

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Матрошилов Никита Олегович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Расчёт магнитного экрана для быстрой ионизационной лампы ПМИ-27

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18312

Научный руководитель:

О. А. Коробейникова

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

Д. С. Чуркин

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Аннотация

В работе проводились измерения концентрации остаточного газа в баке расширителя газодинамической плазменной ловушки (ГДЛ) при помощи двух ионизационных ламп ПМИ-27. Одна из ламп установлена в области сильного магнитного поля и защищена экраном; а другая – в области слабого поля. Были собраны схемы питания для ПМИ-27, а также проведены тестовые запуски для определения работоспособности ламп. Сравнение результатов с двух ламп показало эффективность работы магнитного экрана. Экранированная лампа может быть использована как вспомогательная диагностика в будущих экспериментах на ГДЛ.

Оглавление:

Введение	4
1. Теория	6
1.1 Магнитное удержание	6
1.2 Магнитное экранирование	8
2. Эксперимент	10
2.1 Установка ГДЛ	10
2.2 Ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-27	12
3. Результаты и обсуждение	15
4. Заключение	16
5. Список литературы.....	17

Введение

В настоящее время активно ведутся разработки в области управляемого термоядерного синтеза с целью обеспечения растущих потребностей человечества в электроэнергии. Существует два основных подхода к осуществлению управляемой термоядерной реакции: инерциальный термоядерный синтез (ИТС) и магнитное удержание плазмы. В случае ИТС используется очень быстрый нагрев малого количества термоядерного топлива мощными лазерами [1], что приводит к сжатию вещества и последующей реакции. Магнитное удержание опирается на явления, происходящие с заряженными частицами в магнитном поле, и сводится к удержанию и нагреву плазмы в некоторой ограниченной области пространства [2]. Системы магнитного удержания делятся на два класса: открытые и закрытые. В системах закрытого типа плазма не покидает объема удержания, тогда как в открытых ловушках она вытекает из установки вдоль силовых линий магнитного поля. Важной особенностью открытых ловушек является наличие прямого контакта плазмы со стенкой, поскольку явления, происходящие при этом, могут повлиять на удержание плазмы [3].

Газодинамическая плазменная ловушка (ГДЛ) относится к классу открытых ловушек, общей особенностью которых является наличие специальных баков, называемых расширителями [4]. Области с расширяющимся полем способствуют магнитно-гидродинамической (МГД) стабилизации плазмы и препятствуют проникновению плазмы из расширителя в центральную ячейку. В расширителях ГДЛ присутствует остаточный газ, который может взаимодействовать с плазмой. Одним из вероятных сценариев развития событий является ионизация этого газа потоком плазмы из центральной части. При ионизации нейтрального газа в расширителе неизбежно увеличится плотность холодных электронов, которые могут попасть в центральную ячейку и охладить удерживаемую плазму [5].

Однако проведенные ранее на ГДЛ эксперименты показали, что с ростом концентрации нейтрального газа ионный ток на плазмоприемник, установленный в расширителе, практически не изменяется. Более того, такие параметры плазмы, как температура электронов в центре ГДЛ и нейтронный поток, меняются слабо (до 20%) даже при превышении критической концентрации (10^{12} см^{-3}) в 100 раз [6]. Поэтому ионизационная лампа, установленная вблизи пробочной области, может стать полезным инструментом для изучения процессов взаимодействия плазменного потока и нейтрального газа в расширителе.

Экранируемая лампа находится в степени расширения $K^1 = 40$, что соответствует магнитному полю 3 кГс. Такое сильное поле не позволяет получить корректные показания с ионизационной лампы, так как влияет на её работу. Решением проблемы является магнитное экранирование лампы. Компьютерное моделирование показало, что двухслойный экран из стали и меди обеспечивает приемлемые значения поля ($<100 \text{ Гс}$) в области работы лампы. Целью работы является установление эффективности работы магнитного экрана для ПМИ-27. Для этого произведено сопоставление результатов экранируемой лампы со второй лампой, находящейся в $K = 400$, где магнитное поле не мешает её работе. Схожесть результатов с двух ионизационных ламп будет говорить об исправной работе магнитного экрана.

¹ Величина K , называемая степенью расширения по полю, вычисляется как отношение поля в пробке к полю в расширителе.

1. Теория

1.1 Магнитное удержание

Плазма, необходимая для протекания термоядерной реакции, разогрета до десятков кэВ и представляет собой полностью ионизованный газ. Прямой контакт термоядерной плазмы со стенкой установки приведет к охлаждению, кроме того, нагретую плазму необходимо удерживать горячей достаточно долго. Эти две проблемы решаются при помощи магнитного удержания, которое предотвращает прямой контакт плазмы со стенками установки, тем самым теплоизолируя её.

