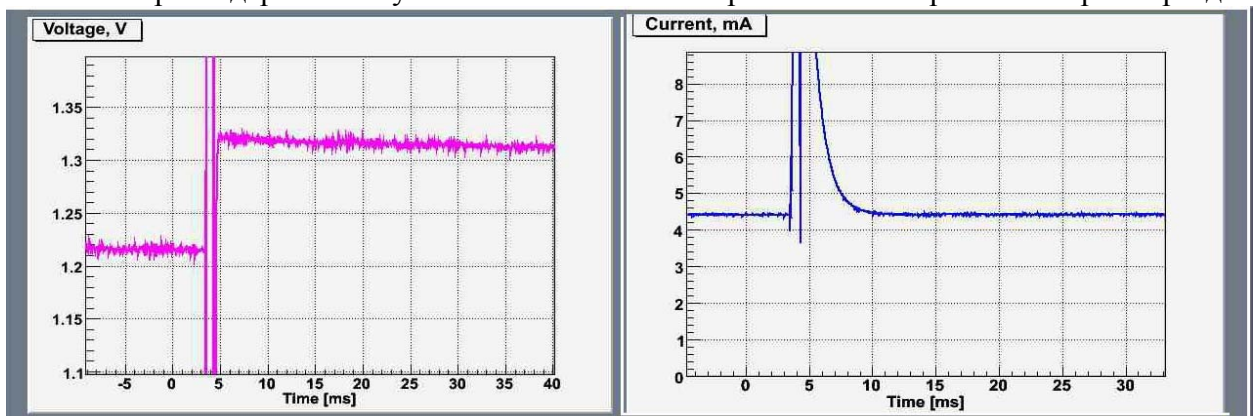


Рис. 5 Измеренное падение напряжения и ток через проволоку.

цифру 400 Дж, что совпало со значением энергосодержания полученного перемножением тока пучка на энергию его частиц и время инъекции. Скачок сопротивления на втором калориметре дал значение для энергосодержания этого же пучка 150 Дж (во время инъекции плазмы в установке не было, так что пучок не ослаблялся). Позднее выяснилось, что причина столь сильного расхождения была в самом инжекторе, он был расфокусирован, поэтому на второй калориметр, расположенный далеко от инжектора, попадала лишь малая часть частиц пучка. Но, тем не менее, пока факт расфокусировки не был выяснен, было выдвинуто много гипотез о причинах столь низкого значения

измеряемого энергосодержания. Так малую часть энергии мог уносить газ, адсорбируемый на проволоке за время между выстрелами инжектора.

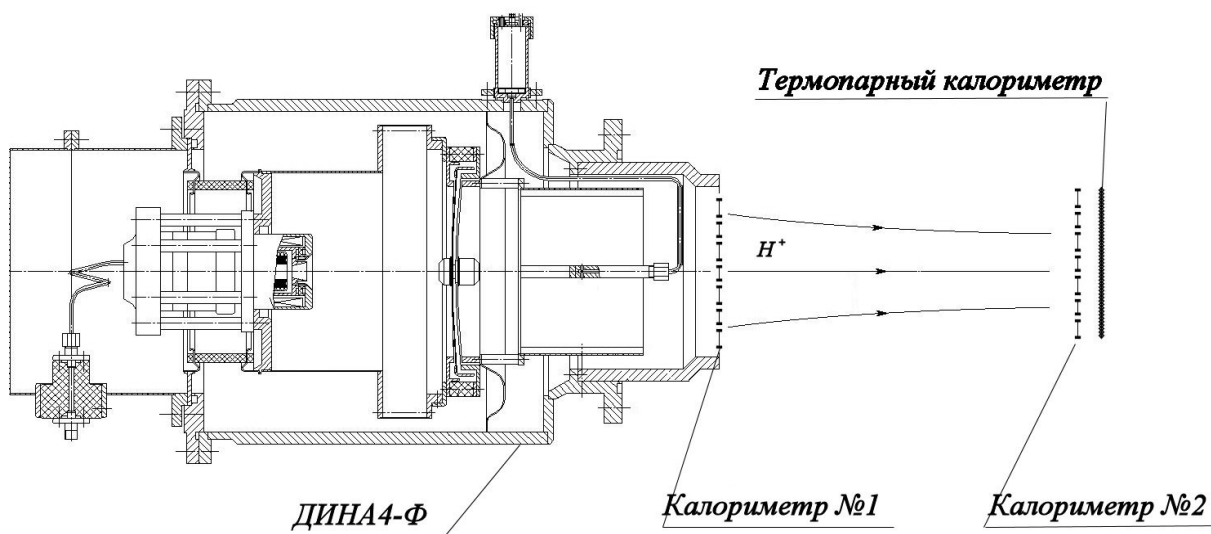


Рис. 6 Схема расположения калориметров.

Для проверки этой гипотезы и работоспособности калориметра был поставлен эксперимент, схема которого изображена на рисунке 6. Перед инжектором “Дина-4Ф” были установлены две проволочные рамки, калориметр №1 был установлен непосредственно перед ионнооптической системой инжектора (ИОС) и таким образом перекрывал весь пучок, калориметр №2 в фокусе ИОС. Сразу за второй рамкой был размещен термопарный калориметр – тонкая медная пластина, температура которой контролировалась с помощью термопар. Во время эксперимента энергосодержание пучка измерялась этими калориметрами и рассчитывалось другим независимым методом:

$$E_{pac} = \int I_{NB}(t) \cdot E_{NB}(t) dt \quad (8),$$

где E_{pac} – расчетное энергосодержания пучка, $I_{NB}(t)$ – ток ИОС инжектора, $E_{NB}(t)$ – энергия частиц пучка (в эксперименте измерялось напряжение между сетками ИОС, которое ускоряет частицы). Инжектор “Дина-4Ф” использованный в эксперименте имеет следующие параметры: $I_{NB} = 20A$, $E_{NB} = 14кэВ$, время инжекции $\tau_{NB} = 110.мкс$, плотность тока пучка вблизи ИОС $i_{ИОС} = 140мА/см^2$. Измерение энергосодержания производилось при различных начальных температурах проволоки (прогрев проволоки, осуществляемый пропуском по ней постоянного тока, должен привести к удалению частиц, адсорбированных на ее поверхности).

