

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

Факультет

ФИЗИЧЕСКИЙ

Кафедра Физики плазмы

Направление подготовки 03.03.02 ФИЗИКА

Образовательная программа: БАКАЛАВРИАТ

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Никишина Алексея Викторовича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Измерение параметров плазменной струи в установке ГОЛ-НВ с помощью  
тройного ленгмюровского зонда

—

**«К защите допущена»**

Заведующий кафедрой,

ученая степень, звание

...../.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

«.....».....20...г.

**Научный руководитель**

канд. физ.-мат. наук

доцент

Иванов И. А./.....

(фамилия, И., О.) / (подпись, МП)

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2016

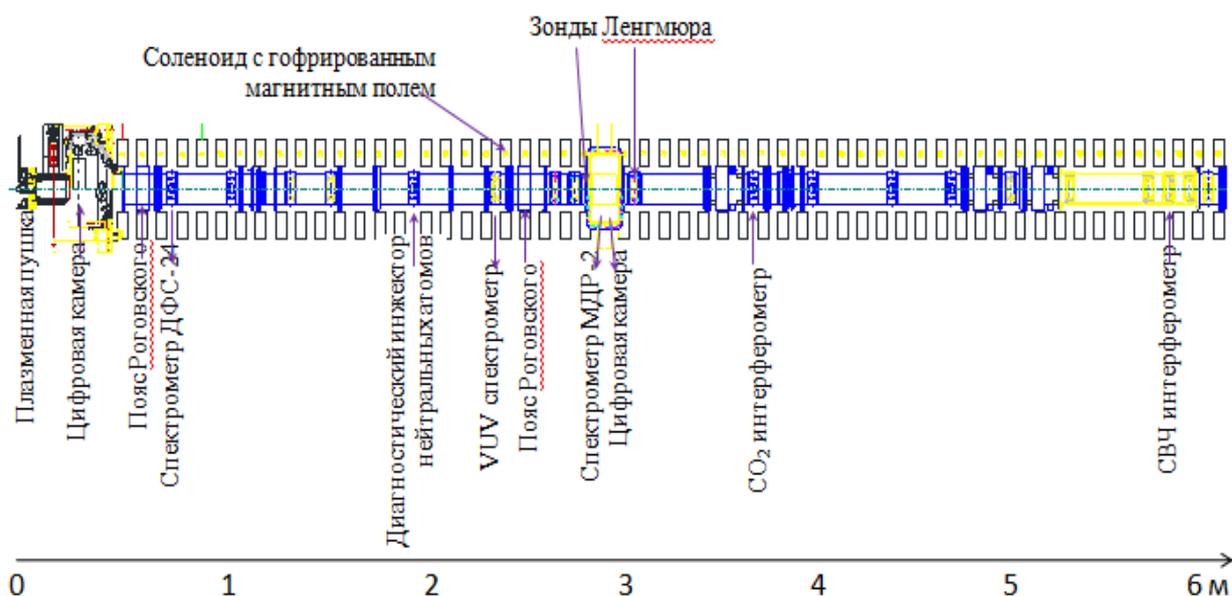
## Оглавление

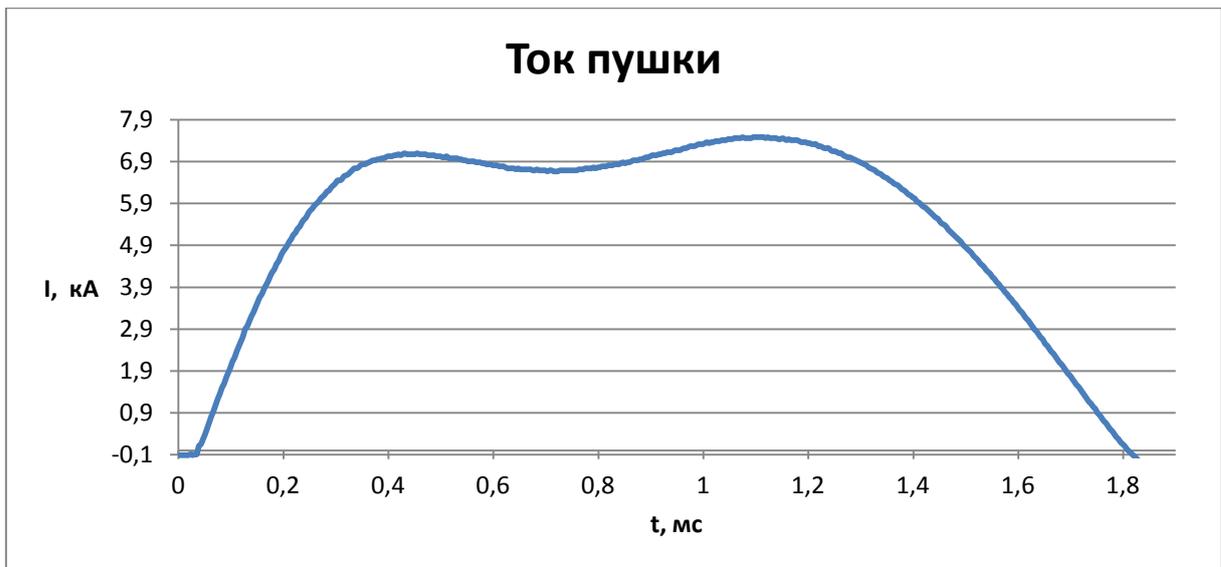
Введение.....	3
1. Теория.....	7
1.1 Принцип работы зонда Ленгмюра.....	7
1.2 Двойной зонд.....	8
1.3 Тройной зонд.....	9
2. Описание эксперимента.....	11
2.1 Конструкция зонда и схема измерений.....	11
2.2 Оптическая развязка.....	13
2.3 Калибровка опторазвязки.....	14
3. Результаты.....	17
3.1 Неподвижный зонд.....	17
3.2 Подвижный зонд.....	18
3.3 Тройной зонд.....	21
3.4 Анализ результатов и погрешности.....	21
Заключение.....	23
Список литературы.....	24

## Введение

Одним из перспективных вариантов решения проблемы управляемого термоядерного синтеза является создание реактора на основе открытой многопробочной ловушки, предложенной Г. И. Будкером, В. В. Мирновым и Д.Д. Рютовым [1]. Идея метода заключается в создании соленоида с гофрированным магнитным полем, так что частицы захватываются множеством последовательно стоящих пробкотронов. В результате движение частиц плазмы приобретает диффузионный характер, а время удержания плазмы значительно возрастает. Эта идея была реализована в Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера на установке ГОЛ-3 [2]. Установка ГОЛ-3 представляла собой многопробочную открытую ловушку длиной 12 м (основной соленоид) с пробочным отношением  $R = B_{\max}/B_{\min} = 4,8 T_{\text{л}}/3,2 T_{\text{л}} = 1,5$ . Нагрев плазмы осуществлялся с помощью релятивистского электронного пучка. На ней удалось получить плазму плотностью  $10^{18}$ - $10^{22}$  м<sup>-3</sup> и температурой до 2 кэВ. Время удержания плазмы составило до 1 мс. На ГОЛ-3 проводились исследования по многим направлениям, в том числе пучковый нагрев плотной плазмы, удержание ионной компоненты плазмы, продольные потери энергии за счёт электронной теплопроводности, стеночное удержание плотной плазмы, а также исследование воздействия плазменных и электронных потоков на твёрдые материалы. Благодаря ГОЛ-3 многопробочные ловушки стали рассматриваться как один из вариантов термоядерного реактора. Хотя наиболее близкие к реакторным параметры плазмы были получены на токамаках, у открытых ловушек отсутствует ограничение по давлению плазмы. Если давление плазмы становится сравнимо с давлением магнитного поля, ловушка переходит в режим «стеночного» удержания – вытолкнутое из плазмы магнитное поле будет концентрироваться у стенок камеры и всё равно продолжать удерживать плазму. Этот эффект позволяет удерживать плазму со значительно большей плотностью. Так, плотность плазмы в ГОЛ-3 примерно в 30 раз выше, чем в среднем на токамаках. В настоящий момент не известно ни одной причины, которая принципиально ограничивала бы возможность увеличения основных термоядерных параметров (плотность, температура, время удержания) в многопробочных ловушках.