Основой ГДЛ является открытая магнитная ловушка, называемая пробкотроном Будкера-Поста. Идея этой системы была предложена независимо Г. И. Будкером и Р. Постом в середине 50-х годов прошлого века. Пробкотрон представляет собой простой соленоид с однородным аксиально-симметричным полем и двумя пробками (областями сильного магнитного поля) по краям соленоида (см. рис.1). Уже первые расчеты показали непригодность пробкотрона для реакторных приложений, потому как в нем невозможно удерживать плазму достаточно долго для осуществления реакции вследствие больших продольных потерь вещества. Однако простота пробкотрона являлась большим преимуществом, поэтому было предложено множество вариантов доработки пробкотрона: многопробочные системы, амбиполярные ловушки, газодинамические ловушки [2] и другие.

Газодинамическая ловушка является длинным пробкотроном с большим пробочным отношением R^2 . Название ловушки оправдано тем, что функция распределения плазмы в установке приближенно описывается распределением Максвелла, и время удержания плазмы может быть оценено аналогично задаче об истечении газа из сосуда через малое отверстие, зависимость имеет следующий вид:

² $R = \frac{B_{\text{проб.}}}{B_0}$, где $B_{\text{проб.}}$ – максимум поля в пробке, а B_0 – значение поля в центре ловушки.

$$\tau \approx \frac{RL}{v_T}$$

где L – длина установки, v_T – тепловая скорость частиц. Видно, что время удержания зависит от пробочного соотношения и длины установки линейно, тогда как у классического пробкотрона зависимость логарифмическая:

$$\tau \approx 0.4\tau_i \ln R$$

где τ_i – среднее время ион-ионных столкновений [2].

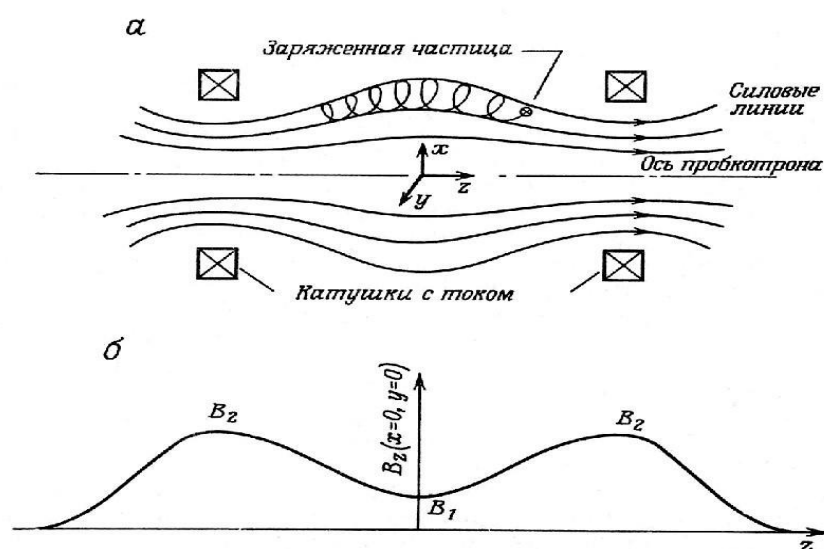


Рис. 1. а) силовые линии пробкотрона, б) профиль магнитного поля на оси пробкотрона.

На практике это означает, что возможно построить реактор на основе ГДЛ, если увеличить пробочное отношение до максимально возможного. Тогда для получения нужного времени удержания можно просто увеличивать длину центральной части. Оцениваемая длина при $B_{\text{проб}} = 45$ Тл и $B_{\text{ось}} = 1.5$ Тл получается более одного километра. Однако большую часть реактора занимает простой соленоид с относительно слабым полем, что является достижимым с инженерной точки зрения. Другим важным приложением ГДЛ является использование установки в качестве нейтронного источника. Такой источник может быть использован для изучения материалов первой стенки,

устойчивых к нейтронному излучению, которые будут использованы в будущих термоядерных реакторах [2].

1.2 Магнитное экранирование

Магнитное экранирование используется в случае, если необходимо изолировать какой-либо прибор от внешних полей, мешающих его работе. Магнитные экраны можно использовать для подавления как стационарного, так и переменного поля, однако принципы их работы существенно различаются.