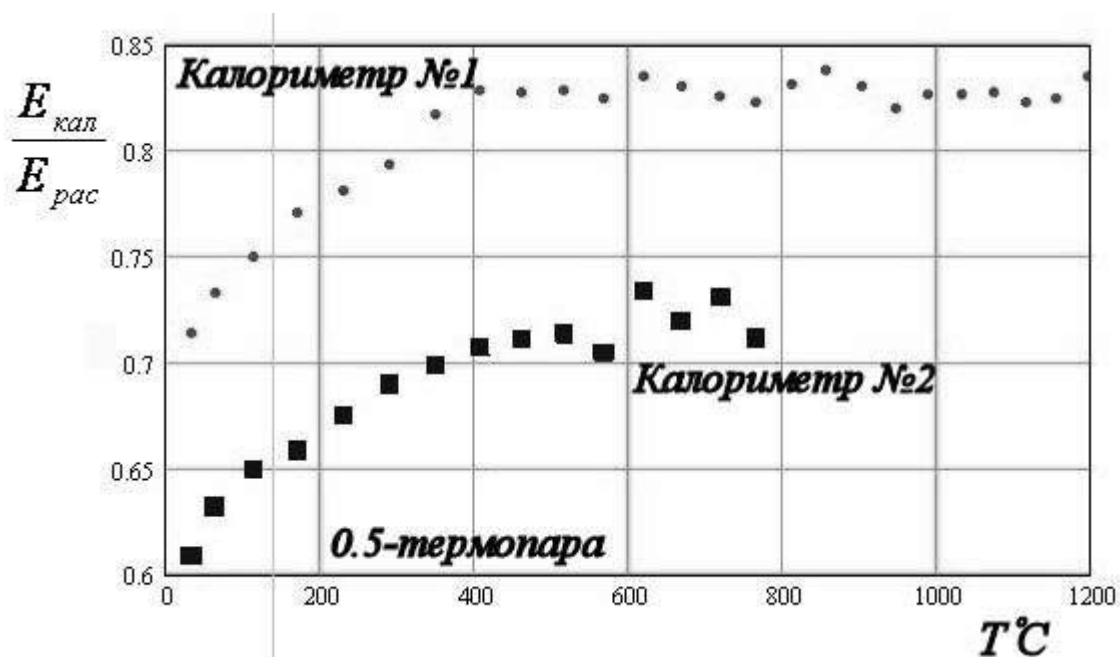


Рис. 7 На графике изображены:
 – энергия пучка, измеренная проволочным калориметром;
 – расчетное энергосодержания пучка.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 7. Для калориметра установленного непосредственно возле ИОС результаты согласуются с ожидаемыми. Видно, что вначале при увеличении температуры проволоки примерно до 400°C отношение измеренного энергосодержания к расчетному растет, а затем становится константой и остается неизменным при дальнейшем нагреве. Не равенство константы единице объясняется уносом части энергии пучка частицами, отраженными от поверхности проволоки (оценка доли уносимой энергии будет сделана в пункте “погрешности измерений”). Калориметр №2 установленный в фокусе атомарного пучка, скорее всего не улавливал в силу геометрии эксперимента всех частиц пучка, этим можно объяснить 30% отличие измеренного энергосодержания от расчетного. Показания термопарного калориметра, который не подвергался прогреву, почти в два раза меньше расчетной величины, причем измеренное им энергосодержание равняется энергосодержанию, измеренному непрогретым проволочным калориметром №2.

На основании этих экспериментальных данных было принято решение, что для устранения ошибки в измерениях связанной с уносом части энергии частицами, адсорбированными на поверхности, перед каждым измерением проволоку необходимо прокалывать при температуре большей 400°C . Во всех последующих экспериментах прогревание вольфрамовой проволоки диаметром 0.05мм до температуры 500°C осуществлялось пропусканием по ней постоянного тока 100мА

После включения прогрева проволоки перед измерениями на калориметре в камере “SHIP” его показания увеличились на 10% по сравнению с холодной проволокой (измерения проведены при одинаковых расчетных энергосодержаниях пучка). Это является аргументом в пользу того, что часть энергии пучка уносится именно адсорбированными на поверхности проволоки частицами. Энергия приходящаяся на единицу площади калориметра в “SHIP” несмотря на расфокусировку инжектора была больше, чем в эксперименте с “Дина-4Ф”, соответственно меньшей доли энергии пучка хватало для того чтобы сбить адсорбированные частицы с проволоки.

