

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Орлов Юрий Викторович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Калибровка системы пироэлектрический болометров для измерения  
энергии потока плазмы в ГДЛ**

Электромагнитный практикум. 2 курс, группа №19306

**Научный руководитель:**

к.-ф.-м.н. Солдаткина Е. И., с.н.с. ИЯФ СО  
РАН

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Терещенко О. Е.

Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы было получение калибровочных коэффициентов системы пироэлектрических болометров, применяемых для измерения энергии потока плазмы в магнитной ловушке открытого типа. Получив коэффициенты, необходимо было измерить поток энергии плазмы и показать радиальные профили энергии в конкретный промежуток времени. Данная работа носит диагностический характер и посвящена практическому измерению потерь энергии при работе газодинамической ловушки, чтобы на основе этих данных судить о её эффективности.

Для получения практического калибровочного коэффициента болометров использовался мощный лазер, а для сравнения вычислен теоретический коэффициент. Болометры в количестве 21 штуки были помещены в установку и проверены на работоспособность. Последним шагом был запуск установки и получение данных с болометров, обработка и анализ которых является основным результатом данной работы.

Ключевые слова: пироэлектрический болометр, магнитная ловушка открытого типа, радиальный профиль энергии плазмы.

Оглавление	
Введение.....	4
Основная часть .....	6
Получение калибровочных коэффициентов .....	6
Теоретическая часть .....	6
Методика измерения.....	8
Результаты обработки данных.....	11
Погрешности .....	13
Сравнение с теоретическими оценками .....	14
Заключение .....	15
Список использованной литературы.....	15

## Введение

Плазма – четвертое агрегатное состояние вещества, ионизованный квазинейтральный (суммарный электрический заряд равен нулю) газ, то есть газ, в котором значительная часть атомов или молекул потеряли хотя бы по одному электрону, превратившись при этом в положительно заряженные ионы. Плазма является естественным состоянием вещества при его нагревании до температуры порядка  $10^8$  К.

Основная задача физики плазмы – реализация управляемой реакции термоядерного синтеза, так как термоядерный реактор намного безопаснее ядерного реактора в радиационном отношении, ведь содержание в нем радиоактивных веществ сравнительно невелико, а энергия, вырабатываемая таким реактором, будет гораздо больше. В связи с этим по всему миру существует множество различных установок по созданию и удержанию плазмы. В таких установках стенки вакуумной камеры не могут выдержать температуру плазмы, поэтому одним из вариантов изоляции плазмы является магнитное поле. В последнее время получила распространение так называемая пробкотронная конфигурация магнитного поля, представляющая собой длинную область однородного магнитного поля с максимумами на краях. Ловушки, созданные по такому принципу, называются открытыми (рис.1).

