

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт кибернетики  
Направление подготовки «Стандартизация и метрология»  
Кафедра КИСМ

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Имитатор магнитных аномалий для поисковых феррозондовых магнитометров<br>УДК 621.317.444 |

Студент

| Группа | ФИО                           | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------|---------|------|
| 8ГМ41  | Солтанова Диана Гульмамедовна |         |      |

Руководитель

| Должность       | ФИО          | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ТПС | Баранов П.Ф. | К.т.н.                    |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность                  | ФИО              | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф.<br>менеджмента | Конотопский В.Ю. | К.э.н.                    |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность       | ФИО               | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------|-------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ЭБЖ | Пустовойтова М.И. | К.х.н.                    |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО         | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|-------------|---------------------------|---------|------|
| КИСМ          | Стукач О.В. | Д.т.н.                    |         |      |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики  
Направление подготовки «Стандартизация и метрология»  
Кафедра КИСМ

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      Стукач О.В.  
(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                          |
|--------------------------|
| магистерской диссертации |
|--------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО                            |
|--------|--------------------------------|
| 8ГМ41  | Солтановой Диане Гульмамедовне |

Тема работы:

|                                                                       |                       |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Имитатор магнитных аномалий для поисковых феррозондовых магнитометров |                       |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)                           | № 957/с от 11.02.2016 |

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 1.06.2016 |
|------------------------------------------|-----------|

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p> | <p>Объект проектирования – увеличение объема однородного магнитного поля, генерируемого имитатором магнитных аномалий.</p> <p>Аналитический обзор по литературным источникам с целью выявления достижений мировой науки техники в рассматриваемой области.</p> <p>Определение требований к морским магнитометрам.</p> <p>Исследование зависимости магнитных аномалий от параметров объекта.</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <p>Сравнение базовых конструкций калибровочных катушек.<br/>         Моделирование имитатора магнитных аномалий.<br/>         Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.<br/>         Социальная ответственность.<br/>         Выводы по результатам работы.</p> |
| <p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>Приложение А. Вариации индукции магнитного поля Земли вблизи объекта при различных значениях параметров объекта</p>                                                                                                                                                                 |
| <p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p><b>Раздел</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p><b>Консультант</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <p>Конотопский Владимир Юрьевич</p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>Социальная ответственность</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <p>Пустовойтова Марина Игоревна</p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>Электромагнитные методы и средства поиска объектов в водной среде</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p>Шепетовский Денис Владимирович</p>                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p>Электромагнитные методы и средства поиска объектов в водной среде</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

|                                                                                                        |                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p> | <p>03.10.2014</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность       | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ТПС | Баранов П.Ф. | к.т.н.                 |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО            | Подпись | Дата |
|--------|----------------|---------|------|
| 8ГМ41  | Солтанова Д.Г. |         |      |

## ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

| Код<br>результата | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | <i>Профессиональные компетенции</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| P1                | применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения инновационных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием современных технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения.                                    |
| P2                | выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, проводить анализ состояния и динамики метрологического и нормативного обеспечения производства, производить оценку качества измерений, контроля и испытаний, проводить работы по автоматизации измерений и контроля в производстве и научных исследованиях.                                                                                |
| P3                | выполнять работы в области стандартизации и сертификации: выполнять разработку и экспертизу новых технических регламентов и другой нормативной документации, разрабатывать процедуры оценки соответствия, поддерживать единое информационное пространство планирования и управления предприятием на всех этапах жизненного цикла изделий.                                                                            |
| P4                | выполнять работы в области контроля и управления качеством: исследовать причины появления некачественной продукции, разрабатывать предложения по предупреждению и устранению причин брака, осуществлять приемочный и выходной контроль продукции, а также контроль производства на основе современных технических средств.                                                                                           |
| P5                | использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения инновационной инженерной деятельности; организовывать работы по защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на них, проводить технико-экономический анализ по проектам связанным с метрологическим обеспечением производства. |
|                   | <i>Универсальные компетенции</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| P6                | понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности, заниматься научно-педагогической деятельностью в области метрологии, технического регулирования и управления качеством                                                                                                                                                          |
| P7                | эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, принимать исполнительские решения в условиях спектра мнений, определять порядок работ, демонстрировать ответственность за результаты работы                                                                                                                                                  |
| P8                | владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности                                                                                                                                                                                                                                         |
| P9                | ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду                                                                                                                                                                                                                                      |
| P10               | следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности, проявлять гражданскую позицию, направленную на его совершенствование.                                                                                                                                                                                                                                                    |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики  
Направление подготовки «Стандартизация и метрология»  
Уровень образования – магистратура  
Кафедра КИСМ  
Период выполнения – осенний / весенний семестр 2014/2016 учебного года

Форма представления работы:

|                          |
|--------------------------|
| Магистерская диссертация |
|--------------------------|

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 3.06.2016 |
|------------------------------------------|-----------|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)                                       | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 20.12.2014    | <i>Проведение аналитического обзора</i>                                                     | 10                                 |
| 12.03.2015    | <i>Моделирование магнитных аномалий в программной среде COMSOL Multiphysics</i>             | 10                                 |
| 8.10.2016     | <i>Исследование зависимости магнитных аномалий от параметров объекта</i>                    | 15                                 |
| 10.02.2016    | <i>Сравнение базовых конструкций калибровочных катушек</i>                                  | 15                                 |
| 11.03.2016    | <i>Моделирование имитатора магнитных аномалий</i>                                           | 15                                 |
| 30.03.2016    | <i>Выводы по результатам работы</i>                                                         | 5                                  |
| 24.04.2016    | <i>Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</i> | 5                                  |
| 24.04.2016    | <i>Выполнение раздела «Социальная ответственность»</i>                                      | 5                                  |
| 25.05.2016    | <i>Выполнение раздела на иностранном языке</i>                                              | 5                                  |
| 01.06.2016    | <i>Оформление графического материала</i>                                                    | 5                                  |
| 01.06.2016    | <i>Оформление расчетно-пояснительной записки</i>                                            | 10                                 |

Составил преподаватель:

| Должность       | ФИО          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф. ТПС | Баранов П.Ф. | К.т.н.                 |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

| Зав. кафедрой | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|-------------|------------------------|---------|------|
| КИСМ          | Стукач О.В. | Д.т.н.                 |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| Группа | ФИО                            |
|--------|--------------------------------|
| 8ГМ41  | Солтановой Диане Гульмамедовне |

| Институт            | ИК           | Кафедра                   | КИСМ                        |
|---------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | Стандартизация и метрология |

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

|                                                                                                                                                             |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1. Стоимость ресурсов для разработки имитатора магнитного поля: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих ресурсов |  |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов                                                                                                                  |  |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования                                                         |  |

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|                                                                                                                                   |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности имитатора магнитного поля с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения |  |
| 2. Планирование и формирование бюджета разработки                                                                                 |  |
| 3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования       |  |

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

Таблица 3 – Линейный график работ

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 7.04.2016 |
|------------------------------------------------------|-----------|

**Задание выдал консультант:**

| Должность               | ФИО              | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------------|------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф. менеджмента | Конотопский В.Ю. | к.э.н.                 |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО            | Подпись | Дата |
|--------|----------------|---------|------|
| 8ГМ41  | Солтанова Д.Г. |         |      |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| Группа | ФИО                            |
|--------|--------------------------------|
| 8ГМ41  | Солтановой Диане Гульмамедовне |

| Институт            | ИК           | Кафедра                   | КИСМ                        |
|---------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | Стандартизация и метрология |

|                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность» и вопросы, подлежащие разработке:</b></p> | <p><i>1. Выбор объекта раздела. Характеристика рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, оборудования)</i></p> <p><i>2. Техногенная безопасность</i><br/> <u>Вредные факторы:</u> (источники вредных факторов на рабочем месте, нормирование их действия на работника, ссылка; технические решения и системы обеспечения требований нормативных документов)</p> <p><u>Опасные факторы:</u> (источники опасных факторов, нормативные требования по обеспечению безопасности работников, ссылка; организационные и технические решения и системы обеспечения требований безопасности)</p> <p><i>3. Региональная безопасность</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul> <p><i>4. Пожарная безопасность</i> (причины возгорания, категория помещения по ПБ, план эвакуации, средства первичного тушения)</p> <p><i>5. Влияние проекта на экологическую обстановку</i></p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 25.03.2016 |
|------------------------------------------------------|------------|

**Задание выдал консультант:**

| Должность          | ФИО               | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--------------------|-------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент каф.<br>ЭБЖ | Пустовойтова М.И. | К.Х.Н.                 |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО            | Подпись | Дата |
|--------|----------------|---------|------|
| 8ГМ41  | Солтанова Д.Г. |         |      |

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация 145 с., 59 рис., 30 табл., 37 источников, 3 прил.

Ключевые слова: имитатор магнитного поля, феррозонд, магнитометр, магнитные аномалии.

Объектом исследования является увеличение объема однородного магнитного поля имитатора магнитных аномалий.

Цель работы – разработка модели имитатора магнитных аномалий с высокой степенью однородности генерируемого магнитного поля.

В процессе исследования проводились определение требований к феррозондовым магнитометрам, исследование различных конструкций калибровочных катушек, компьютерное моделирование имитатора магнитного поля.

В результате исследования была разработана компьютерная модель имитатора магнитного поля на базе катушек Гельмгольца и катушек  $\cos\theta$ .

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: неоднородность генерируемого имитатором магнитного поля не более 1 % на относительном расстоянии до центра системы 48 % в аксиальном направлении и относительном расстоянии 48 % – в радиальном направлении, габаритные размеры имитатора 110x110x265 мм.

Степень внедрения: не внедрен, находится на стадии разработки.

Область применения: калибровка поисковых феррозондовых магнитометров.

Значимость работы выражается в снижении риска возникновения ошибок первого и второго рода (ложно обнаруженного или необнаруженного объекта).

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

### **Определения**

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**выпускная квалификационная работа магистра (магистерская диссертация):** Самостоятельная научная работа на соискание квалификации (степени) «магистр», содержащая углубленные теоретические и экспериментально-практические исследования по определенной теме.

**феррозонд:** Катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником, магнитные свойства которого изменяются под действием измеряемого или вспомогательного магнитного поля.

**магнитометр:** Прибор для измерения характеристик магнитного поля и магнитных свойств материалов.

**магнитная аномалия:** Область на поверхности Земли, в которой значение и направление вектора магнитного поля Земли существенно отличается от нормальных значений геомагнитного поля.

### **Обозначения и сокращения**

В настоящей работе использованы следующие обозначения и сокращения:

МП – магнитное поле;

МПЗ – магнитное поле Земли;

СИ – средство измерения;

ЭДС – электродвижущая сила;

ФМ – феррозондовый магнитометр;

ЧЭ – чувствительный элемент;

ДФ – дифференциальный феррозонд;

ТЗ – техническое задание;

НР – научный руководитель;

И – исполнитель;

ПК – персональный компьютер;

ЭМИ – электромагнитное излучение;

ЭСИ – электростатическое излучение.

### **Нормативные ссылки**

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 8.030-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции постоянного поля в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-12}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл, постоянного магнитного потока, магнитной индукции и магнитного момента в интервале частот от 0 до 20000 Гц
2. ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
3. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
4. РД 50-487-84 Средства измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля от  $1 \cdot 10^{-10}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл образцовые. Методы и средства поверки

## Оглавление

|                                                                                                          |                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                                                                          | С.                                         |
| Введение                                                                                                 | 14                                         |
| 1 Электромагнитные методы и средства поиска объектов в водной среде                                      | 16                                         |
| 1.1 Сравнительный анализ электромагнитных методов поиска                                                 | 16                                         |
| 1.2 Особенности измерения магнитной индукции в океане                                                    | 20                                         |
| 1.3 Измерительные преобразователи магнитометрического метода                                             | 22                                         |
| 1.4 Измерительные преобразователи индукционного метода                                                   | 32                                         |
| 1.5 Современные поисковые магнитометры                                                                   | 37                                         |
| 2 Моделирование объектов поиска                                                                          | 42                                         |
| 2.1 Исследование зависимости распределения магнитного поля Земли<br>вблизи объекта от параметров объекта | 43                                         |
| 2.2 Моделирование объектов сложной формы                                                                 | 46                                         |
| 2.3 Выводы по результатам моделирования объектов поиска                                                  | 48                                         |
| 3 Разработка имитатора однородного магнитного поля                                                       | <b>Ошибка! Закладка не<br/>определена.</b> |
| 3.1 Конструкции калибровочных катушек                                                                    | <b>Ошибка! Закладка не<br/>определена.</b> |
| 3.2 Расчет калибровочных катушек в программной среде Mathcad                                             | <b>Ошибка!<br/>Закладка не определена.</b> |
| 3.3 Моделирование калибровочных катушек в программной среде<br>“COMSOL Multiphysics”                     | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>     |
| 3.4 Моделирование имитатора однородного магнитного поля                                                  | <b>Ошибка!<br/>Закладка не определена.</b> |

3.5 Выводы по результатам моделирования имитатора **Ошибка! Закладка не определена.**

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 50 |
| 4.1 Организация и планирование работ                              | 50 |
| 4.2 Расчет сметы затрат на проектирование                         | 54 |
| 4.2.1 Расчет материальных затрат                                  | 54 |
| 4.2.2 Расчет заработной платы                                     | 55 |
| 4.2.3 Расчет затрат на социальный налог                           | 56 |
| 4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию                             | 56 |
| 4.2.5 Расчет амортизационных расходов                             | 57 |
| 4.2.6 Расчет прочих расходов                                      | 59 |
| 4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки                       | 59 |
| 4.2.8 Расчет прибыли                                              | 60 |
| 4.2.9 Расчет налога на добавленную стоимость                      | 60 |
| 4.2.10 Цена разработки                                            | 60 |
| 4.3 Оценка экономической эффективности проекта                    | 60 |
| 5 Социальная ответственность                                      | 62 |
| 5.1 Требования санитарных правил и норм                           | 62 |
| 5.1.1 Электромагнитные и электростатические поля                  | 63 |
| 5.1.2 Микроклимат                                                 | 64 |
| 5.1.3 Освещение                                                   | 65 |
| 5.1.4 Электрический ток                                           | 66 |
| 5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности          | 67 |
| 5.3 Региональная безопасность                                     | 70 |
| 5.4 Пожарная безопасность                                         | 71 |

|                                                                                                                                   |                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 5.5 Влияние разработки на экологическую обстановку                                                                                | 73                                     |
| Заключение                                                                                                                        | 74                                     |
| Список публикаций                                                                                                                 | 76                                     |
| Список использованных источников                                                                                                  | 77                                     |
| Приложение А (обязательное). Вариации индукции магнитного поля Земли<br>вблизи объекта при различных значениях параметров объекта | 82                                     |
| Приложение Б (обязательное). Расчет трудоемкости выполнения работ                                                                 | 88                                     |
| Приложение В (обязательное). Раздел, выполненный на иностранном<br>языке                                                          | <b>Ошибка! Закладка не определена.</b> |

## **Введение**

В настоящее время экологическая обстановка в морях и океанах требует постоянного наблюдения и контроля. В связи с этим актуальной является проблема разработки точных методов и средств поиска, отслеживания и изучения подводных трубопроводов, кабелей и других объектов [1].