Установка ГОЛ-NB представляет собой один из этапов глубокой реконструкции установки ГОЛ-3. Задачей установки ГОЛ-NB является проверка эффективности работы многопробочной магнитной системы для удержания умеренно столкновительной плазмы с низким уровнем турбулентности [3]. Сама установка имеет длину около 6 м и состоит из 55 стандартных катушек соленоида установки ГОЛ-3, расположенных с шагом 11 см. Катушки создают однородное поле с индукцией до 4,5 Тл на одной половине установки, и гофрированное магнитное поле с максимальной индукцией 4,8 Тл, периодом 22 см и пробочным отношением 1,4 на другой. Внутри катушек соленоида размещена вакуумная камера из немагнитной нержавеющей стали с внутренним диаметром 10 см, составленная из секций камеры установки ГОЛ-3. Камера рассчитана на рабочий вакуум  $10^{-3}$  Па, но в будущем планируется установка новой камеры диаметром 13 см, рассчитанной на более высокий вакуум. Нагрев плазмы планируется осуществлять нейтральным пучком (что отражено в виде индекса NB в названии установки), но в данный момент источником плазмы служит плазменная пушка с дуговым источником, установленная у одного из торцов установки. Питание дугового источника осуществляется от формирующей линии с конденсаторной батареей ёмкостью 3200 мкФ, имеющей рабочее напряжение до 5 кВ. На другом торце камеры расположена заглушка из нержавеющей стали. На рис. 1 представлена текущая конфигурация установки ГОЛ-NB и основной диагностической аппаратуры.





б

Рис 1. а - Текущая конфигурация установки ГОЛ-НВ и диагностической аппаратуры; б – зависимость тока на плазменной пушке от времени.

Существует множество различных методик диагностики плазмы. Одна из них предполагает использование электрического зонда, предложенного Ленгмюром в 1923 году [4]. Зонды Ленгмюра активно используются для диагностики параметров околоземной плазмы, газовых разрядов и периферийной плазмы токамаков [5]. Среди достоинств данного метода можно отметить конструктивную простоту, надёжность и достаточно большой объём получаемых данных. Однако общим недостатком зондовых методик является сравнительно невысокая точность измерений. Для корректной работы зонда измерительная аппаратура должна находиться под плавающим потенциалом. Это порождает ряд проблем. Как правило, для снятия показаний с зонда Ленгмюра используют гальванически отвязанный АЦП с собственным источником питания (аккумулятор, батарейка). Однако у этого метода есть свои недостатки. Во-первых, гальванически отвязанный АЦП достаточно сложно включить в общую систему регистрации данных, что усложняет его использование на больших установках. Во-вторых, независимый источник питания может истощиться в самый неподходящий момент, оставив аппаратуру без питания во время эксперимента. В качестве альтернативы данному решению было предложено использовать аналоговую оптическую развязку ПЛ-300. Это позволит использовать для регистрации данных стандартный АЦП, включённый в общую сеть сбора

данных. Среди недостатков оптической развязки следует отметить наличие проходной ёмкости самой развязки, искажающей сигнал, а также проблемы с быстродействием и линейностью передачи сигнала, что затрудняет использование опторазвязки в некоторых экспериментах.

Целью данной работы было измерить локальные значения плотности и температуры плазменной струи в установке ГОЛ-НВ. Для этого была сконструирована механическая часть зонда и механизм позиционирования, разработана электрическая схема включения и питания зонда, откалибрована измерительная схема и оценена возможность использования опторазвязки для снятия показаний с зонда.

# 1. Теория

## 1.1 Принцип работы зонда Ленгмюра

Согласно теории, изложенной в [6], в простейшем случае одиночный зонд Ленгмюра представляет собой металлический электрод, помещённый в плазму. При подаче напряжения на этот электрод возникает электрическое поле, которое меняет характер движения и плотность заряженных частиц вблизи него.

Зонд, работающий в режиме отталкивания частиц одного сорта, например электронов, создаёт вокруг себя область, где плотность частиц другого сорта выше, чем в окружающей невозмущённой плазме. При большой разнице потенциалов зонда и плазмы переходный слой работает как диод, ток в котором ограничен полем пространственного заряда собираемых зондом частиц. На внешнюю границу слоя поступает поток частиц, по порядку величины равный тепловому  $-\frac{1}{4}n_eT_e$ . При изменении напряжения толщина слоя подстраивается под соответствующую плотность тока следуя закону трёх вторых:  $j \propto \frac{U^2 \sqrt{e}}{9\pi \sqrt{m} d^2}$  где  $m$  – масса частиц,  $d$  – размер слоя. В случае, когда толщина пространственного слоя заряда мала по сравнению с характерным размером зонда, задача становится фактически одномерной.

Когда зонд находится под большим отрицательным потенциалом по отношению к окружающей плазме, он отталкивает почти все электроны. Тогда все ионы, попадающие на внешнюю границу слоя, собираются зондом, а плотность тока на него не зависит от потенциала и равна ионному току насыщения. Если потенциал зонда положительный и достаточно велик, чтобы отталкивать все ионы, собираются все электроны, попавшие на границу слоя, и плотность тока равна электронному току насыщения.

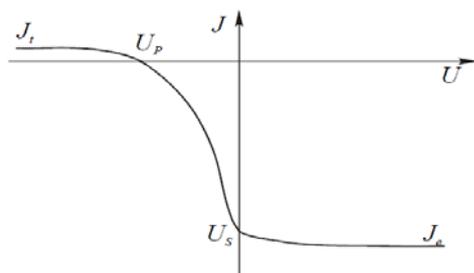


Рис. 2 Вольтамперная характеристика одиночного зонда Ленгмюра

В реальных условиях насыщение, чаще всего, отсутствует. Особенно это касается электронной ветви характеристики зонда. Причин этому может быть несколько, в частности с ростом потенциала увеличивается толщина слоя и, как следствие, эффективная площадь собирающей поверхности зонда.