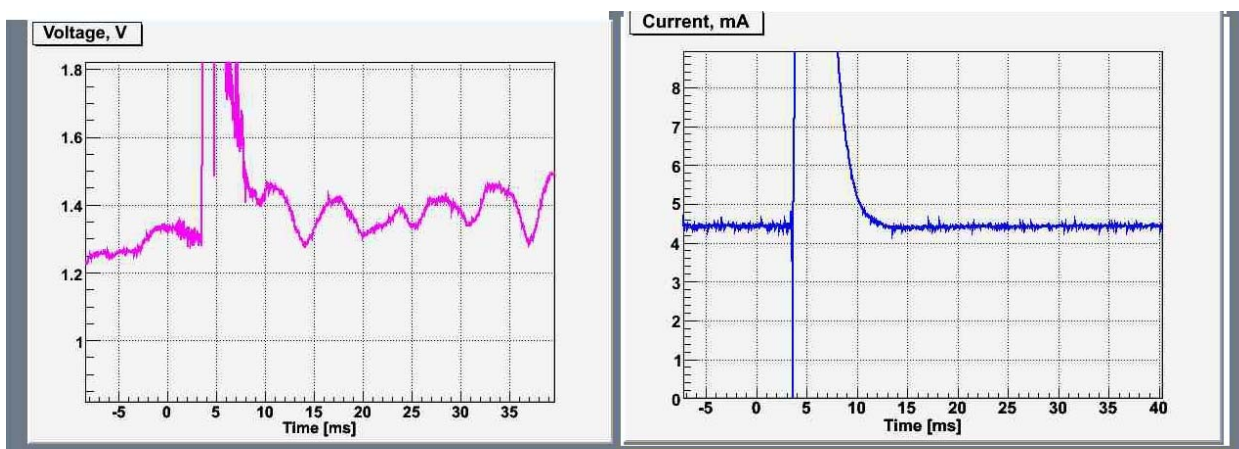


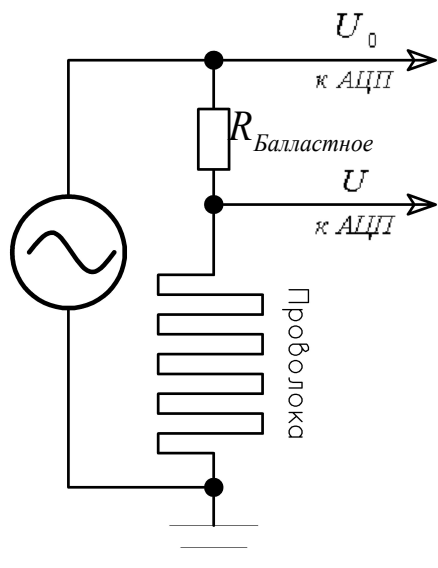
Рис. 8 Измеренное падение напряжения и ток через проволоку при нахождении калориметра в сильном магнитном поле.

Другая проблема выяснилась во время измерений энергосодержания пучка с помощью калориметра, установленного в центральной части установки в области, где присутствует сильное магнитное поле. В результате взаимодействия магнитного поля и имеющих определенную степень свободы проволочек в контуре измерительной цепи изображенной на рис. 4 наводится паразитная ЭДС. Осциллограммы измеренного падения напряжения и тока через проволочный калориметр изображены на рис 8. Колебания, присутствующие на осциллограмме напряжения препятствуют точному определению падения напряжения на проволоке до и после инъекции и, соответственно, ухудшают точность измерения энергосодержания пучка.

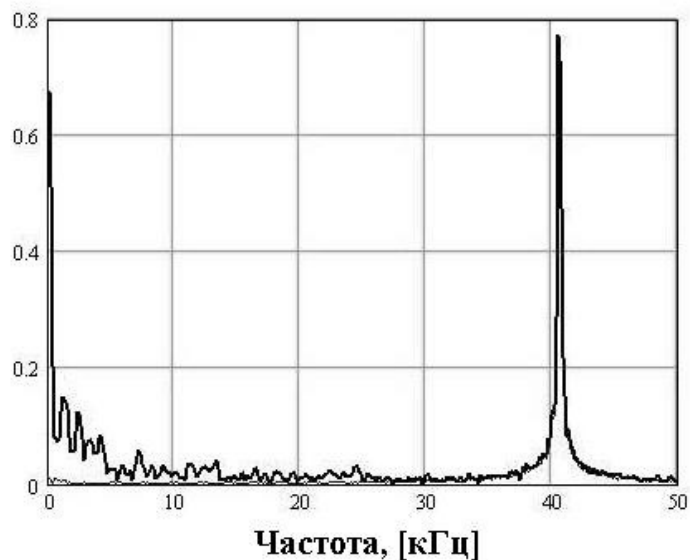
1.3. Улучшение схемы регистрации сопротивления проволочек.

Как было сказано в предыдущем пункте, несмотря на теоретическую возможность измерения мощности пучка, этого не удалось сделать из-за броска напряжения появляющегося во время инъекции пучка и электрических колебаний в измерительной цепи вызванных магнитным полем ГДЛ. Для борьбы с этими двумя явлениями схема

измерений была изменена следующим образом (рис 9 а). Вместо источника постоянного тока к измерительной цепи был подключен высокочастотный генератор синусоидального напряжения, с частотой выше, чем характерная частота паразитных колебаний. Далее измеренные напряжения U и U_0 подвергались цифровой обработке (частотной



а) Схема регистрации



б) Фурье спектр сигнала

Рис. 9

фильтрации), для выделения полезного сигнала и избавления от наводок. Полоса пропускания фильтра подобрана для выделения полезного сигнала с частотой 40кГц , такая частота генератора напряжения была выбрана по следующим причинам. С одной стороны надо чтобы частота полезного сигнала лежала в частотном диапазоне свободном от паразитных колебаний напряжения мешающих измерениям, тогда последние можно подавить полосовым фильтром. На рисунке 9 б изображен Фурье спектр сигнала измеренного падения напряжения на проволоке, измерения проводились при частоте генератора равной 41кГц . В спектре виден пик на частоте генератора – это амплитуда полезного сигнала (в произвольных единицах), все пики на других частотах – это амплитуды паразитных колебаний. Из рисунка видно, что частоты всех мешающих измерениям колебаний укладываются в диапазон от нуля до 30кГц , таким образом, необходимо чтобы полезный сигнал лежал в более высокочастотной области спектра. С другой стороны частоту нельзя брать слишком большой, так как АЦП должно успеть выполнить достаточное для прорисовки синусоиды число измерений за период сигнала. Поэтому частота полезного сигнала должна быть на порядок меньше частоты оцифровки АЦП, которая в эксперименте была равной 500кГц (при частоте сигнала 40кГц на каждый период сигнала приходится 12 измеренных точек).