Для экранирования от постоянного поля используются материалы с большой магнитной проницаемостью – ферромагнетики. Силовые линии магнитного поля стремятся пройти через материал с наименьшим магнитным сопротивлением, в данном случае через ферромагнетик. Из-за того, что сила магнитного поля пропорциональна плотности силовых линий, в экранируемой области магнитное поле ослабляется. Следует отметить, что магнитная проницаемость ферромагнетиков, а в частности, сплавов железа, используемых в данной работе в качестве материала экрана, зависит от величины магнитного поля. При больших значениях внешнего поля происходит насыщение материала, из-за чего его магнитная проницаемость практически стремится к единице.

Поле в области работы лампы достигает 3 кГс, этого более чем достаточно для насыщения экрана. По этой причине используется второй экран из меди. Такая двухслойная конструкция позволяет ослабить внешнее поле достаточно для того, чтобы магнитная проницаемость стального внутреннего экрана приняла своё значение вблизи максимума. Таким образом достигается эффективное экранирование области, в которой находятся электроды ионизационной лампы.

Медный экран выполняет функцию защиты от переменного поля. Как известно, переменное магнитное поле, действующее на некоторый проводник,

порождает в его объеме вихревые токи, которые своим движением создают магнитное поле, противодействующее изначальное. Известно, что магнитное поле затухает экспоненциально по мере погружения в проводник и падает в e раз на глубине $\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}$, которую называют глубиной скин-слоя. В случае экранирования от переменного поля следует выбирать материалы с наибольшей проводимостью, именно поэтому была выбрана медь.

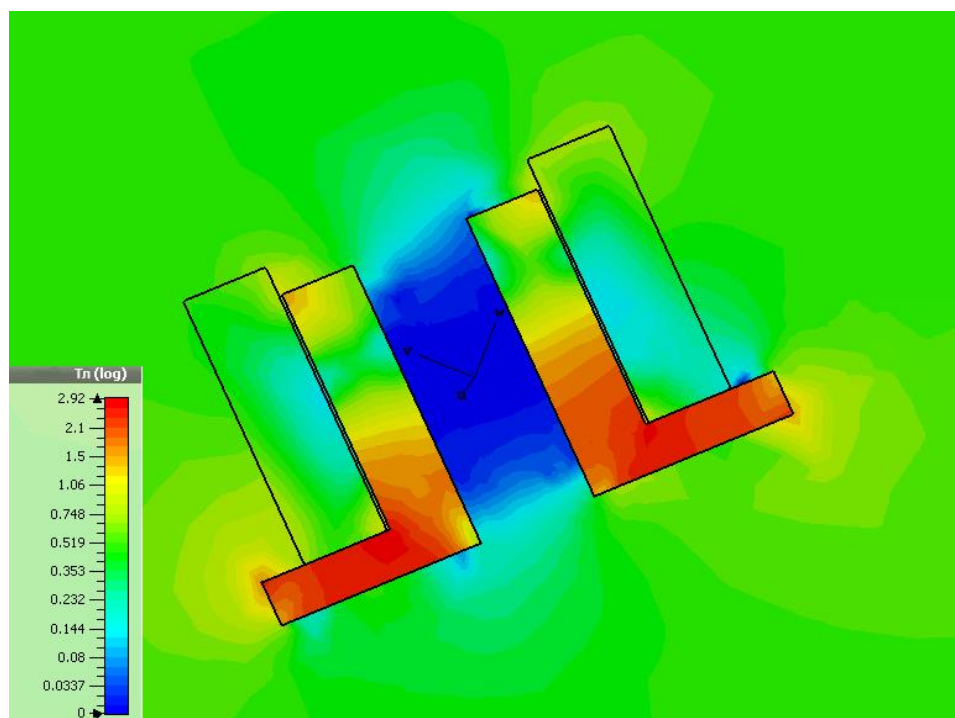


Рис. 2. Распределение абсолютной величины магнитного поля в экране в фиксированный момент времени.

Численный расчет на компьютере показал, что такое двухслойное экранирование позволяет подавить внешнее поле в области работы вакуумной лампы (синяя область на рис. 2) в 30 раз, до 100 Гс и ниже (см. рис. 2).