Трубопроводы, подводные лодки, обломки причальных конструкций и военной техники (далее – объекты), находящиеся под водой, в глинистых и песчаных отложениях, выполнены преимущественно из ферромагнитных материалов. Ферромагнитный объект изменяет естественное магнитное поле Земли (МПЗ), создавая его аномалию. Таким образом, измерение изменения МПЗ позволяет обнаружить объект под водой или в других укрывающих средах [2].

Актуальность работы заключается в необходимости разработки точных средств поиска и отслеживания подводных объектов. В качестве средств поиска используются магнитометры. Для их калибровки, исследования и настройки необходим имитатор магнитных аномалий.

Цель работы – моделирование и разработка имитатора магнитных аномалий с высокой степенью однородности магнитного поля для калибровки поисковых магнитометров.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- исследование зависимости распределения магнитной индукции объекта от его параметров;
- определение требований к точности магнитометров;
- аналитический обзор электромагнитных методов поиска объектов и средств создания магнитного поля;
- моделирование катушек различной конструкции для создания магнитных полей и разработка имитатора магнитных аномалий на их основе.

Объектом исследования является увеличение объема однородного магнитного поля имитатора магнитных аномалий.

Предмет исследования – имитатор магнитных аномалий для калибровки магнитометров.

Научная новизна заключается в разработке конечно-элементных моделей конструкций имитатора магнитных аномалий с высокой степенью однородности поля.

Результаты, приведенные в работе, могут быть использованы для калибровки, исследования и настройки феррозондовых магнитометров.

Промежуточные результаты по теме данной работы были представлены на XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» в 2014 году, а также в 2015 году в журнале «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering».

## **1 Электромагнитные методы и средства поиска объектов в водной среде**

Объекты, находящиеся под водой в течение продолжительного периода времени, покрываются донными отложениями, что затрудняет их визуальное обнаружение. В связи с этим в данной работе рассмотрены дистанционные электромагнитные методы поиска, которые разделяются на активные и пассивные.

Под активным преобразователем понимается преобразователь, воздействующий на объект поиска (например, вызывающий вихревые токи на поверхности объекта поиска), под пассивным – преобразователь, характеристики которого меняются под воздействием магнитного поля (далее – МП) объекта.

### **1.1 Сравнительный анализ электромагнитных методов поиска**

Наиболее распространенными неконтактными электромагнитными методами поиска малоразмерных объектов на глубинах до 10 м в настоящее время являются магнитометрический, индукционный и радиолокационный [1, 3].

Индукционный и радиолокационный методы являются активными. Индукционный метод позволяет обнаружить объекты, выполненные из любого металла (как ферромагнитного, так и диамагнитного), а также содержащие в конструкции металлические элементы. Радиолокационный метод применяется для поиска как металлических так и неметаллических объектов.

К пассивным методам относят магнитометрический метод, предназначенный для обнаружения магнитных аномалий из-за присутствия ферромагнитных объектов (объекты из чугуна, стали, железоникелевых сплавов, электронные устройства в активном состоянии). Для обнаружения

диэлектрических (из пластмассы, дерева и т.п.) и диамагнитных объектов (из дюралюминия, золота, серебра, бронзы и т.п.) этот метод неприменим [3, 4].

Диаграмма методов и типов объектов поиска для них представлена на рисунке 1.1 [1, 3].

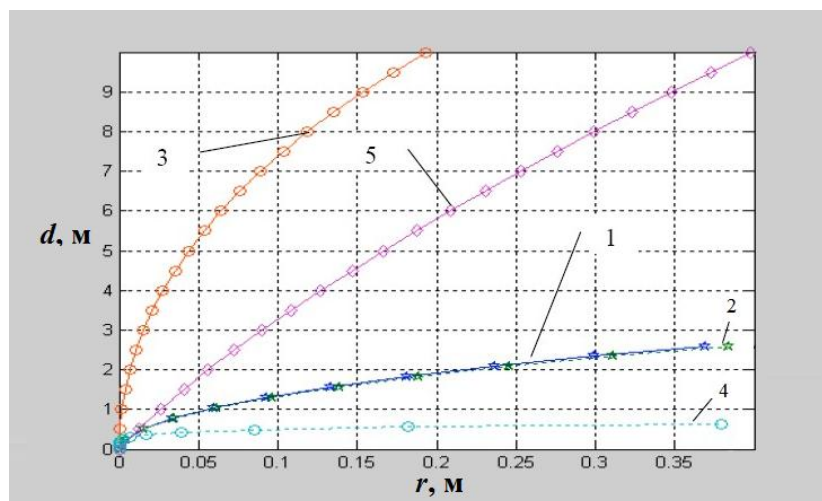


Рисунок 1.1 – Методы поиска и обнаруживаемые объекты

Глубина обнаружения  $d$  зависит не только от метода поиска, но и от типа укрывающей среды и геометрических параметров объекта. Пример данной зависимости для металлической сферы радиусом  $r$  представлена на рисунке 1.2 [1].

Из графиков на рисунке 1.2 видно, что наибольшая глубина обнаружения во влажном грунте присуща магнитометрическому методу.

Для более детального сравнения описанных методов преимущества и недостатки каждого из них были сведены в таблицу 1.1 [1, 2].



- 1 – индукционный метод, сухой грунт;  
 2 – индукционный метод, влажный грунт;  
 3 – радиолокационный метод, сухой грунт;  
 4 – радиолокационный метод, влажный грунт;  
 5 – магнитометрический метод, грунт любой влажности

Рисунок 1.2 – Зависимость глубины обнаружения металлической сферы от ее радиуса, метода поиска и укрывающей среды

Таблица 1.1 – Преимущества и недостатки магнитометрического, индукционного и радиолакационного методов

| Название метода    | Преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Магнитометрический | <ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность обнаружения ферромагнитных объектов в любых естественных укрывающих средах (глинистых и песчаных грунтах, пресной и морской воде, льдах и т.д.);</li> <li>- большая глубина поиска;</li> <li>- высокая скорость поиска за счет ограниченного спектра объектов поиска в сравнении с другими методами;</li> <li>- безопасность поиска взрывных устройств;</li> <li>- невысокие требования к квалификации оператора</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ограниченный круг обнаруживаемых объектов;</li> <li>- ограничение использования вблизи железобетонных сооружений (зданий, мостов, аэродромных покрытий и т.д.), электротехнических установок, в горной местности с металлосодержащими рудами;</li> <li>- высокая стоимость приборов и сложность в их изготовлении;</li> <li>- подверженность помеховому влиянию мелких близкорасположенных предметов при поиске крупных объектов на большой глубине</li> </ul> |

Продолжение таблицы 1.1

| Название метода  | Преимущества                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Недостатки                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Индукционный     | <ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность обнаружения объектов из любого металла;</li> <li>- высокая селективность по размерам искомого объекта: простота «отбрасывания» мелких металлических предметов (гильз, осколков боеприпасов и др.)</li> <li>- при разнесении генераторной и приемной магнитных антенн (металлоискатель на прием-передаче);</li> <li>- невысокие требования к квалификации оператора;</li> <li>- невысокая стоимость приборов;</li> <li>- малое влияние наличия грунта на процесс поиска</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- небольшая глубина обнаружения, соизмеримая с длиной базы – расстоянием между передающей и приемной катушками (порядка <math>10^{-1}</math>, <math>10^0</math> м)</li> <li>- подверженность эфирным помехам (гроза, линии электропередач и т.п.)</li> <li>- ограниченность частотного диапазона областью постоянных и медленно изменяющихся МП</li> </ul>                                                                                                                                  |
| Радиолокационный | <ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность обнаружения неоднородностей в грунте: пустот и объектов из любых материалов (металлы, пластмассы др.);</li> <li>- возможность приближенного определения глубины залегания объекта</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- низкая селективность объектов поиска, неоднозначность интерпретации характера выявленной аномалии;</li> <li>- малая глубина обнаружения в грунтах с повышенным затуханием электромагнитных волн (влажный суглинок, болото и т.д.);</li> <li>- высокая стоимость приборов и сложность в их изготовлении;</li> <li>- низкая скорость поиска, обусловленная большими затратами времени на обработку результатов измерений;</li> <li>- высокие требования к квалификации оператора</li> </ul> |

Сравнительный анализ основных электромагнитных методов позволяет сделать следующий вывод: несмотря на то, что радиолокационный метод является достаточно перспективным, он все же еще уступает магнитометрическому и индукционному. Далее более подробно рассмотрены эти два метода, а так же МП океана и особенности измерения магнитной индукции в океане.

## 1.2 Особенности измерения магнитной индукции в океане

Магнитное поле океана – суперпозиция полей различного происхождения. Из них основной составляющей является магнитное поле Земли (МПЗ), существование которого объясняется протеканием электромагнитных процессов в ядре, магме и земной коре Земли, а также воздействием корпускулярного излучения Солнца.

Суммарное МПЗ состоит из квазистационарного (главного) и переменного магнитных полей. Напряженность главного магнитного поля во много раз превышает напряженность переменного магнитного поля. В настоящее время вектор напряженности главного МПЗ в северном полушарии направлен вглубь Земли.

Главное поле неоднородно и достаточно медленно изменяется с течением времени. Это изменение называют вековым ходом главного МПЗ.

Существуют также менее длительные изменения МПЗ – вариации. Вариации могут быть длиннопериодными (от 11 до 27 суток) и спорадические (от нескольких секунд до 3 суток) [6].

В океане на вариации МПЗ накладывается еще и вторичное магнитное поле, индуцированное течениями, волнами и приливами. Индуцированное магнитное поле с глубиной затухает.

Вектор МПЗ представляет собой историческую и геофизическую константу по направлению действия и уровню. Значение постоянной составляющей индукции МПЗ варьируется в зависимости от широты. Например, на широте  $50^\circ$  модуль магнитной индукции равен примерно 50 мкТл, а на экваторе 31 мкТл. По сравнению с МПЗ магнитные аномалии, вызываемые ферромагнитными предметами, незначительны (от 5 до 500 нТл). Таким образом, задача поиска ферромагнитных объектов в укрывающих средах состоит в определении малых приращений больших величин [3].

В океанологических задачах магнитное поле Земли (МПЗ) оценивают по его вариациям. Диапазон частот измеряемых вариаций колеблется

примерно от 0,001 Гц до 200 Гц. Особенностью таких измерений является то, что амплитуды исследуемых вариаций очень малы (до 10 нТл), что определяет потребность в преобразователях с высоким порогом чувствительности (от 0,01 до 0,1 нТл). Большая постоянная составляющая индукции МПЗ затрудняет измерения на ее фоне малых вариаций. Для избавления от постоянной составляющей находят применение менее точные и более простые преобразователи, такие как индукционная петля или многовитковая катушка с сердечником [6].

В связи с вышеуказанной особенностью (измерение малых вариаций на фоне большой постоянной составляющей МПЗ) изменение положения измерителя магнитного поля относительно направления магнитной индукции МПЗ приводит к появлению помех. Поэтому корректным режимом измерения будет жесткий стационарный, в отличие от буксируемого и зондирующего [6].

Дальность обнаружения ферромагнитных объектов в воде (как пресной, так и соленой) не отличается от дальности обнаружения в грунте. Однако при поиске в воде магнитометр должен быть установлен на плавающем средстве, выполненном из немагнитных материалов (резиновой лодке, деревянном плоту и т.п.), и не содержащим в своей конструкции ферромагнитных элементов (скоб, гвоздей, зажимов и т.п.). Подобные элементы могут быть выполнены из диамагнитных металлов, например, бронзы, дюралюминия или пластмассы [7].

Вода является диамагнетиком и намагничивается под действием внешнего магнитного поля. Вектор намагниченности  $\vec{P}_m$ , А/м, определяется по выражению [6]:

$$\vec{P}_m = \chi_m \cdot \vec{H}, \quad (1.1)$$

где  $\chi_m$  – магнитная восприимчивость,

$\vec{H}$  – напряженность магнитного поля, А/м.

Вода намагничивается слабо, поэтому магнитная восприимчивость отрицательна и имеет малое значение ( $\chi_m = -12,97 \cdot 10^{-6}$ ), а также не зависит от температуры, солености и давления [6].

