

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 _____

Направление подготовки **03.03.02 ФИЗИКА**

Образовательная программа: **БАКАЛАВРИАТ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Содномай Амгалана Булатовича

(Фамилия, Имя, Отчество автора)

Тема работы Разработка магнитной диагностики для установки ГОЛ-НВ

«К защите допущена»

Заведующий кафедрой

д. ф.-м.н., профессор

Иванов А. А./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

Поступаев В.В./.....
(фамилия И., О.) / (подпись, МП)

«.....».....20...г.

Дата защиты: «.....».....20...г.

Новосибирск, 2017

Оглавление

Введение	3
1. Установка ГОЛ-NB	4
1.1 Задачи установки.....	4
1.2 Описание установки.....	5
1.3 Плазма ГОЛ-NB.....	5
2. Магнитная диагностика.....	6
2.1 Методы регистрации магнитных возмущений плазмы.....	6
2.2 Источники магнитных возмущений.....	6
2.3 Магнитная диагностика плазменных установок.....	9
3. Система контроля вакуумного магнитного поля.....	11
4. Проект магнитной диагностики плазмы.....	15
5. Заключение	16
Список литературы.....	17

Введение

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ СО РАН) является одним из крупнейших научных центров фундаментальных исследований в России и мире. Физика плазмы и задачи управляемого термоядерного синтеза — одно из направлений, которое активно развивается с самого основания института.

Плазму в ИЯФ СО РАН удерживают магнитным полем с конфигурацией, которую называют магнитной ловушкой с пробками. Метод был предложен независимо двумя учеными: Г.И. Будкером и Р.Постом в середине XX века. В простейшем случае магнитной ловушки с пробками называют пробкотроном. Последовательное соединение пробкотронов создает квазипериодическое магнитное поле, силовые линии которого напоминают гофрированную трубу [1]. Такой способ удержания представлен в строящейся установке ГОЛ-NB [2], общий вид которой представлен на *Рис. 1*.

Одна из проблем удержания плазмы в многопробочной конфигурации магнитного поля заключается в том, что плазма внутри установки может быть подвержена развитию явлений, которые могут быть источниками магнитных возмущений, а также могут препятствовать квазистационарному удержанию плазмы и достижению проектных параметров. Такие явления как: альфеновская ионно-циклотронная неустойчивость (AIC) [3–5], дрейфовая конусная неустойчивость (DCLC) [6], bounce неустойчивости [7], искажение формы плазмы и другие, ранее наблюдались в различных экспериментах по удержанию плазмы. Регистрация таких процессов — одна из задач магнитной диагностики.

Другая задача магнитной диагностики относится к измерению вакуумного магнитного поля плазменной установки. Импульсное магнитное поле установки ГОЛ-NB индуцирует электрический ток в стенках вакуумной камеры, препятствуя проникновению поля внутрь. В результате, реальная напряженность магнитного поля внутри установки может отличаться от расчетных параметров поля, что может привести к ошибкам и неточностям при проведении плазменных экспериментов. Кроме эффектов диффузии поля, ошибки и неточности в изготовлении и юстировке магнитной системы могут также привести к нарушению корректной конфигурации магнитного поля, что повлечет за собой, в частности, повышенную скорость потерь частиц из ловушки. Именно поэтому необходима также система контроля вакуумного магнитного поля для будущей установки ГОЛ-NB.

Целями данной работы являются:

- 1) Создание диагностики для измерения вакуумного магнитного поля установки ГОЛ-NB;
- 2) Выработка технического задания на проектирование диагностики магнитной активности плазмы, в том числе определения параметров и природы периодических колебаний.

Система магнитной диагностики разрабатывается на основе опыта установок ГОЛ-3 и ГДЛ.

1. Установка ГОЛ-NB

1.1. Задачи установки

Проект ГОЛ-NB (гофрированная ловушка) — экспериментальная установка, разработанная в ИЯФ СО РАН с целью продолжения изучения физики многопробочного удержания плазмы [2].

Предшественником установки является установка ГОЛ-3, которая проработала больше 20 лет и помогла экспериментально доказать эффективность установок, основанных на идее удержания плазмы гофрированным полем.

ГОЛ-NB является промежуточным звеном в создании установки следующего поколения — газодинамической многопробочной ловушки ГДМЛ, сочетающая в себе успехи установки ГДЛ, ИЯФ СО РАН в области нагрева плазмы и эффективности удержания плазмы в многопробочной секции комплекса ГОЛ-3.

Задачей ГОЛ-NB является экспериментальная проверка эффективности идеи многопробочного удержания для плазмы с низким уровнем турбулентности.

Проекты по удержанию плазмы в открытых ловушках, возможно, станут основой для будущих установок управляемого термоядерного синтеза (УТС), и, на сегодняшний день, ИЯФ СО РАН — один из немногих научных центров в мире, в котором активно ведутся исследования по удержанию плазмы с такими конфигурациями магнитных полей.