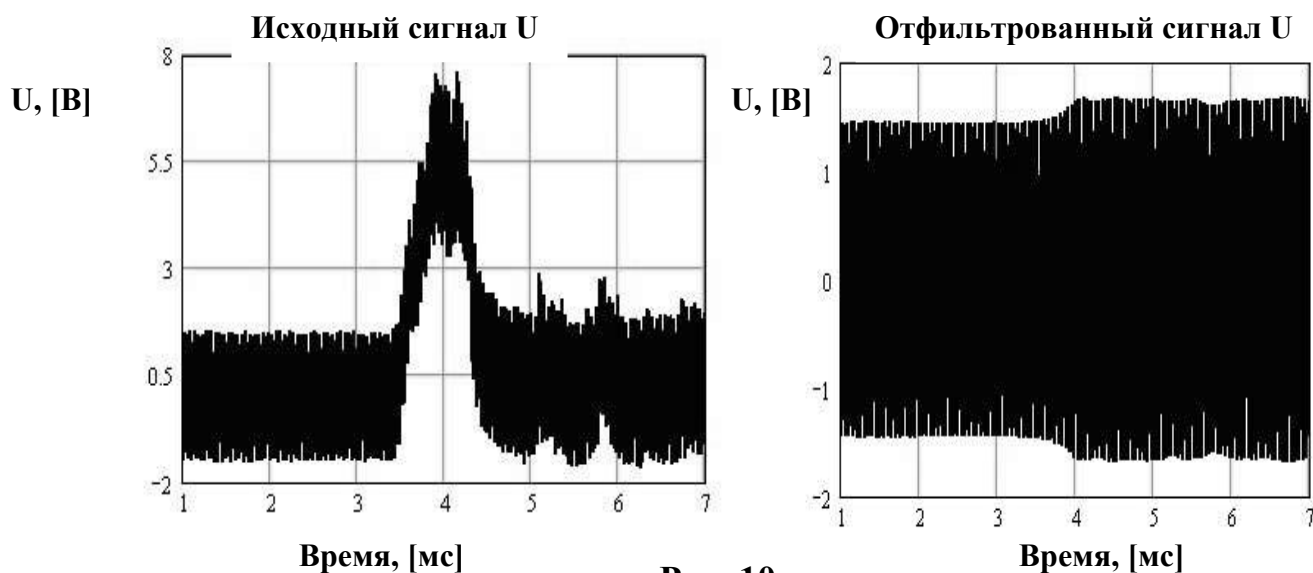


Рис. 10

Осциллограмма сигнала измеренного напряжения U , а также этот же сигнал после его обработки полосовым фильтром изображены на рисунке 10. Отдельные пики синусоиды на рисунках не различимы, так как при частоте 41кГц в одну миллисекунду их укладывается 41 штука. Генератор выдает напряжение стабильной амплитуды U_0 , а амплитуда сигнала с проволоки U растет во время инъекции (начиная с 3,5 мс) из-за увеличения сопротивления проволоки вследствие ее нагрева пучком. Таким образом, с помощью модернизации схемы регистрации изменения сопротивления проволоки удалось практически полностью избавиться от мешающих измерениям колебаний напряжения (сравнить рисунки 7 и 9). Изменение сопротивления проволоки по измененным напряжениям U и U_0 можно рассчитать по формуле:

$$\Delta R_{\Sigma} = R_{\text{Бал}} \cdot \left(\frac{U_0}{U_0 - U_F} - \frac{U_0}{U_0 - U_I} \right) \quad (9),$$

где U_I и U_F - амплитуда напряжения на проволоке до ее нагрева пучком и после нагрева соответственно, U_0 - амплитуда выдаваемого генератором напряжения, а $R_{\text{Бал}}$ - номинал балластного сопротивления.

Мощность пучка можно вычислить по следующей формуле:

$$P_{\text{пуч}} = \frac{dE_{\text{пуч}}}{dt} = \frac{c\rho_{\text{вещ}} S^2}{\alpha\rho_0} \cdot \frac{\Delta X}{d} \cdot \frac{dR_{\Sigma}}{dt} = \frac{c\rho_{\text{вещ}} S^2}{\alpha\rho_0} \cdot \frac{\Delta X}{d} \cdot \frac{U_0 \cdot R_{\text{Бал}}}{(U_0 - U)^2} \frac{dU}{dt} \quad (10).$$

К сожалению, на настоящий момент не удалось достичь подавления паразитных сигналов достаточного для получения гладкого изменения амплитуды “отфильтрованного сигнала U ”, для его дифференцирования и расчета мощности пучка по формуле 10. Но, тем не

менее, значительное подавление наводок позволило улучшить точность определения изменения сопротивления проволоки, и тем самым сильно повысило точность измерения энергосодержания пучка.

2 Эксперимент по измерению энергии захваченной плазмой.

Для проверки возможности измерения энергии захваченной в плазму при мощной атомарной инъекции на ГДЛ был поставлен следующий эксперимент. На пути пучка одного из атомарных инжекторов “СТАРТ-3” были размещены два калориметра. Один установленный сразу на выходе из инжекторного тракта, предназначен для измерения энергосодержания пучка до его прохождения через плазму. Второй установленный на стенку вакуумной камеры с противоположной от оси установки стороны, предназначен для измерения энергосодержания этого же самого пучка, но после прохождения им плазмы. По ослаблению пучка – разнице энергий измеренной двумя калориметрами определяется захваченная плазмой энергия. Схема расположения рамок с проволочными сетками калориметров показана на рисунке 11.

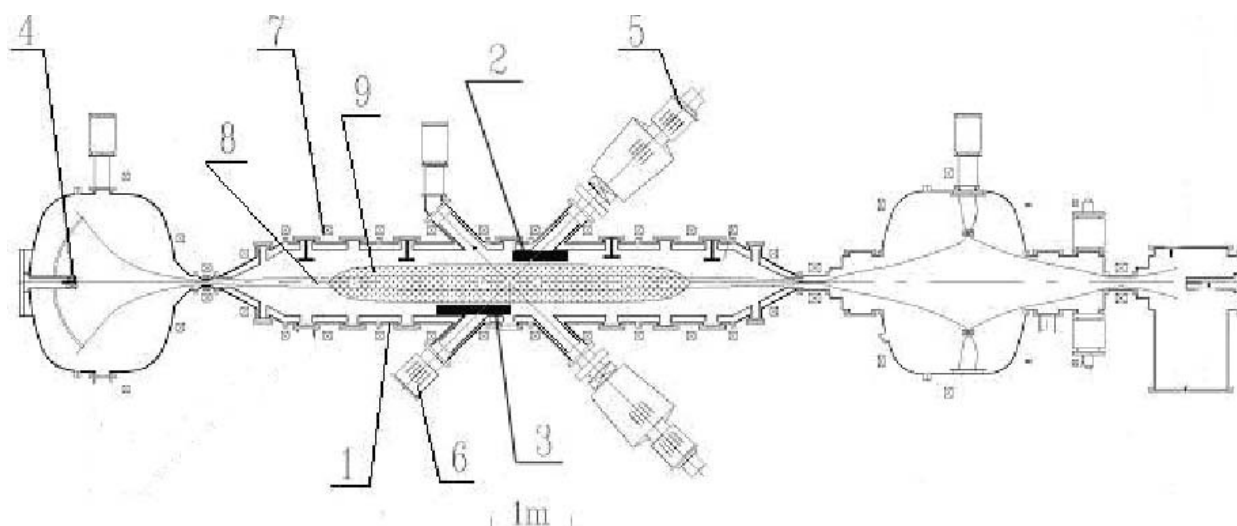


Рис. 11 Схема расположения калориметров на ГДЛ.