2. Эксперимент

2.1 Установка ГДЛ

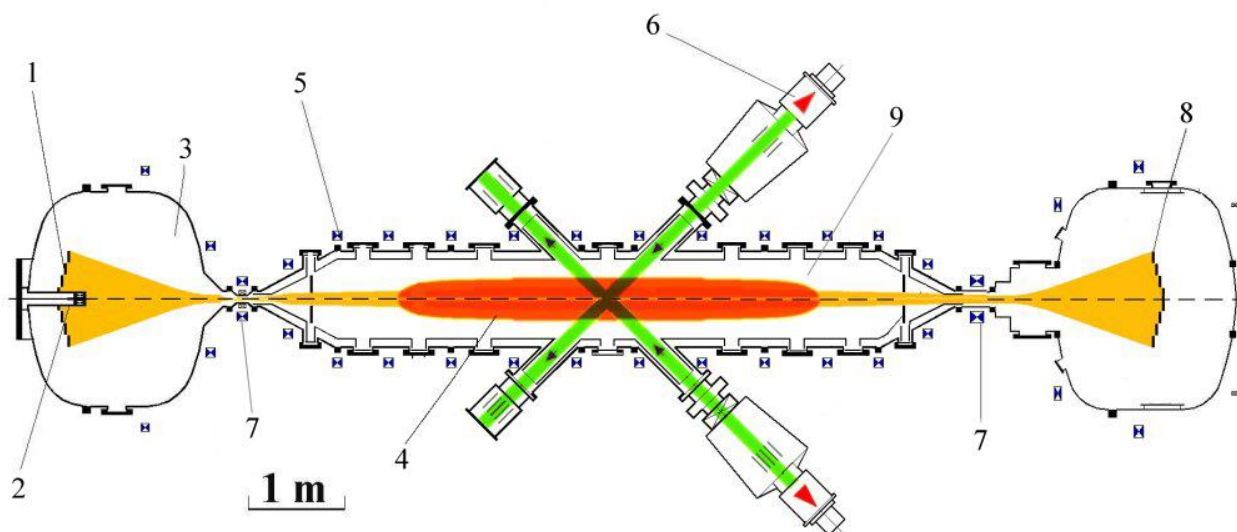


Рис. 3. Основные узлы ГДЛ. 1 – плазмоприемник, 2 – плазмогенератор, 3 – расширительный бак, 4 – область движения быстрых ионов, 5 – катушки магнитной системы, 6 – инжектор нейтральных атомов, 7 – магнитные пробки, 8 – диагностический плазмоприемник, 9 – центральная ячейка.

Как было отмечено выше, ГДЛ относится к классу открытых плазменных ловушек и является осесимметричным пробкотроном для удержания двухкомпонентной плазмы: относительно холодной мишенной плазмы, и быстрых ионов, образующихся в результате инъекции пучков атомов дейтерия суммарной мощностью 5 МВт. Температура мишенной плазмы во время инъекции достигает величины 200 эВ, а при использовании системы электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) (4 на рис. 5) с помощью гиротронов была получена плазма с температурой 1 кэВ [7].

Центральная ячейка ГДЛ представляет собой вакуумную камеру (9 на рис. 3) длиной 7 метров, снаружи которой находятся катушки магнитной системы (5). К центральной камере с двух сторон подключены расширители (3), снаружи которых также находятся катушки магнитной системы (5). В отличие от замкнутых систем для удержания плазмы, например, токамаков, построенных в виде тора, в пробкотронах плазма естественным образом

покидает область удержания, а благоприятная кривизна магнитных силовых линий в расширителе способствует МГД-стабилизации плазмы.

Магнитное поле на ГДЛ создается системой магнитных катушек (5 рис. 3), включающихся согласно временной диаграмме на рис.4.

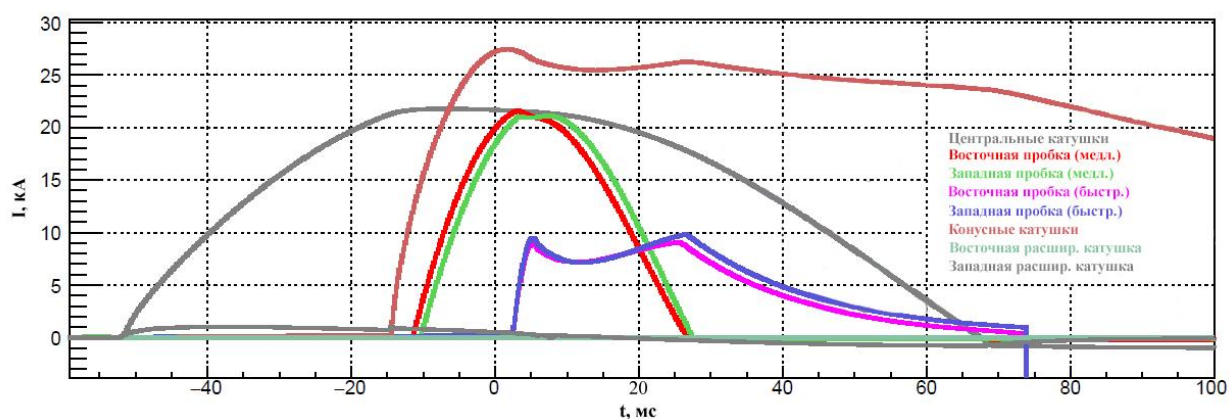


Рис. 4. Временная диаграмма включения магнитных полей на ГДЛ.

