

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬ-
НОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИ-
ВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Апостол Юлия Сергеевна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Создание устройства визуализации магнитного поля на основе магнито-
чувствительных элементов**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19307

Научный руководитель:

Научный сотрудник лаборатории 4
ИТПМ СО РАН

к. ф.- м. н. Ядренкин М. А.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2020 г.

Преподаватель практикума

д. ф.-м. н. Терещенко О. Е.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2020 г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 2020 г.

Новосибирск 2020

Аннотация

Целью данной работы являлось создание устройства визуализации магнитного поля, которая бы отражала как его направление, так и его величину, представленную наглядно. Для этого были созданы и объединены в одном устройстве (далее «Рамка») два объекта: матрица магниточувствительных элементов и ферролинза, заполненная ферромагнитной жидкостью. Основой для матрицы служит поликарбонат, линза же выполнена из стекла. Корпус Рамки был распечатан на 3D-принтере.

В работе использовано свойство магниточувствительных предметов вытянутой формы выстраиваться вдоль поля: явление магнитного диполя, а также оптические свойства ферромагнитной жидкости.

Запечатлены конфигурации полей постоянных магнитов. Также приборы были помещены в рабочую камеру магнитогидродинамического стенда, в которой создавалось поле величиной от 0,025 Тл до 0,27 Тл. Найдены места неоднородности поля в камере. Установлена зависимость степени неоднородности поля от величины индукции.

Ключевые слова: магнитное поле, визуализация магнитного поля, магниточувствительные элементы, магнитный диполь, ферролинза, ферромагнитная жидкость, магнитогидродинамический стенд.

Работа выполнена в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН.

Оглавление

Введение	3
Часть 1. Устройство визуализации магнитного поля.	4
1.1. Матрица магниточувствительных элементов.	5
1.2. Ферролинза	6
Часть 2. Экспериментальные исследования конфигураций магнитных полей. ...	7
2.1. Исследование полей постоянных магнитов.	8
2.2. Исследование поля в рабочей камере МГД-стенда.	9
2.3. Погрешность оценки параметра неоднородности магнитного поля	11
Заключение и выводы	12
Список используемой литературы	12
Приложения	13

Введение

В Институте Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН ведётся разработка способов управления аэротермодинамикой перспективных высокоскоростных летательных аппаратов с помощью методов магнито-плазменной аэродинамики. Суть методов заключается во магнитогидродинамическом (МГД) взаимодействии сверхзвуковых ионизованных потоков газа с электрическими и магнитными полями.

В лаборатории быстропротекающих процессов был создан МГД стенд, в основе которого лежит импульсная аэродинамическая установка. Он создан для проведения экспериментальных исследований МГД-управления высокоскоростными газовыми течениями. Рабочая камера расположена в электромагните, который позволяет создавать постоянное магнитное поле вблизи модели с величиной индукции поля до 2,25 Тл. Также в экспериментах используются постоянные редкоземельные магниты. Для ионизации газов используются различные электроразрядные устройства, а также электронная пушка.

Существует необходимость в визуализации магнитного поля в области расположения экспериментальной модели и набегающего потока, а также проверке поля на однородность. С этой целью была поставлена задача разработки и изготовления вспомогательного устройства для визуализации сложных магнитных полей. С высокой точностью это можно сделать с помощью координатного устройства и датчика магнитного поля, но такая методика не позволяет оперативно исследовать структуру магнитного поля. Из доступных и простых устройств для визуализации конфигурации магнитных полей могут быть применены, помимо датчиков, следующие способы: индикатор (пленка), магнитная стружка, ферролинза. У каждого из перечисленных способов есть преимущества и недостатки. При использовании ферролинзы, устройство которой описано далее, получаемая картина ненаглядна и требует дополнительной постобработки изображения, так как возникающие изолинии, создаваемые точечной подсветкой, перпендикулярны линиям магнитного поля.

Если количественная характеристика магнитного поля не так важна, а нужно простое и быстрое устройство, которое позволит отобразить направление линий магнитной индукции в плоскости, можно воспользоваться устройствами, описанными в данной работе.