1 – центральная вакуумная камера, 2 – калориметр №1, 3 – калориметр №2,
4 - плазменная пушка, 5 - атомарный инжектор “СТАРТ-3”, 6 – приемник атомарного пучка, 7 – катушки основной магнитной системы, 8 – мишенная плазма, 9 – популяция быстрых ионов.

Конструктивно оба калориметра состоят из 16 проволочек диаметром $0,05\text{мм}$, расстояние между проволоками первого калориметра 22мм , у второго оно равно 25мм . Размеры рамки №1 $34\times 24\text{ см}$, рамки №2 $80\times 40\text{ см}$, эти размеры выбраны таким образом, чтобы апертура рамок была больше апертуры пучка в месте их установки. Все проволочки первого калориметра соединены последовательно в одну электрическую цепь, поэтому он измеряет интегрально энергию всего пучка. Калориметр №2 – многоканальный, то есть проволочки не соединены последовательно, а сопротивление измеряется на каждой проволочки в отдельности. Такая схема предназначена не только для измерения

энергосодержания пучка, но так же для измерения профиля плотности его тока по одной координате (поперек проволок). Измерив, профиль плотности тока пучка в эксперименте без заполнения установки плазмой и с плазмой, можно определить профиль ослабления пучка, по этим данным, возможно, восстановить линейную плотность плазмы [5].

В экспериментах с калориметром №1 была продемонстрирована возможность измерять энергосодержание пучка с помощью проволочного калориметра, в том числе в условиях сильных помех создаваемых плазмой и магнитным полем ГДЛ. Сравнение результатов измерения энергосодержания пучка с расчетным энергосодержанием,

вычисленным по формуле 8 показано на рисунке 12. Видно, что большинство экспериментальных точек лежит в пределах от 0,9 до 1,1 от расчетного значения энергосодержания пучка. Причем точки лежащие выше 500 Дж относятся к измерениям без магнитного поля,

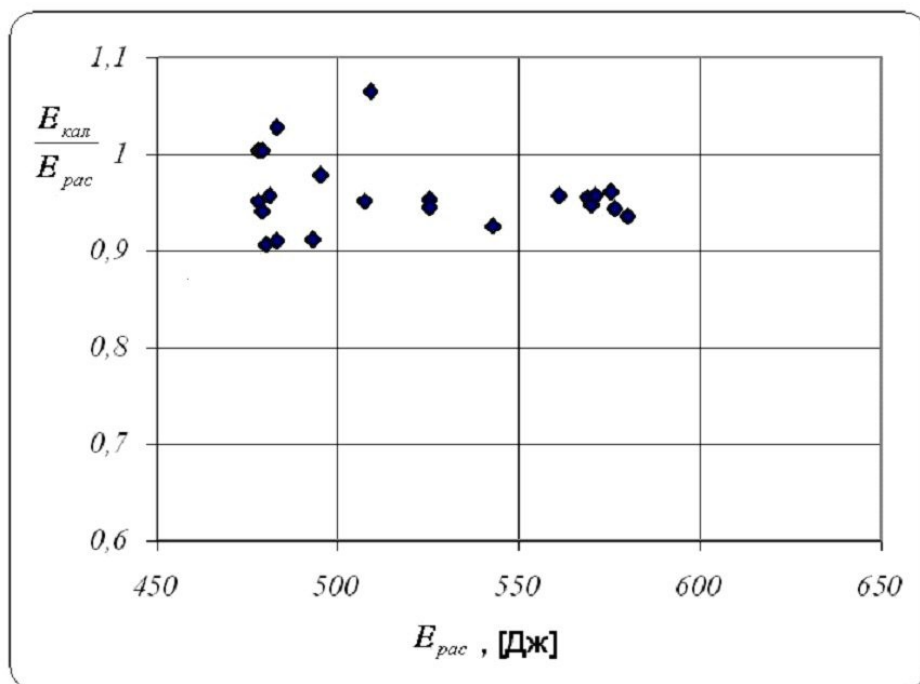


Рис. 12 Результаты измерения энергии пучка.
 – энергия пучка, измеренная проволочным калориметром;
 – расчетная энергия пучка.

когда сигналы имеют вид изображенный на рисунке 5 (в это время на калориметр попадают как нейтральные, так и заряженные частицы пучка, поэтому поглощаемая проволокой энергия больше, чем в случае, когда заряженные части отклоняются магнитным полем установки). Точки ниже 500 Дж получены в экспериментах, когда в установке присутствовала плазма и, соответственно, было включено удерживающее ее магнитное поле. В этих экспериментах расчетное энергосодержание пучка вычислялась по формуле:

$$E_{рас} = \gamma \cdot \int I_{NB}(t) \cdot E_{NB}(t) dt \quad (11),$$

где γ – коэффициент перезарядки в газовой мишени, который принимался равным 0,8 во всех измерениях. Большой разброс точек ниже 500 Дж может быть обусловлен не только

ошибками измерения калориметром, но также ошибками определения расчетного энергосодержания пучка, так как в действительности коэффициент перезарядки зависит от стабильности работы газовой мишени и может меняться от выстрела к выстрелу. Изменение γ вносит ошибку в $E_{рас}$ и, тем самым, является источником дополнительной погрешности в экспериментальных результатах.

Эксперимент со вторым калориметром не удалось провести в запланированном объеме, то есть им не удалось измерить энергосодержание пучка после его ослабления плазмой и соответственно не удалось рассчитать захваченную плазмой энергию. Произошло это по следующим причинам. После завершения подготовки к экспериментам и установки калориметра в вакуумную камеру ГДЛ напротив инжектора, выяснилось, что невозможно проводить измерения из-за помех создаваемых магнитным полем и плазмой (о чем говорилось в пункте 1.3). Метод измерения сопротивления проволоки с помощью использования высокочастотного генератора с последующей фильтрацией сигнала еще не был придуман и отработан. Отработка метода производилась на калориметре №1, так как все его проволоки соединены последовательно и требуют всего двух каналов регистрации АЦП (схема рис. 9 а). Поэтому, производить изменения в схеме регистрации сигналов необходимые в процессе отработки измерительного процесса намного легче на калориметре №1, чем в схеме многоканального калориметра №2. После успешного проведения экспериментов с использованием высокочастотного генератора на первом калориметре, мы приступили к работе по переделке многоканального калориметра, но из-за некоторых технических трудностей эту работу не удалось завершить до остановки экспериментов на ГДЛ. Эксперименты остановлены 19 мая 2006 года с целью замены устаревшей системы инжекторов “СТАРТ-3” на более мощную новую систему инжекторов “СТАРТ-5”.

