

Исследование характеристик устройства визуализации магнитного поля магнитогидродинамического стенда

**Крыцин Илья Иванович**

Физический факультет. Электромагнитный практикум. 3 семестр.

Группа №18312, 2019.

Научный руководитель:

Ядренкин М. А., Научный сотрудник лаборатории 4 ИТПМ СО РАН

### **Аннотация**

Целью работы является создание и исследование визуализатора магнитного поля на основе магнитных и оптических свойств ферромагнитной жидкости. Свет, проходя через тонкий слой феррофлюида, проявляет интересный эффект, как внутри слоя, так и в рассеивании света за его пределами. Корпус прототипа был распечатан на 3D принтере. Были проведены теоретические расчеты и моделирование поля внутри устройства. Экспериментально определена картина распределения магнитного поля для постоянных магнитов и внутри рабочей камеры магнитогидродинамического стенда, расположенной внутри электромагнита при величине индукции 0.34 Тл. По результатам сравнительного анализа форма магнитного поля совпали с теоретическими. Проведен ряд экспериментов: устройство помещалось в магнитное поле, созданное постоянными магнитами или электромагнитом с различным временем воздействия электромагнитного поля. Было определено время реакции ферромагнитной жидкости на изменение магнитного поля. Данное устройство подходит для визуализации постоянного и переменного магнитного поля, с частотой воздействия не менее 350 кГц.

Ключевые слова: Ferroc cell, Ферромагнитная жидкость, Ferrofluid film, Линза, Визуализация, Динамическое магнитное поле

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Крыцин Илья Иванович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование характеристик устройства визуализации магнитного поля  
магнитогидродинамического стенда**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18312

**Научный руководитель:**

Научный сотрудник лаборатории 4  
ИТПМ СО РАН

канд. физ.-мат. наук.

Ядренкин М. А.

Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Оценка преподавателя практикума  
Чуркин Д.С.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

Итоговая оценка  
к.т.н. Астрелин В.Т.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск, 2019

## **Аннотация**

Целью работы является создание и исследование визуализатора магнитного поля на основе магнитных и оптических свойств ферромагнитной жидкости. Свет, проходя через тонкий слой феррофлюида, проявляет интересный эффект, как внутри слоя, так и в рассеивании света за его пределами. Корпус прототипа был разработан в пакете 3D моделирования и распечатан на 3D принтере. Были проведены теоретические расчеты и моделирование поля внутри устройства. Экспериментально определена картина распределения магнитного поля для постоянных магнитов и внутри рабочей камеры магнитогидродинамического стенда, расположенной внутри электромагнита при величине индукции 0.34 Тл. По результатам сравнительного анализа форма магнитного поля совпали с теоретическими. Проведен ряд экспериментов: устройство помещалось в магнитное поле, созданное постоянными магнитами или электромагнитом с различным временем воздействия электромагнитного поля. Было определено время реакции ферромагнитной жидкости на изменение магнитного поля. Данное устройство подходит для визуализации постоянного и переменного магнитного поля, с частотой воздействия не менее 350 кГц.

Ключевые слова: Ferrocil, Ферромагнитная жидкость, Ferrofluid film, Линза, Визуализация, Динамическое магнитное поле

## Оглавление

|  |    |
|--|----|
| Введение   | 4  |
| Глава 1. Принцип работы ферролинзы   | 6  |
| 1.1 Ферромагнитная жидкость .....  | 6  |
| 1.2 Принцип работы ферролинзы .....  | 7  |
| Глава 2. Экспериментальные исследования работы ферролинзы  | 8  |
| 2.1 Описание экспериментальной установки .....   | 8  |
| 2.2 Исследование конфигурации магнитного поля вблизи постоянных<br>редкоземельных магнитов ..... | 9  |
| 2.3 Определение времени отклика устройства на изменение магнитного<br>поля .....                 | 11 |
| 2.4 Исследование конфигурации магнитного поля в рабочей камере МГД<br>стенда .....               | 14 |
| Заключение и выводы  | 15 |
| Список используемой литературы   | 15 |
| Приложение   | 16 |

## Введение

На сегодняшний день в Институте Теоретической и Прикладной Механики им. С.А. Христиановича СО РАН ведётся разработка способов управления аэротермодинамикой перспективных высокоскоростных летательных аппаратов с помощью методов магнитоплазменной аэродинамики. Эти методы основаны на магнитогидродинамическом (МГД) взаимодействии сверхзвуковых ионизованных потоков газа с электрическими и магнитными полями. Для проведения экспериментальных исследований МГД управления высокоскоростными газовыми течениями в лаборатории быстропротекающих процессов был создан МГД стенд, в основе которого лежит импульсная аэродинамическая установка. Магнитное поле создается внутри рабочей камеры, расположенной в электромагните, который позволяет моделировать постоянное магнитное поле с величиной индукции до 2.25 Тл. Также в работе используются постоянные редкоземельные магниты. Для ионизации газов используются различные электроразрядные устройства либо электронная пушка. Создание вспомогательного устройства для визуализации конфигурации магнитных полей в технике эксперимента является актуальной задачей.