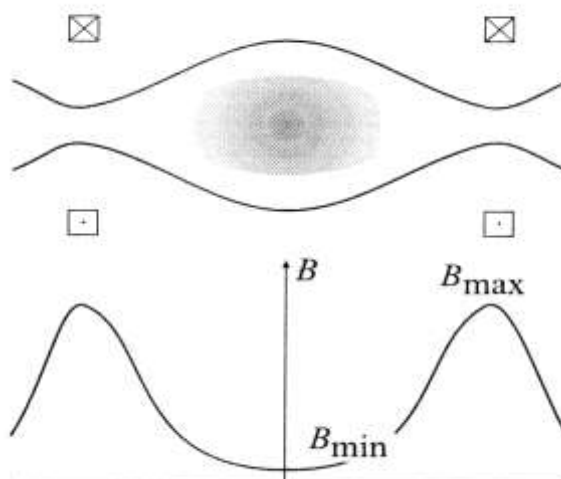


Рисунок 1. Силовые линии пробкотрона и профиль магнитного поля на оси

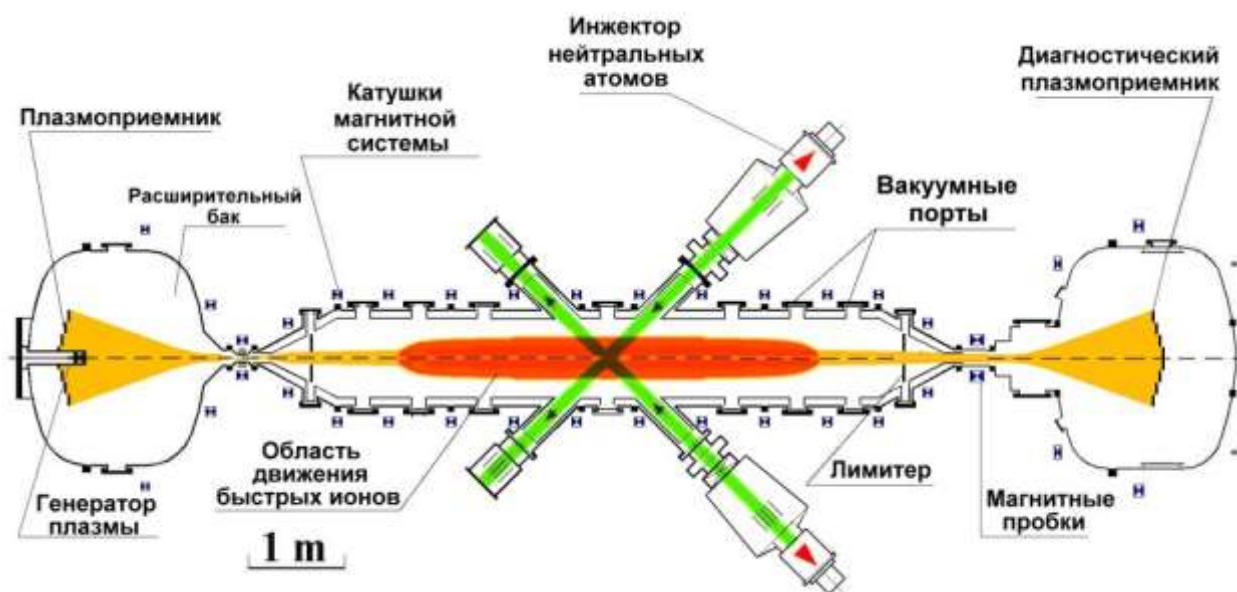


Рисунок 2. Схема газодинамической ловушки

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН является одним из вариантов пробкотрона (рис. 2). Основная ее часть – это соленоид длиной 7 м с магнитным полем на оси 0,35 Тл, на концах которого расположены магнитные пробки с полем 13 Тл. Предварительная плазма создается путем СВЧ-пробоя нейтрального газа (дейтерия), заранее напущенного в установку. Затем включаются инжекторы нейтральных атомов, которые нагревают ионы плазмы до высоких термоядерных температур порядка 10 кэВ, а те в свою

очередь за счет кулоновских столкновений нагревают электроны плазмы до температуры 200 кэВ.

В силу конфигурации магнитного поля любая открытая ловушка имеет прямой контакт плазмы с торцевым приемником плазмы, а значит, часть энергии, удерживаемой в ловушке, теряется вдоль магнитного поля. Одной из ключевых диагностических задач на таких установках является знание величины этих потерь и их радиального распределения.

Для того, чтобы измерить энергию потока плазмы, применяется система из 21 пироэлектрического болометра, расположенного на торцевом плазموприёмнике ГДЛ крестообразно. Калибровочные коэффициенты этих болометров необходимо было теоретически оценить перед непосредственным измерением.

## **Основная часть**

### **Получение калибровочных коэффициентов**

#### **Теоретическая часть**

Пироэлектрики – это теплоэлектрические преобразователи энергии, в основе принципа работы которых лежит пироэлектрический эффект. Суть этого эффекта заключается в том, что в некоторых диэлектриках присутствует спонтанная поляризация кристаллов  $P_c$ , и при изменении температуры спонтанная поляризация также меняется. Пропорциональность изменения вектора поляризованности  $\Delta P_c$  от изменения температуры объясняется тем, что электрический момент каждого диполя зависит от его ориентации как  $\Delta p = p_0(1 - \cos(\theta))$ , а так как угол  $\theta$  мал, то его можно считать пропорциональным тепловому движению. Поэтому изменение температуры приводит к изменению поляризованности диэлектрика, причём зависимость линейная.

Соответственно нам необходимо нагревать пироэлектрик с одной стороны и измерять изменение поляризованности, которое будет выражаться в появлении электрического тока на второй его поверхности.