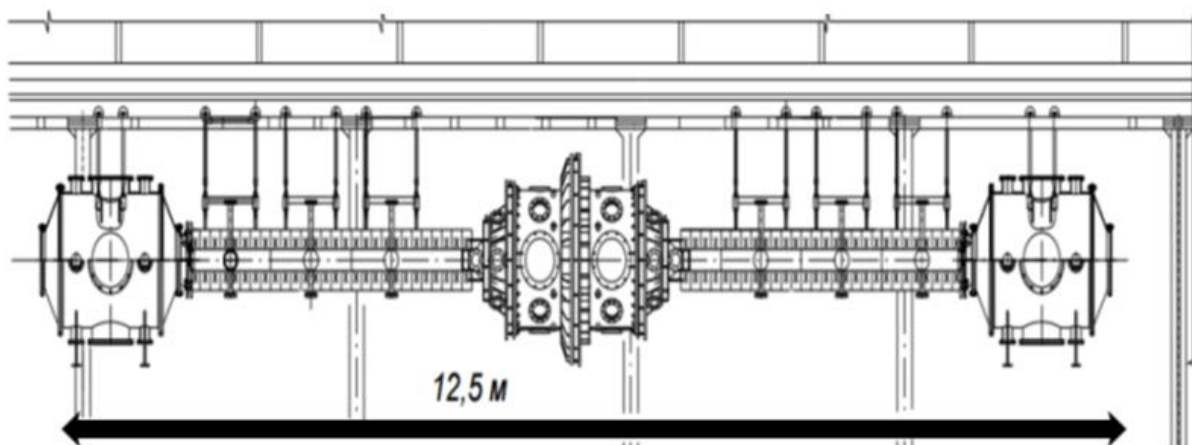


Рис. 1. Общий вид установки ГОЛ-NB

1.2. Описание установки

Строящаяся установка ГОЛ-NB будет состоять из центральной ловушки, двух секций сильного магнитного поля установки ГОЛ-3, двух концевых баков расширителей плазменного потока установки АМБАЛ-М и двух инжекторов нейтральных пучков, мощность каждого инжектора составляет 0,75 МВт.

Общая длина установки составляет примерно 12 метров, длина центральной ловушки — около 2,5 м, общая длина секций сильного магнитного поля — около 6 метров.

Магнитная система установки ГОЛ-NB включает в себя пять катушек центральной ловушки, две зоны сильного поля и две катушки в зоне баков-расширителей. Каждая зона сильного поля состоит из 28 катушек установки ГОЛ-3, разделенных на расстоянии 0,11 м. В режиме соленоида, зоны сильного поля могут обеспечивать однородное поле напряженностью до 4,5 Тл, либо в режиме 13-ти секционной многопробочной ловушки с напряженностью $V_{\max} = 4,5$ Тл и пробочным отношением $R \approx 1,4$ (пробочное отношение — это отношение максимальной величины магнитного поля и минимального, $R = V_{\max}/V_{\min}$) и периодом гофрировки 0,22 м [2]. В центральной ловушке проектная напряженность магнитного поля в центре ловушки составит $0,3 \div 0,6$ Тл, магнитное поле в пробках — около 5 Тл.

1.3. Плазма ГОЛ-NB

Так как в конструкции установки будут использоваться элементы многопробочной секции установки ГОЛ-3, рабочие параметры плазмы ГОЛ-NB подобраны с учетом особенностей гофрированного поля. Ожидается, что эксперименты будут проводиться с плазмой, имеющей следующие параметры [8]: электронная плотность $n_e = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, температура $T \sim 30$ эВ ($1 \text{ эВ} = 11660 \text{ К}$), характерный радиус поперечного сечения плазмы составит порядка 0,2 м.

Для подавления желобковой неустойчивости, свойственной для открытых ловушек, в установке ГОЛ-NB будет реализован режим вихревого удержания [9]. Такой способ стабилизации желобковой неустойчивости применяется сейчас на установке ГДЛ. Режим будет осуществляться при помощи электродов и создаваемым ими электрическим полем.

2. Магнитная диагностика

2.1. Методы регистрации магнитных возмущений плазмы

Наиболее простой конструкцией датчиков для измерения магнитных полей в плазменных экспериментах является катушка. Система катушек, обычно, называется зондами Мирнова [10]. Принцип работы основан на законе электромагнитной индукции Фарадея $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$, что позволяет измерить величину изменения магнитного потока путем интегрирования регистрируемого сигнала по времени. По известной величине магнитного потока и параметров (размер и число витков) катушки, можно определить локальное значение магнитного поля.

Полупроводниковые датчики магнитного поля также представляют широкие возможности для магнитной диагностики. Датчик Холла — полупроводниковый прибор, работа которого основа на эффекте Холла. Датчик обладает небольшими размерами, может измерять одновременно три пространственные компоненты магнитного поля и может принимать сигналы от полей большой длительности по времени и, также, стационарных магнитных полей. Однако, датчики Холла, в отличие от зондов Мирнова, могут производить шумы под действием рентгеновского излучения и, в сравнении с магнитными зондами, сильнее зависимы от температурного режима, что вызывает трудности в использовании на строящейся установке ГОЛ-NB.

Среди корпускулярных методов диагностики плазмы существует метод, который позволяет измерять диамагнетизм плазмы — динамический эффект Штарка (MSE). Эффект Штарка заключается в расщеплении спектральных линий атома при воздействии внешнего электрического поля. Диагностический пучок нейтральных атомов инжектируется в плазму. Попадая в плазму, на пучок воздействует внешнее электрическое поле. Затем, при помощи преобразований Лоренца для полей, в системе отчета пучка электрическое поле преобразуют в магнитное поле. Метод применяется таких установках как токамаках TEXTOR [11], JET [12] а также в открытой ловушке ГДЛ [13].

2.2. Источники магнитных возмущений

AIC неустойчивость

Альфеновская ионно-циклотронная неустойчивость (AIC) — это вид электромагнитной неустойчивости, в которой волна распространяется вдоль силовых линий магнитного поля, и входит в резонанс с ионами, которые вращаются в магнитном поле с циклотронной частотой $\Omega_{ci} = \frac{e_i B}{m_i}$, где e_i — заряд иона, m_i — масса иона. Характерным условием развития AIC-неустойчивости является большой параметр βA^2 [3], где $\beta = 8\pi p_0 / B^2$ — отношение давление плазмы к давлению магнитного поля, $A = \langle W_{\perp} \rangle / \langle W_{\parallel} \rangle$ — показатель анизотропии плазмы. Возбуждение

АИС неустойчивости вызывается инверсной заселенностью траекторий резонансных частиц, для которых продольная скорость удовлетворяет условию циклотронного резонанса $V_{||res} = (\omega - \Omega_{ci})/k_{||}$, где ω и $k_{||}$ — частота и модуль продольного волнового вектора возбуждаемой волны. Граница устойчивости сильно зависит от деталей инжекции, в частности, от углового и энергетического разброса инжектируемых частиц [4].