Одной из важных задач, возникающих при проведении экспериментальных исследований МГД-способов управления газовыми течениями, является определение пространственной конфигурации магнитного поля относительно экспериментальной модели и набегающего потока. Направление и величину магнитного поля с достаточной точностью можно измерить помощью координатного устройства и датчика магнитного поля, но данный способ является очень затратным по времени. Для наглядной визуализации магнитного поля могут быть применены различные способы, обладающие рядом преимуществ и недостатков такие, как матрица датчиков магнитного поля, пленка для визуализации, магнитная стружка, координатное устройств с магнитным датчиком. Целью данной работы является создание устройства для визуализации магнитного поля в рабочей камере

магнитогидродинамического стенда. Устройством, созданным для наблюдения за оптическими явлениями в слое феррофлюида под воздействием магнитного поля, является ферролинза, изобретенная Тиммом А. Вандерелли [1].

Для проверки возможности использования данного устройства на магнитогидродинамическом стенде были поставлены следующие задачи:

- 1) создание экспериментального образца, для исследования оптических свойств ферромагнитной жидкости;
- 2) определение времени реакции ферромагнитной жидкости на изменение магнитного поля;
- 3) проверка устройства в МГД стенде.

## Глава 1. Принцип работы ферролинзы

### 1.1 Ферромагнитная жидкость



Рис 1. Фото колбы с ферромагнитной жидкостью

Ферромагнитная жидкость — жидкость, сильно поляризуемая в присутствии магнитного поля. Феррофлюиды были изобретены в США в 1960-х годах. Из этих изобретений наиболее известным является разработанная в 1963 году Стивом Пеппелем (Steve Papell) из NASA для создания жидкого ракетного топлива, которое можно было бы притягивать к входу насоса в невесомости, применяя магнитное поле [2]. Физическая химия процесса была уточнена, а в процессе, разработанном Rosensweig et al. (1965). O'Connor (1962), для очистки продукта была синтезирована феррофлюидная жидкость с использованием химического осаждения с ионообменной техникой. Гейбл использовал химический синтез, подав в 1965 г. патентную заявку, которая была выдана позже (Gable and Kerr, 1977).

В качестве основы для высокостабильных, сильно намагничиваемых жидкостей, известных как магнитные жидкости или феррожидкости, служат жидкие среды, состоящие из твердых магнитных частиц очень малого размера,

коллоидно распределенных в жидком носителе (рис 1). Типичный размер частиц в феррофлюиде составляет около 10 нм, что меньше домена, поэтому каждая частица постоянно намагничивается. Частицы испытывают ощутимое термическое преобразование, которое поддерживает их во взвешенном состоянии против силы тяжести, в то время как при отсутствии тепловой переориентации частиц смещения приводит к нулевой работоспособности или коэрцитивной силе, т.е. феррожидкость является магнитомягкой. Феррофлюиды ведут себя как высокооднородные, намагничиваемые среды, сохраняющие свои жидкостные свойства в наиболее интенсивно применяемых магнитных полях и градиентах магнитного поля.

## **1.2 Принцип работы ферролинзы**

В данном исследовании используются ферролинзы Тим А. Вандерелли. Ферролинза состоит из двух стекол и слоя сильно разбавленного феррофлюида (около 1.5% оксида железа) между ними, сразу за ферролинзой расположены множество точечных источников света. При прохождении света через феррофлюид он рассеивается в зависимости от расположения железных частиц. В результате в плоскости ферролинзы можно наблюдать чередование светлых и темных полос, форма которых связана с конфигурацией действующего на устройство магнитного поля.

Объяснением такого поведения является то, что феррожидкость представляет собой сложную двухфазную жидкость, твердые частицы которой изменяют свою ориентацию под действием магнитного поля и поляризуют проходящий свет в направлении перпендикулярном линиям магнитной индукции.