Суммарное магнитное поле в океане характеризуется вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ , Тл, вычисляемым по формуле [6]:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}, \quad (1.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,

$\mu$  – магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость соотносится с магнитной восприимчивостью следующим образом:

$$\mu = (1 + \chi_m). \quad (1.3)$$

Из-за малости магнитной восприимчивости магнитная проницаемость практически равна единице.

### 1.3 Измерительные преобразователи магнитометрического метода

Магнитометрические преобразователи относятся к пассивным. Они работают на основе явления возникновения электродвижущей силы (ЭДС) электромагнитной индукции в контуре, пронизываемом потоком магнитной индукции. Источником энергии такого преобразователя является электромагнитное поле. Это обеспечивает неподрыв взрывоопасных предметов иницирующими физическими полями при активном зондировании, что зачастую необходимо [4, 5].

В основе работы магнитометров лежат такие физические законы и явления, как закон электромагнитной индукции Фарадея, эффект Холла, Гаусса, Джозефсона и др. [4].

Измерить минимальные изменения МПЗ позволяют следующие виды средств измерений (далее – СИ) [3, 7]:

- 1) квантовые и сверхпроводящие магнитометры;

- 2) магнито-оптические преобразователи;
- 3) датчики Холла;
- 4) протонные магнитометры;
- 5) феррозондовые магнитометры (далее – ФМ).

Несмотря на то, что 1) и 2) имеют высокую чувствительность, у них есть недостаток – отсутствие направленности чувствительного элемента (далее – ЧЭ), что не позволяет определить пространственную ориентацию вектора магнитного поля объекта измерения. Также 1), 2) и 3) отличаются громоздкостью и низким быстродействием [3].

В настоящее время наиболее широко используются феррозондовые приборы. Они характеризуются высокой чувствительностью и точностью, а также возможностью непосредственного измерения составляющих вектора магнитного поля, что обеспечивает получение полной информации о структуре поля и его источниках.

ФМ имеют ЧЭ – феррозонд, представляющий собой катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником, магнитные свойства которого изменяются под действием измеряемого или вспомогательного МП. Таким образом, параметром, на который оказывается воздействие, является магнитная проницаемость сердечника  $\mu$ . Феррозондовые преобразователи применяются в измерениях стационарных или медленно изменяющихся МП [8].

В основе работы феррозонда лежит принцип модуляции измеряемого магнитного потока с выделением четногогармонического измерительного сигнала. Преобразователь включает один или два ферромагнитных сердечника, обмотки возбуждения и сигнальной обмотки. Функционирование феррозонда заключается во взаимодействии в объеме сердечников постоянного измеряемого МП и переменного вспомогательного МП, которое появляется под воздействием тока, протекающего в обмотке возбуждения. В сигнальной обмотке формируется ЭДС, которая характеризует измеряемое МП [6].

ЭДС в сигнальной обмотке рассчитывается по формуле:

$$e_k = -w_{II} \frac{d\Phi}{dt} = -H_0 \cdot S \cdot \mu_0 \cdot w_{II} \frac{d\mu_d}{dt}, \quad (1.4)$$

где  $e_k$  – ЭДС в сигнальной обмотке, В,

$w_{II}$  – число витков измерительной обмотки,

$\Phi$  – магнитный поток в сердечнике, Вб,

$H_0$  – проекция напряженности измеряемого поля на магнитную ось феррозонда, А/м,

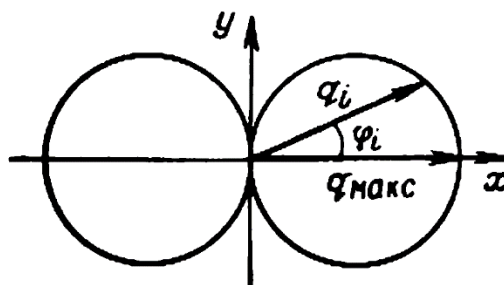
$S$  – площадь поперечного сечения сердечника, м<sup>2</sup>,

$\mu_d$  – дифференциальная магнитная проницаемость сердечника.

Вспомогательное поле вызывает периодические изменения  $\mu_d$ , что обеспечивает чувствительность феррозонда к постоянной  $H_0$  и ее сравнительно медленным вариациям [6].

Феррозонды характеризуются наличием магнитной оси. В таких преобразователях выходной сигнал связан с проекцией вектора магнитной индукции на магнитную ось. Следовательно, выходной сигнал является не только функцией вектора магнитной индукции, но и функцией пространственного расположения преобразователя.

Изменяя пространственное положение ФМ при повороте на равные углы в заданной плоскости, можно получить зависимость значения и направления вектора магнитной индукции от угла поворота в виде диаграммы направленности, представленной на рисунке 1.3 [8].



$q_i$  –  $i$ -е значение выходного сигнала преобразователя, Тл  
 $q_{max}$  – максимальное выходное значение преобразователя, Тл  
 $\varphi_i$  –  $i$ -й угол поворота преобразователя, °

Рисунок 1.3 – Диаграмма направленности феррозонда

Если за начальное направление диаграммы выбрать ось  $x$ , совпадающую с максимальным положительным значением, то верно выражение [8]:

$$q_i = q_{\max} \cdot \cos \varphi_i = S \cdot B_{\Omega} \cdot \cos(B_{\Omega}, i_m^0), \quad (1.5)$$

где  $S$  – чувствительность преобразователя,

$B_{\Omega}$  – направление вектора в плоскости угла поворота, Тл,

$i_m^0$  – магнитная ось преобразователя.

Таким образом, при совпадении магнитной оси феррозонда с направлением силовых линий внешнего МП диаграмма направленности имеет максимальное значение ( $q_i = q_{\max}$ ), векторы  $B_{\Omega}$  и  $i_m^0$  совпадают и модуль вектора  $B_{\Omega}$  вычисляется по формуле [8, 9]:

$$B_{\Omega} = \frac{q_{\max}}{S}. \quad (1.6)$$

Существует несколько классификаций феррозондов: по режиму работы, принципу действия, конструкции, способу наложения вспомогательного поля [9].

Феррозонды могут работать в двух режимах.

Первый режим характеризуется наличием слабого переменного и сильного постоянного токов. Постоянный ток создает в сердечниках сильное МП, направленное в противоположные стороны. Измеряемое МП алгебраически суммируется с постоянным МП, уменьшает  $\mu_d$  в одном из сердечников и увеличивает в другом. Из-за этого баланс индукций нарушается и во вторичной обмотке появляется ЭДС, пропорциональная индукции измеряемого поля.

Первый режим работы обеспечивает малую потребляемую мощность по переменному току и отличается нелинейностью функции преобразования [6, 9].

Во втором режиме работы по цепи возбуждения феррозонда протекает только переменный ток. Создаваемое током переменное МП периодически

доводит сердечники до состояния магнитного насыщения. В то же время измеряемое поле настолько мало, что оно не влияет на перемангничивание сердечников.

Второй режим имеет ряд преимуществ перед первым. Во-первых, во втором режиме используется четногармонический спектр сигнала, что позволяет улучшить соотношение сигнал/помеха. Во-вторых, обеспечивается стабильность нуля феррозонда и большой динамический диапазон. Также во втором режиме достигается более высокая линейность функции преобразования [6, 9].

Феррозонды появились в 30-х годах XX века. Первый феррозонд был изобретен учеными Х. Ашенбреннером и Г. Губо и представлял собой кольцевой сердечник с первичной обмоткой и располагающегося поверх них специального каркаса со вторичной обмоткой, как показано на рисунке 1.4 [9].

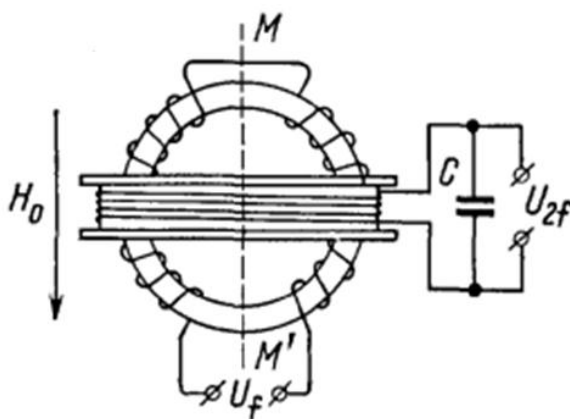


Рисунок 1.4 – Феррозонд Х. Ашенбреннера и Г. Губо

На первичную обмотку подавался ток частоты 500 Гц. ЭДС со вторичной обмотки имела удвоенную частоту и амплитуду, пропорциональную измеряемой компоненте поля, направленной вдоль вертикали  $MM'$  [9].

Позже Ф. Ферстер заменил кольцевой сердечник на два стержневых. На их основе ученый создал прибор для испытаний магнитных материалов и градиометр.

Примерно в то же время П.А. Халилеев разработал стержневой феррозонд с одним сердечником и обмоткой. Этот прибор активно использовался в магниторазведке.

Также исследования и анализ теоретических основ в области феррозондовых приборов были проведены М. Гаррисоном, Р. Фальдкеллером, В.К. Аркадьевым, М.А. Розенблатом, С.Ш. Долгиновым, Р.И. Янусом, Л.Х. Фридманом, В.И. Дрожжиным, Н.Н. Шумиловским, Б.И. Блажкевичем, В.Н. Пономаревым и др. В 70-х годах XX века Ю.В. Афанасьев в своих работах подробно описал типы конструкций и материалов феррозондов, их характеристики [9].

Предложенная Ф. Ферстером конструкция двухстержневого дифференциального феррозонда (далее – ДФ) получила широкое распространение и продолжает использоваться в настоящее время. Схема ДФ приведена на рисунке 1.5.

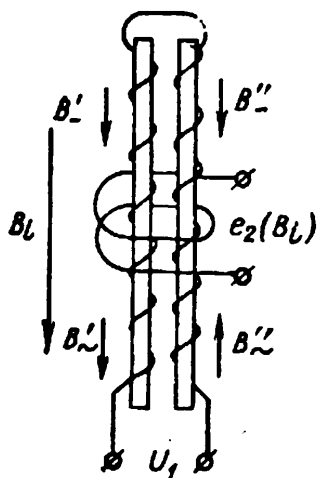
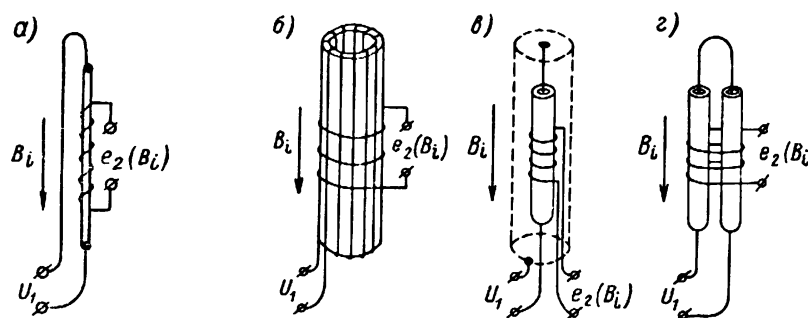


Рисунок 1.5 – Схема дифференциального феррозонда

ДФ представляет собой два ферромагнитных стержня с первичными обмотками, включенными последовательно-встречно, и общей вторичной обмоткой. При отсутствии измеряемого поля встречное включение обмоток возбуждения обеспечивает баланс между потоками в сердечниках и, соответственно, равенство нулю ЭДС, возникающей в сигнальной обмотке. Если измеряемое поле присутствует, то во вторичной обмотке появляется ЭДС, пропорциональная продольной компоненте внешнего поля [8].

ДФ относится к феррозондам с продольным возбуждением. Существуют также феррозонды с поперечным возбуждением. Их конструкции представлены на рисунке 1.6.



а) – проволочный, б) – трубчатый, в) – коаксиальный, г) – дифференциальный

Рисунок 1.6 – Феррозонды с поперечным возбуждением

Проволочный феррозонд состоит из пермаллового проволочного сердечника, через который протекает переменный ток, и измерительной обмотки, нанесенной вдоль стержня. В модификациях проволочного феррозонда используются трубчатые сердечники. Трубки равномерно промагничиваются и обладают требуемой жесткостью [8].

ФМ пригодны для работы в слабых магнитных полях в широком температурном диапазоне и отличаются высокой надежностью, небольшим энергопотреблением и компактными габаритами. Собственные шумы новых феррозондовых приборов составляют порядка  $10^{-12}$  Тл, что в два раза ниже, чем у датчиков Холла [3, 9].

Выходной сигнал феррозонда зависит не только от величины внешнего магнитного поля, но и от его направления относительно магнитной оси ЧЭ. Таким образом, феррозонд используется как устройство, ориентируемое в пространстве относительно силовых линий поля Земли. Однако для построения поискового магнитометра это свойство рассматривается как недостаток, поскольку МПЗ на несколько порядков превосходит поля объектов измерения.

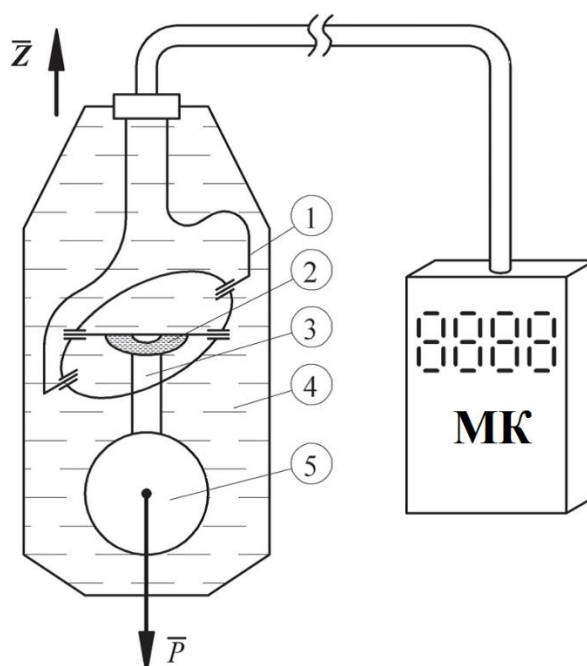
Для устранения влияния ориентации магнитометра применяют трехкомпонентные феррозондовые преобразователи, которые измеряют

модуль суммарного вектора магнитного поля. Однако такие приборы имеют усложненную конструкцию, что ведет к их удорожанию. Кроме того, такие магнитометры имеют низкую чувствительность, поскольку измеряют магнитные величины, близкие к МПЗ [3].