Выше была упомянута система ЭЦР нагрева, предназначенная для дополнительного нагрева электронной компоненты плазмы в ГДЛ. СВЧ излучение (54.5 ГГц) от гиротронов вводится в плазму по волноводам и позволяет эффективно передавать энергию электронам.

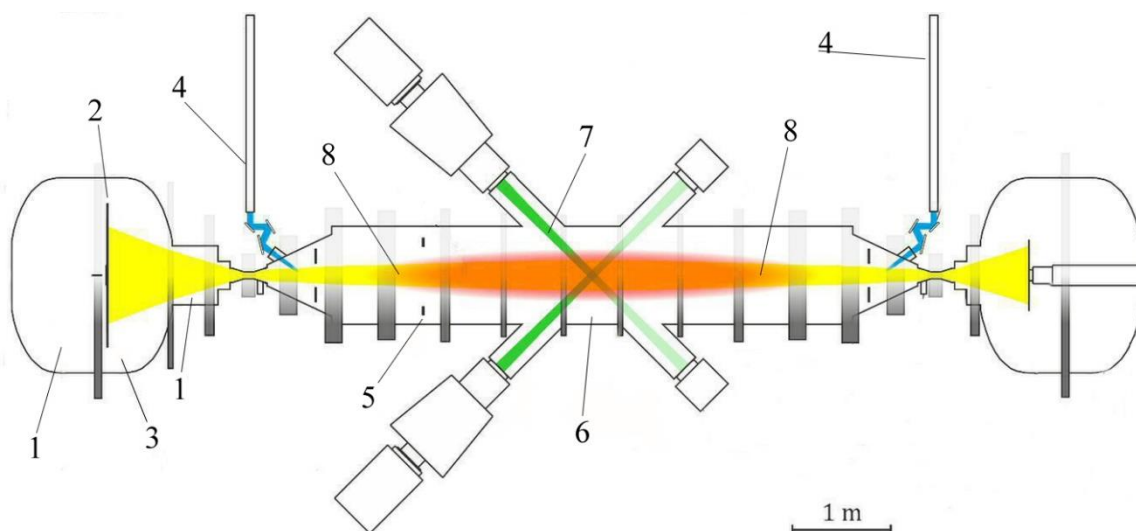


Рис. 5. Диагностический комплекс ГДЛ. 1 – ПМИ-27, 2 – диагностический плазмодетектор, 3 – газовый клапан, 4 – ЭЦР волноводы, 5 – диамагнитные петли, 6 – томсоновское рассеяние, 7 – нейтральный пучок, 8 – нейтронные датчики.

Для наблюдения за поведением плазмы в центральной ячейке используется несколько основных систем измерения. Для определения температуры и плотности электронов в центре ловушки используется томсоновское рассеяние (6 на рис. 5). С помощью двух диамагнитных петель (5) измеряется содержание быстрых ионов в плазме, по которому определяется эффективность захвата инжектированных атомов (7). Нейтронный поток определяется с помощью нейтронных датчиков (8) вблизи мест остановки быстрых ионов. В расширителе находится диагностический плазмоприемник (2), на котором по радиусу установлены ионные зонды, определяющие ионный ток из центральной ячейки. Для непосредственного определения концентрации газа используются быстрые ионизационные лампы ПМИ-27 (1).

Для начала эксперимента необходима мишенная плазма, которая затем будет нагрета с помощью инъекции. На ГДЛ она может быть получена несколькими способами: напуск плазмы с помощью специальной пушки (2 на рис. 3), пробой газа электронной пушкой или пробой гиротроном. При получении экспериментальных данных для этой работы был реализован последний вариант.

2.2 Ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-27

Данный преобразователь используется для измерения концентрации остаточного газа с временным разрешением не хуже 250 мкс. Лампа приспособлена для работы в режимах высокого и низкого вакуума. На установке ГДЛ она работает в режиме низкого вакуума, что соответствует диапазону давлений от 10^{-3} до 10 Па.

Ионизационная лампа состоит из катода (1 на рис. 7), анода (2) и коллектора (3). Вследствие нагрева иридиевый катод эмитирует электроны, которые попадают в ускоряющий потенциал анода (300 В). За время пролета до анода электроны вызывают ионизацию газа в межэлектродном пространстве. Коллектор (0 В) служит для сбора образовавшихся положительных ионов. Регистрируя с коллектора ионный ток, можно определить давление газа

внутри лампы, так как ионный ток прямо пропорционален молекулярной концентрации газа при условии постоянства электронного тока и ускоряющего напряжения. Ультрафиолетовый экран (5) защищает электроды от ионизирующего излучения, исходящего от плазменного потока (6 на рис. 6). Малый рабочий объем лампы и большие зазоры в уф экране обеспечивают высокое временное разрешение.