## Глава 2. Экспериментальные исследования работы ферролинзы

### 2.1 Описание экспериментальной установки

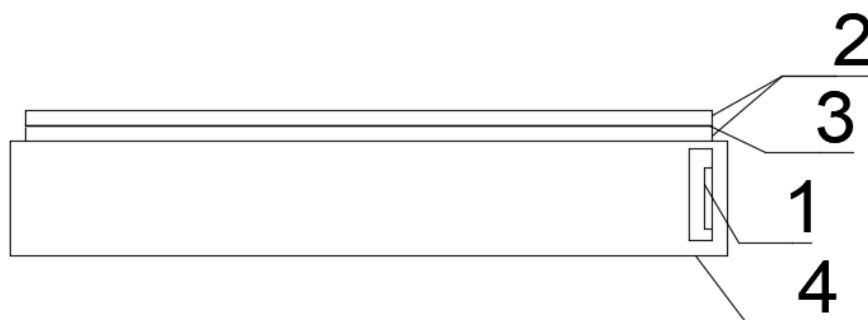


Рис. 3 Ферролинза. 1 – Светодиодная лента, 2 – Стекло, 3 – Тонкий слой смеси ферромагнетика и универсальной смазки WD-40, 4 – корпус устройства

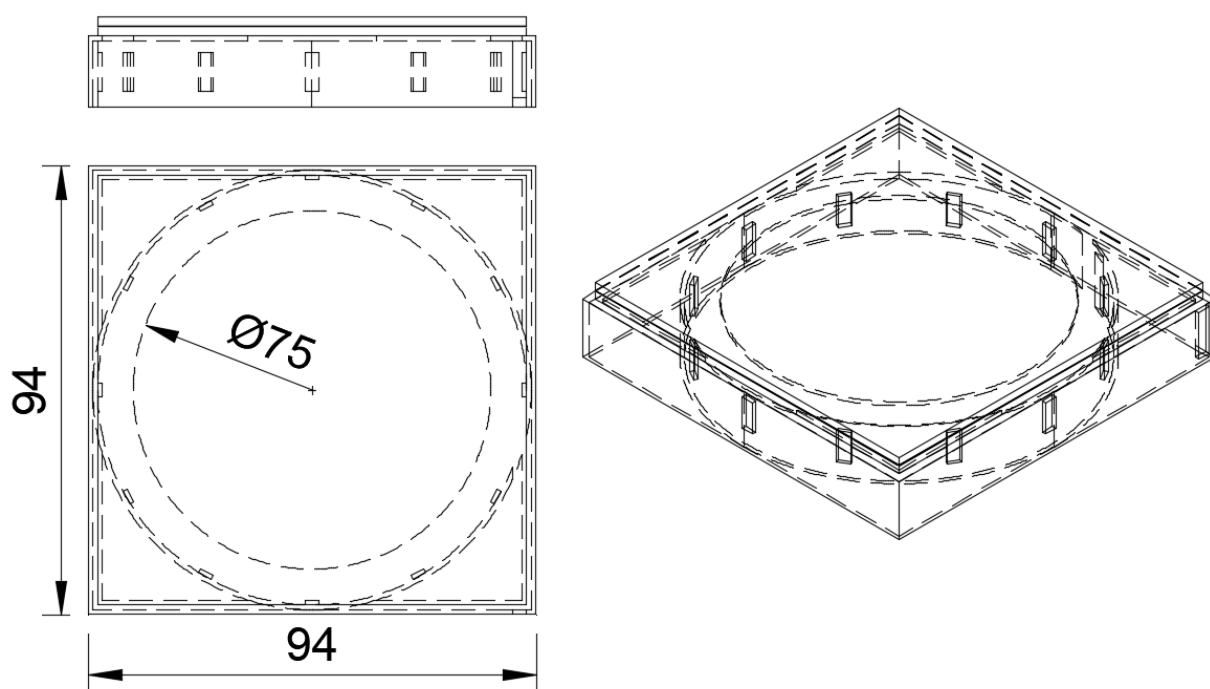


Рис. 4 Схема устройства.

Предметом исследования является ферролинза заполненная смесью ферромагнитной жидкости на основе керосина и универсальной смазки WD-40. Она находится в рамке из пластмассы, которая подсвечена снизу светодиодной лентой, расположенной перпендикулярно линзе. В данном

эксперименте источником света является светодиодная лента с температурой 5200 К.

Для ферролинзы использовалась смесь WD-40 и ферромагнитной жидкости (характеристики указаны в приложении) при концентрации ферромагнитной жидкости 8%. Также был проведен эксперимент с содержанием ферромагнитной жидкости 2%, при таком количестве смесь получилась более прозрачной, но контрастность световых полос значительно ухудшилась, что могло помешать проведению наблюдений.