В связи с этим при поиске скрытых в воде или под землей ферромагнитных объектов применяется однокомпонентный, вертикально ориентированный феррозонд, в котором компенсация МПЗ в магнитных сердечниках ДФ осуществляется током в обмотке компенсации. Недостатки такого устройства состоят в сложности эксплуатации и изготовления и нестабильности.

Существует метод поиска, при котором предполагается, что постоянная составляющая МПЗ в радиусе 10 км на поверхности земли является константой. При реализации метода для автоматической установки оси чувствительности ФМ в вертикальном положении, широко применяются гравитационные ориентаторы. Поскольку во время поиска объекта оператор находится в движении, появляются погрешности ориентации, обусловленные импульсными и высокочастотными механическими помехами. Для их демпфирования используется карданов подвес, который вместе с датчиком помещен в жидкость, не проводящую электрический ток. Для достижения более высокой точности и стабильности ориентации феррозонда магнитометр содержит жидкостный коммутатор, разрешающий выборку значений измеряемого магнитного поля только при совпадении магниточувствительной оси феррозонда с вертикалью. Схематичное изображение устройства представлено на рисунке 1.7 [7].

Диаграмма направленности ФМ в сочетании с жидкостным индикатором вертикали повышает точность определения местоположения объекта, стабильность, быстродействие, а также обеспечивает технологичность измерительного процесса [3].



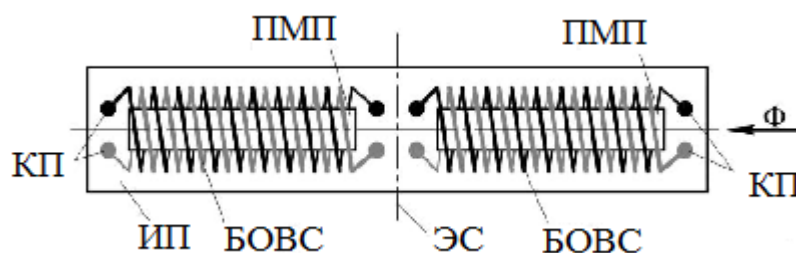
- 1 – подвес гравитационного ориентатора
- 2 – жидкостный маятниковый коммутатор
- 3 – феррозондовый датчик
- 4 – демпфирующая жидкость
- 5 – груз маятника
- МК – микроконтроллер с электронным преобразователем сигналов ФМ
- $\vec{P}$  – вектор силы тяжести
- $\vec{Z}$  – вертикальная составляющая МПЗ

Рисунок 1.7 – Магнитометр с жидкостным коммутатором

В феррозондах с кольцевыми и объемными пермаллоевыми сердечниками, а также для ЧЭ на тонких магнитных пленках характерно угловое смещение чувствительной оси датчика относительно геометрической оси, что ведет к повышению погрешности измерения. Также имеется погрешность в ДФ с параллельными полуэлементами из-за искажения диаграммы направленности при плоских перемещениях вокруг собственного центра симметрии в неоднородном МП. Решение описанных проблем возможно с помощью соосного расположения полуэлементов стержневого ДФ [10]. Кроме того, можно использовать бескаркасные соленоидные обмотки, что позволяет жестко закрепить их в корпуса магнитометра. Описанная технология обеспечивает точность совмещения геометрической оси феррозонда и физической оси чувствительности не хуже 0,5' [11].

Возможно использование в качестве сердечников феррозондов плоских магнитных пленок. Такие ЧЭ изготавливают по гибридным

технологиям. Примером является проект производства гибридных ДФ с соосными полуэлементами. Схема гибридного ДФ изображена на рисунке 1.8 [11].

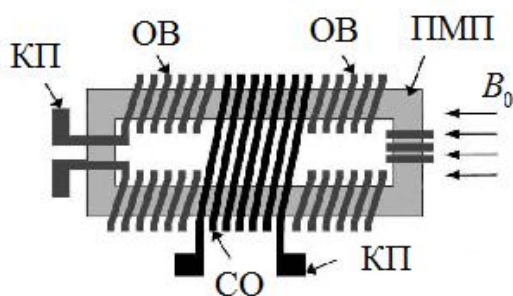


ПМП – плоская магнитная пленка  
ИП – измерительная платформа  
ЭС – экваториальное сечение ДФ  
Φ – ось чувствительности ДФ  
КП – контактные площадки  
БОВС – бифилярные обмотки возбуждения сигнала

Рисунок 1.8 – Модель гибридного ДФ с плоской магнитной пленкой

Плоские индуктивности обмоток феррозонда, выполненные по интегральным технологиям, в сравнении с индуктивностями катушек имеют меньшую величину межвитковой емкости.

Существуют ДФ, выполненные полностью по интегральной технологии – MEMS-феррозонды (MEMS flux-gate sensors), изготовленные на основе замкнутого магнитопровода. Пример такого феррозонда изображен на рисунке 1.9 [12, 13].



$B_0$  – силовые линии магнитного поля  
ОВ – обмотка возбуждения  
СО – сигнальная обмотка  
ПМП – плоская магнитная пленка  
КП – контактные площадки

Рисунок 1.9 – Модель интегрального ДФ с ПМП

Однако в таких феррозондах пленки магнитопроводов выполняются из магнитомягких материалов. Это увеличивает уровни тока возбуждения сигналом синусоидальной формы (от 100 до 300 мА) [14], а значения плотности тока становятся близки к предельным. Магнитопровод занимает небольшую часть витка вторичной обмотки, что вызывает деформацию диаграммы направленности ДФ [15].

#### 1.4 Измерительные преобразователи индукционного метода

Принцип работы индукционных металлоискателей основан на законе электромагнитной индукции – преобразовании изменяющегося магнитного потока в ЭДС. В искомом проводящем объекте под воздействием возбуждающей катушки индуктивности с импульсным или периодическим током наводятся вихревые токи, которые принимаются сигнальными катушками. Поскольку индукционные металлоискатели оказывают влияние на объект поиска, они относятся к активным приборам [5].

Простым примером индукционного преобразователя является индукционная петля, представленная на рисунке 1.10. Петля выполнена из изолированного провода на неподвижном основании в виде окружности из одного или нескольких витков. Многовитковые петли используются реже, чем одновитковые, так как при одной и той же длине провода не выгодно увеличивать число витков.

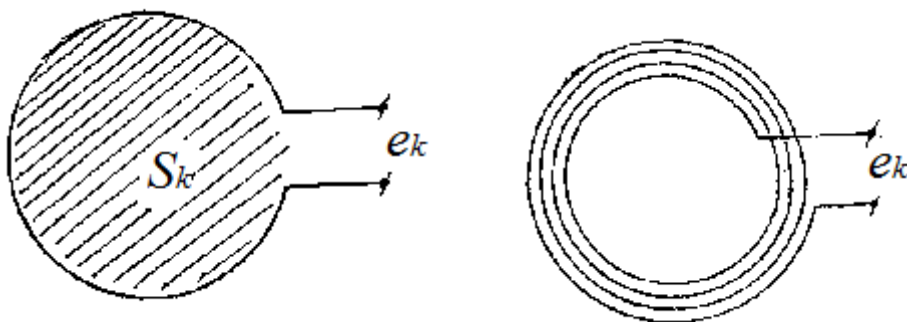


Рисунок 1.10 – Одновитковая и многовитковая индукционные петли

Если петля охватывает однородное МП, то ЭДС выхода находится по выражению:

$$e_k = -w_k S_k \mu_0 \frac{dH}{dt} \cos(\vec{B}, \vec{n}), \quad (1.7)$$

где  $e_k$  – ЭДС выхода, В,

$w_k$  – количество витков,

$S_k$  – площадь петли, м<sup>2</sup>,

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равная абсолютной магнитной проницаемости вакуума ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м),

$H$  – напряженность МП, А/м,

$\vec{B}$  – вектор магнитной индукции, Тл,

$\vec{n}$  – вектор нормали к поверхности петли.

Таким образом, если  $H$  изменяется синусоидально, то чувствительность петли зависит от частоты ЭМ поля.

В неоднородных МП эффективный магнитный поток  $\vec{\Phi}_{\text{эф}}$ , Вб, определяется по формуле:

$$\vec{\Phi}_{\text{эф}} = \int_{(S_k)} B \cos(\vec{B}, \vec{n}) dS. \quad (1.8)$$

В этом случае чувствительность не нормируется и тогда целесообразно использовать многовитковые петли [6].

Еще одним примером индукционного преобразователя является многовитковая катушка с ферромагнитным сердечником.

Если через катушку с поперечным сечением  $s$  и количеством витков  $w$  протекает магнитный поток  $\Phi$ , то полный магнитный поток  $\Psi$ , Вб вычисляется по формуле:

$$\Psi = w \cdot \Phi - H \cdot \mu \cdot s \cdot w \cdot \cos \alpha, \quad (1.9)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды,

$\alpha$  – угол между направлением вектора  $H$  и нормалью к сечению катушки, °.

Таким образом, значение ЭДС может быть получено через измерение напряженности МП  $H$  (вибрационные магнитометры) и угла  $\alpha$  (магнитоэлектрические веберметры, тесламеры) [15].

Сердечник в катушке выступает в роли концентратора ферромагнитного поля, что объясняет ее высокую чувствительность. Еще одним преимуществом катушки является возможность ее применения в неоднородном МП.

В то же время по сравнению с индукционной петлей в катушке индуктивности выше вибрационные помехи, которые вызывают вариации взаимного положения сердечника и каркаса катушки, изменение магнитной проницаемости сердечника и магнитного потока в объеме катушки. Перечисленные факторы вызывают помехи, превышающие помехи из-за изменения угла наклона преобразователя.

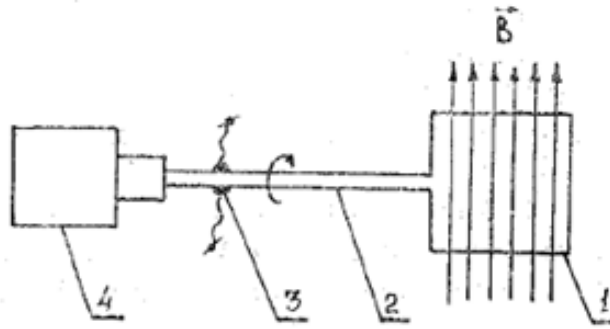
Кроме того, на работу индукционных преобразователей оказывают воздействие внешние электрические поля. Во избежание этого применяют электрические экраны или секционную намотку катушки с симметричным подключением секций ко входной цепи преобразователя. Также можно уменьшить соотношение между длиной катушки и длиной сердечника [6].

Преимуществами применения индукционной катушки в магнитометрических приборах являются простота конструкции, многофункциональность, легкость в эксплуатации и широкий диапазон частот. Однако такие приборы используются только в переменном МП и имеют большие габариты [15].

Так как чувствительность индукционных преобразователей зависит от частоты измеряемого МП, с их помощью невозможно измерить медленные вариации и постоянные МП. Этого ограничения можно избежать путем вращения преобразователя с постоянной скоростью.

Типичный вращающийся индукционный преобразователь изображен на рисунке 1.11. Он состоит из многовитковой рамки, установленной на ось электродвигателя, и контактного коллектора для получения сигнала. Рамка

вращается с частотой  $\omega_k$ , Гц, в плоскости, параллельной вектору индукции МПЗ  $\vec{B}$  [6].



- 1 – многовитковая рамка
- 2 – ось
- 3 – контактный коллектор
- 4 – электродвигатель

Рисунок 1.11 – Схема вращающегося индукционного преобразователя  
ЭДС  $e_k$ , В, возникающая на выходе рамки, определяется по формуле:

$$e_k = w_k \cdot B \cdot S_k \cdot \omega \cdot \sin \omega t, \quad (1.10)$$

где  $w_k$  – количество витков обмотки,

$S_k$  – площадь поперечного сечения обмотки,  $\text{м}^2$ .

В таком случае чувствительность преобразователя зависит от скорости вращения и является постоянной величиной:

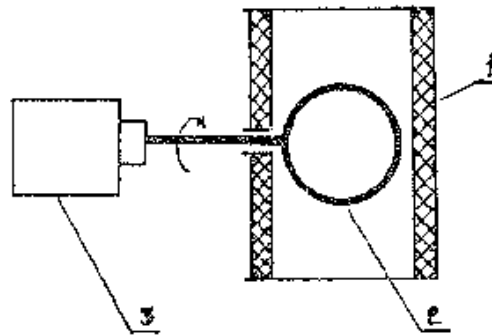
$$\frac{de_k}{dB} = w_k \cdot B \cdot S_k \cdot \omega. \quad (1.11)$$

Среди индукционных преобразователей выделяют четногармонические, которые обладают наилучшими свойствами.

Вращающийся четногармонический преобразователь ( $\alpha$ -преобразователь Барнетта) отличается возможностью разделения частот информационного сигнала и помех, создаваемых электроприводом цепи вращения. Это обеспечивает низкий порог чувствительности – до  $10^{-10}$  Тл.