По мере уменьшения отрицательного потенциала на зонде ток ионов на него не меняется и остаётся равен ионному току насыщения. Вместе с тем всё больше электронов оказываются способны преодолеть потенциальный барьер и достичь зонда, так что в какой-то момент суммарный ток на зонд становится равным нулю. При этом говорят, что зонд находится под плавающим потенциалом  $U_p$  относительно плазмы. Этот потенциал определяется балансом ионного тока насыщения  $j_i = \frac{1}{4}en_i\langle v_i \rangle$  и электронного тока  $j_e = \frac{1}{4}en_e\langle v_e \rangle e^{eU/T_e}$  с энергиями, превышающими потенциальный барьер  $eU_p$ . Считая температуры ионов и электронов равными, можно получить оценку плавающего потенциала одиночного зонда в водородной плазме.  $U_p = \frac{T}{e} \ln \sqrt{\frac{M}{m}} \approx 3,3 \frac{T}{e}$ . Измеряя плавающий потенциал зонда и используя приведённые формулы, можно получить значение температуры плазмы. Однако зачастую это бывает трудно осуществить на практике, так как сама плазма, как правило, находится под некоторым потенциалом относительно земли установки.

## 1.2 Двойной зонд

Если в плазме присутствуют большие электрические поля, снятие вольтамперной характеристики затруднено. В таких случаях используют двойной зонд Ленгмюра. Такой зонд состоит из двух одиночных зондов, между которыми прикладывается напряжение и измеряется протекающий при этом ток. Суммарный ток на оба зонда равен нулю. Поскольку тепловой ток электронов много больше, чем ионный, то вне зависимости от поданного между ними напряжения, каждый из зондов находится под отрицательным потенциалом по отношению к плазме. Следовательно, на каждый зонд идёт ионный ток насыщения. Электроны же собираются в режиме отталкивания, так что плотность электронного тока на зонды соответственно

$\frac{1}{4}en\langle v_e \rangle e^{-eU_1/T_e}$  и  $\frac{1}{4}en\langle v_e \rangle e^{-eU_2/T_e}$ , где  $U_1$  и  $U_2$  – потенциалы зондов.

Предполагая, что площадь собирающей поверхности зондов одинакова, ток, текущий в цепи, можно записать следующим образом:

$$J = S * \left( \frac{1}{4} en \langle v_i \rangle - \frac{1}{4} en \langle v_e \rangle e^{-eU_1/T_e} \right) = S * \left( \frac{1}{4} en \langle v_e \rangle e^{-eU_2/T_e} - \frac{1}{4} en \langle v_i \rangle \right)$$

Примем во внимание, что полный ионный ток на зонды равен электронному, т.е.

$$2j_{i0} = j_{e0} \left( e^{-eU_1/T_e} + e^{-eU_2/T_e} \right)$$

Выразим электронный ток насыщения через ионный и подставим в формулу для полного тока в цепи двойного зонда

$$J = S \left( j_{i0} - \frac{2j_{i0}}{e^{-eU_1/T_e} + e^{-eU_2/T_e}} e^{-eU_1/T_e} \right) = S \frac{j_{i0} \left( e^{-eU_2/T_e} - e^{-eU_1/T_e} \right)}{e^{-eU_1/T_e} + e^{-eU_2/T_e}}$$

Или  $J = S * j_{i0} \tanh \left( \frac{e(U_1 - U_2)}{2T_e} \right)$ . В этом выражении гиперболический тангенс равен единице, если  $T_e \ll e(U_1 - U_2)$

### 1.3 Тройной зонд

Удобство тройного зонда Ленгмюра заключается в возможности одновременно определить плотность и температуру плазмы, не снимая вольтамперную характеристику. Такой зонд состоит из трёх одинаковых близко расположенных электродов. Два из них включаются в режиме двойного зонда, причём потенциал на них выбирается таким образом, чтобы двойной зонд работал в режиме насыщения. Третий электрод находится под плавающим потенциалом. Схема включения тройного зонда и ВАХ одиночного зонда представлены на рис 3

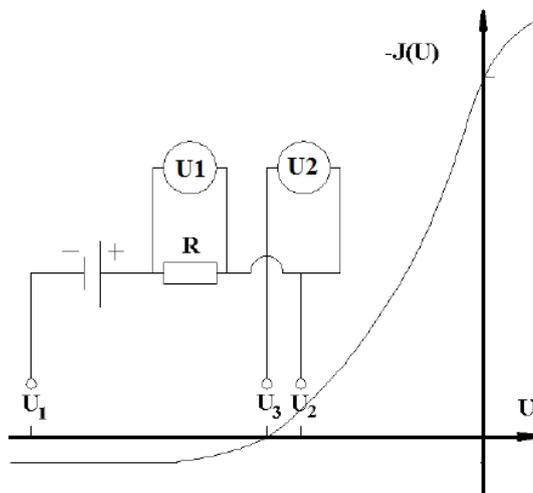


Рис 3. ВАХ одиночного зонда Ленгмюра и схема включения тройного зонда.

Электроды 1 и 2 образуют двойной зонд, при этом электрод 1, находящийся под большим отрицательным потенциалом, отталкивает все электроны, и ток на него равен ионному току насыщения. На электрод 2, потенциал которого по отношению к плазме также отрицателен, идёт ионный ток насыщения и удвоенный электронный ток. Суммарный ток на оба электрода равен нулю из уравнения непрерывности для стационарных условий. Потенциал зонда 2 можно найти из соотношения  $2 * \frac{1}{4} en \langle v_i \rangle = \frac{1}{4} en \langle v_e \rangle e^{-eU_2/T_e}$ .

Электрод 3 находится под плавающим потенциалом, следовательно

$\frac{1}{4} en \langle v_i \rangle = \frac{1}{4} en \langle v_e \rangle e^{-eU_3/T_e}$ . Измеряя разность потенциалов между электродами 2 и 3 можно определить электронную температуру, воспользовавшись соотношением  $T_e = e(U_2 - U_3) / \ln 2$ . Зная электронную температуру и ток насыщения, а также считая температуры ионов и электронов равными, можно найти плотность плазмы по следующим формулам:

$$U_i = \sqrt{\frac{8eT_e}{\pi m_i}} \quad (1)$$

$$I_i = J_i S = \frac{1}{4} en U_i S \quad (2)$$

## 2. Описание эксперимента

### 2.1 Конструкция зонда и схема измерений

Зонд состоит из трёх вольфрамовых проволочек диаметром 0,3мм, каждая из которых помещена в кварцевый капилляр. Эти капилляры находятся внутри ещё одного капилляра большего радиуса. Общая длина зонда составляет 10 см, площадь собирающей поверхности равна 3 мм<sup>2</sup>