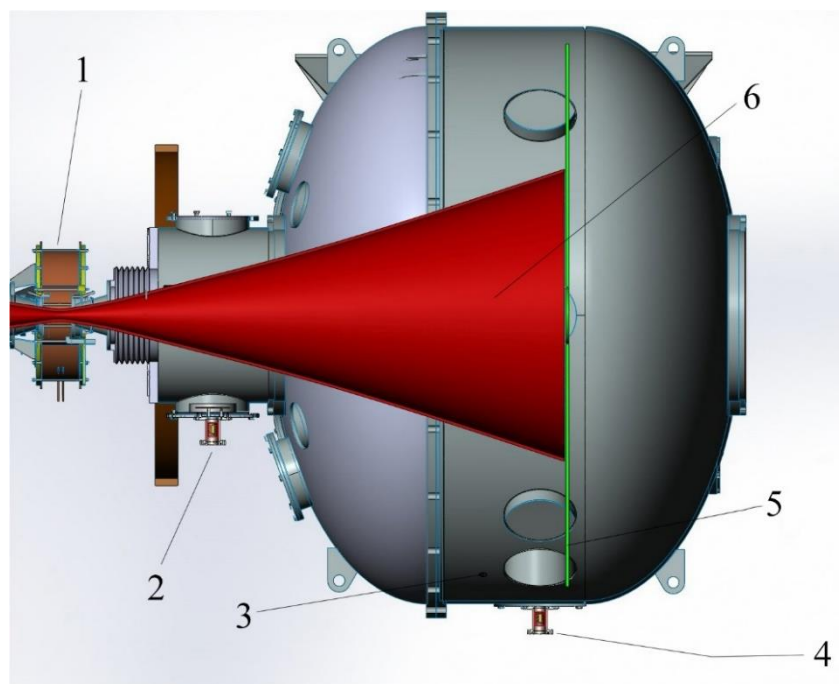


Рис. 6. Расширитель ГДЛ. 1 – магнитная пробка, 2 – ПМИ-27 ($K = 40$), 3 – газовый клапан, 4 – ПМИ-27 ($K = 400$), 5 – плазмоприемник, 6 – расширяющийся плазменный поток.

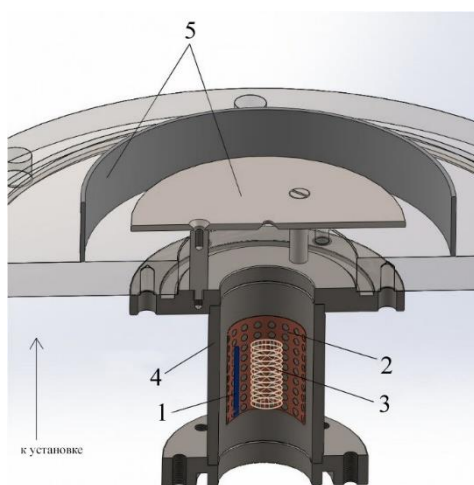


Рис. 7. Схематическое устройство ПМИ-27. 1 – катод, 2 – анод, 3 – коллектор, 4 – магнитный экран, 5 – ультрафиолетовый экран.

Для работы лампы в режиме низкого вакуума была собрана схема питания из двух источников напряжения Б50 на 300 и 30 В и одного источника постоянного тока Б47 на 1.5 А. Параметры источников питания были выбраны в соответствии с техническим паспортом ПМИ-27 [8] для режима работы в низком вакууме.

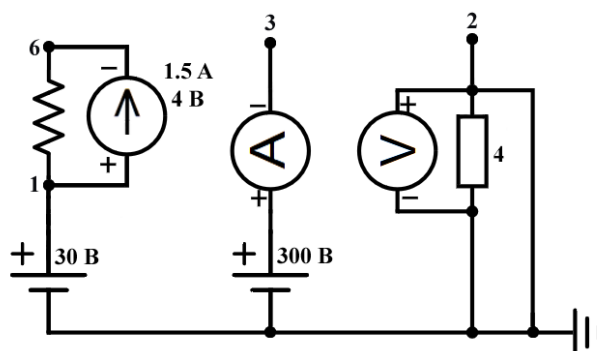


Рис. 8. Схема питания ПМИ-27. Выводы: 1 и 6 - низковакуумный катод, 2 - коллектор, 3 - анод, 4 - место включения осциллографа.