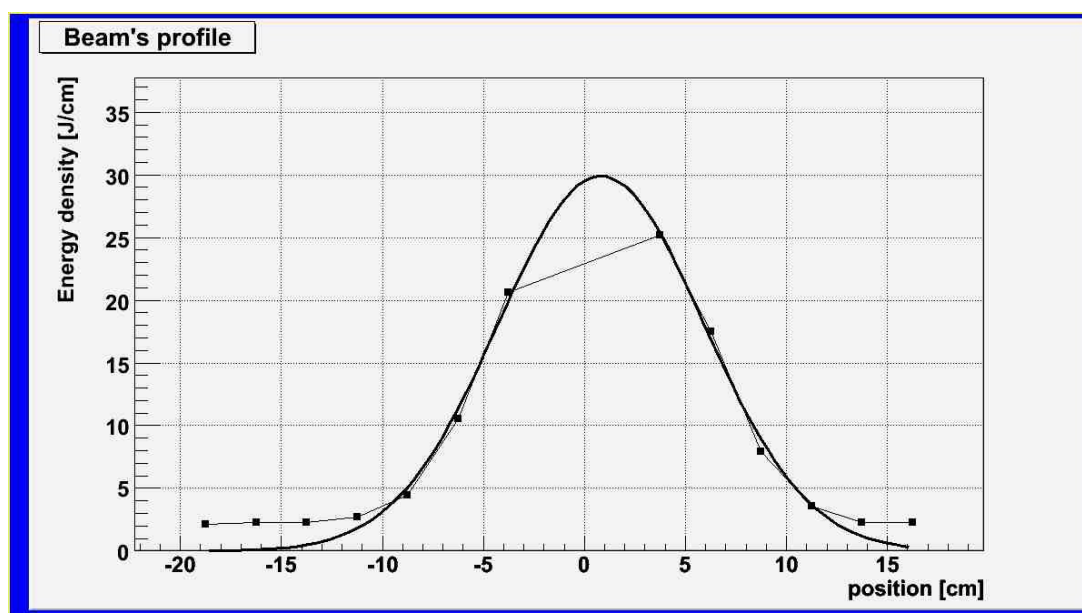


Рис. 13 Профиль пучка.

Тем не менее, были произведены измерения профиля плотности распределения энергии в пучке в нескольких выстрелах инжектора, один из полученных профилей представлен на рисунке 13. Экспериментальные точки изображены квадратиками, черная жирная кривая – результат аппроксимации профиля Гауссом. На графике отсутствуют точки с координатами $-1,25\text{см}$ и $1,25\text{см}$, так как при монтаже к стенке вакуумной камеры многоканального калориметра были повреждены два его центральных канала регистрации (две центральных проволоки оказались в электрическом контакте с корпусом установки внутри вакуумной камеры и, поэтому, их сопротивление невозможно было измерить).

1. Погрешности измерений.

Суммарная погрешность метода складывается из погрешности восстановления энергосодержания пучка по энергии поглощенной проволокой и погрешности определения этой поглощенной энергии по измеренному изменению сопротивления. Разберем отдельно каждую из составляющих погрешности.

Погрешность измерения энергии поглощенной проволокой (вычисляемой по формуле 5) описывается следующим выражением

$$\frac{\Delta E_{II}}{E_{II}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\alpha \cdot \rho_0)}{\alpha \cdot \rho_0}\right)^2 + \left(\frac{4 \cdot \Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta R)}{\Delta R}\right)^2} \quad (12),$$

где Δc – отклонение удельной теплоемкости от ее среднего значения в интервале температур от T_0 (начальной температуры проволоки) до $T_0 + \Delta T$, $\Delta(\alpha \cdot \rho_0)$ – изменение температурного коэффициента сопротивления с температурой, Δd – отклонение диаметра проволоки от его среднего значения 0.05мм , ΔR – погрешность измерения скачка сопротивления проволоки.

При нагреве пучком различные участки проволоки находятся при температурах от 500°C на периферии пучка до 900°C в центре пучка, и соответственно имеют теплоемкости от $0,140\text{Дж}/\text{г}\cdot\text{K}$ до $0,148\text{Дж}/\text{г}\cdot\text{K}$ [7]. Паспортное значение отклонения диаметра проволоки от его среднего значения 0.05мм один процент. Максимальное отклонение температурного коэффициента сопротивления $\alpha \cdot \rho_0$ от значения $2,77 \cdot 10^{-8}\text{Ом}\cdot\text{см}/\text{K}$ в интервале температур от 500°C до 900°C составляет менее 3%. Погрешность измерения ΔR связана с остыванием проволоки за время проведения измерений. Сделаем оценку энергии теряемой проволокой, остывание идет только за счет теплового излучения, а мощность излучения с единицы поверхности по закону Стефана-Больцмана равняется σT^4 . В эксперименте проволоки не нагреваются выше 900°C , следовательно, имея диаметр $d = 0.05\text{мм}$ и суммарную длину 4 метра, излучают не более 70Вт, мощность же нагрева пучком составляет примерно 1кВт (на проволоку попадает 0,2% пучка имеющего мощность 600кВт). Таким образом, за время инъекции проволока вследствие излучает менее 7% поглощаемой энергии. Относительная погрешность измерения энергии поглощенной проволокой в соответствии с формулой 12 будет не более $\sqrt{(6\%)^2 + (3\%)^2 + (4 \cdot 1\%)^2 + (7\%)^2} = 11\%$.