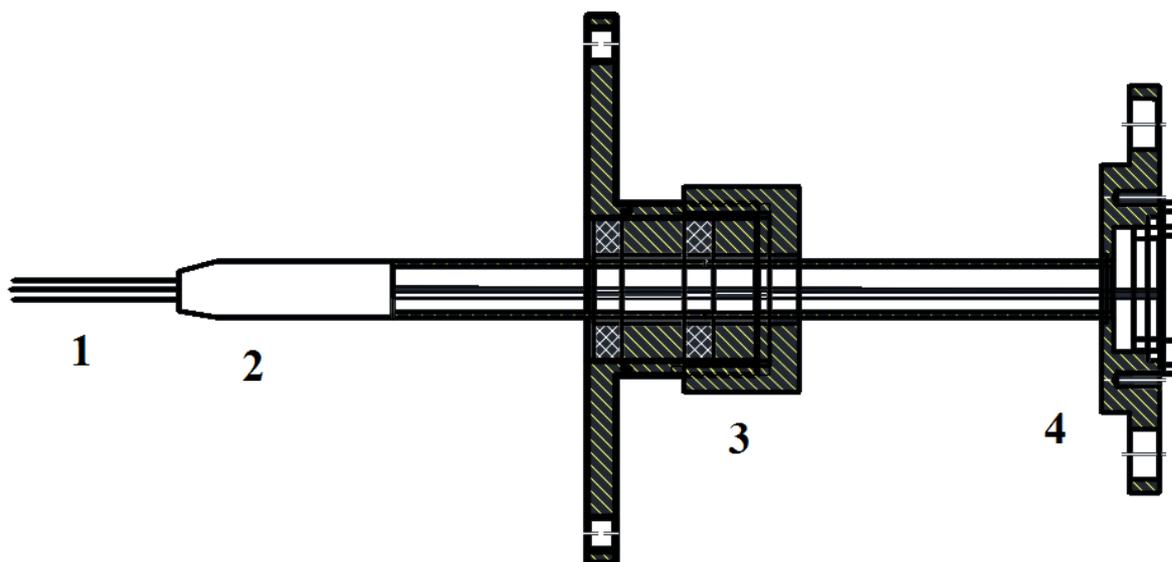
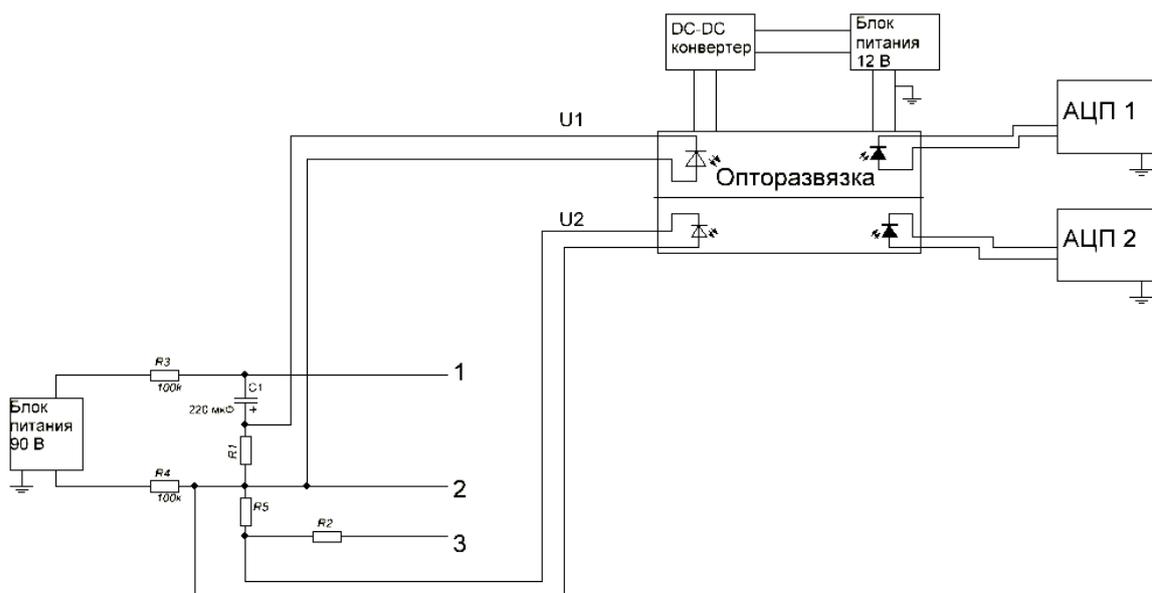


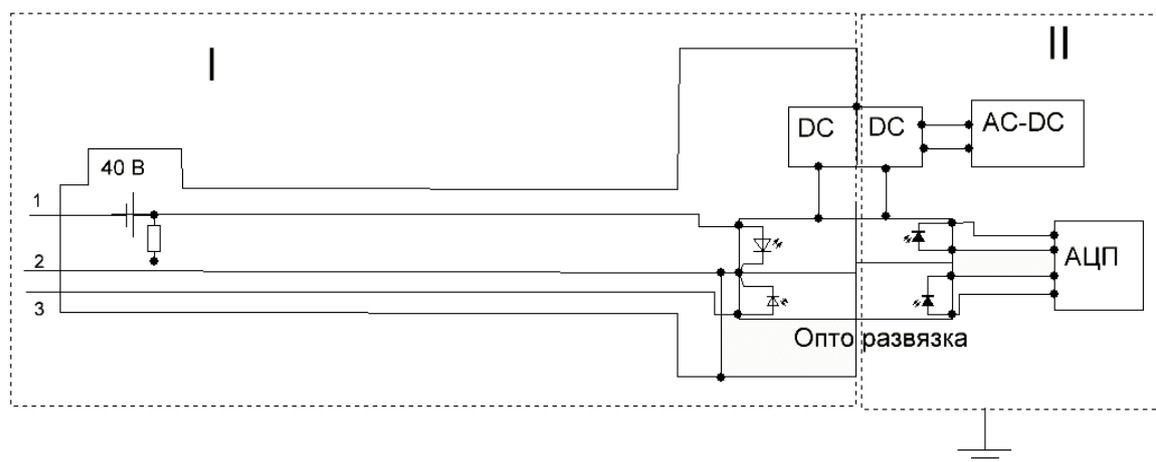
Рис 4. Конструкция зонда. 1 – контакты зонда; 2 – кварцевый капилляр; 3 – соединение Вильсона; 4 – вакуумный разъём.

Для проведения измерений в нескольких точках радиуса плазменной струи необходимо изменять положение зонда. Чтобы избежать остановки работы на длительный срок, необходимый для вскрытия установки и последующей откачки до рабочего давления, необходимо было найти способ изменять положение зонда без существенного нарушения вакуума установки. Для этого было выбрано соединение Вильсона. Оно позволяет как перемещать зонд по радиусу, устанавливая его на необходимом расстоянии от центра камеры, так и поворачивать его на нужный угол, ориентируя контакты зонда относительно магнитного поля.

Измерить плазменный потенциал – достаточно сложная задача, так как плазма находится под значительным (порядка двух киловольт) потенциалом относительно земли установки. Поэтому эксперимент проводился по следующей схеме (рис. 5).



а



б

Рис 5. Принципиальная схема эксперимента

Электроды 1 и 2 включаются по схеме двойного зонда. Чтобы обеспечить режим насыщения, на них подаётся напряжение 40-90 В. Напряжение подаётся с блока питания через большое сопротивление (100 кОм), и заряжает конденсатор, который, в свою очередь, обеспечивает питание зонда во время эксперимента. Электрод 3 находится под плавающим потенциалом. Для определения тока насыщения измеряется напряжение на резисторе с известным сопротивлением. Опторазвязка не пропускает сигналы с амплитудой выше 2,2 В, следовательно сопротивление нужно подобрать так, чтобы при наибольшем возможном токе насыщения напряжение было в пределах 2 В. С другой стороны, при малой плотности и, соответственно, малом токе насыщения, и малом

сопротивлении напряжение также будет очень малым. Чтобы избежать связанных с этим проблем и расширить диапазон измеряемых величин, вместо одного резистора установлен магазин сопротивлений, на котором можно выставить значения  $R = 2, 10, 33$  и  $100$  Ом. При измерении плавающего потенциала возникает схожая проблема, поэтому между электродами 3 и 2 установлен делитель напряжения 1:3. Сигналы с резисторов подаются на вход опторазвязки. Выход опторазвязки с помощью экранированного коаксиального кабеля соединён с АЦП. Опторазвязка требует отдельного питания напряжением 12 В. Для этого используется компьютерный БП (блок питания). Во избежание наводок, земля блока питания оторвана от его корпуса.