Для создания магнитного поля были использованы неодимовые (Ne-Fe-B) магниты, размещенные на некотором расстоянии от ферролинзы. Изменяя положение магнитов, можно корректировать магнитное поле, действующее на ферромагнитную жидкость и, следовательно, изменять структуру раствора магнитных наночастиц.

## 2.2 Исследование конфигурации магнитного поля вблизи постоянных редкоземельных магнитов

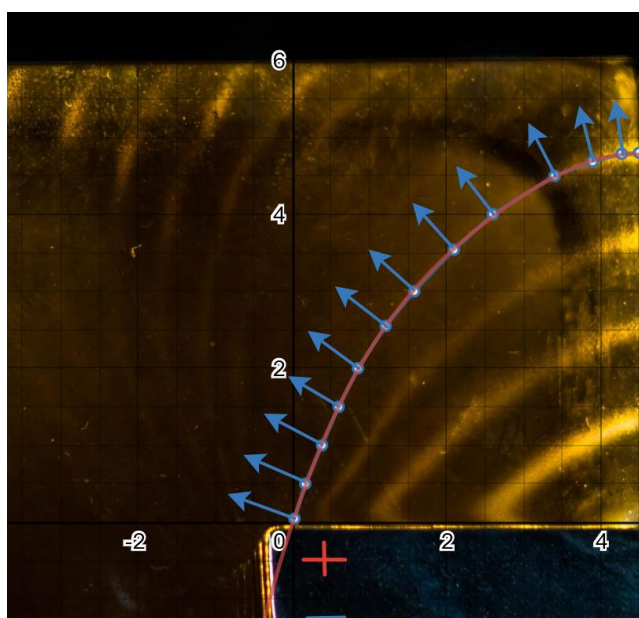


Рис. 5 Векторы магнитного поля

С помощью ферролинзы удалось получить картину распределения магнитного поля постоянного магнита посредством распределения светлых и темных полос на ферролинзе. Магнитное поле перпендикулярно светлым

полосам на ферролинзе (рис. 5). Было проведена серия экспериментов с различным расположением магнитов (рис. 6).