АИС неустойчивость впервые была зарегистрирована на установке ТМХ [3] на частоте $\Omega_{ci} = 5,6$ МГц. на установке ГДЛ был обнаружен сигнал на частоте 1.15 МГц, который впоследствии был идентифицирован как развитие АИС неустойчивости. При наличии возможностей роста альфеновского ионно-циклотронного резонанса в строящейся установке ГОЛ-НВ ожидается, что резонансная частота Ω_{ci} будет порядка $0,6 \cdot 10^8$ Гц, при напряженности магнитного поля в 0,6 Тл.

DCLC неустойчивость

Дрейфовая конусная неустойчивость (DCLC), с точки зрения кинетической теории, это отклонение функции распределения ионов от максвелловской функции распределения в пространстве скоростей [14]. Существование DCLC неустойчивости плазмы в открытых ловушках обусловлено наличием конуса потерь (loss cone), угол раствора которого определяется как $\theta_{lc} = \arcsin \sqrt{\frac{B_{min}}{B_{max}}}$. Магнитные возмущения DCLC неустойчивости имеют вид «желобков», бегущих в направлении диамагнитного дрейфа ионов с частотой близкой к Ω_{ci} .

В плазме ГОЛ-НВ дрейфовая конусная неустойчивость будет стабилизирована за счет большого пробочного отношения.

Диамagnetизм плазмы

Движение заряженных частиц по ларморовским окружностям создает кольцевой ток. В плазме, в силу квазинейтральности, средний ток внутри объема плазмы равен нулю. При этом, несколько иная ситуация складывается на границе раздела плазма/вакуум, где в виду отсутствия компенсации заряда, возникает ток, который уменьшает магнитное поле в плазме. Это явление известно также как диамagnetизм плазмы.

Оценим вклад диамagnetизма плазмы. Запишем закон Био-Савара-Лапласа. Для удобства, запишем его в системе СГС:

$$\delta \mathbf{B} = \frac{1}{c} \int \frac{[\mathbf{j} \times \mathbf{R}] d^3 x}{R^3} = \frac{1}{c} \int \frac{j_{\theta} d^3 x}{R^2} \cdot \mathbf{e}_z$$

Плотность тока:

$$j_{\theta} = e \langle v_{\perp} (f(r + \rho_i) - f(r - \rho_i)) \rangle = 2e \left\langle \frac{\partial f}{\partial r} \rho_i v_{\perp} \right\rangle = \frac{2c}{B_{vac}} \left\langle \frac{\partial f}{\partial r} m v_{\perp}^2 \right\rangle$$

Здесь \mathbf{R} — радиус-вектор, направленный из d^3x в точку наблюдения поля, $\langle \dots \rangle$ — усреднение в пространстве скоростей.

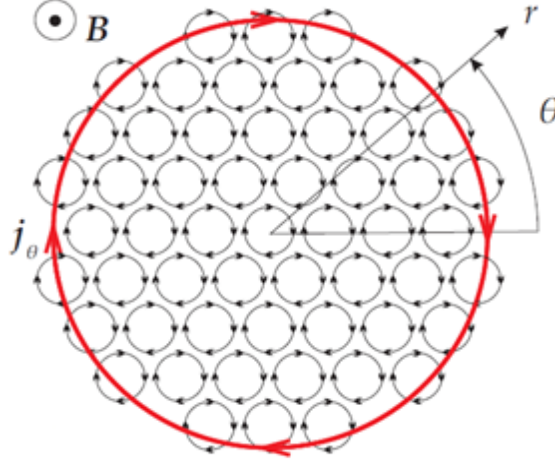


Рис. 2. Движение заряженных частиц по ларморовским окружностям

Усреднение по скоростям дает выражение для тока:

$$j_{\theta} = \frac{2p_0 c}{B_{vac}} \frac{\partial F}{\partial r}$$

На оси:

$$\delta B_z = \frac{1}{c} \int j_{\theta} \frac{d^3x}{R^2} = \frac{2\pi}{c} \int j_{\theta} \frac{r dr dz}{r^2 + z^2} = \frac{4\pi p_0}{B_{vac}} \int \frac{\partial F}{\partial r} \frac{r dr dz}{r^2 + z^2} = \frac{4\pi p_0}{B_{vac}} I$$

$$I = \int \frac{\partial F}{\partial r} \frac{r dr dz}{r^2 + z^2}$$

В случае, когда продольные размеры плазмы $l \gg a$ — поперечного сечения плазмы, интеграл $I \sim 1$.

Оценка вклада диамагнетизма, в этом случае, равна

$$\delta B_z \sim \frac{\beta}{2} B_{vac}, \text{ где } \beta = \frac{8\pi p_0}{B_{vac}^2}$$

Из оценок видно, что величина возмущения магнитного поля пропорциональна β , и в экспериментах с плазмой с значением $\beta \ll 1$, для измерения диамагнетизма плазмы требуются чувствительные датчики.

2.3. Магнитная диагностика плазменных установок

Магнитная диагностика установки ГОЛ-3

Магнитная диагностика установки ГОЛ-3 включала в себя три независимые подсистемы: регистрация сигналов, связанных с диамагнетизмом плазмы, измерение полного тока по плазменному шнуру набором поясов Роговского, измерение локального значения азимутальной компоненты магнитного поля.

Измерение диамагнетизма плазмы проводилось диамагнитными зондами, которые представляли собой четырехвитковые петли с диаметром 0.088 м без компенсации магнитного потока, создаваемого вакуумным магнитным полем. Сигнал интегрировался с помощью RC-цепей с постоянной времени $RC = 300 \div 1500$ мкс.

