

МЕЛКОМАСШТАБНЫЙ МАКЕТ ТОРОИДАЛЬНОЙ КАТУШКИ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Е. А. Виницкий^{1,2}, А. С. Дрозд², Е. В. Хитрова¹,
М. А. Осипов¹, С. А. Крат¹

В работе представлены создание и экспериментальные испытания мелкомасштабного макета тороидальной катушки сферического токамака и системы для регистрации трёхкомпонентных магнитных полей. Основной целью исследования является разработка инструментальной базы для изучения влияния геометрических особенностей непрерывного тороидального соленоида на процессы удержания высокотемпературной плазмы. Макет тороидальной катушки для токамака MEPhIST-1 масштаба 1:3 был изготовлен с возможностью модульной сборки и установки измерительной аппаратуры в различных полоидальных сечениях. Для измерения магнитного поля разработана печатная плата, содержащая массив цифровых датчиков Холла, встроенные микроконтроллеры для синхронизации опроса и автономный сбор данных в реальном времени. Архитектура системы ориентирована на регистрацию малых рассеянных вертикальных и радиальных полей на фоне большого тороидального поля. Созданный комплекс был испытан при постоянном токе через катушку. Первичные измерения подтвердили корректную регистрацию компонент магнитного поля. Несмотря на влияние шумов при малых токах, при повышении тока система зафиксировала устойчивые распределения, сопоставимые с расчётыми оценками.

Ключевые слова: тороидальные катушки, сферический токамак, датчик Холла, рассеянные поля.

¹ НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31; e-mail: egor.vinitsky@gmail.com.
² НИЦ “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Введение. Тороидальное магнитное поле является главной удерживающей силой в установках по изучению вопросов управляемого термоядерного синтеза. Увеличение амплитуды тороидального поля приводит к улучшению удержания и увеличению термоядерной мощности установки [1]. Однако неточности, допущенные при изготовлении и монтаже тороидальных катушек, приводят к возникновению рассеянных вертикальных и радиальных полей, которые являются причиной возникновения неустойчивостей [2] и образования запертых частиц [3]. Эти факторы значительно ухудшают основные параметры плазмы: длительность импульса, ток, плотность и температуру плазмы [4, 5].

На данный момент на стадии проектирования находится токамак MEPhIST-1, улучшенная версия токамака MEPhIST-0 [6]. Кроме этого, обсуждается вопрос выбора системы тороидального магнитного поля для установки. Одним из возможных вариантов предлагается идея непрерывного тороидального соленоида (HTC) [7], в котором каждый виток плавно переходит в другой на внутреннем обходе. Данная концепция использовалась на токамаках ST-40 [8], GLAST-III [9] и MEPhIST-0 [10]. Один из возможных вариантов – изготовление HTC из высокотемпературных сверхпроводников [11]. Использование данных материалов позволит достигать тороидального магнитного поля вплоть до 1.5 Тл при температуре сверхпроводника 21.1 К [12].

Для оценки влияния таких факторов обычно используются численные расчеты по определению магнитных полей [13–15], создаваемых тороидальными катушками. Однако в случае HTC рассеянные поля возникают не только за счет неточностей, допущенных при монтаже, но и в результате наклона тороидальной обмотки. По этой причине для оценки неприятных факторов от тороидального соленоида для токамака MEPhIST-1 была предложена экспериментальная методика для определения магнитной конфигурации от тороидальной катушки в виде HTC. Экспериментальное определение магнитных полей позволит не только верифицировать расчеты, но и оценить влияние неточностей, допущенных при монтаже катушки, на магнитные поля.

Данная работа посвящена описанию экспериментальной установки по измерению магнитных полей от макета HTC. В первой секции обсуждается мелкомасштабный макет (1:3) тороидальной катушки токамака MEPhIST-1. Во второй секции приведено описание платы датчиков Холла для измерения магнитных полей и сбора данных. В последней секции статьи приведены первые результаты измерений магнитной конфигурации мелкомасштабного макета тороидальной катушки токамака MEPhIST-1.