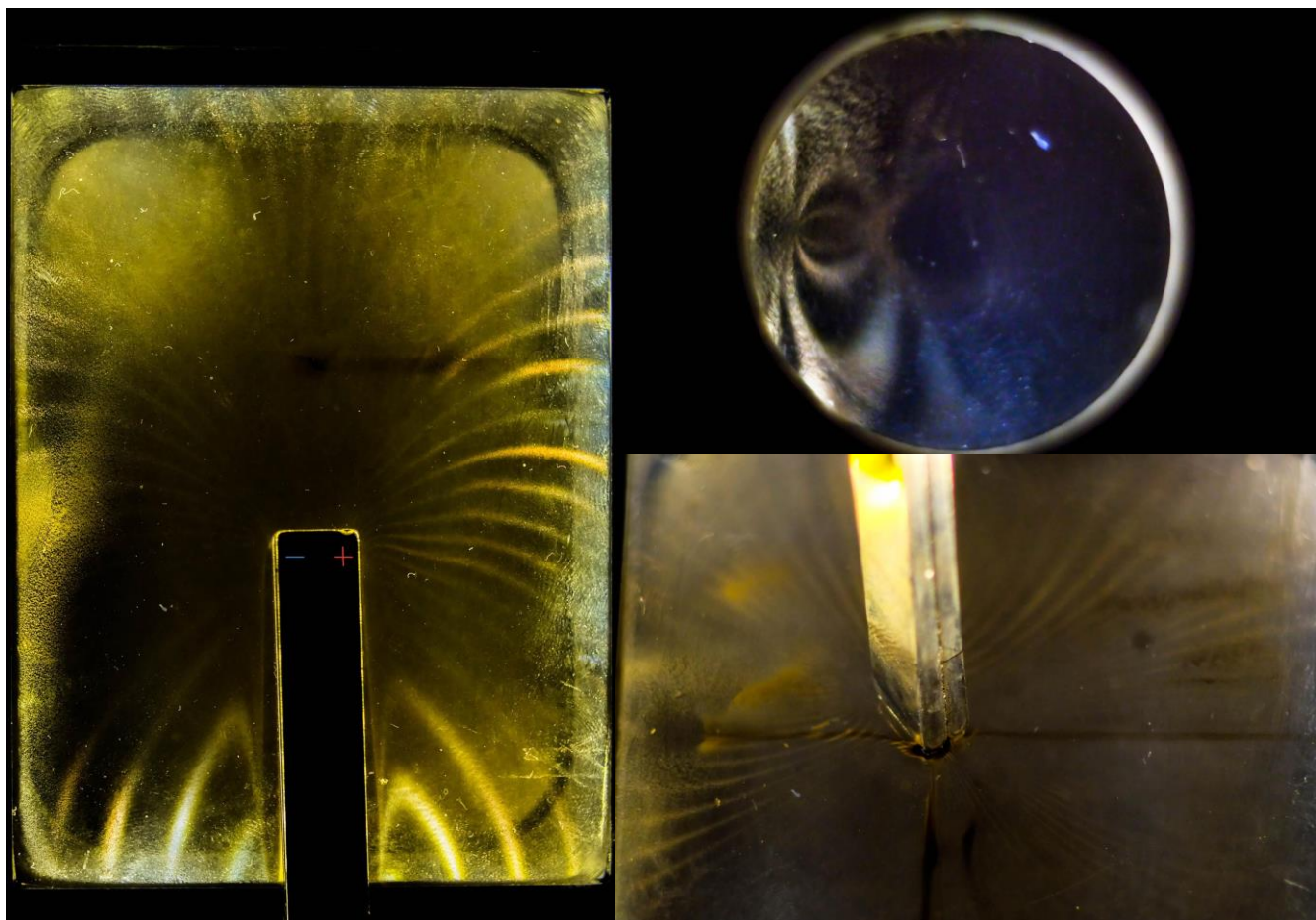


Рис. 6 Магнитные контуры, наблюдаемые в трех различных конфигурациях магнитного поля с помощью прибора Ferrolens. Изображение слева - магнит параллелен плоскости стекла; справа сверху - темные и светлые полосы внутри кругового магнита; справа снизу - магнит перпендикулярен плоскости стекла.

## 2.3 Определение времени отклика устройства на изменение магнитного поля

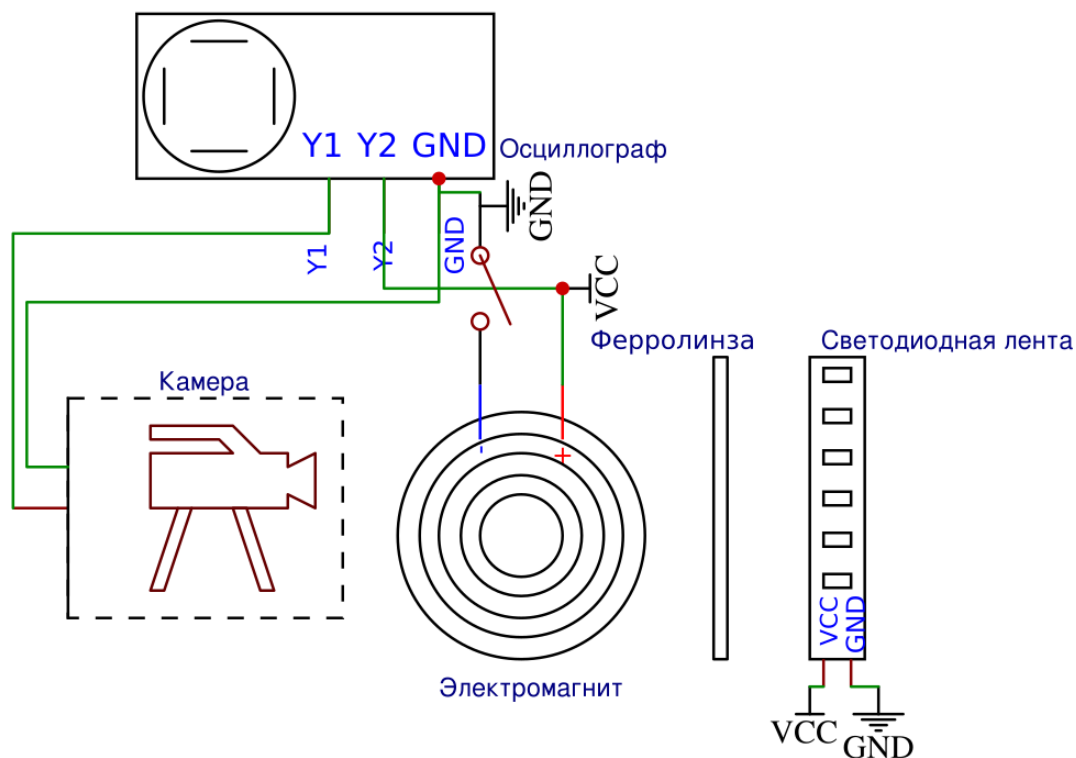


Рис. 7 Схема эксперимента для измерения скорости отклика ферромагнитной жидкости на изменение магнитного поля: VCC - напряжение, GND - земля, Y1, Y2 - каналы осциллографа.