В восьми точках по длине установки были расположены пояса Роговского, измеряющие полный ток по плазменному шнуру. Пояс использовался в режиме самоинтегрирования, собственное время пояса при оптимальном изготовлении — около 70 мкс [14].

Азимутальная сборка датчиков включала в себя три типаборок измерительных каналов: компактный одиночный зонд, компактный зонд с двумя катушками, разнесенными по азимутальной координате на 45° , кольцевая сборка из шестнадцати катушек с шагом 22.5° . Катушки состояли из 32 витков и имели размеры: 5 мм — катушки круглого сечения, 4 мм — катушки прямоугольного сечения. Индуктивность катушек L порядка 0.4 мкГн [15].

Магнитная диагностика установки ГДЛ

Магнитная диагностика установки ГДЛ также состоит из нескольких подсистем. Внутри установки расположены: диамагнитные петли с компенсацией магнитного потока, линейная сборка зондов Мирнова, расположенная по длине установки, круговая сборка зондов Мирнова и набор датчиков высокочастотных магнитных возмущений.

Конструкция диамагнитной петли состоит из внешней и внутренней петли, радиус которых 425 мм и 346 мм соответственно. Измерительная петля состоит из пяти витков, проложенных во внутренней трубке. Витки компенсирующей катушки проходят последовательно через внешнюю и внутреннюю трубки.

Датчики имеют следующие параметры: внутренний диаметр обмотки катушки $D = 64$ мм, число витков $N = 100$, высота обмотки катушки $h = 4$ мм, индуктивность порядка 0.0015 Гн.

Линейная и круговая сборка зондов Мирнова была разработана с целью изучения вихревого удержания плазмы [9]. В дальнейшем, было замечено появление высокочастотных колебаний в плазме ГДЛ, из-за чего было высказано предположение о росте АИС неустойчивости. Для проверки этого предположения

были спроектированы датчики высокочастотных колебаний. В работе было показано, что в плазме установки ГДЛ действительно развивается АС неустойчивость, частота которой составляет 1.15 МГц [16]. Также, методами магнитной диагностики были зарегистрированы и изучены спектральные характеристики желобковых колебаний плазмы, АС неустойчивости, обнаружены колебания плазмы на bounce-частоте горячих ионов.

Токамаки

Плазменные установки удержания плазмы типа токамак также используют датчики Мирнова для измерения магнитных сигналов. В работах [17,18], Зонды Мирнова были использованы для регистрации магнитогидродинамических (МГД) возмущений, сигнал которых был обработан при помощи сингулярного-полярного разложения (SVD) и позволил определить островную структуру магнитных поверхностей вдоль малого обхода тора.

Также, в работе [19] были представлены результаты измерений на основе датчиков Холла, которые использовались на таких токамаках как TORE SUPRA и JET. В строящемся токамаке ITER планируется использовать датчики Холла [20], способные измерять магнитные поля до 7 Тл.

3. Система контроля вакуумного магнитного поля

Для измерения вакуумного магнитного поля было решено использовать магнитные катушки, которые будут измерять пространственные компоненты поля: B_r , B_θ , B_z , в зависимости от ориентации катушки в пространстве. Расположение датчиков изображено стрелками на *Рис. 3*.

$$B_i = -\frac{1}{NS} \int_{t_0}^t \varepsilon(t') dt' , \quad i = r, \theta, z$$

В зонах 1,2 будут использоваться одинаковые сборки датчиков для измерения магнитного поля вблизи оси установки (см. *Рис. 4-6*). В сборке для зоны 3 датчики расположены от оси на расстоянии, соответствующим характерному радиусу поперечного сечения плазмы ГОЛ-NB.

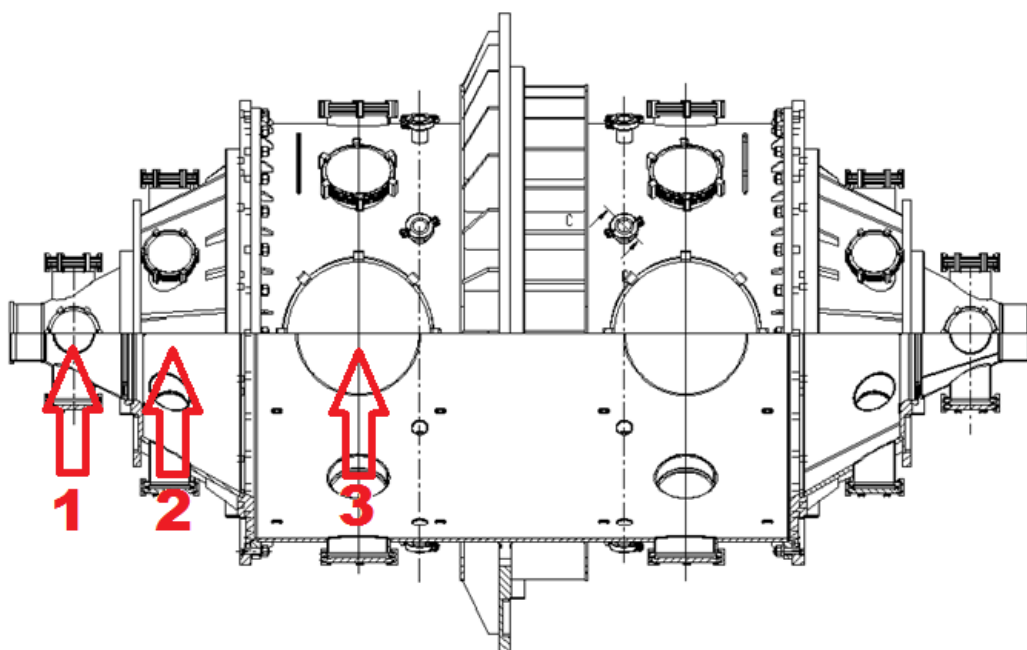


Рис. 3. Центральная камера установки ГОЛ-NB.