Мелкомасштабный макет тороидальной катушки токамака MEPhIST-1. Для оценки магнитных полей в области горения плазменного разряда токамака был спро-

ектирован и создан мелкомасштабный макет НТС токамака MEPhIST-1. Сечение тороидального соленоида было выбрано из результатов работы [11]. Макет состоит из двух куполов и основания, напечатанных на 3D принтере с пазами под медный провод. На рис. 1 продемонстрированы модель мелкомасштабного макета НТС (рис. 1(а)) и собранный макет (рис. 1(б)), с намотанным на него медным проводом МГ 50. Намотка провода определяется условием минимизации вертикальных и радиальных полей в области внутри катушки. Подробнее о выборе линии намотки говорится в работе [7]. Для выравнивания медного провода на внутреннем диаметре используется внутренний цилиндр с пазами для медного провода (рис. 1(в)). Вся конструкция является разборной и позволяет менять конфигурацию эксперимента в зависимости от потребностей.

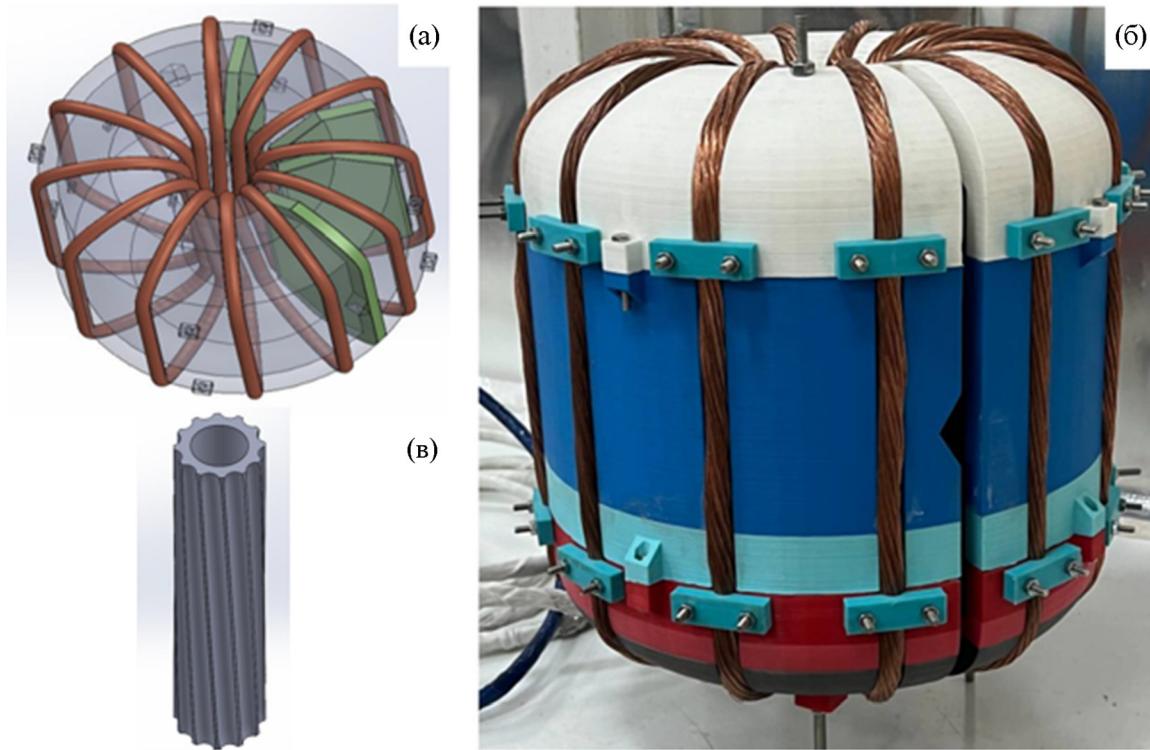


Рис. 1: (а) модель мелкомасштабного НТС, зеленым цветом изображены кассеты с датчиком, коричневым цветом – медный провод; (б) собранная модель с намотанным медным проводом; (в) внутренний цилиндр, используемый для центрирования медного провода с пазами для правильной намотки.

Спроектированное устройство позволяет проводить измерения магнитных полей в 4 полоидальных сечениях, соответствующих различным тороидальным углам $\varphi = 0; 7.5; 12.5; 22.5^\circ$. Такое расположение позволяет определять распределение гофрировки

магнитного поля в вертикальном и радиальном направлениях. При этом кассету, расположенную в полоидальном сечении $\varphi = 0$, можно вытащить без разбирания всего макета, что обеспечивает гибкость при измерении рассеянных вертикальных и радиальных полей. Также имеются крепления для расположения кассеты в горизонтальной плоскости макета.