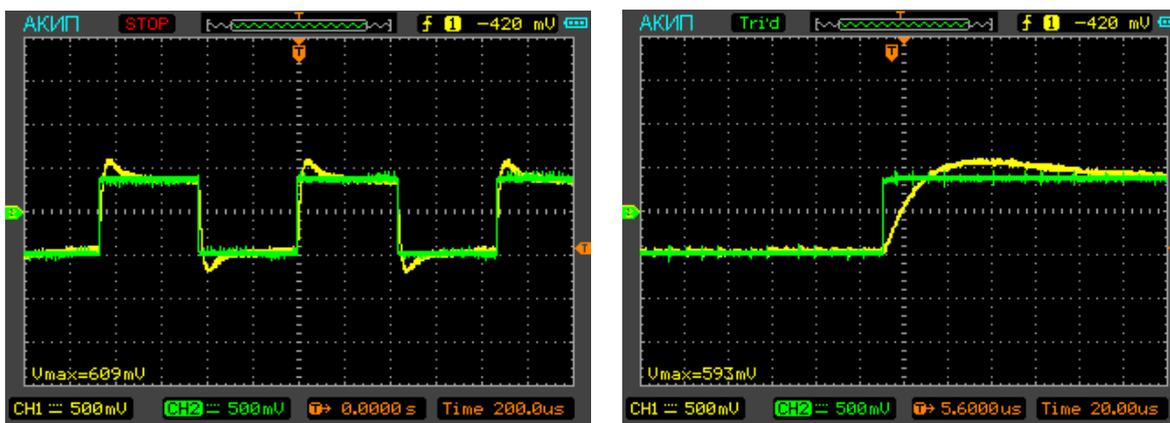
Измерительная схема состоит из 2 частей, между которыми есть значительная разность потенциалов (рис 5б). Часть I находится под потенциалом плазмы, часть II заземлена. Сигнал между этими частями передаётся с помощью оптической развязки, питание самой развязки осуществляется с помощью DC-DC конвертера с изоляцией до 3 кВ.

Так как установка ГОЛ-NB в процессе работы является мощным источником наводок, были предприняты меры по минимизации помех. Так, все кабели помещены внутрь заземлённых экранов, опторазвязка и измерительная схема помещены внутрь металлического корпуса. Кабель, соединяющий зонд и измерительную схему, представляет собой 2 витые пары, помещённые в общую экранирующую оплётку. В измерительной схеме присутствуют несколько фильтров высоких и низких частот. В частности, перед выходом измерительной схемы расположен фильтр высоких частот. Питание опторазвязки также осуществляется через фильтр, что позволяет избежать наводок со стороны блока питания.

## **2.2 Оптическая развязка**

Задача оптической развязки – без искажений передать сигнал между двумя частями схемы, находящимися под разным потенциалом. Для этого она должна быть линейной и обладать приемлемым быстродействием. Линейность обеспечивается следующим образом. Сигнал подаётся на не инвертирующий вход первого операционного усилителя, выход которого подключен к светодиоду. Сигнал со светодиода с коэффициентом  $K_1$  поступает на фотодиод, через который подключена обратная связь первого операционного усилителя. Таким образом, первый операционный усилитель работает так, что напряжение на его входе равно напряжению на 4 контакте опторазвязки. Сигнал на выходе опторазвязки регистрируется





а

б

Рис 7. Оценка быстродействия опторазвязки. Зелёным цветом выделен сигнал на входе опторазвязки, жёлтым – сигнал на выходе.

На рис. 7а 1 клетка по вертикали соответствует 0,5В, по горизонтали – 0,2 мс, на рис 7б – 0,5В и 20 мкс соответственно. Как видно на рис 7б время установления сигнала составляет ~70 мкс, что значительно меньше времени существования плазмы в установке ГОЛ-НВ, которое составляет порядка нескольких миллисекунд.

Для проверки линейности опторазвязки на вход был подан пилообразный сигнал амплитудой 2 В. На рис. 8 представлены входной сигнал  $U_{in}$ , выходной сигнал  $U_{out}$ , а также зависимость отношения  $U_{out}/U_{in}$  от амплитуды входного сигнала.

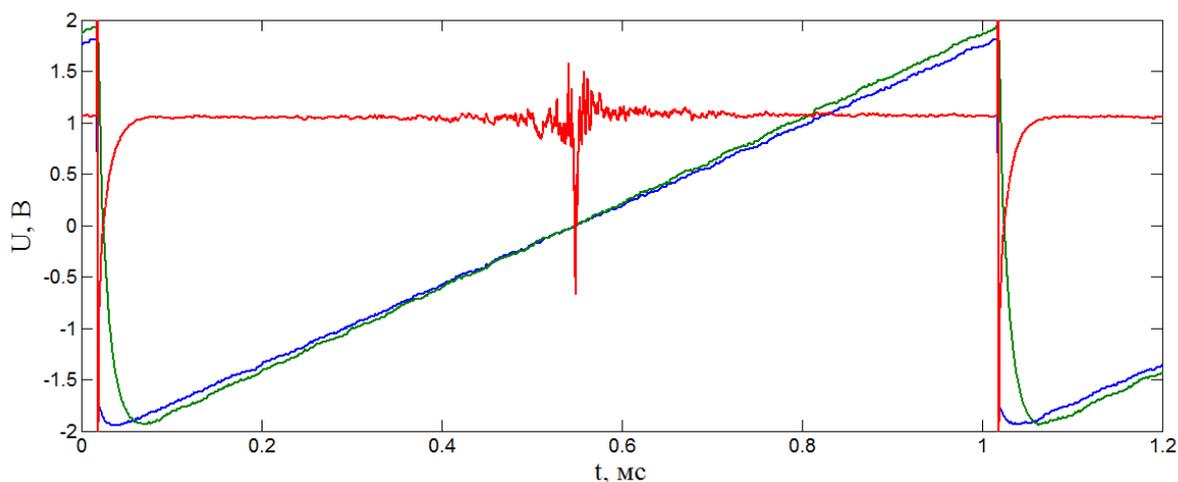


Рис 8. Проверка линейности опторазвязки. Синим цветом обозначен входной сигнал, зелёным – выходной, красным – отношение  $U_{out}/U_{in}$ .

На графике видно, что пока напряжение не превышает 2 В, коэффициент передачи остаётся постоянным и практически равным единице. Однако

если сигнал больше этого значения, наблюдаются искажения сигнала. В одних экспериментах наблюдался резкий рост коэффициента усиления, в других наблюдалось обрезание сигнала до 2 В. Можно предположить, что это связано с индивидуальными особенностями кристалла развязки. Скачки графика отношения вблизи 0 В связаны с делением на стремящуюся к нулю величину.