Теперь оценим погрешность расчета энергосодержания пучка по известному количеству тепла поглощенному проволокой. Вначале покажем, что если расстояние между проволоками мало по сравнению с радиусом пучка, то значение энергосодержания,

полученное при измерениях проволочным калориметром, не будет отличаться от измеренного сплошным калориметром, поглощающим весь пучок. Пусть $w_{инж}(x, y)$ – плотность энерговыделения пучка на поверхности сплошного калориметра. Поглощенная энергия пучка дается интегралом от $w_{инж}(x, y)$ по поверхности калориметра:

$$E_{пуч} = \iint_{S_K} w_{инж}(x, y) dx dy \quad (13).$$

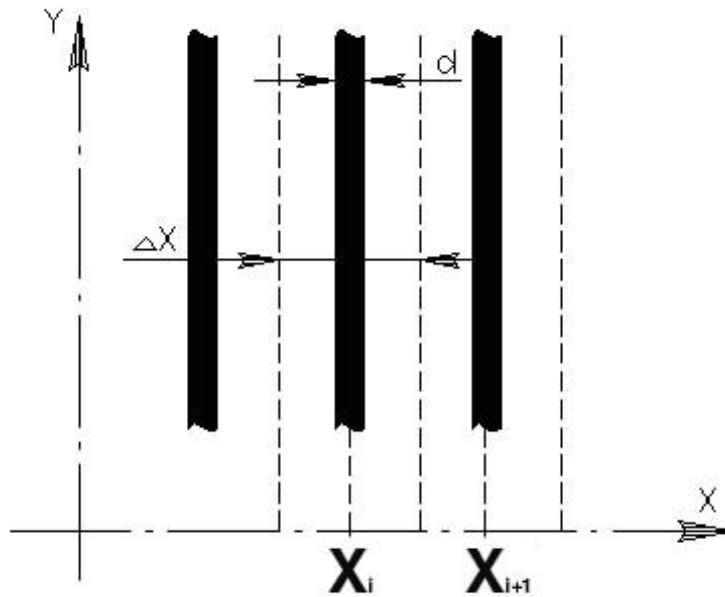


Рис. 14 Пояснение к расчету погрешности.

При измерениях проволочным калориметром энергосодержание пучка рассчитывается по формуле 6. Найдем погрешность измерений, получающаяся при переходе от сплошного калориметра к проволочному, погрешность – это разница выражения 13 и 6.

$$\Delta E_{пуч} = \sum_i \int_0^L dy \int_{x_i - \frac{\Delta X}{2}}^{x_i + \frac{\Delta X}{2}} w(x, y) dx - \frac{\Delta X}{d} \cdot \sum_i \int_0^L dy \int_{x_i - \frac{d}{2}}^{x_i + \frac{d}{2}} w(x, y) dx =$$

Учитывая, что $w(x, y)$ существенно меняется на расстояниях больших, чем расстояние между проволоками, и можно произвести разложение $w(x, y)$ вблизи точки X_i (рис 14).

$$\begin{aligned}
&= \sum_i \int_0^L dy \int_{X_i - \frac{\Delta X}{2}}^{X_i + \frac{\Delta X}{2}} \left[w(X_i, y) + \frac{\partial w(X_i, y)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w(X_i, y)}{\partial x^2} \right] dx - \\
&- \frac{\Delta X}{d} \cdot \sum_i \int_0^L dy \int_{X_i - \frac{d}{2}}^{X_i + \frac{d}{2}} \left[w(X_i, y) + \frac{\partial w(X_i, y)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 w(X_i, y)}{\partial x^2} \right] dx =
\end{aligned}$$

После интегрирования по dx и сокращения одинаковых членов разных знаков получаем следующее выражение.

$$= \frac{\Delta X}{24} (\Delta X^2 - d^2) \sum_i \int_0^L dy \frac{\partial^2 w(X_i, y)}{\partial x^2}$$

Используя полученную формулу, найдем погрешность для Гауссова распределения

профиля плотности тока пучка, когда $w(x, y) = A \cdot \exp\left(-\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}\right)\right)$. Относительная погрешность измерений равна:

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta E_{\text{луч}}}{E_{\text{луч}}} &= \frac{\Delta X}{24} (\Delta X^2 - d^2) \frac{\sum_i \int_0^L dy \frac{\partial^2 w(X_i, y)}{\partial x^2}}{\frac{\Delta X}{d} \sum_i \int_0^L d \cdot w(X_i, y) dy} = \frac{(\Delta X^2 - d^2) \sum_i \frac{\partial^2 w(X_i)}{\partial x^2}}{24 \sum_i w(X_i)} = \\
&= \frac{(\Delta X^2 - d^2) \sum_i \left[\frac{4X_i^2}{a^4} - \frac{2}{a^2} \right] \cdot \exp\left(-\frac{X_i^2}{a^2}\right)}{24 \sum_i \exp\left(-\frac{X_i^2}{a^2}\right)} = \frac{(\Delta X^2 - d^2) \sum_i \left[\frac{X_i^2}{a^2} - \frac{1}{2} \right] \cdot \exp\left(-\frac{X_i^2}{a^2}\right)}{8 \cdot a^2 \sum_i \exp\left(-\frac{X_i^2}{a^2}\right)}
\end{aligned}$$

Учитывая, что последний член в полученном выражении (с суммой по i в числителе и знаменателе) практически равен нулю для Гауссова профиля и, по крайней мере, меньше единицы для профилей близких к Гауссу, можно написать оценку для относительной погрешности

$$\frac{\Delta E_{\text{луч}}}{E_{\text{луч}}} < \frac{(\Delta X^2 - d^2)}{8 \cdot a^2} \approx \frac{1}{8} \left(\frac{\Delta X}{a} \right)^2 \quad (14),$$

где a – радиус пучка на уровне $1/e$, d – диаметр проволоки, ΔX – расстояние между проволоками.

В экспериментах на ГДЛ радиус пучка в месте установки диагностики $a = 7,5$ см, расстояние между проволоками $\Delta X = 2,2$ см, $d = 0,005$ см. В соответствии с 14 отличие от энергии, которую измерит сплошной калориметр менее 1%.