Схема болометра с основными его элементами приведена на рисунке 3:

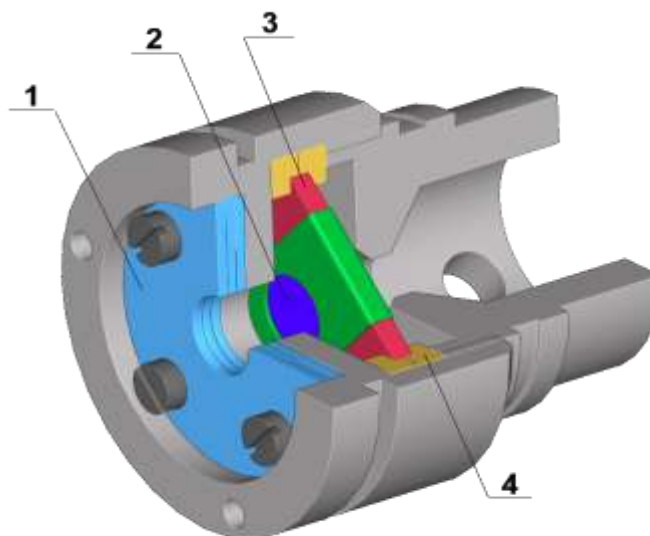


Рисунок 3. Болометр: 1 – держатели экранирующих сеток, 2 – пьезоэлектрическая керамика, 3 – плата усилителя, 4 – вакуумная резина.

Основным рабочим элементом болометра является тонкая посеребрённая таблетка из ниобата лития – пьезоэлектрической керамики. Таблетка закрыта от колебаний потенциала плазмы экранирующей сеткой. Так как напряжение на таблетке очень мало, сигнал необходимо усиливать, для этого применяется операционный усилитель, расположенный на той же плате, что и таблетка пьезоэлектрика. Для подавления акустических колебаний таблетку помещают между двумя кольцами вакуумной резины.

Для оценки теоретического коэффициента пересчета напряжения болометра в мощность была использована формула из [4]

$$k = \frac{d}{S * R * \frac{\gamma}{c * \rho}},$$

где  $S = 0,28 \text{ см}^2$  – площадь таблетки,  $d = 0,05 \text{ см}$  – её толщина,  $R = 4,7 * 10^6 \text{ Ом}$  – сопротивление обратной связи в схеме усилителя.

Для ниобата лития коэффициент  $\frac{\gamma}{c * \rho} = 2,8 * 10^{-9} \text{ Кл*см/Дж}$ .

## Методика измерения



Рисунок 4. Установка для калибровки болометров.

Чтобы откалибровать болометр, мы использовали мощную лазерную указку и генератор, с помощью которого могли осуществлять короткий (5 мс) либо длинный (5 с) импульс лазера. Лазером мы светили на болометр, который был подключён к батарее для питания микросхемы усилителя и к осциллографу, с помощью которого мы и измеряли напряжение, которое выдаёт болометр (рис. 4).

Мощность лазера необходимо было измерить для вычисления коэффициентов, а также периодически проверять, чтобы она существенно не изменилась, для этого был использован прибор для измерения мощности оптического излучения.



На рис. 5 приведен участок графика мощности лазера, который усреднялся:

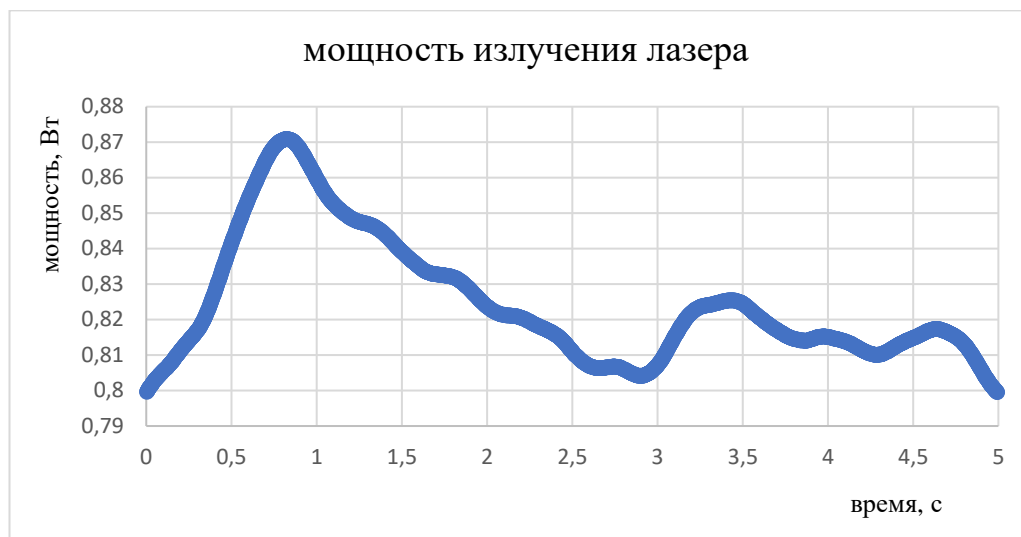


Рисунок 5. Измерение мощности лазера. Зависимость мощности лазера от времени.

График напряжения болометра с осциллографа:

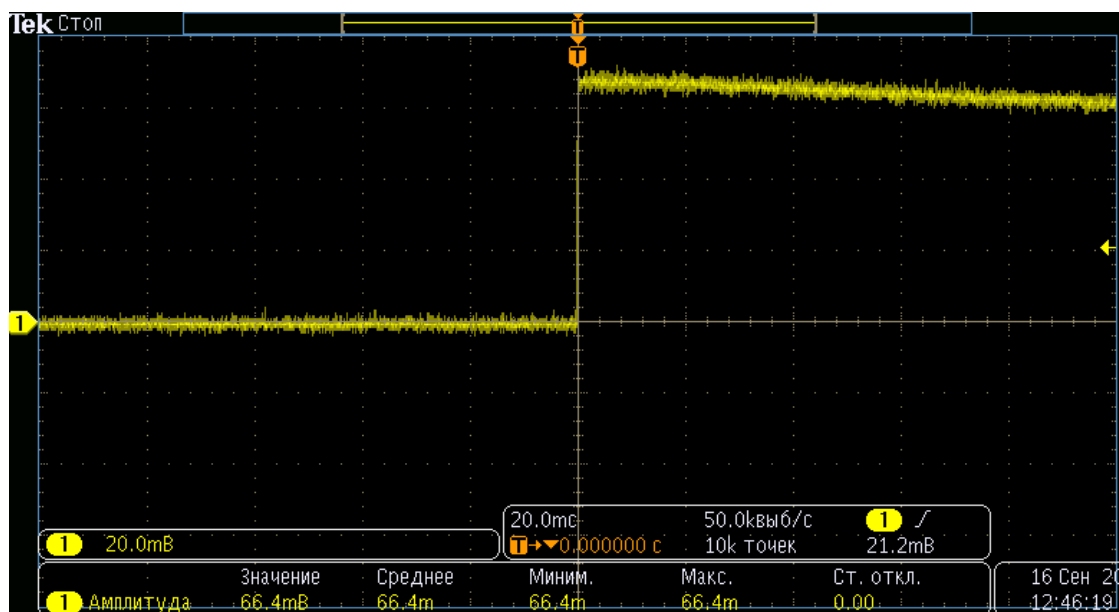


Рисунок 6. График с осциллографа.

Среднее значение мощности лазера за все проведенные измерения, необходимое для вычисления коэффициентов, приведено в таблице 1.

При подсчёте калибровочных коэффициентов использовались амплитудные значения напряжения с болометров. Практическая формула для калибровочного коэффициента:

$$k = \frac{W * B}{S * U},$$

где  $W$  – средняя мощность лазера,  $U$  – напряжение, измеренное на болометре,  $S$  – площадь таблетки болометра,  $B = 0,42$  – коэффициент прозрачности экранирующей сетки.

Некоторые болометры показывали инвертированные сигналы, но корректные по величине, поэтому при дальнейшей обработке это также было учтено.

Теоретический калибровочный коэффициент зависит только от материала и размеров пироэлектрика, поэтому он одинаков для всех болометров.

Таблица 1. Результаты калибровки болометров.