$\alpha$ -преобразователь Барнетта, представленный на рисунке 1.12, содержит виток, вращающееся внутри неподвижной обмотки и двигатель. Если система располагается в МП вдоль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ , то

внутри витка наводится ЭДС и появляется ток, МП которого изменяется с одинаковой частотой и по модулю, и по направлению [6].



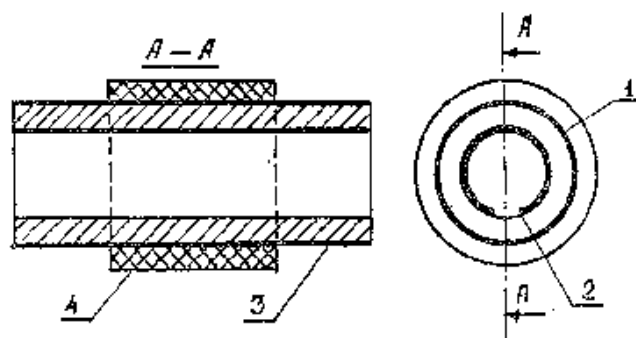
- 1 – неподвижная обмотка
- 2 – виток
- 3 – двигатель

Рисунок 1.12 – Вращающийся четногармонический преобразователь

Наводимая в обмотке ЭДС имеет в два раза большую частоту, чем частота вращения, и вычисляется по формуле:

$$e_k = w_k \cdot B \cdot S_k \cdot \omega \cdot \sin 2\omega t. \quad (1.12)$$

Еще одним видом индукционных преобразователей являются вибрационные преобразователи. В них осуществляется частотное разделение сигнала и помехи. Модуляция сигнала обеспечивается изменением площади поперечного сечения ЧЭ. Схема вибрационного преобразователя представлена на рисунке 1.13.



- 1,2 – электроды
- 3 – цилиндр
- 4 – сигнальная катушка

Рисунок 1.13 – Схема вибрационного преобразователя

Вибрационный преобразователь состоит из цилиндра с сигнальной катушкой и нанесенными на внешние и внутренние поверхности цилиндра электроды. Электрод 1 образует короткозамкнутое кольцо, а электрод 2 имеет разрыв по всей длине цилиндра.

Если преобразователь находится в МП, то в кольце наводится ЭДС и появляется переменный ток. МП этого тока вызывает появление ЭДС в сигнальной катушке, пропорциональную магнитной индукции внешнего поля.

Цилиндр колеблется радиально с частотой, равной удвоенной частоте возбуждающей ЭДС. Поэтому и выходная ЭДС сигнальной катушки имеет удвоенную частоту [6].

В ходе исследования источников по вопросам электромагнитных измерений было установлено, что для измерений магнитных аномалий в водной среде, наиболее подходящими являются феррозондовые приборы. Это объясняется их высокой селективностью и точностью, применимостью в постоянных и медленно изменяющихся магнитных полях, разного рода укрывающих средах, а также наибольшей глубиной обнаружения объектов.

### **1.5 Современные поисковые магнитометры**

Одним из ведущих производителей морских магнитометров является компания “Marine Magnetics”. Магнитометры “Marine Magnetics” основаны на датчиках с эффектом Оверхаузера. Преимущество таких датчиков состоит в том, что их характеристики не ухудшаются со временем. Примерами продукции компании являются магнитометры “SeaSPY”, “Explorer” и “SeaQuest” [16].

Магнитометр “SeaSPY”, изображенный на рисунке 1.14, измеряет напряженность внешнего магнитного поля с помощью специализированной версии технологии ядерного магнитного резонанса.



Рисунок 1.14 – Магнитометр “SeaSPY”

Благодаря малой абсолютной погрешности (0,2 нТл) “SeaSPY” могут применяться в градиометрических конфигурациях из двух или трех магнитометров для измерения независимых направлений градиента – вертикального или горизонтального (в поперечном направлении), и продольного (в направлении движения) [16].

Пример поперечного градиометра представлен на рисунке 1.15. Конструкция подходит для точных съемок при поиске небольших железосодержащих объектов, когда необходимо небольшое расстояние между датчиками (до двух метров).



Рисунок 1.15 – Поперечный градиометр

Горизонтальный поперечный градиометр можно использовать для отслеживания кабелей или трубопроводов в режиме реального времени при буксировке на достаточно большой глубине. Добавление вертикального градиометра позволяет отследить маршрут кабеля и обеспечивает точное измерение глубины залегания кабеля/трубопровода.

На рисунке 1.16 изображен продольный градиометр.



Рисунок 1.16 – Продольный градиометр

Продольные градиометры наибольшее возможное изменение базовой линии (базы): от 1,5 м до 500 м. Длинная база обеспечивает превосходную чувствительность при измерении градиента и наибольшую дальность обнаружения, а так же высокую гидродинамическую устойчивость.

Продольные градиометры используются для поиска затонувших кораблей. Такая конфигурация позволяет выявить массивные источники магнитного поля, такие как стальные корпуса судов, котлы или двигатели и т.д. Для обнаружения более мелких источников, таких как якоря или орудия, требуется более короткая база, и меньшая глубина буксировки.

Еще одним примером продукции “Marine Magnetics” является миниатюрный морской магнитометр – “Explorer”. Малый вес и небольшие размеры магнитометра “Explorer” позволяют использовать его на мелководье при спуске с небольшого судна [16].

На рисунке 1.17 представлен градиометр “SeaQuest”, измеряющий градиент во всех трех направлениях одновременно. Абсолютная погрешность составляет 0,1 нТл [16].



Рисунок 1.17 – Градиометр “SeaQuest”

Балласт нижнего крыла обеспечивает расположение центра масс ниже оси буксировки, что сводит к минимуму продольную качку и вращательные движения. Большая площадь поверхности крыльев обеспечивает ровное и гладкое буксирование даже при сильных волнах.

“SeaQuest” применяется для поиска невзорвавшихся боеприпасов, поиска месторождений, отслеживания трубопроводов, экологических исследований, в археологии.

Вышеописанные приборы являются цифровыми системами. Измерение сигнала производится непосредственно внутри буксируемой капсулы, где сигнал наиболее сильный и в наибольшей степени защищен от внешних помех.

Датчики на эффекте Оверхаузера, лежащие в основе магнитометров фирмы “Marine Magnetics”, не требуют технического обслуживания, и не нуждаются в повторной настройке и калибровке. Кроме того, такие магнитометры характеризуются отсутствием ошибки курса и температурного дрейфа [16].

Основные характеристики рассмотренных магнитометров фирмы “Marine Magnetics” представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики магнитометров фирмы Marine Magnetics

| Название характеристики       | Значение характеристики |          |          |
|-------------------------------|-------------------------|----------|----------|
|                               | SeaSPY                  | Explorer | SeaQuest |
| Абсолютная погрешность, нТл   | 0,1                     |          |          |
| Чувствительность датчика, нТл | 0,01                    | 0,02     | 0,01     |
| Разрешение, нТл               | 0,001                   |          |          |
| Диапазон измерений, мкТл      | от 18 до 120            |          | -        |
| Отклонение градиента, мкТл/м  | Более 10                |          | -        |

К недостаткам рассмотренных магнитометров на основе эффекта Оверхаузера относятся большие размеры, высокая стоимость,

чувствительность к механическим воздействиям, высокая потребляемая мощность. Кроме того такие магнитометры имеют низкое быстродействие и ограниченный температурный диапазон. Следует отметить, что магнитометры на основе эффекта Оверхаузера не имеют оси чувствительности, поэтому не могут давать информацию о направлении магнитного поля.

Для измерения магнитного поля и поиска объектов на больших глубинах с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов по-прежнему наиболее перспективными остаются феррозондовые магнитометры.

Для создания точного средства поиска необходимо знать характер изменения магнитной индукции объекта поиска в зависимости от размеров объекта и расстояния до него, и разработать имитатор магнитных аномалий для исследования поискового магнитометра.

## 2 Моделирование объектов поиска

Для создания точного электромагнитного средства поиска необходимо знать характер изменения магнитной индукции поля объекта поиска в зависимости от параметров объекта и расстояния до него. Задав некоторые условия, возможно получить подобные зависимости с помощью компьютерного моделирования.

Компьютерное моделирование магнитных аномалий было выполнено в программной среде “COMSOL Multiphysics” (COMSOL).

COMSOL – это среда математического моделирования, предназначенная для численного решения различных научных и инженерных задач, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных. Вычисления основаны на методе конечных элементов [18].

Основными этапами моделирования в программе COMSOL являются:

- построение геометрии исследуемого объекта;
- назначение материалов;
- задание условий физики;
- разбиение модели на конечные элементы;
- осуществление вычислений;
- представление результатов.

Вычисления магнитных полей в COMSOL базируются на уравнениях Максвелла [7] (2.1):

$$\begin{aligned}\oint \bar{E} dl &= -\int \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} dS, \\ \oint \bar{D} dS &= \int \rho dV, \\ \oint \bar{H} dl &= \int (j + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t}) dS, \\ \oint \bar{B} dS &= 0,\end{aligned}\tag{2.1}$$

где  $\bar{H}$  – вектор магнитного поля, А/м,

$\bar{B}$  – вектор магнитной индукции, Тл,

$\bar{D}$  – вектор тока подмагничивания, А,

$\rho$  – объемная плотность внешних зарядов, Кл/м<sup>3</sup>,

$j$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>,

$l$  – дистанция, м.

Магнитное поле объекта может быть определено следующим выражением [8]:

$$B_x = \frac{B_i V}{4\pi x^3}, \quad (2.2)$$

где  $B_x$  – магнитная индукция объекта, Тл;

$B_i$  – внутренняя магнитная индукция материала, Тл;

$x$  – расстояние до объекта, м.

Внутренняя магнитная индукция материала  $B_i$ , Тл, определяется по формуле (2.3) [3]:

$$B_i = (\mu_r - 1)B_E, \quad (2.3)$$

где  $B_E$  – величина магнитной индукции окружающей среды, равная 50 мкТл.

## **2.1 Исследование зависимости распределения магнитного поля Земли вблизи объекта от параметров объекта**

Предполагаемые объекты поиска (трубопроводы, подводные лодки, обломки судов и т.д.) выполнены преимущественно из ферромагнитных материалов. В таблице 2.1 приведены основные ферромагнитные материалы и их относительная магнитная проницаемость.

Таблица 2.1 – Относительная проницаемость ферромагнитных материалов

| Ферромагнитные материалы                                 | Состав                                               | Обработка                     | Относительная магнитная проницаемость |              | Т <sub>к</sub> , °С |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|
|                                                          |                                                      |                               | начальная                             | максимальная |                     |
| Ферромагнитные материалы                                 |                                                      |                               |                                       |              |                     |
| Кобальт                                                  | 99 % Со                                              | отжиг                         | 70                                    | 250          | 1150                |
| Никель                                                   | 99 % Ni                                              | отжиг                         | 110                                   | 600          | 360                 |
| Железо                                                   | 99,8 % Fe                                            | отжиг                         | 200                                   | 5000         | 770                 |
| Железо                                                   | 99,95 % Fe                                           | отжиг в водороде              | 10000                                 | 200000       | 774                 |
| Соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными |                                                      |                               |                                       |              |                     |
| Сталь                                                    | до 2,1 % С, до 4,5 % Si, до 0,5 % Al, остальное – Fe | охлаждение                    | 200                                   | 4000         |                     |
| Fe <sub>3</sub> Al                                       |                                                      |                               | 743                                   |              |                     |
| Ni <sub>3</sub> Mn                                       |                                                      |                               | 773                                   |              |                     |
| ZnCMn <sub>3</sub>                                       |                                                      |                               | 353                                   |              |                     |
| Сплав кремний-железо                                     | 96,7 % Fe; 3,3 % Si                                  |                               | 600                                   | 10000        |                     |
| Сплав кремний-железо                                     | 96,7 % Fe; 3,3 % Si                                  | отжиг в водороде              | 1500                                  | 40000        |                     |
| Пермаллой (78 %)                                         | 78 % Ni; 22 % Fe                                     | закалка                       | 8000                                  | 100000       | 550                 |
| Мю-металл                                                | 77% Ni; 16% Fe; 5% Cu; 2% Cr                         |                               | 100000                                | 300000       |                     |
| Суперпермаллой                                           | 79 % Ni; 16 % Fe; 5 % Mo                             | отжиг в водороде, охлажде-ние | 100000                                | 1000000      |                     |

Для оценки влияния ферромагнитного объекта на естественное МПЗ, проводилось моделирование протяженного полого цилиндрического объекта (трубы) из ферромагнитного материала, помещенного в однородную среду (воду). Толщина стенки трубы установлена равной 1 % от значения диаметра. Внешний вид модели представлен на рисунке 2.1.

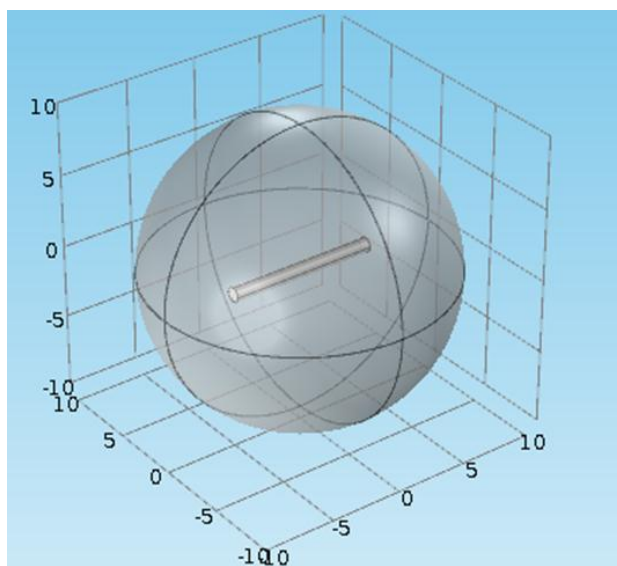


Рисунок 2.1 – Модель полый ферромагнитной трубы

В модели на рисунке 2.1 МПЗ принято постоянным, а значение магнитной индукции МПЗ – равным 50 мкТл. МПЗ действуют вдоль оси  $z$ , а по остальным двум осям отсутствует. Варьировались следующие параметры: длина  $l$ , диаметр  $D$ , относительная магнитная проницаемость  $\mu_0$ . Вариации магнитной индукции поля объекта моделировались во всех случаях для направления перпендикулярного длине объекта.