Конструкция магнитной диагностики состоит из: двух вакуумных фланцев, которые жестко закрепляются вакуумным соединением к установке. К каждому фланцу приварена труба 50x3.0 для фиксации диэлектрической трубы, на которой установлены датчики магнитного поля. К одному из фланцев также присоединен разъем вакуумного ввода типа 2РМГ на 19 контактов. Все металлические детали выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, датчики магнитного поля и держатели датчиков выполнены из капролона. Неметаллические части диагностики позволяют исключить возможность существенного искажения вакуумного магнитного поля вблизи зоны измерения.

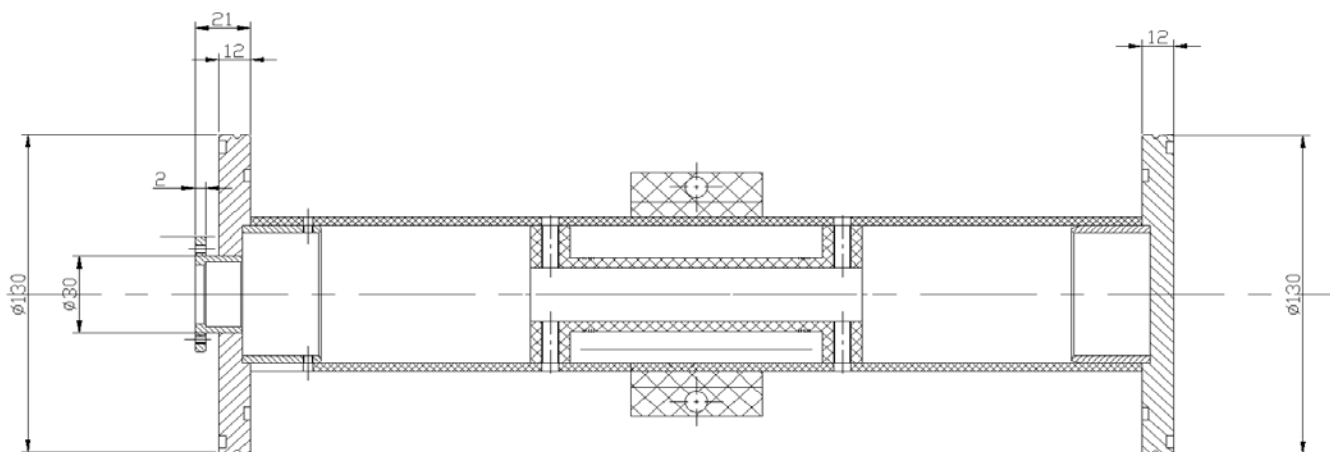


Рис. 4. Сборка датчиков в зонах 1, 2 центральной ловушки ГОЛ-NB

Так как напряженность магнитного поля различна в каждой зоне центральной ловушки — напряженность увеличивается по мере приближения к пробкам ловушки, необходимо правильно подобрать параметры каждой катушки, используемой в измерениях. Рабочая площадь каждой катушки, которая участвует в измерениях, составляет около 7 см^2 . При использовании катушки с числом витков $N = 2$, в поле $B_{\text{vac}} = 1.2 \text{ Тл}$ и характерным временем действия поля $\tau = 1 \text{ мс}$, ожидаемый сигнал катушки составит около 1.5 В , для магнитного поля $B_{\text{vac}} = 3 \text{ Тл}$ сигнал будет равен около 4 В .

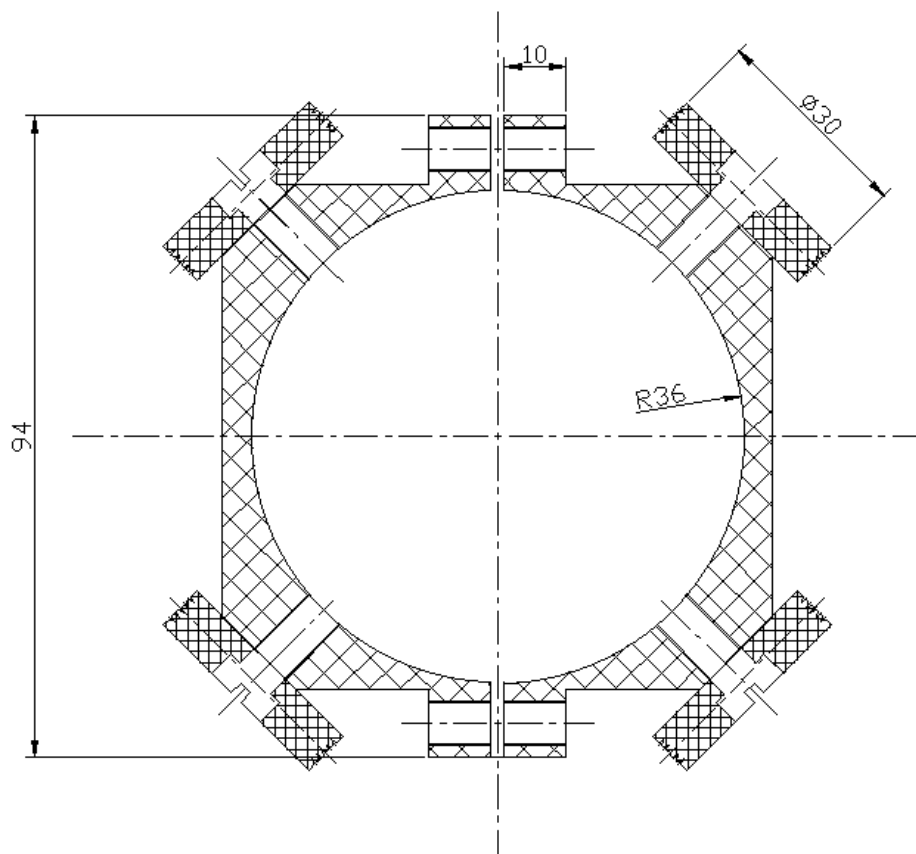


Рис. 5. Сборочный чертеж держателя и датчиков магнитного поля

При измерении определенной пространственной компоненты магнитного поля важно исключить влияние других, особенно в тех случаях, когда напряженность одной из проекций магнитного поля много больше двух других проекций. Для этого было решено сделать несколько канавок под измерительный провод на каждой катушке. Вид катушки изображен на *Рис. 6*.