Плата регистрации и сбора данных о магнитных полях на основе датчиков Холла. Для регистрации магнитных полей макета НТС была разработана печатная плата, представляющая собой 2D массив из трехкомпонентных цифровых датчиков Холла и микроконтроллеров для управления и регистрации данных. Массив состоит из 4 датчиков, расположенных в ширину, и 9 датчиков, расположенных в высоту, т. е. 36 датчиков Холла в сумме. Данные собираются в оперативную память (внутреннюю SRAM) “ведомых” микроконтроллеров STM32F412RGT6. После завершения записи данные с каждого “ведомого” микроконтроллера поочередно собираются “ведущим” STM32F412RGT6 и записываются на flash-носитель. Триггер запуска передается в виде фронта электрического импульса “ведущему” микроконтроллеру, который затем раздает его всем остальным. Основные параметры используемого трехкомпонентного датчика Холла TLI493D-A2B6 представлены в табл. 1. Каждая отдельная микросхема датчика Холла питается от регулятора напряжения MCP1700T-3302E/TT, что позволяет добиться шума в измерениях порядка пары значащих бит и не превышает 0.3 мТл.

Таблица 1

Основные параметры датчика Холла TLI493D-A2B6

| | |
|-----------------------------|----------------------------|
| Диапазон измерений | ± 200 мТл |
| Интерфейс | цифровой, I ₂ C |
| Разрядность | 12 бит |
| Максимальная частота опроса | 7.5 кГц |

На каждом из “ведомых” микроконтроллеров использовались 3 отдельных модуля I₂C для управления и чтения данных с датчиков. Триггер старта нового измерения был настроен на завершение чтения данных с предыдущего, а новое чтение данных вызывается по срабатыванию настроенного в микроконтроллере STM32 таймера. Частота опроса в проведенных измерениях составляла $f = 1$ кГц. Кроме того, передача данных по шине I₂C проводится с использованием DMA (Direct Memory Access), что позволяет практически одновременно считывать данные с 3 датчиков Холла. Таким образом процесс записи и чтения данных детерминирован и работает в реальном времени. Данные

между “ведомыми” и “ведущим” микроконтроллером передаются по интерфейсу SPI с проверкой целостности данных при помощи расчета контрольной суммы. Блок-схема платы регистрации и сбора данных представлена на рис. 2.

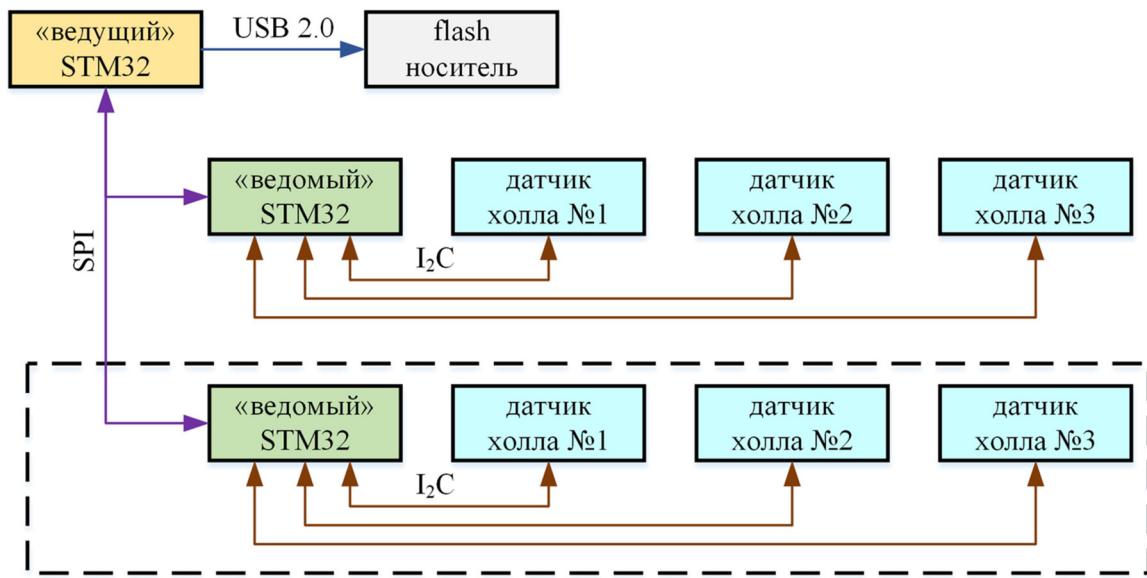


Рис. 2: Блок-схема платы регистрации и сбора данных. Область в пунктирной рамке повторяется аналогично верхней части схемы. Плата регистрации включает в себя 36 датчиков Холла и 12 “ведомых” STM32.