Целью работы является создание устройства для визуализации магнитного поля в виде комбинации матрицы из магниточувствительных элементов и ферролинзы, а также их сравнение в поле действия постоянных магнитов и в рабочей камере МГД-стенда, расположенной в электромагните.

Во избежание путаницы «магниточувствительными элементами» в этой работе называются именно стрелки матрицы, а не частицы феррожидкости, хотя, конечно, они тоже являются магниточувствительными элементами.

Часть 1. Устройство визуализации магнитного поля.

Абсолютно все вещества имеют магнитные свойства. При появлении магнитного поля тело намагничивается.

Обычно все вещества классифицируют как слабомагнитные, не намагниченные в отсутствие внешнего поля (они в данной работе не рассмотрены), и сильномагнитные. Ферромагнетики и ферримагнетики являются сильномагнитными веществами. Они намагничены даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

В работе используются ферромагнетики в магнитном поле, так как они наиболее магниточувствительны. По квантовым причинам спины электронов внутренних оболочек атомов группируются по параллельной ориентации, образуя домены, и вследствие этого появляется спонтанное намагничение в отсутствие внешнего магнитного поля. Однако домены часто намагничены антипараллельно, поэтому суммарная намагниченность всех доменов близка к нулю.

Основываясь на свойствах ферромагнетиков, было разработано и создано устройство, объединяющее в своей конструкции матрицу из крупных магниточувствительных элементов и ферролинзу. Общий вид устройства показан на рисунке 1.

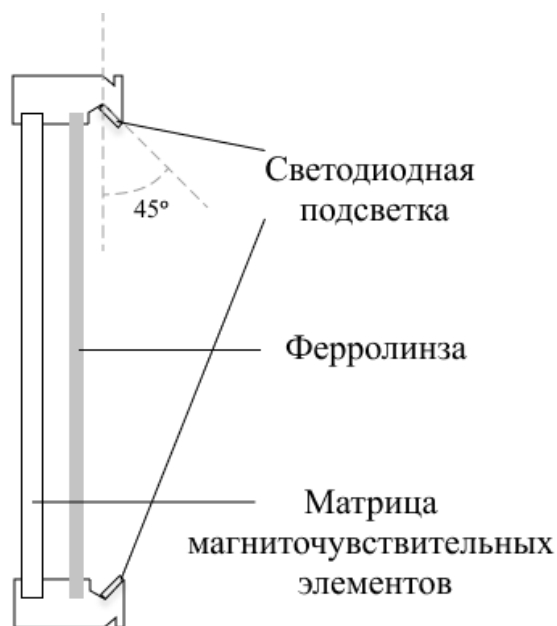


Рис. 1. Общая схема Рамки в поперечном разрезе



Рис. 2. Фотографии Рамки

1.1. Матрица магниточувствительных элементов.

Матрица магниточувствительных элементов (далее «Матрица») представляет собой равномерно расположенные в плоскости металлические Z-образные элементы с шагом по осям 10 мм. Каждый элемент имеет ось вращения и плечи, которые стремятся занять устойчивое положение вдоль линий магнитной индукции.

При внесении Матрицы в магнитное поле элементы ориентируются вдоль поля, показывая таким образом его конфигурацию. Это явление магнитного диполя, который стремится перейти в положение с наименьшей потенциальной

энергией. Благодаря возникающему вращательному моменту элементы поворачиваются в направлении магнитного поля.

Сила, действующая на диполь со стороны магнитного поля:

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \nabla) \vec{B}.^{[1]} \quad (1)$$

На рисунке 2 изображена схема устройства с магниточувствительными элементами, которые выполнены из магнитомягкой стальной проволоки и расположены на основании из поликарбоната.