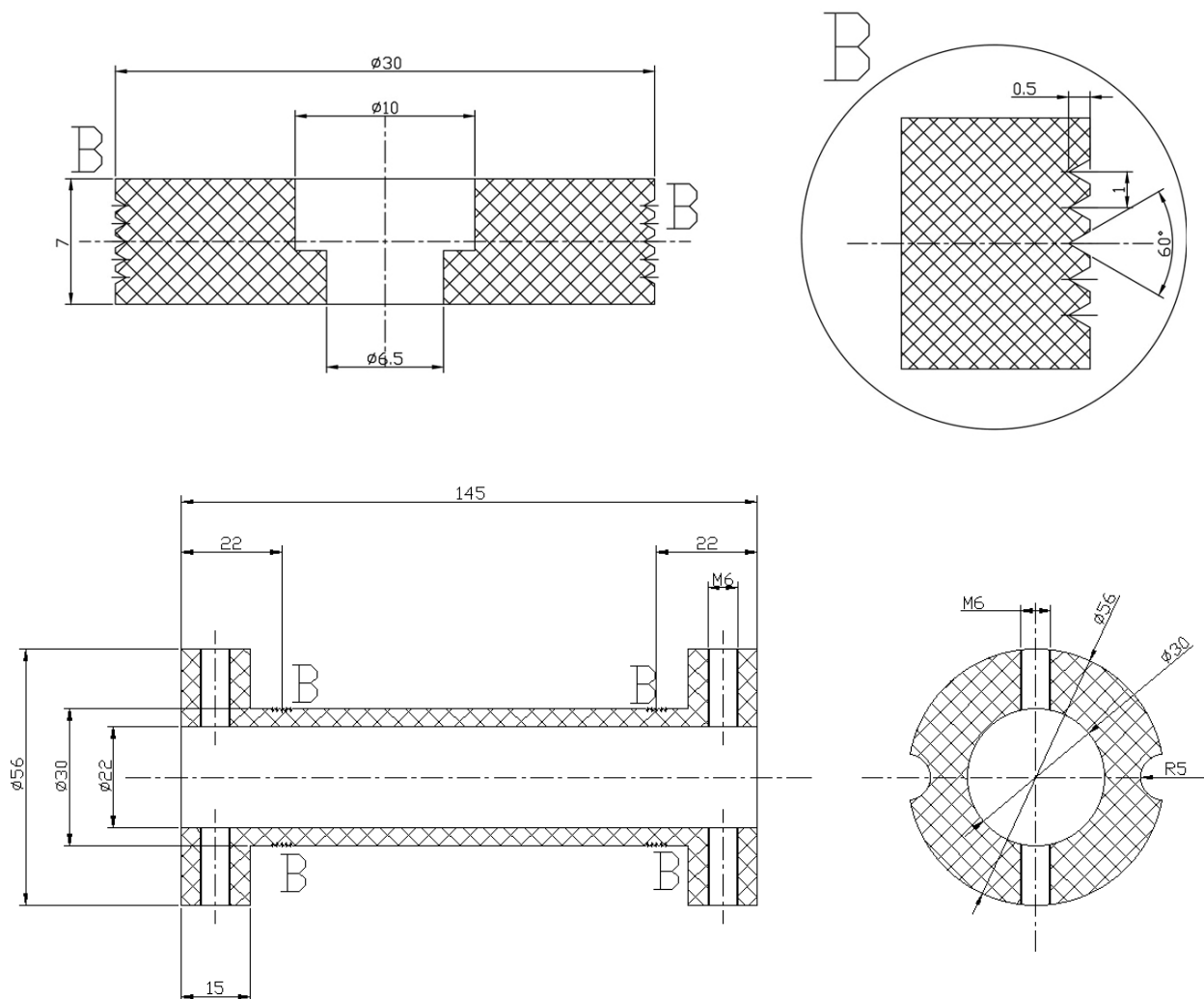


Рис. 7. Чертеж датчиков магнитного поля

В зоне 3 будут расположены девять датчиков магнитного поля, по четыре датчика на радиальную и азимутальную компоненту поля, и один датчик для компоненты магнитного поля V_z . Датчики будут расположены от ловушки на расстоянии, равном характерному радиусу плазмы — 0.2 м. Сборка катушек изображена на *Рис. 8*.

Каждая катушка будет подключена через вакуумный соединитель 2РМГ к АЦП А1220 [21], входное сопротивление которого составляет 50 Ом. Постоянная времени цепи $\tau \sim 18$ нс при $N = 4$, что много меньше характерного времени работы магнитного поля и, следовательно, не приведет к серьезным ошибкам в измерениях. Схема измерений представлена на *Рис. 7*.