Для измерения скорости реакции ферролинзы на изменение магнитного поля была создана установка, изображенная на (рис 7). Магнитное поле создавалось подачей импульса тока с помощью замыкания и размыкания электрической цепи, подключенной к генератору тока. Электромагнит и скоростная камера были подключены к осциллографу и включались отдельно, вручную. Для синхронизации времени работы электромагнита и скоростной камеры в цепь был введен осциллограф, с помощью которого рассчитывалась разница во времени между сигналом, подаваемым на катушку и сигналом включения камеры.

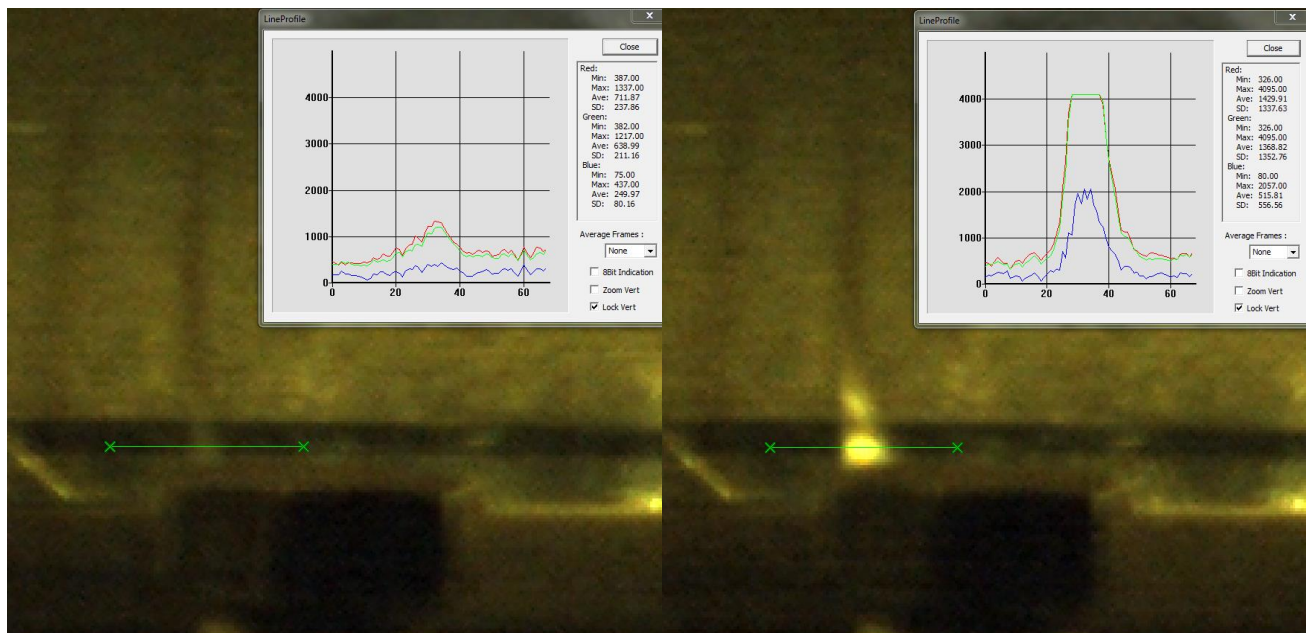


Рис. 8 Сравнение интенсивности отраженного света. Диаграмма в правом верхнем углу указывает распределение по яркости каждого из каналов RGB по отрезку.

С помощью скоростной камеры фиксировалось количество рассеянного света ферромагнитной жидкостью. За время реакции бралось время от включения электромагнита до достижения максимума отраженного света (рис. 8).