На рисунке 2.2 представлено качественное распределение магнитной индукции при длине объекта  $l = 1$  м.

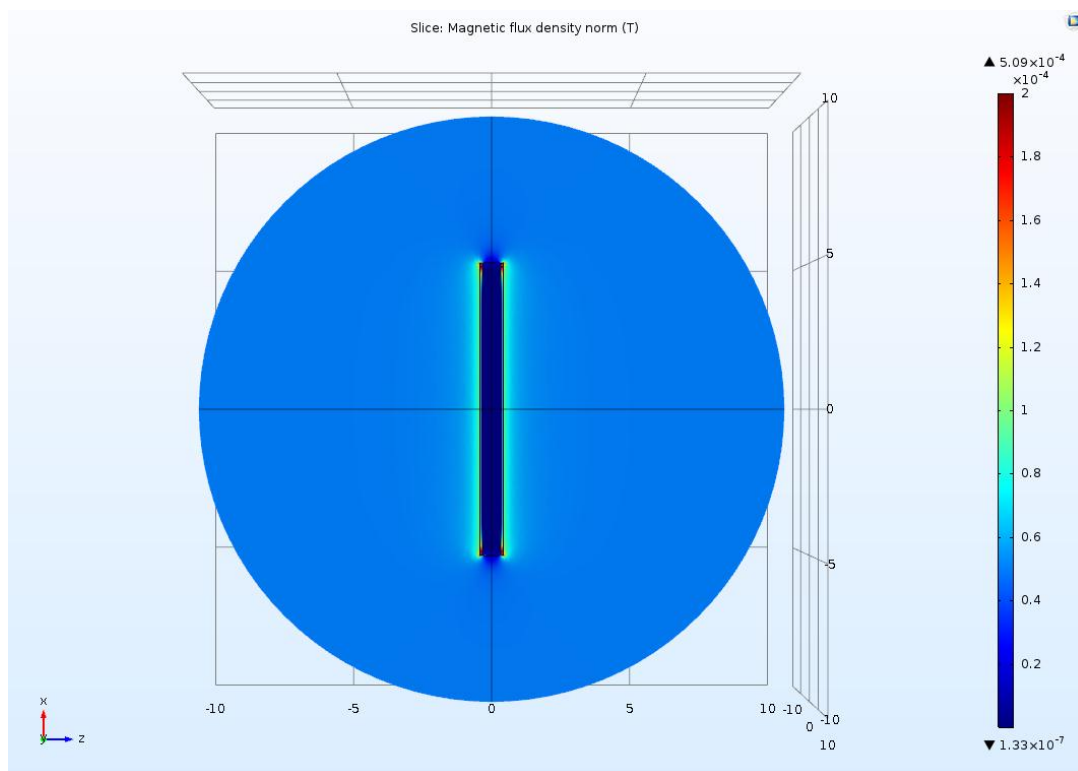


Рисунок 2.2 – Качественное распределение магнитной индукции при длине объекта  $l = 1$  м

Моделирование проводилось при изменении одного из параметров (например, длины  $l$ ) и фиксированных значениях двух других параметров (например, диаметр  $D = 1$  м, относительная магнитная проницаемость  $\mu_0 = 1000$ ).

В приложении А приведены вариации индукции МПЗ вблизи объекта в зависимости от расстояния до объекта, полученные при различных значениях длины (таблица А.1) и диаметра объекта поиска (таблица А.2), а также магнитной проницаемости материала (таблица А.3).

## 2.2 Моделирование объектов сложной формы

Для определения требований к точности магнитометра, в программе COMSOL была создана трехмерная модель ферромагнитного объекта, помещенного в водное пространство (прямоугольный параллелепипед),

которая позволяет вычислить значение магнитной индукции в каждой точке исследуемой области. Вид модели представлен на рисунке 2.3.

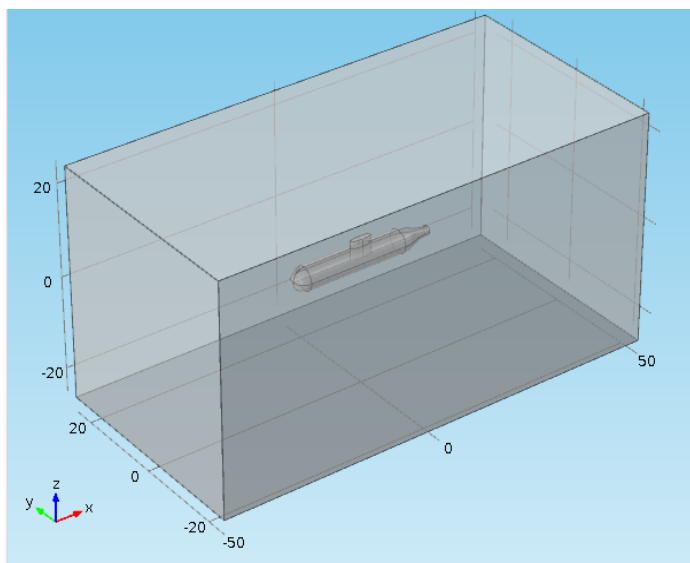


Рисунок 2.3 – Геометрия модели

Для моделируемого объекта были заданы длина 32 м, радиус 2,5 м и материал “Iron”. Для исследуемого пространства были установлены габаритные параметры 30x40x100 м, значение индукции МПЗ вдоль оси z 50 мкТ и материал “Water”.

Отображение распределения магнитного поля объекта в ху-плоскости на расстоянии 15 м имеет вид, представленный на рисунке 2.4. Цветом показаны значения модуля магнитной индукции. Так же был построен трехмерный векторный график магнитной индукции.

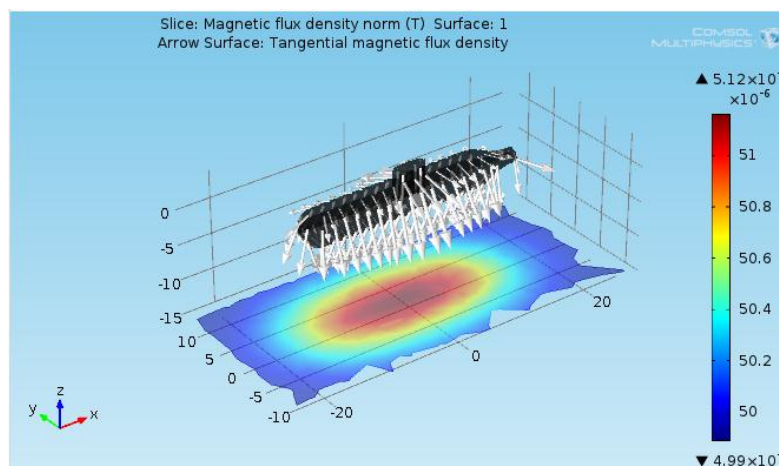


Рисунок 2.4 – График модуля магнитной индукции в слое -15 м и график тангенциального магнитного поля

Для оценки распределения магнитной индукции вдоль оси  $z$  был построен график зависимости модуля магнитной индукции  $|\vec{B}|$ , Тл, от расстояния до объекта, м, представленный на рисунке 2.5.

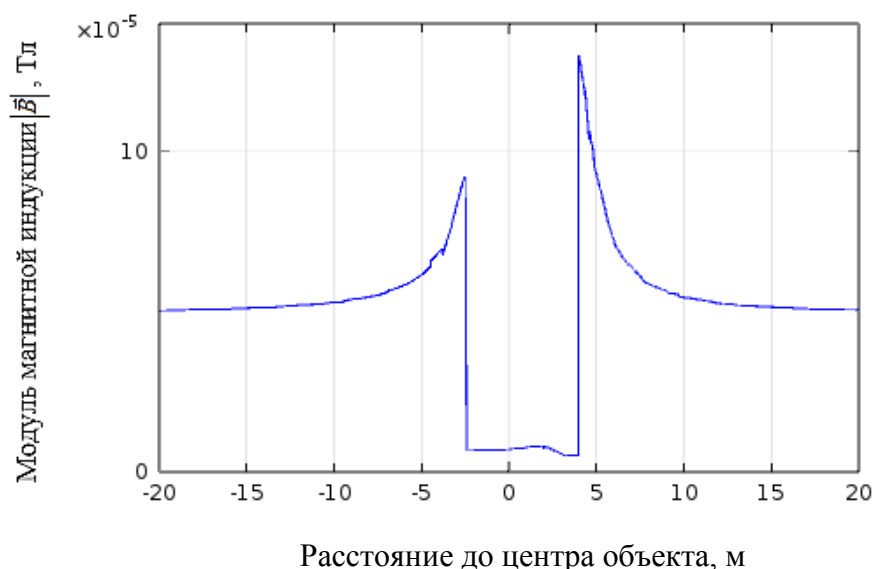


Рисунок 2.5 – Распределение магнитной индукции вдоль оси  $z$

По графику на рисунке 2.5 можно сказать, что естественное МПЗ заметно изменяется вблизи ферромагнитного объекта. Например, для обнаружения объекта на дистанции 20 м феррозондовый магнитометр должен зафиксировать изменение индукции МПЗ на 1 мкТл, а на дистанции 15 м – изменение индукции на 1,5 мкТ.

### 2.3 Выводы по результатам моделирования объектов поиска

По результатам, полученным в ходе моделирования можно сделать следующие выводы.

Вариации длины объекта от равной его диаметру до десятикратного увеличения практически не влияют на изменение магнитного поля в направлении перпендикулярном длине объекта.

Увеличение диаметра объекта прямо пропорционально изменяет магнитное поле в направлении перпендикулярном длине объекта. Для объекта диаметром 0,5 м изменение магнитного поля на расстоянии 2 м составляет

500 нТл или 1 %. Аппроксимировать изменение естественного магнитного поля от ферромагнитного объекта возможно с помощью кубической параболы.

Вариации относительной магнитной проницаемости практически не влияют на изменение магнитного поля в направлении перпендикулярном длине объекта.

Для решения задачи поиска подводных ферромагнитных объектов поисковый магнитометр должен обладать чувствительностью порядка от 10 до 1 нТл.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В работе осуществляется проектирование имитатора магнитного поля (далее – имитатора) с высокой степенью однородности, применяемого для калибровки феррозондовых поисковых магнитометров. Для оценки возможности реализации имитатора необходимо установить целесообразность его внедрения с точки зрения экономики. Прежде всего, необходимо рассчитать цену разработки, которая складывается из затрат на исходные материалы, заработную плату исполнителей, электроэнергию, амортизационных и накладных расходов. Затем определяется предполагаемый экономический эффект, на основании которого вычисляется срок окупаемости.

### **4.1 Организация и планирование работ**

При организации процесса работы над конкретной задачей необходимо сначала определить занятость каждого из участников и сроки выполнения отдельных этапов работы, начиная с составления технического задания (ТЗ) до оформления документации включительно. Перечень этапов настоящей работы и продолжительность их выполнения в процентном соотношении для научного руководителя (НР) и исполнителя (И) представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Распределение занятости научного руководителя и исполнителя по этапам работы

| <b>Этапы работы</b>                      | <b>Исполнители</b> | <b>Загрузка исполнителей</b> |
|------------------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Постановка задачи                        | НР                 | НР – 100 %                   |
| Разработка и утверждение ТЗ              | НР, И              | НР – 100 %<br>И – 10 %       |
| Подбор и изучение материалов по тематике | НР, И              | НР – 50 %<br>И – 100 %       |
| Разработка календарного плана            | НР, И              | НР – 100 %<br>И – 10 %       |

Продолжение таблицы 4.1

| Этапы работы                                                                                      | Исполнители | Загрузка исполнителей   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------|
| Обсуждение литературы                                                                             | НР, И       | НР – 30 %<br>ИП – 100 % |
| Моделирование и исследование магнитных аномалий в компьютерной среде COMSOL Multiphysics          | НР, И       | НР – 30 %<br>И – 100 %  |
| Формулировка требований к точности поисковых магнитометров                                        | НР, И       | НР – 30 %<br>И – 100 %  |
| Моделирование и исследование типов калибровочных катушек в компьютерной среде COMSOL Multiphysics | НР, И       | НР – 30 %<br>И – 100 %  |
| Проектирование имитатора магнитных аномалий, анализ полученных результатов                        | НР, И       | НР – 30 %<br>И – 100 %  |
| Оформление расчетно-пояснительной записки                                                         | И           | И – 100 %               |
| Оформление графического материала                                                                 | И           | И – 100 %               |

Для определения ожидаемой продолжительности работ  $t_{ож}$  с помощью экспертных оценок была использована следующая формула [30]:

$$t_{ож} = \frac{3t_{min} + 2t_{max}}{5}, \quad (4.1)$$

где  $t_{min}$  – минимальная продолжительность работ, дн.;

$t_{max}$  – максимальная продолжительность работ, дн.

Длительность этапов в рабочих днях  $T_{РД}$  вычислялась по формуле [30]:

$$T_{РД} = t_{ож} \cdot K_d, \quad (4.2)$$

где  $K_d$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации и согласование работ ( $K_d=1,2$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях  $T_{КД}$  ведется по формуле [30]:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_K, \quad (4.3)$$

где  $T_{РД}$  – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;

$T_K$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле [30]:

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (4.4)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 366$ );

$T_{ВД}$  – выходные дни ( $T_{ВД} = 53$ );

$T_{ПД}$  – праздничные дни ( $T_{ПД} = 14$ ).

$$T_K = \frac{366}{366 - 53 - 14} \approx 1,224.$$

Все расчеты представлены в таблице Б.1 в приложении Б.