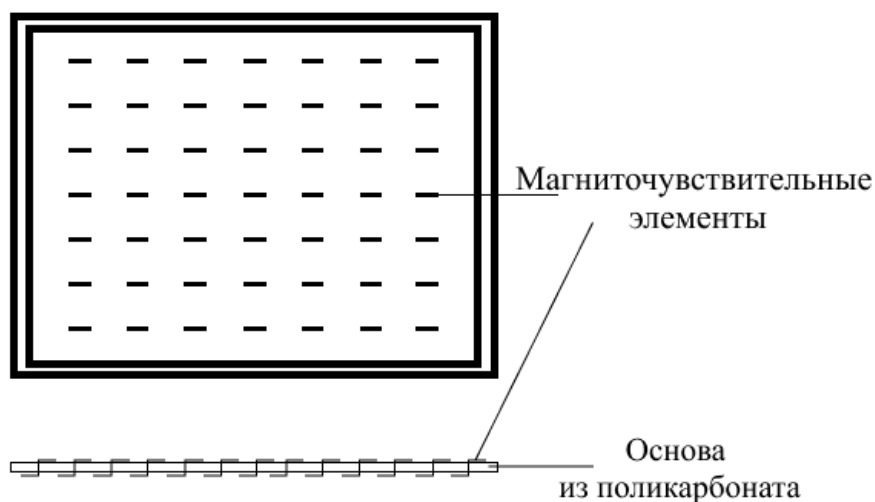


Рис. 3. Схема матрицы магниточувствительных элементов

1.2. Ферролинза

Ферромагнитная жидкость состоит из диспергированных частиц, коллоидно распределенных в жидком носителе. Во избежание коагуляции в раствор добавлены ПАВ, которые формируют слой, препятствующий расслоению жидкой и твердой фаз. Характерный размер частиц составляет порядка 10 нм, что меньше характерной величины домена (10^{-4} - 10^{-6} м), поэтому каждая частица намагничивается в магнитном поле полностью. Тепловое движение частиц позволяет им не оседать под воздействием силы тяжести.

¹ В. И. Яковлев. Классическая электродинамика.

Феррочастицы расположены хаотически. При внесении в магнитное поле они изменяют свою ориентацию и поляризуют проходящий свет в направлении, перпендикулярном линиям магнитной индукции. Свет, отражаясь от стенок частиц, полярируется и происходит образование светлых и темных областей линзы, ориентированных перпендикулярно линиям магнитной индукции. Как сказано ранее, видимая картина распределения линий не отражает реальное направление линий магнитной индукции.

Между двух стекол помещена разбавленная в керосине ферромагнитная жидкость, характеристика которой указана в приложении к работе. По бокам под углом 45° к плоскости линзы располагаются точечные источники света в виде светодиодной ленты.

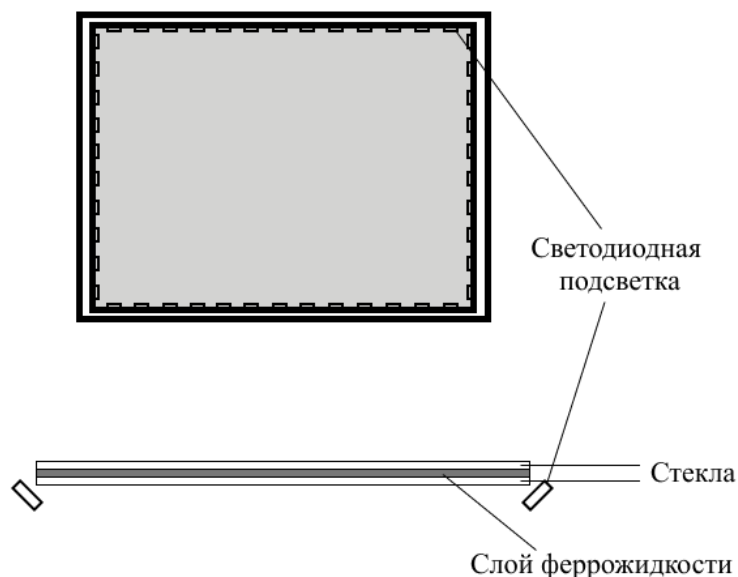


Рис. 4. Схема ферролинзы

Часть 2. Экспериментальные исследования конфигураций магнитных полей.

Экспериментальные исследования конфигураций магнитных полей осуществлялись с помощью Рамки, располагаемой в поле действия магнитных систем. Мгновенные картины визуализации магнитного поля были запечатлены на фотоаппарат Panasonic Lumix G2. Чувствительность матрицы была установлена на уровне 400 ISO, время экспозиции составило $1/30$ сек. Фотографирование процесса происходило в свете фоновой подсветки ферролинзы.