Размер изготовленной платы выбран исходя из геометрии макета НТС так, чтобы можно было жестко фиксировать ее положение внутри макета. Выводами являются разъем питания 5 В, разъем SMA входящего триггера и разъем USB под flash-накопитель. Плата является двухслойной с толщиной 1.6 мм. Каждый микроконтроллер имеет отдельную шину SWD (Serial Wire Debug) для отладки и прошивки. На рис. 3 представлена фотография изготовленной платы (а) и точки измерения магнитного поля в полоидальном сечении токамака (б).

Глубина записи определяется объемом памяти SRAM микроконтроллера, которая в случае STM32F412RGT6 составляет 256 кБ. Данные с датчиков Холла собираются в виде регистров TLI493D. Одно измерение трех компонент занимает 6 байт. Таким образом, можно записать до ~ 43 тысяч точек на каждую из компонент магнитного поля.

Аналогичные датчики Холла использовались для регистрации магнитных полей в зале установки Т-15МД [16]. В работе была проведена калибровка датчиков в катушке

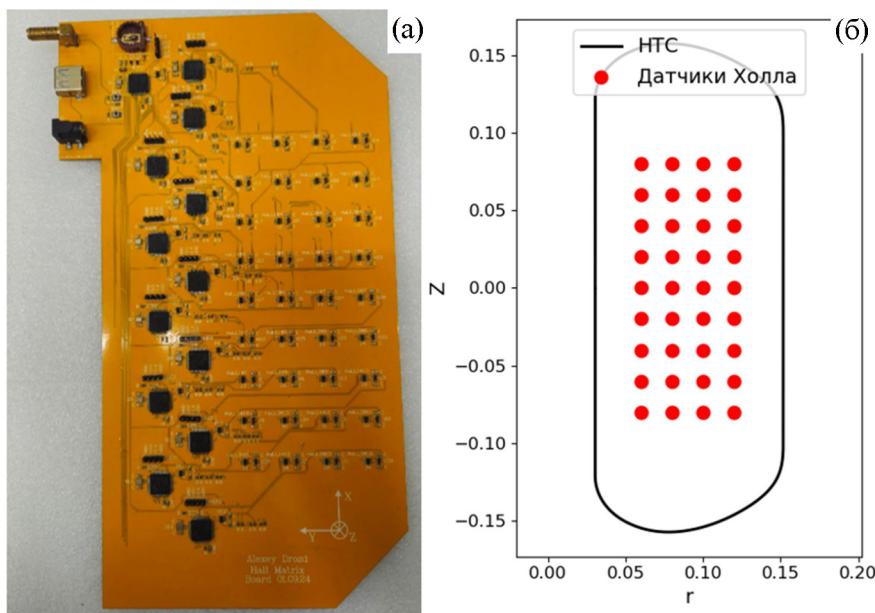


Рис. 3: (а) фотография изготовленной платы регистрации и сбора данных датчиков Холла; (б) расположение точек измерения датчиков Холла в полоидальном сечении.

Гельмгольца путем сравнения с сертифицированным прибором ТПУ-02. Было показано, что ошибки измерения магнитного поля по компонентам не превышали 1%.

Первые результаты измерений магнитных полей. Целью первых измерений являлась проверка работоспособности аппаратной части и методики регистрации магнитного поля. Поэтому во время эксперимента использовалась одна печатная плата, описанная в прошлом разделе. Она помещалась в полоидальном сечении между витками НТС при тороидальном угле $\varphi = 0$. Ток на катушку подавался с помощью блока постоянного тока TDK Lambda величиной 180 А. Результаты измерения компонент магнитного поля по радиусу для вертикального положения $Z = 0$ показаны на рис. 4 слева.