Основная погрешность восстановления энергосодержания пучка по измеренной энергии, поглощенной калориметром связана с тем, что калориметр поглощает не все 100% энергии частиц пучка попадающих на проволоку, часть частиц пучка отражается. Оценим погрешность, связанную с отражением высокоэнергичных атомов водорода от рабочей поверхности калориметра. Для нашей оценки будем считать вольфрамовую проволоку цилиндром диаметром d с идеально чистой поверхностью, а поток атомов водорода моноэнергическим с энергией $E = 17$ кэВ и не имеющим углового разброса. Значение коэффициента отражения энергии в зависимости от угла падения возьмём согласно [8]:

$$R_E(\phi) = 0.66 \exp \left\{ - 0.415 \sqrt{\frac{M_2}{(M_1 + M_2)}} \cdot \frac{E[eV]}{Z_1 Z_2 \sqrt{Z_1^{\frac{2}{3}} + Z_2^{\frac{2}{3}}}} \cos(\phi) \right\} \quad (15),$$

где M_1 , M_2 , Z_1 и Z_2 – масса и заряд налетающей и мишенной частицы соответственно, ϕ – угол между направлением скорости частиц в пучке и нормалью к поверхности проволочки. Тогда относительная величина энергии уносимой отражёнными от поверхности проволочки частицами:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\int_0^{\pi/2} R_E(\phi) \cos(\alpha) d\alpha}{\int_0^{\pi/2} \cos(\alpha) d\alpha} = 14\% \quad (16),$$

где α – угол между нормалью к плоскости, проходящей через все проволоки калориметра, и нормалью к поверхности проволочки. Инжектируемый пучок падает под углом 45° к плоскости калориметра, поэтому из геометрии следует выражение $\cos(\phi) = \cos(45^\circ) \cdot \cos(\alpha)$, которое использовано при вычислении интеграла 16.

В действительности коэффициент отражения энергии сильно зависит от наличия примесей на поверхности материала. Как указывается в работе [8], наличие примесей легких элементов на поверхности материала состоящего из тяжелых атомов ведет к уменьшению среднего атомного номера материала мишени, что соответственно влечет за собой уменьшение коэффициента отражения энергии в соответствие с формулой 15. В экспериментах была использована проволока, которая в процессе производства протягивается через графит, поэтому на проволоке могут присутствовать частицы

углерода. Для сравнения при отражении от цилиндра, диаметр которого равен диаметру проволоки, а поверхность которого состоит только из углерода, величина $\frac{\Delta Q}{Q}$ равняется всего 0,7%. В общем, для реальной поверхности коэффициент отражения энергии может в несколько раз отличаться от полученных 14 процентов, причем в меньшую сторону, так как легкие элементы, присутствующие на поверхности могут только уменьшить этот коэффициент. Поэтому отражение части энергии пучка нельзя учесть увеличением энергосодержания на 14%, но 14% можно принять для оценки сверху систематической ошибки, которую вносит отражение части энергии пучка от поверхности проволоки. Для избавления от этой систематической ошибки следует произвести калибровку калориметра, с целью выяснения отражающих свойств его поверхности.

Выводы.

В результате проделанной работы была сконструирован и собран проволочный калориметр, имеющий высокую прозрачность, с помощью которого возможно измерение энергосодержания пучка с поглощением лишь незначительной его доли (менее 1%). Произведены испытания данного устройства, в ходе которых была выяснена необходимость его прогрева до температуры 500°C для избавления от ошибки связанной с уносом части энергии пучка адсорбированными на поверхности проволоки частицами. Разработана и реализована схема регистрации сопротивления проволок, позволяющая избавиться от наводок создаваемых пучком, плазмой, магнитным полем и производить измерение энергосодержания пучка в таких условиях. Проволочным калориметром произведены измерения энергосодержания пучка инжектора “СТАРТ-3” на ГДЛ. Полученные результаты в пределах ошибки измерений совпадают с расчетным энергосодержанием пучка.

В дальнейшем планируется оснастить проволочными калориметрами все инжекторы на ГДЛ, для измерения энергии захваченной плазмой. Кроме того, планируется улучшить систему регистрации сопротивления проволоки, с целью произвести измерения не только энергосодержания, но мощности пучков. Обработка данных с двух многоканальных калориметров, позволит восстанавливать динамику линейной плотности мишенной плазмы во время мощной атомарной инъекции.

В заключение хочу сказать спасибо и выразить благодарность всему коллективу ГДЛ и особенно моему научному руководителю – *С.В. Мурахтину* за полезные советы и помощь в проведении данной работы.

Список литературы.

1. *V.V.Mirnov, D.D.Ryutov*, Sov. Tech. Phys. Lett. 5 (1979) 279.
2. *P.A. Bagryansky, A.A. Ivanov, E.P. Kruglyakov, A.M. Kudryavtsev, Yu.A. Tsidulko, A.V. Andriyash, A.L. Lukin, Yu.N. Zouev*, “Gas dynamic trap as high power 14 MeV neutron source”. Fusion engineering and design, 70 (2004).
3. *Иванов А.А., Рютов Д. Д.*, “О плазменных нейтронных генераторах для испытания материалов”. Препринт 89-80 ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1989.
4. *Котельников И.А., Рютов Д.Д., Цидулко Ю.А., Катышев В.В., Комин А.В., Кривошеев В.М.*, “Математическая модель источника нейтронов на основе газодинамической ловешки”. Препринт 90-105 ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1990.
5. *П.А.Багрянский, В.Н.Бочаров, П.П.Дейчули, А.А. Иванов, А.Н.Карпушов, В.В.Максимов, А.И.Рогозин, Т.В.Саликова.* “Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инжекции мощных атомарных пучков”. Препринт 93-70 ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1993.
6. *M. Osakabe, Y. Takeiri, T. Takanashi, K. Tsumori, S. Okamura, K. Matsuoka, R. Akiyama, E. Asano, O. Kaneko, Y. Kawamoto, T. Oka, and CHS-Group*, “Development of fast response calorimeter for neutral beam shine-through measurement on CHS”. Review of scientific instruments, volume 72, number 1, January 2001.
7. *Справочник “Физические величины”, под редакцией И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова*, Энергоатомиздат, Москва, 1991, с. 200.
8. *В.А. Курнаев, Е.С. Машкова, В.А. Молчанов*, “Отражение легких ионов от поверхности твердого тела”. Энергоатомиздат, Москва, 1985.
9. *32nd EPS Conference of Plasma Phys. Tarragona, 27 June -1 July 2005 ECA Vol.29, P-5.077 (2005)*

Содержание

Новосибирск – 2006 год.....	1
Введение.....	2
Выводы.....	24
Содержание.....	26