2.1. Исследование полей постоянных магнитов.

С помощью устройства визуализации были исследованы конфигурации магнитных полей, создаваемых постоянными редкоземельными магнитами.

На рисунке 4 показаны случаи расположения сборки из неодимовых магнитов относительно устройства, что приводит к изменению ориентации феррочастиц в жидкости, а также магниточувствительных Z-образных элементов.

При помощи ферролинзы наглядно видно распределение напряженности магнитного поля в исследуемой области (чем плотнее линии, тем больше поле). Магниточувствительные элементы, в свою очередь, показывают направление линий индукции магнитного поля в каждой из точек их расположения.

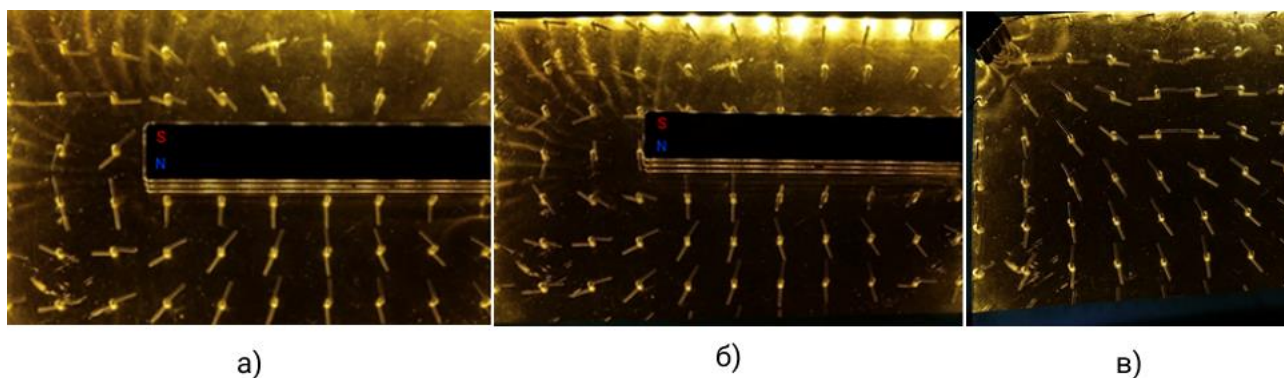


Рис. 5. Конфигурация магнитных полей при разном положении сборки из неодимовых магнитов

Видно, что ферролинза позволяет разрешить мелкомасштабные особенности распределения поля в отличие от матрицы магниточувствительных элементов.

Также были исследованы конфигурации магнитного поля вблизи двух постоянных ферритовых магнитов большой площади ($4/5$ площади рамки) в зависимости от их положения относительно устройства. На рисунке 6 показаны частные случаи расположения магнитов относительно Рамки.

На рисунке 6а) магниты поставлены одноименными полюсами друг к другу, но со смещением; на 6б) правый магнит повернут на 90 градусов по часовой стрелке. Магниточувствительные элементы отражают теоретические распределения линий магнитной индукции при данном расположении магнитов. Рисунок 6в), в сравнении с 6а) и 6б), позволяет увидеть, что плотность линий на линзе отражает силу магнитного поля: магниты здесь расположены ближе.