Уровень шумов при калибровке не превышал 0,1 В. Таким образом, использованная схема позволяет уверенно измерять напряжения 0,3 – 1,6 В. С учётом возможности установить несколько различных резисторов, использованная схема позволяет измерить от 3 до 800 мА, что теоретически соответствует плотности плазмы от  $2,5 \cdot 10^{13}$  до  $6,8 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Однако классическая теория применима только в случае, когда зонд работает в бесстолкновительном режиме. Этот режим реализуется при условии, что размер зонда значительно меньше длины свободного пробега

ионов  $\lambda_i = 2,28 \cdot 10^7 Z^{-1} \sqrt{m_i/m_p/n}$ . При температуре порядка 1 эВ и

диаметре контакта зонда 0,3 мм можно измерять плотность до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> (длина свободного пробега ионов при этих условиях составляет 3 мм). Использование зонда диаметром 0,1 мм дает возможность измерять плотность до  $10^{15}$  ( $\lambda = 0,9$  мм).

### 3. Результаты

#### 3.1 Неподвижный зонд

Изначально для проверки принципиальной возможности использования опторазвязки для измерения плазменных параметров была собрана одноканальная измерительная схема для измерения тока насыщения. В первых экспериментах использовался неподвижный зонд, установленный на расстоянии 1 см от центра камеры. Зонд состоял из 3 золочёных проволочек диаметром 0,1 мм и длиной 1,5 мм. Таким образом, эффективная площадь собирающей поверхности зонда  $S_{эф} = 0,1 \cdot 3,14 \cdot 1,5 = 0,47 \text{ мм}^2$ . Напряжение снималось с резистора сопротивлением 100 Ом. На рис. 9 представлены данные, полученные во время выстрелов 760 (напряжение смещения  $U = 90 \text{ В}$ ), и 770 (без напряжения смещения).

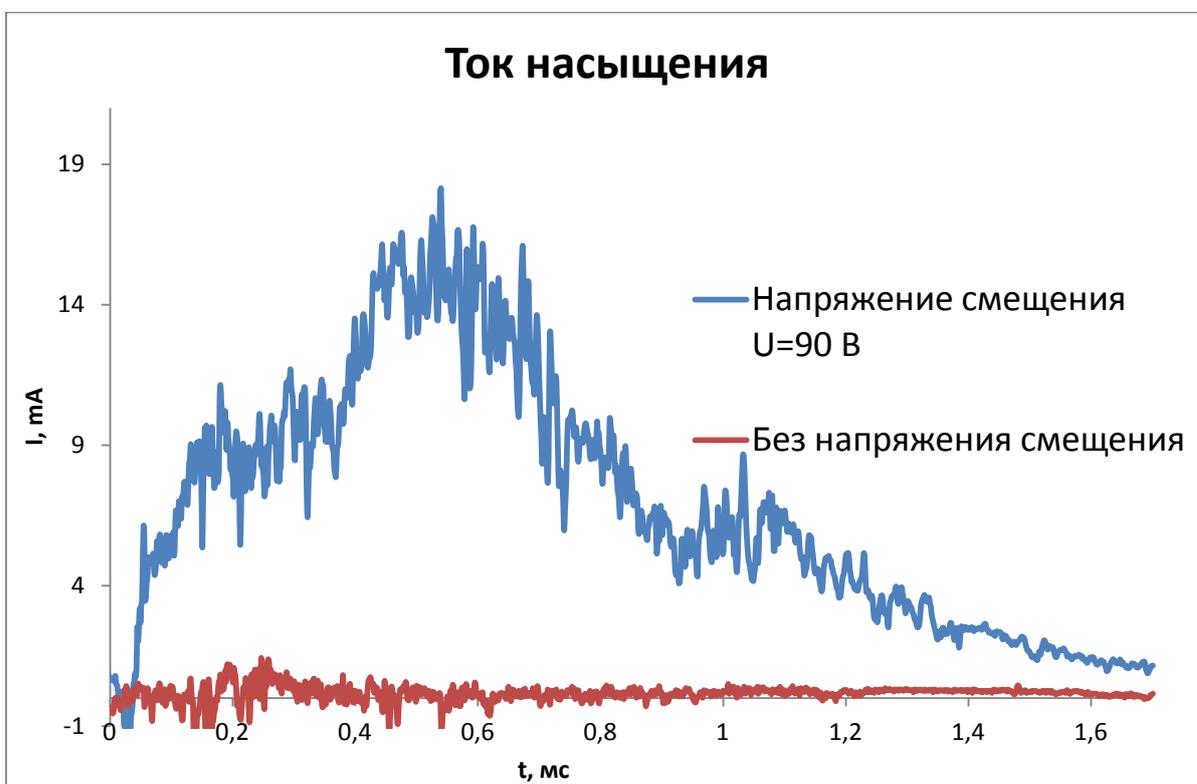


Рис 9. Результаты экспериментов на неподвижном зонде.

Согласно теории, в случае, когда на зонд не подаётся напряжение смещения, все электроды зонда находятся под плавающим потенциалом и ток между ними не течёт. Эксперимент показывает, что в отсутствие напряжения смещения, сигнал на зонде практически не отличается от нуля. Таким образом можно заключить, что токи, протекающие через плазму, и скачки плазменного потенциала практически не влияют на показания зонда.

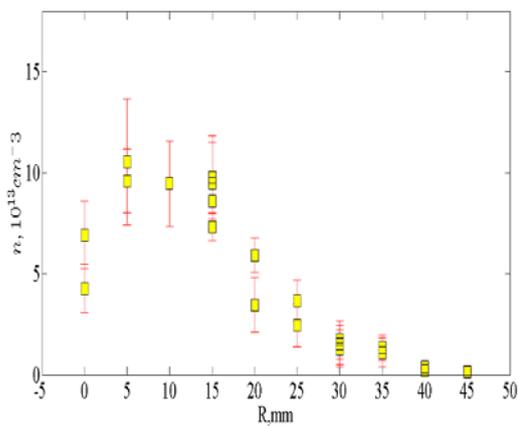
При обработке этих результатов температура электронов принималась  $\sim 2$  эВ. Такая оценка была получена на основании анализа спектра плазмы, в котором присутствуют линии многозарядных ионов. На основании этой оценки были получены следующие значения плотности (рис 10).



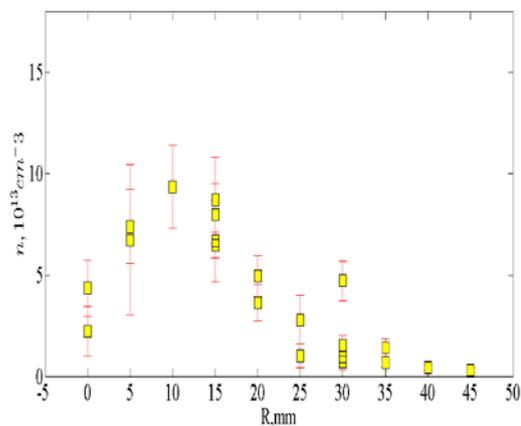
Рис 10. Плотность плазмы, полученная с помощью неподвижного зонда.