Таблица 1 Зависимость времени реакции от магнитной индукции

| № <sub>эксп.</sub> | Напряжение на катушке, В | Ток, А | Магнитная индукция в ферролинзе, мТ | Время реакции |
|--------------------|--------------------------|--------|-------------------------------------|---------------|
| <b>1</b>           | 30                       | 0.9    | 4.3                                 | 0.474         |
| <b>2</b>           | 30                       | 0.5    | 2.4                                 | 1.252         |
| <b>3</b>           | 30                       | 0.2    | 1                                   | 0.216         |
| <b>4</b>           | 30                       | 0.2    | 1                                   | 0.354         |
| <b>5</b>           | 30                       | 0.5    | 2.4                                 | 1.122         |
| <b>6</b>           | 30                       | 0.9    | 4.3                                 | 0.752         |

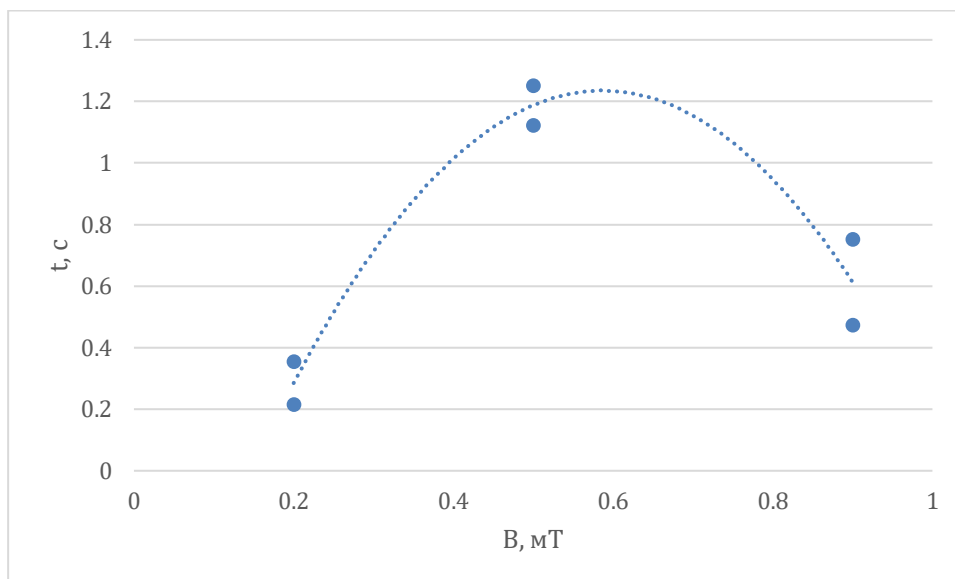


Рис. 9. Зависимость времени реакции  $t$  от индукции магнитного поля  $B$

Можно наблюдать, что скорость реакции устройства на изменение магнитного поля нелинейно зависит от величины магнитной индукции. Для более точной аппроксимации требуется провести больше экспериментов. Можно предположить, что скорость меняется нелинейно из-за вязкости ферромагнитной жидкости. По результатам выполненных измерений был построен график (рис. 9).