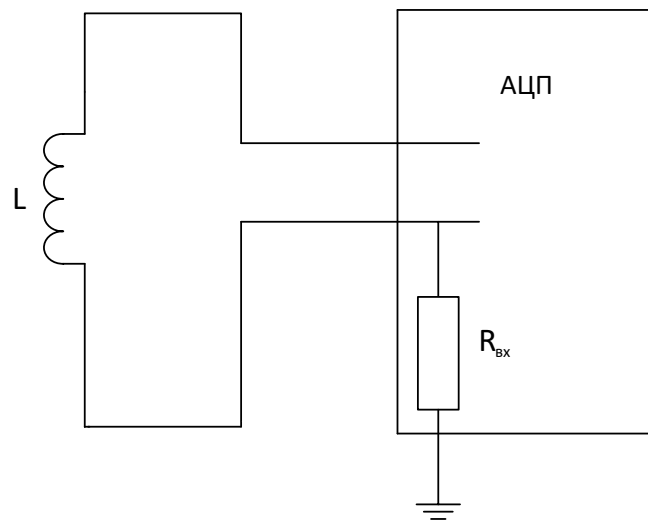


Рис. 7 Схема измерений

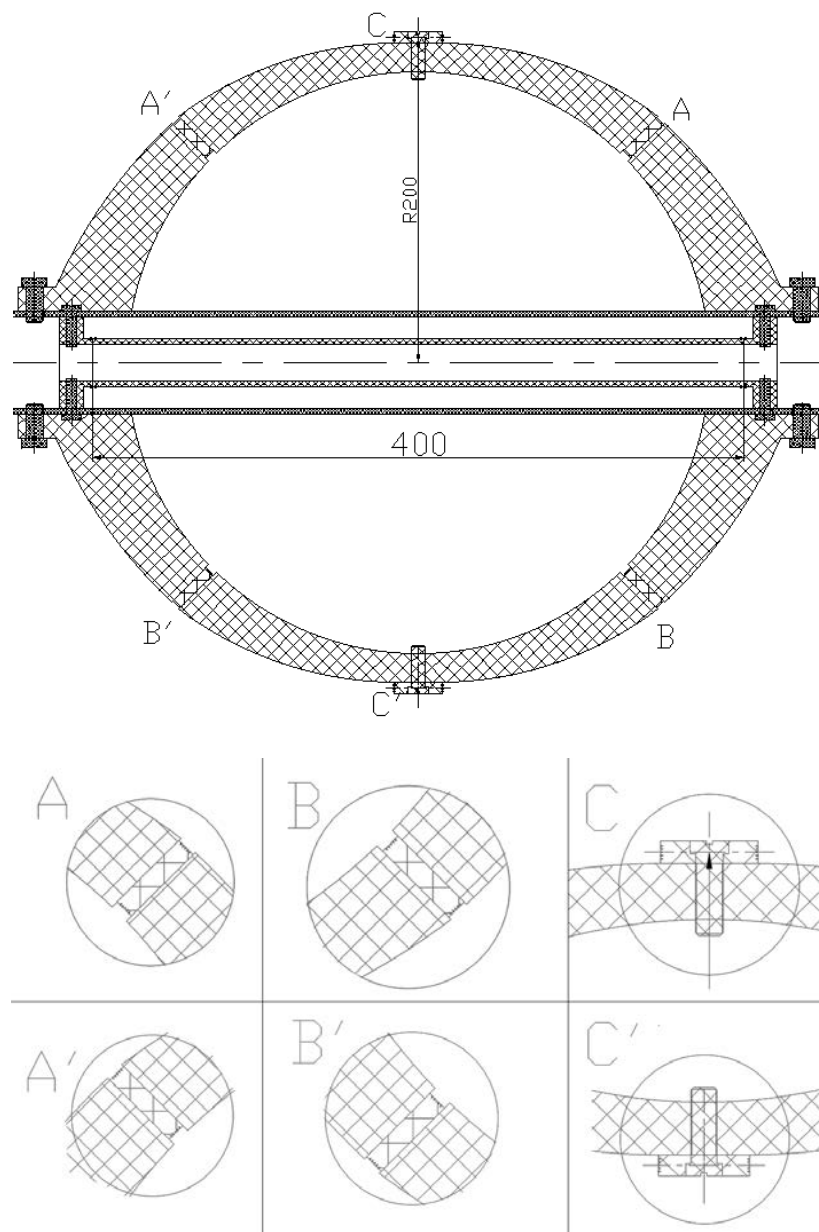


Рис. 8 Сборка датчиков в зоне 3 центральной ловушки ГОЛ-НВ

4. Проект магнитной диагностики плазмы

Опыт плазменных экспериментов, в том числе ГДЛ и ГОЛ-3, говорит о необходимости разработки магнитной диагностики плазмы ГОЛ-NB в виду развития различного вида магнитных флуктуаций в плазме.

Магнитная диагностика плазмы будет включать в себя две подсистемы:

- 1) Магнитная диагностика центральной ловушки;
- 2) Магнитная диагностика секции сильного магнитного поля

Магнитная диагностика центральной ловушки

Планируется, что в центральной ловушке будут установлены круговая и линейная сборки датчиков магнитных сигналов. Для измерения пространственной азимутальной моды колебаний плазмы $m = 4$, в круговой сборке требуется, по крайней мере, 9 датчиков. Общее число датчиков магнитной диагностики для произвольной моды колебаний вычисляется по формуле $M = 2m + 1$. Датчики линейной сборки будут измерять сигнал, источником которого являются радиальные возмущения магнитного поля, в различных точках на длине установки. Расстояние между датчиками можно оценить, зная альфеновскую скорость $C_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho_i}}$, где ρ_i — плотность ионов, и частоту циклотронного резонанса Ω_{ci} .

Проектная напряженность магнитного поля установки ГОЛ-NB в зоне 3, изображенной на Рис.3, порядка 0,6 Тл. Исходя из оценки циклотронной частоты $\Omega_{ci} \sim 0,6 \cdot 10^8$ Гц следует, что частота дискретизации АЦП $\delta f = R_{вх} / L$ должна быть не меньше чем 10^8 Гц. Это требование накладывает ограничение на индуктивность измерительных катушек в этой зоне, расчет которой производится по формуле $L = \mu_0 \pi N^2 \frac{a}{2}$. При радиусе катушки $a = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м, витков $N = 7$, получаем, что индуктивность $L \approx 4,8 \cdot 10^{-7}$ Гн. Входное сопротивление АЦП $R_{вх} = 50$ Ом, что обеспечивает $\delta f \sim 10^8$ Гц. Ожидаемая величина напряжения равна 0,3 В.