№ болометра	Амплитуда, мВ	inv.	k теор, Вт/ В*см <sup>2</sup>	k практ, Вт/ В*см <sup>2</sup>	Рлазера, Вт	σ, Вт
1	66,8	-	13,56	18,7	0,835	0,15
2	65,2	-		19,2		
3	70	-		17,9		
4	66,4	-		18,9		
5	66,4	-		18,9		
6	74	+		16,9		
7	66,5	-		18,8		
8	69,6	+		17,1		
9	68	-		18,4		
10	69,2	-		18,1		
11	70	-		17,9		
12	70,4	+		17,8		
13	65,6	-		19,1		
14	73,6	-		17,0		
15	68,8	-		18,2		
16	67,2	-		18,6		
17	66,4	-		18,8		
18	63,2	-		19,8		
19	66,4	-		18,8		
20	63,6	-		19,7		
21	70,4	-		17,8		

### Результаты обработки данных

В ходе обработки сигналов с болометров в рабочих импульсах ГДЛ обнаружилось, что не все болометры работают исправно, некоторые из них показали некорректные данные. Возможная тому причина – отслоение углеродной плёнки, которая была нанесена на таблетки болометра, чтобы она максимально поглощала лазерное излучение. Поэтому в работе приводится профиль плотности мощности лишь по одному из радиусов, на котором все датчики работали корректно.

На рисунке 7 представлен график плотности мощности потока плазмы от времени одного из болометров:

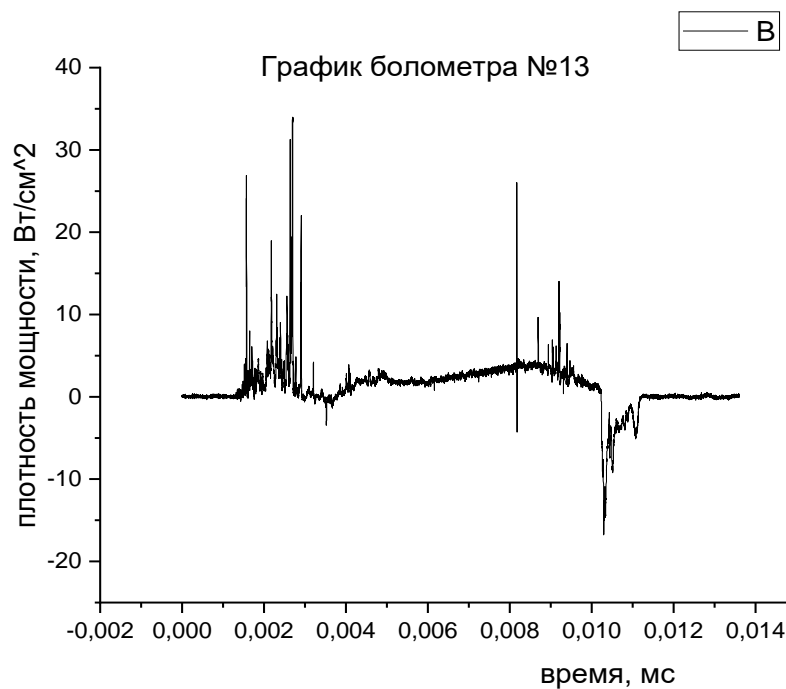


Рисунок 7. Данные с болометра. Плотность мощности потока плазмы.

Как можно заметить на графике болометра № 13, первые 4 миллисекунды разряда на сигнале видны шумы, обусловленные работой гиротрона, создающего предварительную плазму, затем начинается период, когда внутри ГДЛ создаётся горячая плазма за счёт захвата нейтральных атомов, а примерно после 9 миллисекунды, когда инжекторы выключаются, наблюдается переполюсовка пироэлектрика.

Далее представлены радиальные профили плотности мощности излучения в разные периоды времени:

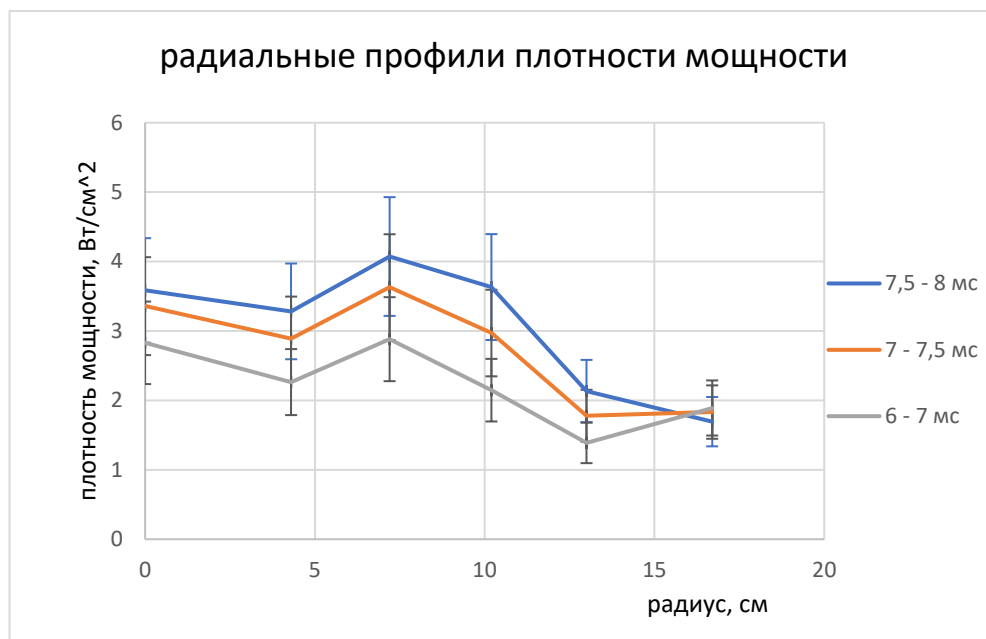


Рисунок 8. Радиальные профили энергии плазмы.

Точки на радиальном профиле являются средними значениями за соответствующий период времени, в качестве погрешности посчитано среднеквадратичное отклонение от среднего.

### Погрешности

Относительная погрешность измеренного калибровочного коэффициента складывается из относительных погрешностей измерения напряжения на болометре и мощности лазера. Погрешность измерения напряжения составила 4%. Погрешность измерения мощности можно оценить из рис. 5, она составляет 17%. Итоговая погрешность оказывается равной 21%

## Сравнение с теоретическими оценками

Чтобы понять, насколько верны измеренные значения мощности, можно сделать теоретическую оценку ожидаемых потерь энергии из ловушки и сравнить их с полученными значениями. Формула для полной мощности, покидающей ловушку [5]:

$$Q \approx 1,53n \cdot 8T_e \sqrt{\frac{T_e}{2\pi m_i}} \cdot S,$$

где  $n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  – плотность плазмы в ГДЛ,  $T_e = 150 \text{ эВ}$  – ее температура,  $S = 36 \text{ см}^2$  – площадь пробки,  $m_i$  – масса иона дейтерия. При подстановке этих значений величина потерь энергии оказывается порядка 100 кВт. Чтобы оценить эту величину из наших измерений, нужно взять полученный профиль плотности мощности и проинтегрировать его по площади плазмоприемника, считая, что профиль имеет азимутальную симметрию.

Так как диагностический плазмоприёмник один, то результат, вычисленный по формуле выше, нужно поделить пополам.

Результат интегрирования экспериментально полученных профилей дает оценку для полной мощности:  $P_\Sigma \approx 46 \text{ кВт}$ , что находится в пределах погрешности относительно теоретически оцененного значения.

## Заключение

Проведена калибровка, измерены мощности потоков энергии плазмы, обнаружены некоторые некорректности в работе датчиков, которые предстоит устранить.

По результатам данной работы мы можем судить о том, как распределяется энергия потока плазмы, можем наблюдать некоторую динамику этого распределения. Конечно, для полной диагностики и исследования эффективности газодинамической ловушки необходима целая серия подобных опытов, моей же целью было показать работоспособность системы. Считаю, что цель работы достигнута в приемлемом объёме.

## Список использованной литературы

- 1) Сайт ГДЛ <http://inp.nsk.su/nauka/nauchnye-podrazdeleniya/gdl>
- 2) Ю.М. Поплавко: “Физика активных диэлектриков”. Ростов-на-Дону. Издательство южного федерального университета, 2009. 477 с.
- 3) Котельников. И.А. Лекции по физике плазмы. / И.А. Котельников. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 384 с.
- 4) Багрянский П. А., Бочаров В. Н., Дейчули П. П., Иванов А. А., Карпушов А. Н., Максимов В. В., Рогозин А. И., Саликова Т. В. Диагностический комплекс установки ГДЛ для изучения нагрева плазмы при инжекции мощных атомарных пучков. Новосибирск: ИЯФ СО РАН. 1993. (Препринт ИЯФ СО РАН; №70).
- 5) Мирнов В.В., Рютов Д.Д. Газодинамическая ловушка// Итоги науки и техники: Физика плазмы. – 1988. – Т.8.