## 2.4 Исследование конфигурации магнитного поля в рабочей камере МГД стенда

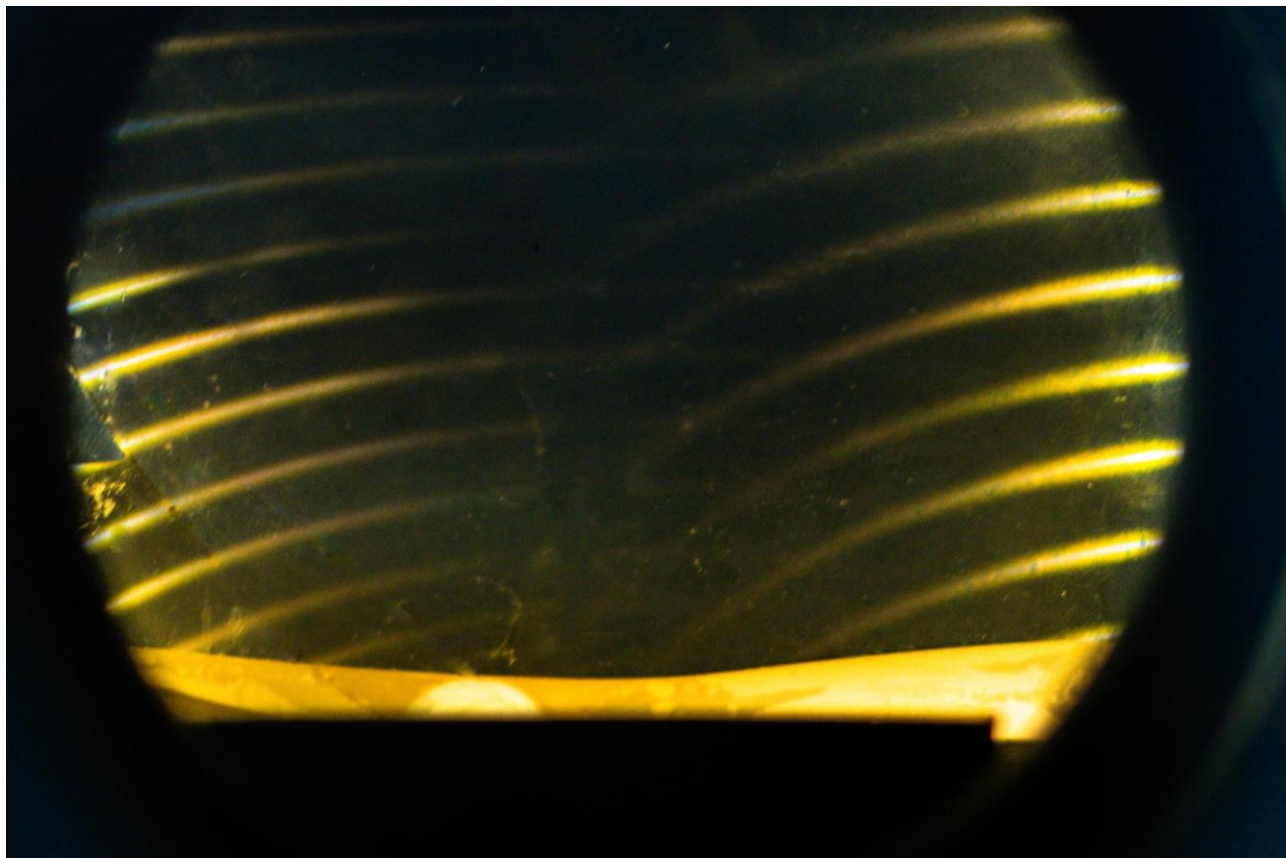


Рис. 10 Светлые и темные полосы в МГД

Были проведены испытания устройства в МГД, которые показали странную аномалию в центре ферролинзы, при стабильном поле световые полосы должны быть параллельны. Измерение датчиком холла показало, что поле было однородным. Данная аномалия вызывает ряд вопросов и требует дополнительного исследования.

## **Заключение и выводы**

В ходе выполнения работы были выяснены скорость релаксации феррофлюида и возможность его использования в качестве визуализатора магнитного поля на магнитогидродинамическом стенде. В ходе выполнения данной курсовой работы были получены следующие результаты:

- 1) Создано устройство для проверки влияния магнитного поля на тонком слое ферромагнитной жидкости.
- 2) Определено время реакции феррофлюида на изменение магнитного поля. Измерения проводились в магнитном поле от 1 до 4.3 мТ. Показано, что оно нелинейно зависит от величины магнитной индукции, возможно, из-за нелинейной зависимости деформации вязкости феррофлюида.
- 3) Исследована конфигурация магнитного поля около постоянных магнитов различной геометрии.
- 4) Исследована конфигурация магнитного поля внутри рабочей камеры экспериментального МГД стенда.

## **Список используемой литературы**

1. Tufaile, A., Vanderelli, T., Snyder, M., & Tufaile, A. (2019). Observing Dynamical Systems Using Magneto-Controlled Diffraction. *Condensed Matter*, Vol. 4(2), 35. <https://doi.org/10.3390/condmat4020035>
2. Rosensweig, R. E. (2016). Ferrofluids: Introduction. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.02477-2>
3. Alberto Tufaile, Timm A. Vanderelli, and Adriana Pedrosa Biscaia Tufaile, "Light Polarization Using Ferrofluids and Magnetic Fields," *Advances in Condensed Matter Physics*, vol. 2017, Article ID 2583717, 7 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2583717>.
4. Markoulakis, E., Rigakis, I., Chatzakis, J., Konstantaras, A., & Antonidakis, E. (2018). Real time visualization of dynamic magnetic fields with a nanomagnetic ferrolens. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 451, 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.12.023>
5. Tufaile, A., Van-derelli, T.A. and Tufaile, A.P.B. (2016) Observing the Jumping Laser Dogs. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 4, 1977-1988. <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2016.411198>



## Приложение

Характеристики ферромагнитной жидкости:

|   |          |
|---|----------|
| Керосин   | 58% +-   |
| Оксид железа  | 18% +-   |
| Масло синтетическое   | 22% +-   |
| Стабилизатор полимерный   | 2%       |
| Плотность при 20 <sup>+2</sup> С г/см <sup>3</sup>                            | 0,85-1,7 |
| Вязкость 20 <sup>+2</sup> С сСт   | 0,95-1,5 |
| Намагниченность насыщения при напряженности магнитного поля не менее 500 кА/м | 1-80     |