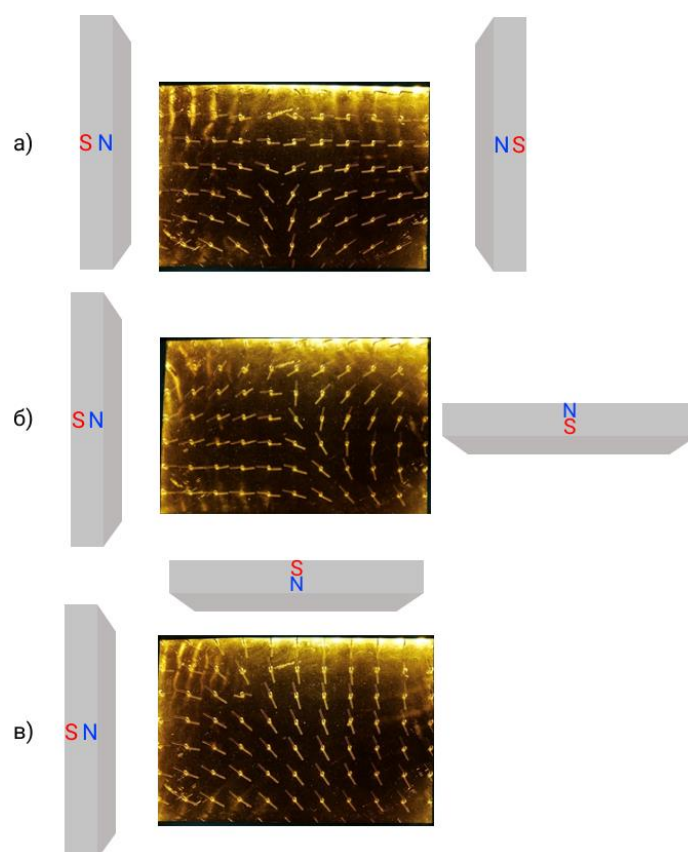


Рис. 6. Поля, создаваемые двумя постоянными магнитами большой площади

2.2. Исследование поля в рабочей камере МГД-стенда.

Для исследования конфигурации магнитного поля в плоскости симметрии рабочей камеры МГД-стенда, расположенной внутри электромагнита устройство визуализации было размещено в области с предполагаемым квазиоднородным магнитным полем с величиной индукции в центре наблюдательного окна от 0,025 Тл до 0,27 Тл. Величина индукции в центре окна была ранее установлена с помощью датчика Холла. Изменение величины индукции в рабочей камере происходит при изменении тока, протекающего в соленоиде.