Экспериментальные данные сравнивались с результатами моделирования в программе COMSOL методом конечных элементов. Для тороидального поля результаты расчета и экспериментальные данные хорошо совпадают. Отметим, что уровень экспериментальных сигналов радиального и вертикального полей были на уровне с шумовым сигналом системы сбора данных. Так, среднее радиальное поле в эксперименте было $B_r = 1.3$ Гс, а вертикальное поле $B_z = 2.3$ Гс. На данном этапе можно сказать, что отношение рассеянных полей к тороидальному полю не превышает $\frac{\sqrt{(B_r + B_z)^2}}{B_T} < 4\%$.

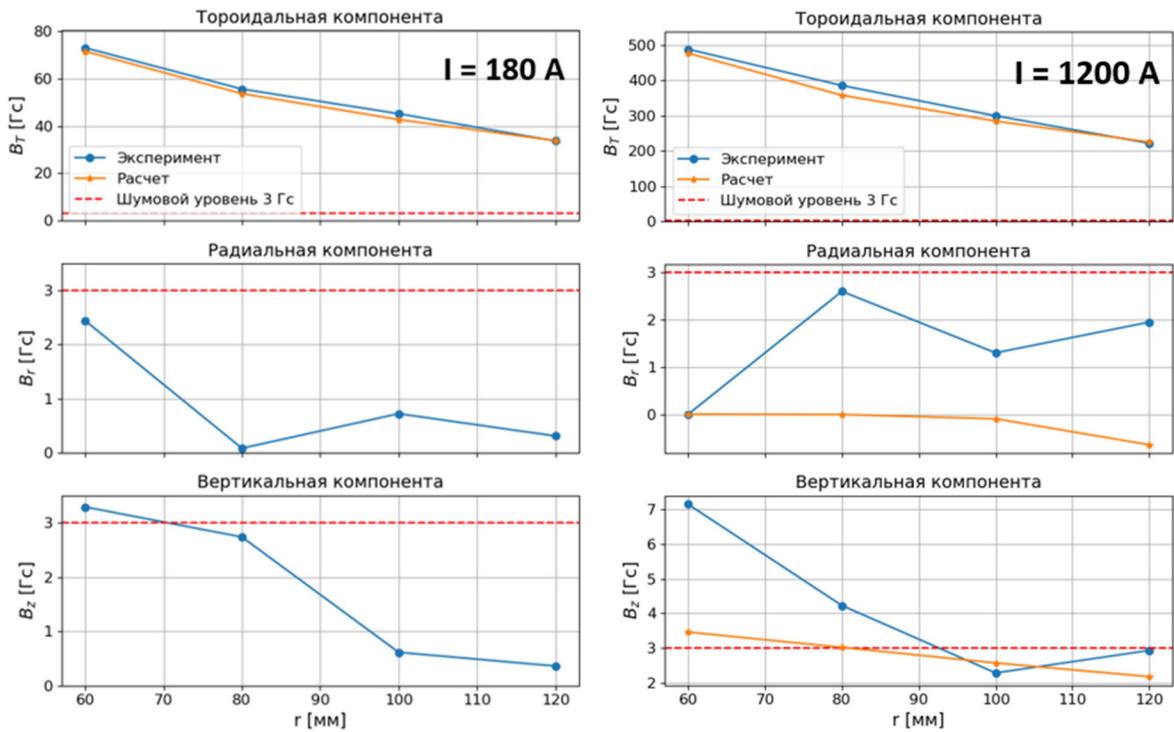


Рис. 4: Радиальные распределения компонент магнитного поля, которое создает НТС для вертикального положения $Z = 0$ при токе через катушку $I = 180 \text{ A}$ и токе через катушку $I = 1200 \text{ A}$.

Для повышения уровня сигнала радиальной и вертикальной компонент магнитного поля ток в катушке был увеличен до 1200 А. На рис. 4 справа представлены распределения радиальной и вертикальной компонент магнитного поля по полоидальному сечению макета. Повышение поля в 6.4 раза приводит к значимому сигналу для вертикальной компоненты поля, при этом радиальная компонента остается сравнима с шумовым сигналом. Доминирующей компонентой рассеянного поля является вертикальная компонента B_z , что совпадает с численными расчетами для MEPhIST-1 [11] и MEPhIST-0 [7]. Отношение рассеянных полей к торoidalному полю на радиусе $r = 80$ мм составляет $\frac{\sqrt{(B_r + B_z)^2}}{B_T} \approx 1.2\%$. При этом расчетное значение равняется $\frac{\sqrt{(B_r + B_z)^2}}{B_T} \approx 0.3\%$. Подобное расхождение может быть связано с неточностью установки торoidalной катушки. Для подтверждения этого фактора необходимо проведение дополнительных расчетов и экспериментов.