Ионизационные лампы способны нормально функционировать лишь в достаточно слабых магнитных полях (менее 100 Гс), тогда как магнитное поле в месте установки лампы достигает 3 кГс, что скажется негативно на её работе, так как магнитное поле будет влиять на движение заряженных частиц в межэлектродном пространстве. Для решения этой проблемы лампа была экранирована двумя соосными цилиндрами из стали и меди. Параметры экрана подбирались с учетом места установки лампы. Так как на установке во время работы присутствуют сильные вибрации, масса экрана, а значит и толщина, не должны быть слишком большими, но в то же время, толщины должно быть достаточно для эффективного экранирования. Толщина изготовленного стального экрана - 5 см, медного – 6 см.

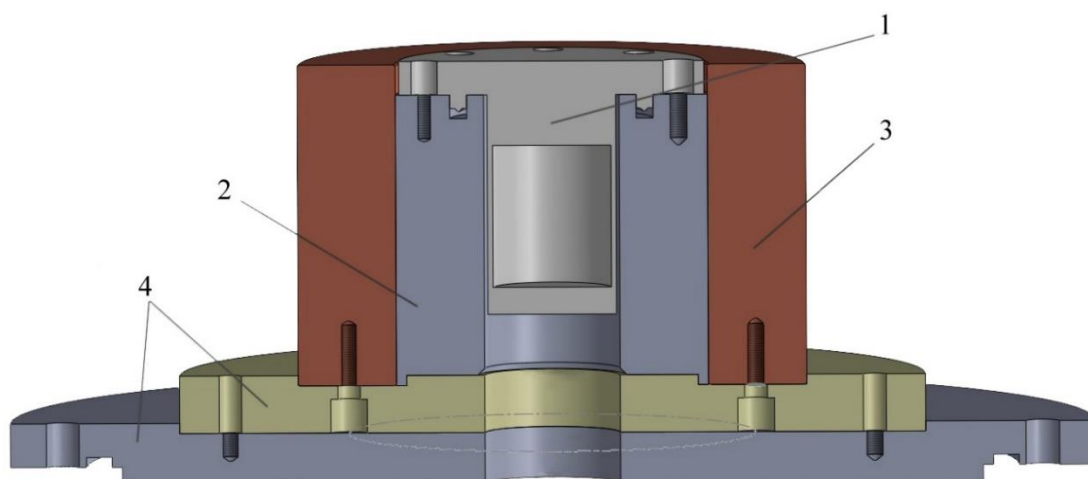


Рис. 9. Схема магнитного экрана. 1 – ПМИ-27, 2 – стальной экран, 3 – медный экран, 4 – фланцы для крепления к ГДЛ.

3. Результаты и обсуждение

Для проверки корректной работы лампы было произведено несколько тестовых выстрелов на ГДЛ. При тестовых выстрелах не использовалась инжекция нейтральных атомов, но были включены магнитные поля. Всего было произведено три выстрела, результаты с ламп записывались на многоканальный осциллограф Teledyne LeCroy WaveJet 334A. Для удобства различия двух датчиков далее лампа, установленная в степени расширения $K = 40$, будет называться K40, вторая, соответственно, K400.

Первые данные, полученные с экранированной лампы, показали наличие сильных шумов. После проверки оказалось, что шумы вызваны наводками в самой схеме питания. Лампа K400 показала чистый сигнал, согласующийся с показаниями других вакуумметров. В целом видно, что сигналы с обеих ламп весьма близки, это говорит об эффективности работы магнитного экрана. На осциллограмме (рис. 10) видно момент открытия газового клапана в расширителе, его закрытие и последующая откачка газа. Таким образом, запуск показал, что обе лампы функционируют нормально, а экран выполняет свои функции. Остается лишь решить проблему шумов в схеме питания лампы K40.