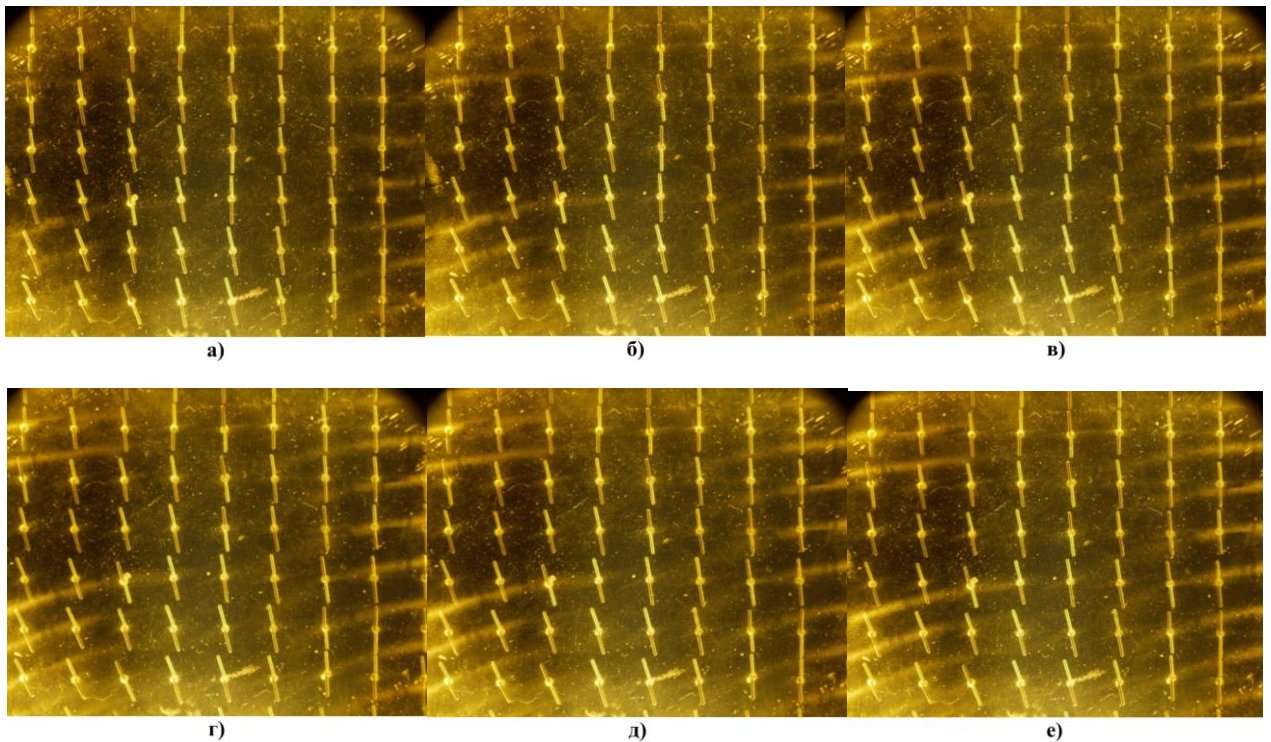


Рис. 7. Поле внутри рабочей камеры МГД стенда при разной величине индукции: при а) 0,025 Тл, б) 0,05 Тл, в) 0,1 Тл, г) 0,16 Тл, д) 0,2 Тл, е) 0,27 Тл

Недостаток используемого в работе визуализатора проявился в том, что влияние поля на ферромагнитную жидкость видно только по бокам ферролинзы. Это объясняется тем, что количество феррожидкости по всей площади распределено неоднородно (чем ближе к центру, тем его меньше) по причине неровности стекол и ввиду несовершенства технологии заполнения ферролинзы жидкостью при изготовлении.

Для каждого из магнитных полей (0,025 Тл; 0,05 Тл; 0,1 Тл; 0,16 Тл; 0,2 Тл; 0,27) построены 3-D графики относительного отклонения плечей каждого элемента от оси ОУ (рисунок 8). За начало координат выбран центр правого нижнего элемента. Параметр неоднородности, по которым область внутри рамки делилась на цветные фрагменты, вычислен по формуле:

$$\frac{|\alpha|}{90}, \quad (2)$$

Где α – угол между положительным направлением оси ОУ и плечом самого элемента.

Это сделано для того, чтобы наглядно судить о неоднородности магнитного поля в плоскости симметрии рабочей камеры МГД-стенда. Чем больше значение параметра неоднородности, тем больше меняется направление магнитного поля в данной точке.