### 3.2 Подвижный зонд

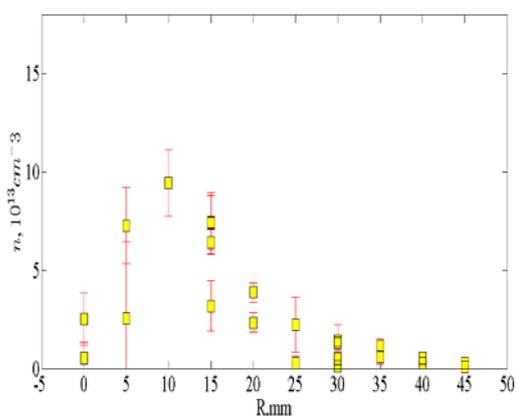
После серии успешных экспериментов неподвижный зонд сгорел (в результате пробоя). К тому моменту был введён в строй подвижный зонд. Зонд был установлен на расстоянии 0,5 м от диагностического инжектора. Это позволило соотнести показания зонда с данными, измеренными на инжекторе. Была проведена серия экспериментов (выстрелы 878 – 934) и измерены радиальные профили плотности плазмы в разные моменты времени. Установка работала в двух режимах: слабого (напряжение на пушке – 500 В, на соленоиде – 1500 В) и сильного (1500 и 4500 В соответственно) поля. Магнитное поле в месте установки зонда было однородным, зонд был сориентирован параллельно полю установки. Были измерены радиальные профили плотности плазмы в моменты времени 0,4 - 0,6 мс; 0,6 - 0,8 мс; 0,8 – 1 мс; 1 - 1,2 мс; 1,2 – 1,4 мс; 1,4 – 1,6 мс. При вычислении плотности использовалась оценка электронной температуры  $T_e \sim 2$  эВ, полученная на основании анализа спектра плазмы.



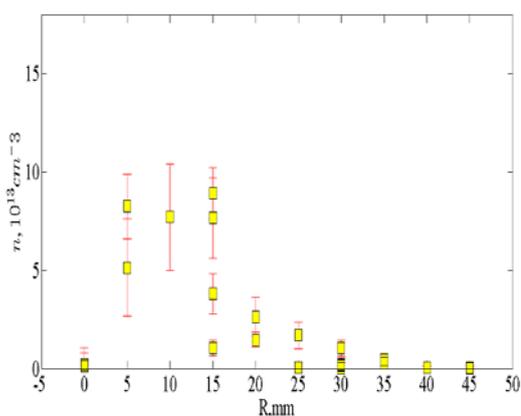
а



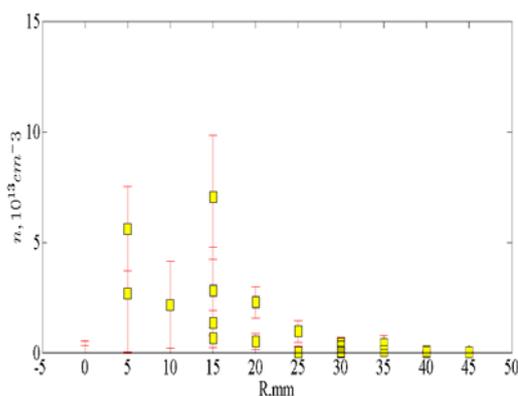
б



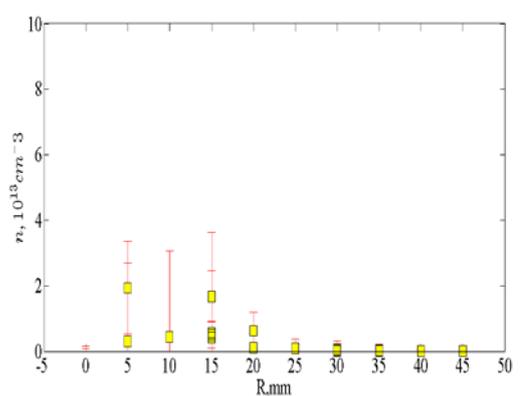
в



г

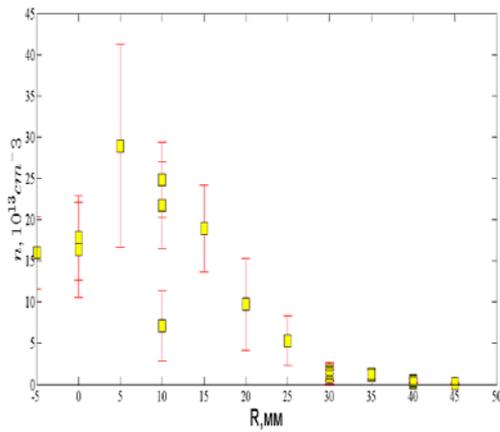


д

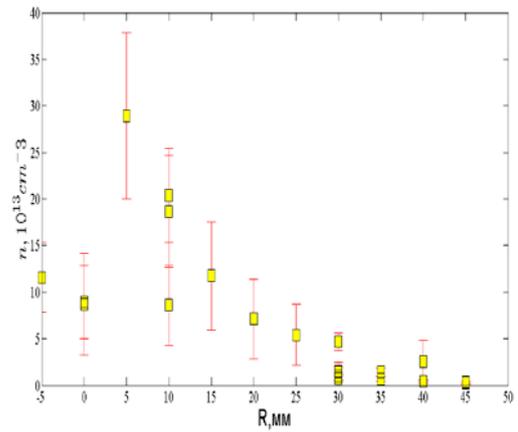


е

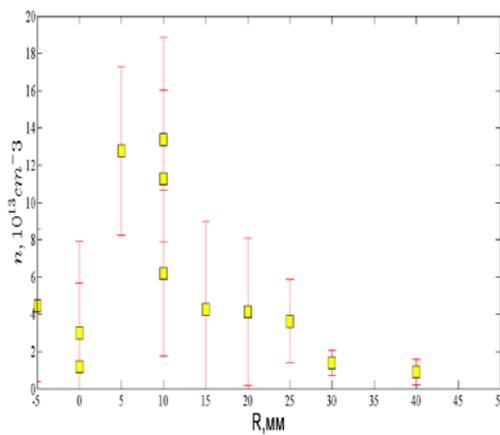
Рис 11. Радиальные профили плазмы при слабом поле в разные моменты времени. а - 0,4 - 0,6 мс; б - 0,6 - 0,8 мс; в - 0,8 - 1 мс; г - 1 - 1,2 мс; д - 1,2 - 1,4 мс; е - 1,4 - 1,6 мс. Усреднённое по всем выстрелам значение плотности в центре плазменного шнура за период времени 0,9-1,1 мс, полученное с помощью инжектора, составляет  $17 \pm 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Данные с зонда за тот же интервал времени дают значение  $10 \pm 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .



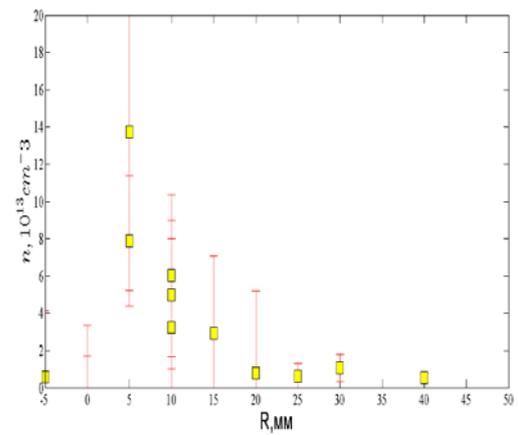
а



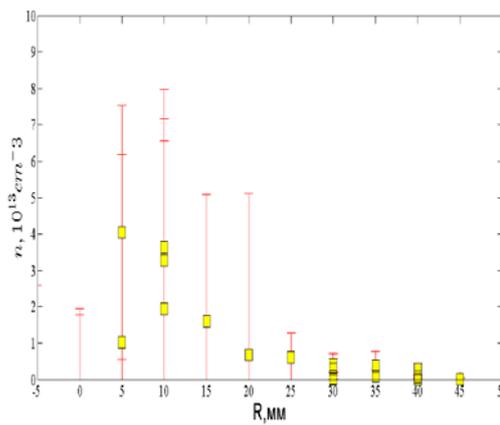
б



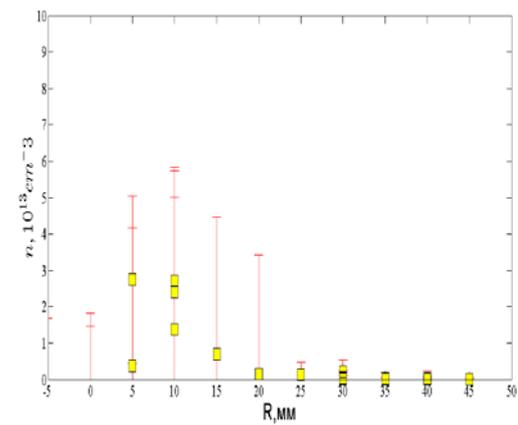
в



г



д



е

Рис 12. Радиальные профили плазмы при сильном поле в разные моменты времени. а – 0,4 – 0,6 мс; б – 0,6 – 0,8 мс; в – 0,8 – 1 мс; г – 1 – 1,2 мс; д – 1,2 – 1,4 мс; е – 1,4 – 1,6 мс. Данные с инжектора в интервале времени 0,9 – 1,1 мс показывают плотность  $5 \pm 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , данные с зонда в этом же интервале времени дают значение плотности  $7 \pm 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

### 3.3 Тройной зонд

Установленный на данный момент зонд имеет 3 контакта, однако работает он в режиме двойного зонда. Это связано с тем, что первоначально была собрана одноканальная измерительная схема. Двухканальная опторазвязка собрана и откалибрована, её работоспособность проверена на стенде. Однако для получения экспериментальных данных она пока не использовалась.

### 3.4 Анализ результатов и погрешности

Среди основных источников погрешности в данной работе можно выделить следующие:

- Отсутствие строгой теории, описывающей поведение зонда Ленгмюра в сильном магнитном поле, то есть в случае, когда ларморовский радиус для ионов меньше либо равен размеру зонда. В данном случае точно не известно, какова эффективная площадь собирающей поверхности электрода. В предельном случае очень сильного поля, когда плазма не может проникнуть в пространство между контактами зонда, за эффективную собирающую площадь следует принимать произведение диаметра на длину контакта  $d * l$ . В противоположном случае, при слабом поле, эффективной собирающей площадью следует считать периметр зонда, т.е.  $2\pi d * l$ . Таким образом, в предельном случае полученные значения плотности могут отличаться в 3 раза.
- Влияние загрязнения поверхности зонда. Часто при использовании зондов перед экспериментом их поверхность очищают, пропуская электрический ток. В данной работе такая очистка не проводилась.
- Погрешность измерения тока насыщения.

Для определения плотности использовалась формула (2) в которую вместо площади зонда  $S$  была подставлена эффективная собирающая площадь  $S_{эф}$ . В сильном поле, когда ларморовский радиус для ионов  $r_l = 0,01$  мм за эффективную площадь принималась площадь зонда, перпендикулярная магнитному полю, т.е. диаметр. В слабом поле  $r_l = 0,15$  мм, что равно радиусу электрода зонда. В этом случае для расчетов

$S_{эф}$  принималась равной  $\frac{2}{3} S$  зонда. При обработке результатов экспериментов с тонким зондом использовалась классическая зондовая теория, т.к. индукция поля в этих экспериментах составляла 0,5 Тл, а классическая теория для зонда диаметром 0,15 мм применима при значениях индукции магнитного поля до 2 Тл

Чтобы учесть загрязнение поверхности зонда в формулу (2) необходимо добавить множитель  $(1 + \kappa)$ , где  $\kappa$  – коэффициент вторичной электронной эмиссии. Для чистого вольфрама он известен, и при температуре 2 эВ практически не отличается от нуля, однако для загрязнённой поверхности получить его точное значение не представляется возможным. В данной работе этот коэффициент принимался равным  $\sim 0,2$ , что даёт погрешность определения плотности порядка 20%.

Проходная ёмкость измерительной схемы создаёт помехи и вносит систематическую ошибку в измерение тока насыщения. Эти помехи хорошо видны во время экспериментов без напряжения смещения (рис 9), их амплитуда в среднем  $\sim 0,15$  В. В зависимости от сопротивления абсолютная ошибка измерения тока насыщения может меняться от 1,5 мА (при  $R = 100$  Ом) до 75 мА ( $R = 2$  Ом), что даёт абсолютную погрешность определения плотности от  $2 \cdot 10^{12}$  до  $1 \cdot 10^{13}$  соответственно.

## **Заключение**

В ходе данной работы был сконструирован тройной зонд Ленгмюра для установки ГОЛ-NB. Была разработана электрическая схема питания и включения зонда с использованием оптической развязки. Схема откалибрована и обеспечивает передачу сигнала без существенных искажений. Собрана система позиционирования зонда, позволяющая устанавливать зонд в произвольном радиусе плазмы, а также ориентировать контакты зонда под определённым углом относительно магнитного поля установки. Проведены эксперименты с различными зондами, получены радиальные профили плотности плазмы в разные моменты времени. Результаты сопоставлены с данными, полученными при помощи диагностического инжектора. Двухканальная опторазвязка, обеспечивающая возможность одновременно измерить плавающий потенциал и ток насыщения, подготовлена к работе и в ближайшее время будет задействована в экспериментах.

## Список литературы

---

1. Г. И. Будкер, В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов, Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы. Письма в ЖТЭФ, 1971, 14, с.320.
2. А. В. Аржанников, В. Т. Астрелин, А. В. Бурдаков, Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3, Физика плазмы, 2005, том 31, №6, с 506 – 520.
3. В. В. Поступаев, В. И. Баткин, А. В. Бурдаков, Эксперименты по транспортировке замагниченной плазменной струи на установке ГОЛ-3, Физика плазмы, 2016, том 42, № 4, с. 321–330.
4. I. Langmuir, Scattering of electrons in ionized gases, Phys. Rev. 26, 585-613, 1925.
5. G. F. Matthews, Tokamak plasma diagnosis by electrical probes, Plasma Phys. Control. Fusion, 36, 1595-1628, 1994.
6. В.И. Давыденко, А.А. Иванов, Г. Вайсен, Экспериментальные методы диагностики плазмы, НГУ, Новосибирск, 1999.