Магнитная диагностика секции сильного магнитного поля

Как и в случае центральной ловушки, в зоне сильного магнитного поля требуется круговая сборка магнитных датчиков. Но также, для исследования диамагнитных явлений плазмы ГОЛ-NB, требуется создание измерительной петли, обычно называемой диамагнитной петлей.

Однако, измерение диамагнетизма плазмы ГОЛ-NB сопряжено с определенными сложностями: малое значение $\beta \sim 10^{-5}$, малый диаметр вакуумной камеры и импульсный режим магнитного поля установки. Все эти факторы вызывают необходимость в создании диамагнитной петли с дополнительной внешней обмоткой, компенсирующей магнитный поток вакуумного магнитного поля и влияния стенок камеры на магнитное поле. Также, требуется, чтобы диаметр

диамангнитной петли был сопоставим с диаметром вакуумной камеры многопробочной секции ГОЛ-НВ — 0.13 м.

5. Заключение

Результаты работы заключаются в следующем:

1. Спроектирована и отправлена на изготовление система контроля вакуумного магнитного поля для центральной ловушки установки ГОЛ-НВ.
2. Изучены возможные источники магнитных возмущений плазмы ГОЛ-НВ.
3. Разработано техническое задание на проектирование магнитной диагностики плазмы ГОЛ-НВ.

В заключение автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю В. В. Поступаеву за внесенный вклад в проделанную работу и конструктивные замечания, В.В. Приходько за консультации по опыту работы магнитной диагностики установки ГДЛ, Судникову А.В. и Христо М.С. за помощь в поиске литературы, а также Касатову А.А. за консультации по работе измерительных систем.

Список литературы:

1. Будкер Г. И., Мирнов В. В., Рютов Д. Д. Влияние гофрировки магнитного поля на расширение и остывание плотной плазмы // Письма в ЖЭТФ. – 1971. – Т. 14. – №. 5.
2. Postupaev V.V. et al. The GOL-NB program: further steps in multiple-mirror confinement research // Nucl. Fusion., 2017. Vol. 57, № 3.
3. Casper T.A., Smith G.R. Observation of alfvén ion-cyclotron fluctuations in the end-cell plasma in the tandem mirror experiment // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48, № 15. P. 1015–1018.
4. Цидулко Ю. А., Черноштанов И. С. Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в аксиально-симметричной ловушке с наклонной инжекцией быстрых атомов // Физика плазмы. – 2014. – Т. 40. – №. 12. – С. 1074-1083.
5. Аникеев А. В. и др. Энергетический спектр продольных потерь ионов в ГДЛ при развитии альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости // Физика плазмы. – 2015. – Т. 41. – №. 10. – С. 839-849.
6. Cordey J. G., Kuo-Petravić L. G., Petravić M. The ion cyclotron drift loss-cone instability in mirror magnetic wells // Nuclear Fusion. – 1968. – Т. 8. – №. 3. – С. 153.
7. Beklemishev A. D. Bounce Instability in Multiple-Mirror Trap // Fusion science and technology. – 2007. – Т. 51. – №. 2Т. – С. 180-182.
8. Поступаев В. В., Юров Д. В. Моделирование референсного сценария работы многопробочной ловушки ГОЛ-NB // Физика плазмы. – 2016. – Т. 42. – №. 11. – С. 966-977.
9. Beklemishev A. D. et al. Vortex confinement of plasmas in symmetric mirror traps // Fusion science and technology. – 2010. – Т. 57. – №. 4. – С. 351-360.
10. Мирнов С. В. Зондовая методика измерения смещения токового шнура в цилиндрической и тороидальной камерах // Атомная энергия. – 1964. – Т. 17. – №. 3. – С. 209.
11. Jakubowska K. et al. Motional Stark effect diagnostic on TEXTOR // Review of scientific instruments. – 2004. – Т. 75. – №. 10. – С. 3475-3477.
12. Wolf R. C. et al. Motional Stark effect measurements of the local ICRH induced diamagnetism in JET plasmas // Nuclear fusion. – 1993. – Т. 33. – №. 12. – С. 1835.
13. Abdrachitov G. F. et al. Motional stark effect diagnostic for multi-chord measurements of plasma beta in GDT // Fusion science and technology. – 2005. – Т. 47. – №. 1Т. – С. 159-162.
14. Николаев В., Поступаев В., Таубер М. Вакуумно-плазменная система установки ГОЛ-3 // Препринт ИЯФ АН СССР 1991-105. Новосибирск: 1991.
15. Судников А. В. и др. Исследование вращения плазмы в установке гол-3 // Физика плазмы. – 2012. – Т. 38. – №. 9. – С. 779.
16. Zaytsev K. V. et al. Magnetic Measurements at the GDT Facility // Fusion Science and Technology. – 2013. – Т. 63. – №. 1Т. – С. 346-348.
17. Патров М. И. и др. Диагностика МГД-неустойчивостей на сферическом токамаке глобус-м // Физика плазмы. – 2007. – Т. 33. – №. 2. – С. 99-108.

18. Kim J. S. et al. MHD mode identification of tokamak plasmas from Mirnov signals //Plasma physics and controlled fusion. – 1999. – Т. 41. – №. 11. – С. 1399.
19. Bolshakova I. et al. Performance of Hall sensor-based devices for magnetic field diagnosis at fusion reactors //Sensor Letters. – 2007. – Т. 5. – №. 1. – С. 283-288.
20. М. Kocan, et al., Final design of the ITER outer vessel steady-state magnetic sensors, Fusion Eng. Des. (2017), URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.043>
21. Гурко В.Ф., Зубарев П.В., Квашнин А.Н., Моисеев Д.В., Хильченко А.Д., Хильченко В.А.// Приборы и техника эксперимента. 2003. Т. 46. № 5. С. 32-37