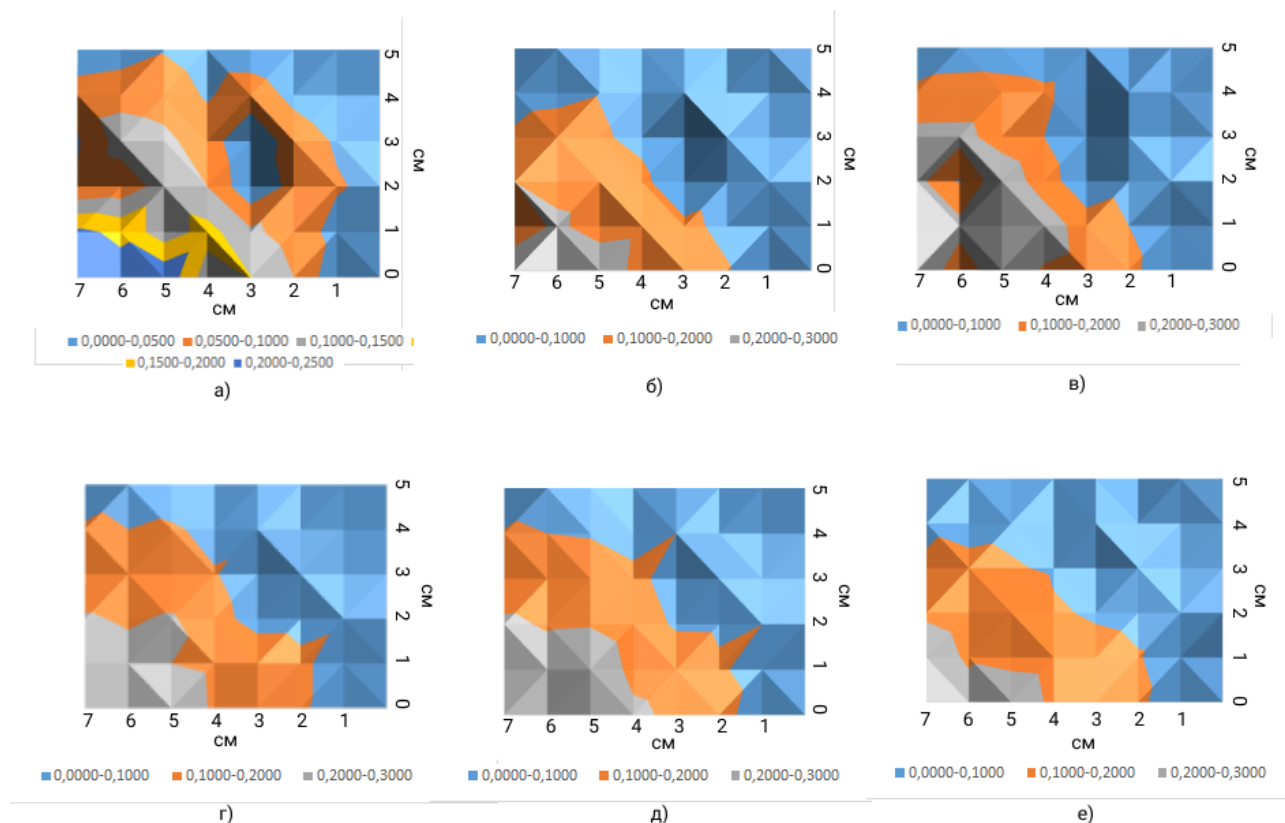


Рис. 8. Диаграммы относительного отклонения магнитного поля от нормального направления при разной величине индукции: при а) 0,025 Тл, б) 0,05 Тл, в) 0,1 Тл, г) 0,16 Тл, д) 0,2 Тл, е) 0,27 Тл

Как видно на рисунке 8, с увеличением магнитного поля в рабочей камере происходит уменьшение неоднородности магнитного поля по пространству. Это связано с насыщением чугуновых и стальных элементов корпуса электромагнита, окружающего рабочую камеру. В результате насыщения влияние этих элементов на распределение магнитного поля снижается.

2.3. Погрешность оценки параметра неоднородности магнитного поля

Определение угла наклона чувствительных элементов Матрицы осуществлялось с помощью программной обработки растрового изображения. Средняя длина каждого элемента на полученном изображении составляет 49 пикселей. Средний угол отклонения плеча элемента от нормали определяется

как арктангенс отношения средней длины катетов образуемого треугольника, выраженные в пикселях. При погрешности определения длины катетов в 1 пиксель изменение угла наклона плеча каждого элемента составляет $0,25^{\circ}$ - $0,3^{\circ}$. Погрешность измерения степени неоднородности направления поля составила в среднем 3% при погрешности измерения катета в 1 пиксель, общая погрешность – 12%.

Также незначительную погрешность в результат измерений данного эксперимента вносят расположение камеры относительно плоскости рамки (непараллельность оптической оси объектива и направления), искажение изображения в виду наличия асферических аберраций.

Заключение и выводы

В результате проделанной работы создано устройство визуализации магнитного поля для определения направления поля и распределения напряженности поля.

Исследованы сложные конфигурации магнитных полей, создаваемые постоянными редкоземельными и ферритовыми магнитами.

Исследована структура магнитного поля, создаваемого в камере МГД-стенда. Обнаружены зоны неоднородности магнитного поля в исследуемой области. Показано распределение степени неоднородности поля по пространству в зависимости от величины магнитной индукции.

Список используемой литературы

1. А. Г. Костюрина, С.А. Бордзиловский, В.В. Максимов, О. Е. Терещенко. Электрические и магнитные свойства твердых тел: учебно-методическое пособие/ Новосибирск: НГУ/ 2008. 129 с.
2. Парселл, Э. Берклеевский курс физики. Т. II. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1983. 438 с.
3. Яковлев, В. И. Классическая электродинамика. Ч. 1. Электричество и магнетизм: учебное пособие/ Новосибирск: НГУ, ИТПМ/ 2003. 267 с.
4. Tufaile A. et al. Observing dynamical systems using magneto-controlled diffraction //Condensed Matter. – 2019. – Т. 4. – №. 2. – С. 35.

Приложения

Растворитель WD-40	70%
Ферромагнитная жидкость на основе керосина	30%.

Таблица. Концентрация раствора ферромагнитной жидкости