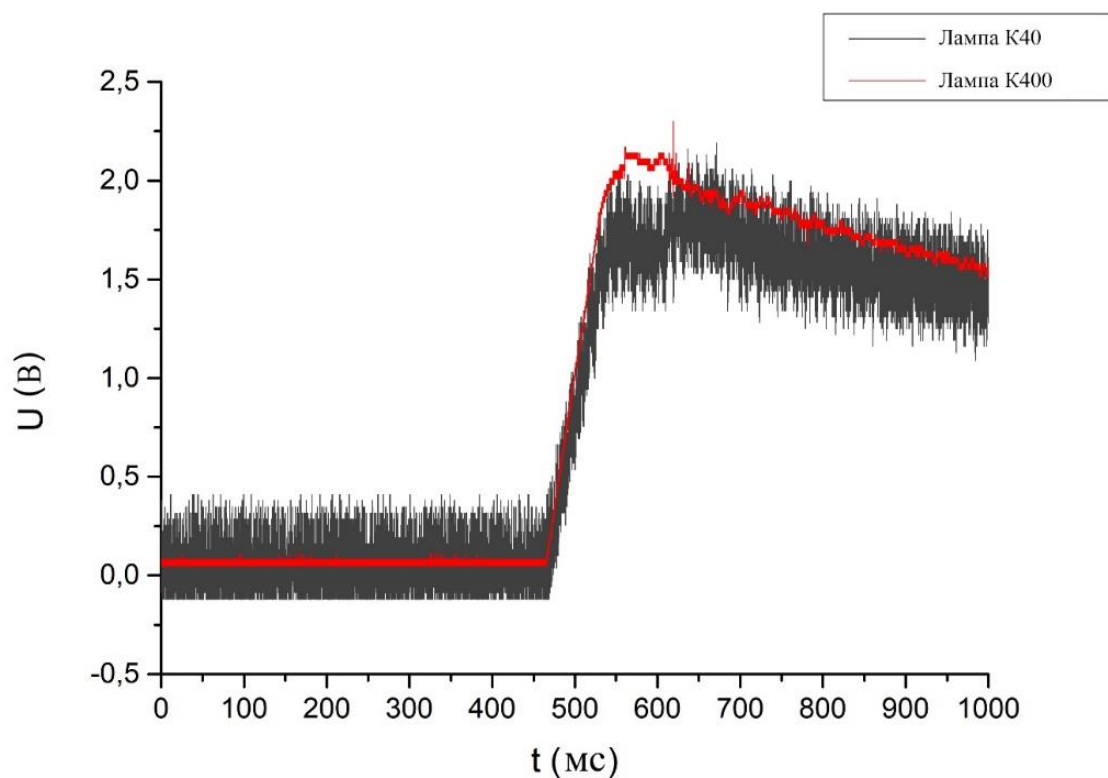


Рис. 10. Сигналы с ионизационных ламп К40 и К400.

4. Заключение

В ходе работы были собраны схемы питания ионизационных ламп ПМИ-27 и получены результаты изменения концентрации остаточного газа в расширителе ГДЛ за время выстрела. Лампа в степени расширения $K = 40$ показала принципиальную возможность работы ионизационных манометрических преобразователей в сильном магнитном поле при условии их эффективного экранирования, однако схема питания лампы К40 требует доработки. Таким образом, был создан новый рабочий датчик, который может быть использован в будущих исследованиях физики расширителя.

5. Список литературы

1. R. Betti and O. A. Hurricane. Inertial-confinement fusion with lasers // Nature Physics. — 2016. — Vol. 12. — P. 435–448. — DOI:10.1038/nphys3736
2. Д. Д. Рютов, Открытые ловушки, Успехи физических наук, т. 154, выпуск 4, с. 565-615.
3. D. D. Ryutov, Axial electron heat loss from mirror devices revisited, Transactions of fusion science and technology, Vol. 47, pp 148-154, Lawrence Livermore National Laboratory, 2005.
4. В. В. Мирнов, Д. Д. Рютов, Газодинамическая ловушка препринт 88-70, 1988.
5. M.A.Anikeev, P.A.Bagryansky, A.D.Beklemishev, A.T.Chernyavsky, A.Dunaevsky, O.A.Korobeynikova, M.S.Korzhavina, A.A.Lizunov, V.V.Maximov, S.V.Murakhtin, D.I.Skovorodin, E.I.Soldatkina, P.Yushmanov, Analysis of Gas Conditions Influence in the GDT West Expander on Plasma Confinement in the Central Cell, AIP Conference Proceedings 1771, 030022 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4964178>.
6. E.I. Soldatkina, P.A. Bagryansky, O.A. Korobeynikova, A.A. Lizunov, V.V. Maksimov, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev. Axial Plasma Confinement in Gas Dynamic Trap, Plasma and Fusion Research Volume 14, Issue Specialissue1, 2019, 2402006, DOI: 10.1585/pfr.14.2402006.
7. P.A. Bagryansky, A.V. Anikeev, G.G. Denisov, E.D. Gospodchikov, A.A. Ivanov, A.A. Lizunov, Yu.V.Kovalenko, V.I. Malygin, V.V. Maximov, O.A. Korobeynikova, S.V. Murakhtin, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, V.Ya. Savkin, A.G. Shalashov, O.B. Smolyakova, E.I. Soldatkina, A.L. Solomakhin, D.V. Yakovlev, K.V. Zaytsev. Overview of ECR plasma heating in the GDT magnetic mirror, Nucl. Fusion 55(2015) 053009 (12pp), doi:10.1088/0029-5515/55/5/053009.
8. Преобразователь манометрический ионизационный ПМИ-27. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЮР 2. 832. 000. ТО