В таблице Б.1 итоги по столбцам 8 и 9 являются общими трудоемкостями для каждого из участников проекта. Далее они будут использованы для определения затрат на оплату труда участников и прочие затраты. Величины трудоемкости этапов по исполнителям  $T_{КД}$  (данные столбцов 8 и 9 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Линейный график работ

| Этап | НР   | И     | Февраль |    |    | Март |    |    | Апрель |    |    | Май |     |     | Июнь |     |
|------|------|-------|---------|----|----|------|----|----|--------|----|----|-----|-----|-----|------|-----|
|      |      |       | 10      | 20 | 30 | 40   | 50 | 60 | 70     | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130  | 140 |
| 1    | 4,11 | -     | ■       |    |    |      |    |    |        |    |    |     |     |     |      |     |
| 2    | 4,11 | 0,41  | ■       | ■  |    |      |    |    |        |    |    |     |     |     |      |     |
| 3    | 9,69 | 19,34 |         | ■  | ■  | ■    |    |    |        |    |    |     |     |     |      |     |
| 4    | 4,11 | 0,41  |         |    |    | ■    | ■  |    |        |    |    |     |     |     |      |     |
| 5    | 3,08 | 10,28 |         |    |    |      | ■  | ■  |        |    |    |     |     |     |      |     |
| 6    | 3,08 | 10,28 |         |    |    |      |    | ■  | ■      |    |    |     |     |     |      |     |
| 7    | 1,23 | 4,11  |         |    |    |      |    |    | ■      | ■  |    |     |     |     |      |     |
| 8    | 7,67 | 25,56 |         |    |    |      |    |    | ■      | ■  | ■  |     |     |     |      |     |
| 9    | 3,96 | 13,22 |         |    |    |      |    |    |        |    |    | ■   | ■   |     |      |     |
| 10   | -    | 25,56 |         |    |    |      |    |    |        |    |    |     |     | ■   | ■    |     |
| 11   | -    | 12,04 |         |    |    |      |    |    |        |    |    |     |     |     |      | ■   |

НР – ■; И – ■

## 4.2 Расчет сметы затрат на проектирование

Затраты на проектирование разрабатываемого имитатора группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам [30]:

- материальные затраты (за вычетом возвратных отходов);
- затраты по заработной плате исполнителей;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без учета освещения);
- амортизация основных средств;
- накладные расходы.

### 4.2.1 Расчет материальных затрат

Поскольку все исходные материалы для разработки уже имелись в распоряжении разрабатывающей кафедры, в материальных затратах будут учтены только затраты на канцелярские принадлежности и картриджи для принтера.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$C_{MAT} = \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}, \quad (4.6)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении работы;

$N_{расxi}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования;

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов.

Материалы необходимые для данной разработки и расчет материальных затрат представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Материальные затраты

| Наименование      | Единица измерения | Количество | Цена за ед., руб. | Затраты на материалы, руб. |
|-------------------|-------------------|------------|-------------------|----------------------------|
| Листы бумаги (А4) | Пачка             | 1          | 210               | 210                        |
| Ручка шариковая   | Шт.               | 2          | 30                | 60                         |
| Картридж          | Шт.               | 1          | 1600              | 1600                       |
| <b>Итого</b>      |                   |            |                   | <b>1870</b>                |

#### 4.2.2 Расчет заработной платы

Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя. Месячный оклад (МО) НР, занимающего должность доцента и имеющего степень кандидата технических наук, составляет 23484,86 руб./мес. МО исполнителя, являющегося инженером первого уровня составляет 7864,11 руб./мес.

Исходя из того, что в месяце в среднем 24,83 рабочих дня при шестидневной рабочей неделе среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \text{МО} / 24,83 \quad (4.7)$$

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.4. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы Б.1. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов:  $K_{\text{ПР}} = 1,1$ ;  $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$ ;  $K_{\text{р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$ .

Таблица 4.4 – Затраты на заработную плату

| Исполнитель   | Оклад,<br>руб./мес. | Среднедневная<br>ставка,<br>руб./раб.день | Затраты<br>времени,<br>раб.дни | Коэффициент | Фонд з/п,<br>руб. |
|---------------|---------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------------|
| НР            | 23484,86            | 945,83                                    | 34                             | 1,699       | 54636,82          |
| И             | 7864,11             | 316,72                                    | 99                             | 1,699       | 53272,62          |
| <b>Итого:</b> |                     |                                           |                                |             | <b>107909,44</b>  |

#### 4.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН) включают в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование и составляют 30 % от полной заработной платы по проекту.

То есть ЕСН ( $C_{\text{соц.}}$ ) определяется следующим образом:

$$C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3 = 107909,44 \cdot 0,3 = 32372,83 \text{ руб.}$$

#### 4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования, а именно компьютера и принтера. Затраты на электроэнергию при работе оборудования  $C_{\text{эл.об.}}$  рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}} \cdot t_{\text{об}}, \quad (4.8)$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$  – тарифная цена за 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Мощность  $P_{\text{об}}$ , потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} \cdot K_{\text{с}}, \quad (4.9)$$

где  $P_{\text{ном.}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C$  – коэффициент загрузки (для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ ).

Номинальная мощность компьютера составляет 0,3 кВт, принтера – 0,1 кВт.

Для ТПУ с учетом налога на добавленную стоимость (НДС)  $C_3$   
 $= 5,257 \text{ руб./кВт}\cdot\text{час}$

Время работы оборудования  $t_{OB}$  для исполнителя вычисляется на основе данных таблицы 4.2 по формуле:

$$t_{OB} = T_{РД} \cdot K_t \quad (4.10)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{РД}$ .

Из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов, а работа на компьютере проводилась по 6 часов, то  $K_t = 0,74$ . Тогда из 792 часов, потраченных исполнителем на осуществление проекта, 594 часа были проведены за компьютером. Принтер использовался примерно в течении 30 часов.

Затраты на электроэнергию при работе оборудования сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Затраты на электроэнергию

| Наименование оборудования | Время работы оборудования $t_{OB}$ , час | Потребляемая мощность $P_{OB}$ , кВт | Затраты Эоб, руб. |
|---------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------|
| Персональный компьютер    | 594                                      | 0,3                                  | 936,75            |
| Струйный принтер          | 30                                       | 0,1                                  | 15,77             |
| <b>Итого:</b>             |                                          |                                      | <b>952,57</b>     |

#### 4.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения работы.

Амортизационные отчисления рассчитываются по времени использования компьютера по формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{OB}}{F_D} \cdot t_{рф} \cdot n, \quad (4.11)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации;

$C_{OB}$  – цена оборудования;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени;

$t_{рф}$  – время работы вычислительной техники;

$n$  – число задействованных единиц оборудования,  $n = 1$ .

Годовая амортизация  $N_A$  определяется как величина, обратная сроку амортизации оборудования  $C_A$ , который определяется согласно постановлению правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы». Для компьютера примем  $C_A = 3$  года, тогда  $N_A = 0,33$ . Для принтера примем  $C_A = 2$  года, тогда  $N_A = 0,4$ .

Расчет затрат на амортизационные отчисления представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Затраты на амортизационные отчисления

| Наименование оборудования | Норма амортизации оборудования $N_A$ | Стоимость оборудования $C_{OB}$ , руб. | Фактич. время работы оборудования $t_{рф}$ , ч | Действ. годовой фонд рабочего времени $F_D$ , ч | Амортизац. отчисления $C_A$ , руб. |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|
| Персональный компьютер    | 0,33                                 | 45000                                  | 594                                            | 2384                                            | 3700,04                            |
| Струйный принтер          | 0,5                                  | 15000                                  | 30                                             | 500                                             | 450                                |
| <b>Итого:</b>             |                                      |                                        |                                                |                                                 | <b>4150,04</b>                     |

#### 4.2.6 Расчет прочих расходов

Прочие расходы  $C_{\text{проч}}$  учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$C_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}). \quad (4.12)$$

$$C_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (1870 + 107909,44 + 32372,83 + 952,57 + 4150,04) = \\ = 14725,49 \text{ руб.}$$

Таким образом, накладные расходы составили 14725,49 руб.

#### 4.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Общую стоимость разработки имитатора можно определить по смете затрат. Смета затрат представлена в таблице 4.7

Таблица 4.7 – Смета затрат на разработку проекта

| Статья затрат                   | Условное обозначение      | Сумма, руб.      |
|---------------------------------|---------------------------|------------------|
| 1 Материалы и покупные изделия  | $C_{\text{мат}}$          | 1870             |
| 2 Основная заработная плата     | $C_{\text{зп}}$           | 107909,44        |
| 3 Отчисления в социальные фонды | $C_{\text{соц}}$          | 32372,83         |
| 4 Расходы на электроэнергию     | $C_{\text{эл.об.}}$       | 952,57           |
| 5 Амортизационные отчисления    | $\mathcal{E}_{\text{ам}}$ | 4150,04          |
| 6 Прочие расходы                | $C_{\text{проч}}$         | 14725,49         |
| <b>Итого:</b>                   |                           | <b>161980,39</b> |

Таким образом, расходы на разработку составили  $C = 161980,39$  руб.

#### **4.2.8 Расчет прибыли**

Прибыль от реализации имитатора магнитного поля с высокой однородностью предполагается равной 15 % от расходов на разработку и составляет 24297,06 руб.

#### **4.2.9 Расчет налога на добавленную стоимость**

НДС равен 18 % от суммы затрат на разработку и прибыли:  
 $(161980,39 + 24297,06) \cdot 0,18 = 33529,94$  руб.

#### **4.2.10 Цена разработки**

Цена разработки складывается из себестоимости, прибыли и НДС:  
 $Ц_{\text{НИР}} = 161980,39 + 24297,06 + 33529,94 = 219807,39$  руб.

### **4.3 Оценка экономической эффективности проекта**

Актуальным аспектом качества выполненного проекта является экономическая эффективность его реализации, которая выражается в соотношении обусловленного ею экономического результата и затрат на разработку проекта. В рассматриваемой ситуации оценивается экономическая эффективность инвестиций, то есть вложение денежных средств в проект с целью получения определенного экономического эффекта в будущем.

В результате реализации имитатора предполагается улучшение качества калибровки подводных магнитометров, а значит и точности поиска объектов. Это означает снижение риска возникновения ошибок первого (ложный сигнал о наличии объекта в зоне поиска) или второго рода

(отсутствие сигнала при наличии объекта). При ошибке первого рода возникнет ситуация напрасных материальных и временных затрат, связанных с работами по погружению водолазов и специальной техники. При ошибке второго рода, например, в случае необнаруженного взрывоопасного объекта, могут возникнуть последствия (потери материальных и человеческих ресурсов, ухудшение экологической ситуации), устранение которых так же потребует больших затрат.

Разработка так же может иметь экологический эффект при возникновении экологической опасности из-за возможности утечки топлива из затонувшего судна или политический эффект, например, при необходимости извлечь из затонувшего судна информацию военного назначения.

Таким образом, оценка экономического эффекта от внедрения имитатора зависит от конкретной сферы деятельности и границ применения и требует дополнительных комплексных исследований, проведение которых в рамках данной работы не предоставляется возможным.

## **5 Социальная ответственность**

В работе осуществляется проектирование имитатора магнитных аномалий для калибровки поисковых феррозондовых магнитометров. Имитатор представляет собой совокупность катушек индуктивности. Компьютерная модель имитатора была разработана и исследована с помощью среды конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics. Достоверность информации, полученной при компьютерном моделировании была проверена расчетами на основе известных теоретических зависимостей в программе Mathcad. Результаты вычислений и моделирования отображаются на мониторе персонального компьютера (ПК). Таким образом, выполняемые при проектировании и исследовании модели имитатора работы сводятся к взаимодействию с ПК.

Работа над проектом выполнялась в помещениях кафедры КИСМ в корпусе №10. Рабочее место оборудовано ПК, что определяет наличие следующих физических факторов, влияющих на здоровье человека: длительное неизменное положение тела, напряжение глаз, воздействие электромагнитных и электростатических полей, света, микроклимата

В связи с возникающими при взаимодействии с компьютером вредными факторами в данной главе рассматриваются из воздействия на организм человека и комплексы мероприятий, которые позволяют минимизировать и ликвидировать их негативные влияния на человека. Также рассмотрено воздействие разработки окружающую среду.

### **5.1 Требования санитарных правил и норм**

Вредными факторами на рассматриваемом рабочем месте могут являться:

- наличие электромагнитного и электростатического полей;
- низкая или высокая температура воздуха и поверхностей на рабочем месте;

- пониженная или повышенная влажность воздуха;
- недостаточное естественное или искусственное освещение.

### 5.1.1 Электромагнитные и электростатические поля

Вредные проявления факторов рассматриваемой рабочей зоны выражаются, прежде всего, в электромагнитном и электростатическом излучениях (ЭМИ и ЭСИ). Это объясняется тем, что ПК часто оснащают сетевыми фильтрами, источниками бесперебойного питания и другим вспомогательным электрооборудованием, что формирует сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя. Кроме того, источниками ЭМИ могут являться линии электропередач, трансформаторные подстанции, распределительные щиты, электропроводка, бытовые приборы согласно [31]. Техногенные электромагнитные поля приводят к десинхронизации функциональных процессов в организме человека. Воздействие электромагнитных полей может привести к повышению температуры тела, появлению головной боли, вызвать ожоги, катаракты. Радиочастотное электромагнитное поле влияет на нервную и сердечно-сосудистую системы согласно [32].