Для случая $I = 1200$ А рассмотрим двумерную карту распределения всех компонент магнитного поля для эксперимента и в случае численного расчета. Сравнение представлено на рис. 5.

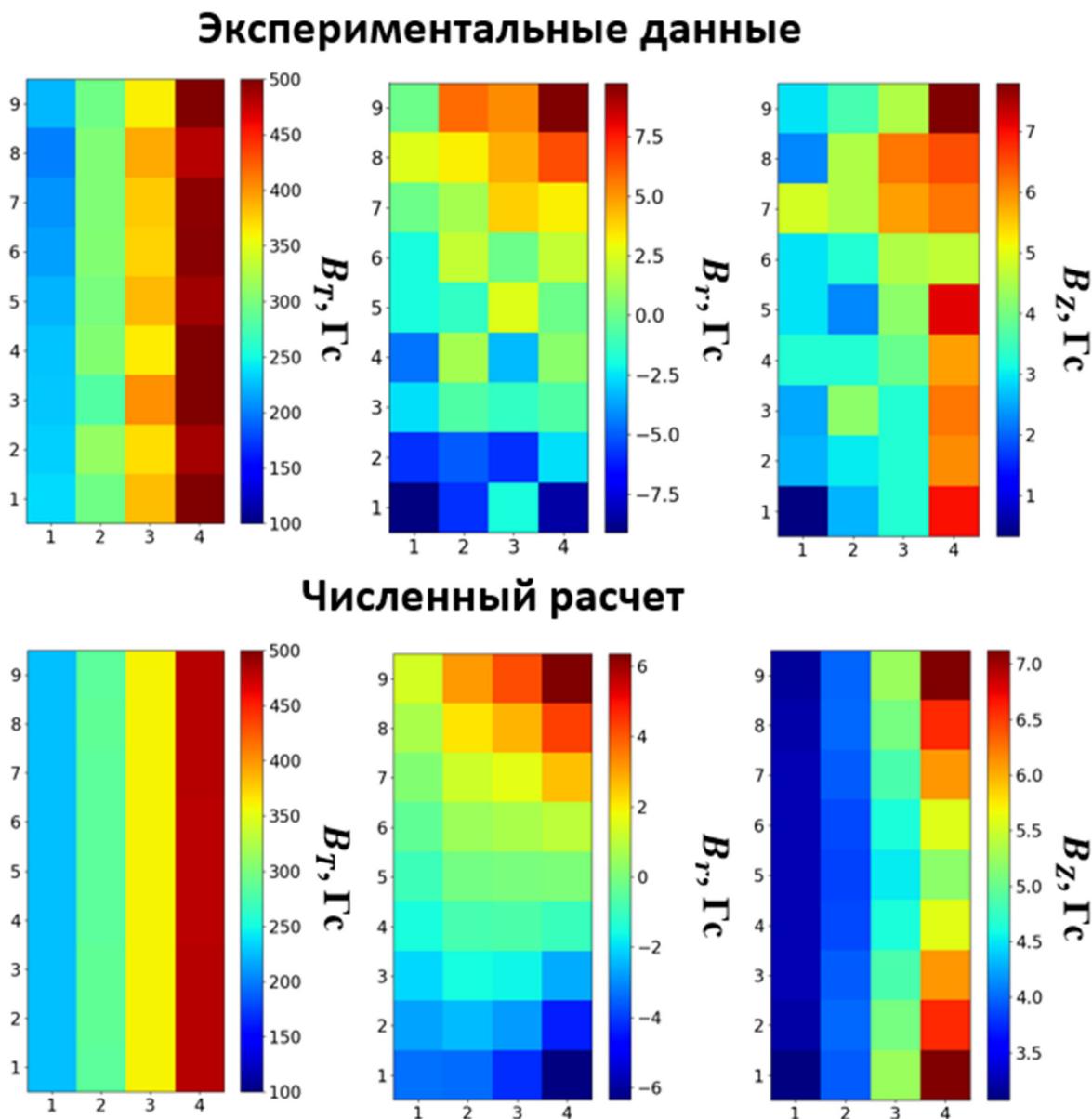


Рис. 5: Двумерная карта компонент магнитного поля для экспериментальных данных и для численного расчета.

В случае тороидальной компоненты B_T экспериментальные данные демонстрируют хорошее согласие с результатами моделирования как по амплитуде, так и по про-

странственному распределению. Для радиальной компоненты B_r также наблюдается совпадение общей структуры поля: в обоих случаях в верхней правой части сечения присутствует область максимального положительного значения, аналогичная область располагается в нижней левой части, а минимум поля приходится на линию $Z = 0$. Амплитуды сигналов совпадают по порядку величины. Для вертикальной компоненты B_z амплитуды также согласуются по порядку, однако совпадение пространственного распределения ограничивается в основном радиальным направлением. В вертикальном направлении экспериментальные данные и результаты моделирования демонстрируют различия. Эти несоответствия могут быть обусловлены влиянием токопроводов, особенностями реальной геометрии установки, а также небольшим наклоном или смещением датчиков, что приводит к паразитному вкладу других компонент поля.

Заключение. В ходе работы создан экспериментальный комплекс, включающий мелкомасштабный макет тороидальной катушки и систему измерения магнитных полей на основе массива цифровых датчиков Холла. Конструкция макета позволяет воспроизвести геометрию непрерывного тороидального соленоида и варьировать полоидальное положение измерительных модулей, что обеспечивает гибкость при исследовании магнитной конфигурации.

Разработанное устройство регистрации продемонстрировало высокую стабильность работы и достаточную чувствительность для фиксации слабых отклонений магнитного поля при высоких токах через катушку.

Проведённые измерения подтвердили работоспособность методики. Выявлено, что основной компонентой рассеянных полей является вертикальная компонента, что согласуется с расчетами. Отношение рассеянных полей к тороидальному в эксперименте в несколько раз превышает рассчитанное значение, что может быть связано с неточностями, допущенными при монтаже тороидальной катушки и токоподводами. Разработанная методика создает основу для дальнейших исследований, включая определение гофрировки тороидального поля и определение полоидальных распределений компонент магнитного поля. Полученные экспериментальные данные и практические разработки могут быть использованы в дальнейшем для разработки непрерывного тороидального соленоида для сферического токамака, в том числе на основе высокотемпературных сверхпроводников.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00749, <https://rscf.ru/project/24-29-00749/>.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. R. Cohn, L. Bromberg, *J. Fusion Energy* **5**(3), (1986).
- [2] R. J. La Haye et al., *Phys. Fluids B* **4**(7), (1992).
- [3] S. D. Scott et al., *J. Plasma Phys.* **86**(1), (2020).
- [4] G. Sadler et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **34**(13), (1992).
- [5] A. A. E. Van Blokland et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **36**(5), (1994).
- [6] S. Krat et al., *Fusion Sci. Technol.* Taylor and Francis Ltd. **79**(4), 446 (2023).
- [7] E. Vinitskiy et al., *Fusion Sci. Technol.* Taylor & Francis.
- [8] B. K. Huang et al., *Fusion Eng. Des.* **124**, (2017).
- [9] Z. Ahmad et al., *Phys. Scr.* **92**(4), (2017).
- [10] S. A. Krat et al., *Phys. At. Nucl.* **84**(12), (2021).
- [11] I. V. Martirosian et al., *Phys. At. Nucl.* **87**(12), 1849 (2024).
- [12] D. A. Aleksandrov et al., *Mod. Transp. Syst. Technol.* **11**(3), 409 (2025).
- [13] P. Y. Jiang et al., *Phys. Plasmas* **31**(2), (2024).
- [14] L. Kripner et al., *Fusion Eng. Des.* Elsevier Ltd. **187**, (2023).
- [15] B. Mahdavipour, A. Salar Elahi, M. Ghoranneviss, *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* **26**(2), (2016).
- [16] А. С. Дрозд и др., Сборник тезисов XXI всероссийской конференции “Диагностика высокотемпературной плазмы”. Сочи, 2025. Р. 67.

Поступила в редакцию 16 октября 2025 г.

После доработки 3 декабря 2025 г.

Принята к публикации 3 декабря 2025 г.