Источником ЭСИ является дисплей ПК, трение поверхности клавиатуры и мыши. ЭСИ может способствовать нарушениям гормональной и иммунной систем.

Показатели ЭМИ и ЭСИ на рабочих местах с ПК представлены в таблице 5.1 в соответствии с [33].

Таблица 5.1 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПК

| Наименование параметров                           |                                    | ВДУ ЭМП |
|---------------------------------------------------|------------------------------------|---------|
| Напряженность электрического поля                 | в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц    | 25 В/м  |
|                                                   | в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц | 2,5 В/м |
| Плотность магнитного потока                       | в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц    | 250 нТл |
|                                                   | в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц | 25 нТл  |
| Электростатический потенциал экрана видеомонитора |                                    | 500 В   |

Защита персонала от воздействия ЭМИ осуществляется путем проведения организационных и инженерно-технических мероприятий. К организационным мероприятиям относится выбор рациональных режимов оборудования, выделение зон воздействия ЭМП, разработка маршрутов движения персонала таким образом, чтобы исключалась возможность облучения людей при уровнях, превышающих предельно допустимые согласно [32]. К инженерно-техническим мероприятиям относится рациональное размещение оборудования, использование средств, ограничивающих поступление электромагнитной энергии на рабочие места персонала (поглотители мощности, установка отражающих и поглощающих экранов), использование средств индивидуальной защиты – очков со спектральными фильтрами в соответствии с [33].

Данные о значениях показателей ЭМИ и ЭСИ на рассматриваемом рабочем месте работодателем не предоставлены.

### **5.1.2 Микроклимат**

При работе с ПК должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата: температура воздуха, поверхностей, относительная влажность воздуха, его скорость движения.

На рабочих местах при выполнении работ операторского типа, связанных с нервно-эмоциональным напряжением оптимальные величины показателей микроклимата должны соответствовать приведенным в таблице 5.2 согласно [34]. Работа производится сидя и сопровождается незначительным физическим напряжением, поэтому данные в таблице 5.2 представлены для категории работ Ia.

Оптимальные значения показателей температуры воздуха и поверхностей обеспечиваются водяной отопительной системой и вентиляцией.

Таблица 5.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений для категории работ Ia

| Период года | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | 22-24                   | 21-25                        | 40-60                              | 0,1                            |
| Теплый      | 23-25                   | 22-26                        | 40-60                              | 0,1                            |

Значения показателей микроклимата на рассматриваемом рабочем месте сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Показатели микроклимата на рассматриваемом рабочем месте

| Период года | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | 22                      | Нет данных                   | 45                                 | 0,1                            |
| Теплый      | 24                      | Нет данных                   | 52                                 | 0,1                            |

По таблице 5.3 можно сделать вывод, что показатели микроклимата на рассматриваемом рабочем месте соответствуют нормам. Кроме того, в кабинете предусмотрен кондиционер.

### 5.1.3 Освещение

Немаловажным является нормирование производственного освещения, так как яркость дисплея, частота обновления изображения и общая освещенность в рабочей зоне оказывают влияние на зрение. Например, необходимо размещать рабочие столы таким образом, чтобы естественный свет падал слева. Искусственное освещение осуществляется системой общего равномерного освещения, а при работе с документами применяется комбинированное освещение.

Работу за компьютером можно отнести к IV зрительному разряду (работа средней точности), так как наименьший размер объекта различения составляет от 0,5 до 1 мм. Тогда при общем освещении в соответствии с [35] освещенность помещения должна составлять не менее 200 лк. Для местного освещения кроме разрядных источников света следует использовать лампы накаливания, в том числе галогенные.

Поскольку при выполнении работы за ПК чаще всего требования к цветоразличению отсутствуют, то заявленная освещенность общего освещения может быть обеспечена следующими типами ламп согласно [35]: люминесцентная лампа белого свечения или холодного белого свечения, металлогалогенная лампа.

Освещенность поверхности экрана ПК не должна превышать 300 лк. Яркость светящихся поверхностей в поле зрения должна быть не более 200 кд/м<sup>2</sup>. Яркость бликов на экране ПК должна составлять не более 40 кд/м<sup>2</sup>, а яркость потолка не должна превышать 200 кд/м<sup>2</sup>. Коэффициент пульсации должен быть не более 5 %. Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях для использования ПК следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп. К средствам индивидуальной защиты относятся защитные очки со спектральными фильтрами, приэкранные защитные фильтры согласно [33].

На рассматриваемом рабочем месте используется система общего освещения. Данные о значениях параметров освещенности работодателем не предоставлены.

#### **5.1.4 Электрический ток**

Источниками электрической опасности могут быть ПК, электроприборы, проводка. Для обеспечения защиты от случайного

прикосновения к токоведущим частям применяют следующие способы и средства согласно ГОСТ 12.1.019-2009: защитные оболочки, защитные ограждения (временные или стационарные), безопасное расположение токоведущих частей, изоляцию токоведущих частей, изоляцию рабочего места, малое напряжение, защитное отключение, предупредительную сигнализацию, блокировку, знаки безопасности.

Для защиты от поражения электрическим током при прикосновении к металлическим токоведущим частям, которые могут оказаться под напряжением в результате повреждения изоляции, применяют в соответствии с [36]: защитное заземление, зануление, выравнивание потенциала, систему защитных проводов, защитное отключение, изоляцию нетоковедущих частей, электрическое разделение сети, малое напряжение, контроль изоляции, компенсация токов замыкания на землю, средства индивидуальной защиты.

Рассматриваемое рабочее место соответствует нормам, описанным в настоящем подразделе.

## **5.2 Организационные мероприятия обеспечения безопасности**

Организация рабочих мест пользователей ПК должна осуществляться в соответствии со следующими требованиями согласно [33]:

- расстояние между рабочими столами с видеомониторами должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м;
- экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии от 600 до 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.
- конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение используемого оборудования с учетом характера выполняемой работы;

- поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения от 0,5 до 0,7;

- конструкция рабочего стула должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПК, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины; тип рабочего стула выбирается с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПК.

Кроме того, в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78 для рабочих мест нормируются следующие параметры:

- высота рабочей поверхности стола (от 655 мм);
- глубина стола (500 мм);
- высота поверхности сиденья (от 420).

Значения нормируемых параметров для рассматриваемого рабочего места представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Нормируемые параметры рассматриваемого рабочего места

| Наименование параметра                                 | Значение параметра |
|--------------------------------------------------------|--------------------|
| Расстояние между рабочими столами                      | 3 м                |
| Расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов | 1,3 м              |
| Расстояние от глаз пользователя до экрана монитора     | 550 мм             |
| Высота рабочей поверхности стола                       | 650 мм             |
| Глубина стола                                          | 500 мм             |
| Высота поверхности сиденья                             | 420 мм             |

По таблице 5.6 можно сделать вывод, что рабочее место соответствует нормам организации работы.

Для обеспечения зрительной комфортности необходимо соблюдение требований к визуальным параметрам дисплеев (таблица 5.7) согласно [33].

Таблица 5.7 – Визуальные параметры дисплеев, контролируемые на рабочих местах

| Параметры | Допустимые значения |
|-----------|---------------------|
|-----------|---------------------|

|                                         |                               |
|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Яркость белого поля                     | Не менее 35 кд/м <sup>2</sup> |
| Неравномерность яркости рабочего поля   | Не более $\pm 20\%$           |
| Контрастность (для монохромного режима) | Не менее 3:1                  |

Данные по визуальным параметрам дисплея на рабочем месте работодателем не предоставлены.

Для видов работы с ПК устанавливается 3 категории тяжести и напряженности работы, которые определяются: для группы А - по суммарному числу считываемых знаков за рабочую смену, но не более 60000 знаков за смену; для группы Б - по суммарному числу считываемых или вводимых знаков за рабочую смену, но не более 40000 знаков за смену; для группы В - по суммарному времени непосредственной работы с ПЭВМ за рабочую смену, но не более 6 ч за смену согласно [33].

В зависимости от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки за рабочую смену при работе с ПК устанавливается суммарное время регламентированных перерывов (таблица 5.8) согласно [33].

Таблица 5.8 – Суммарное время регламентированных перерывов в зависимости от продолжительности работы, вида и категории трудовой деятельности с ПК

| Категория работы с ПЭВМ | Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с ПЭВМ |                             |             | Суммарное время регламентированных перерывов, мин |                      |
|-------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------------------|----------------------|
|                         | группа А, количество знаков                              | группа Б, количество знаков | группа В, ч | при 8-часовой смене                               | при 12-часовой смене |
| I                       | до 20000                                                 | до 15000                    | до 2        | 50                                                | 80                   |
| II                      | до 40000                                                 | до 30000                    | до 4        | 70                                                | 110                  |
| III                     | до 60000                                                 | до 40000                    | до 6        | 90                                                | 140                  |

В случаях, когда характер работы требует постоянного взаимодействия с ПК, внимания и сосредоточенности, при исключении возможности периодического переключения на другие виды трудовой деятельности, не связанные с ПК, рекомендуется организация перерывов длительностью от 10 до 15 мин через каждые 45 мин работы [33].

### 5.3 Региональная безопасность

Эксплуатация имитатора подразумевает использование ПК и не влечет за собой негативных воздействий на окружающую среду, поэтому создание санитарно-защитной зоны и принятие мер по защите атмосферы, гидросферы, литосферы не являются необходимыми в рассматриваемой ситуации.

Обратим внимание, что в результате реализации имитатора и ПК могут возникнуть следующие виды негативного воздействия на окружающую среду:

- выбросы в атмосферу углекислого газа, образование тепла (в случае пожара);
- загрязнение почвы (в результате утилизации как твердого отхода).

При завершении срока службы имитатора и ПК, их можно отнести к отходам электронной промышленности. Переработка таких отходов осуществляется разделением на однородные компоненты, химическим выделением пригодных для дальнейшего использования компонентов и направлением их для дальнейшего использования (например, кремний, алюминий, золото, серебро, редкие металлы) согласно [36].

Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха.

Стоит отметить, что ПК может содержать тяжелые металлы, а также печатные платы с замедлителями горения, которые при горении могут выделять опасные диоксиды. Для опасных отходов существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Однако этот способ затратный и не исключает вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию подлежат захоронению на полигонах или в почве. Важное значение в таком случае имеют нормативы предельно допустимых концентраций токсичных веществ в почве (в мг/кг) в соответствии с [36].

Сточные воды предприятия сливаются в сеть канализации, если уровень их загрязнения не превышает установленных норм. В противном

случае сначала осуществляется локальная очистка с помощью решеток, отстойников, нейтрализационных установок и др. затем может использоваться биологическая очистка. Биологическое разрушение (окисление) загрязняющих органических веществ, производимое биоценозом, позволяет достичь высокого качества воды. Кроме того, по сравнению с химическими методами, биологическая очистка имеет меньшую стоимость. Также проводится дезинфекция запасов воды хлорированием согласно [32].

#### **5.4 Пожарная безопасность**

Пожары и взрывы могут быть источниками чрезвычайных ситуаций (ЧС) на рассматриваемом рабочем месте.

Причинами возникновения пожаров могут являться:

- нарушение противопожарного режима, неосторожное обращение с огнем;
- нарушение мер пожарной безопасности при проектировании и строительстве зданий.

К первичным средствам пожаротушения в соответствии с [36] относятся:

- огнетушители;
- внутренние пожарные краны;
- ящики с песком;
- противопожарные щиты с набором инвентаря и др.

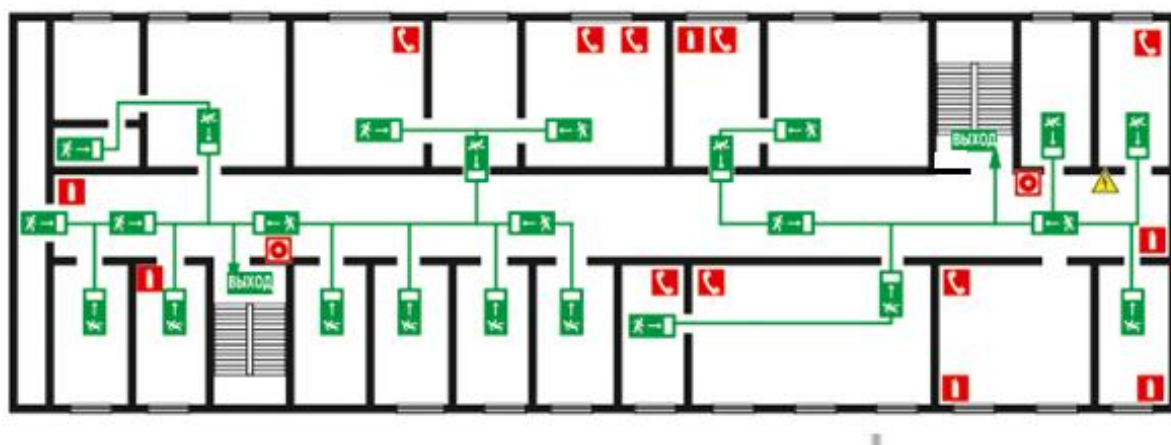
Для обеспечения безопасности при пожаре должна включаться предупредительная сигнализация. При автоматической пожарной сигнализации используются датчики, реагирующие на появление открытого огня, дыма, повышение температуры согласно [36].

Профилактические мероприятия по пожаровзрывобезопасности при проектировании и строительстве зданий включают решение таких вопросов, как повышение огнестойкости зданий и сооружений, зонирование территории,

применение противопожарных разрывов, применение противопожарных преград, обеспечение удаления из помещения дыма при возникновении пожара согласно, обеспечение безопасной эвакуации людей при возникновении пожара [36].

В производственных помещениях должно быть не менее двух эвакуационных выходов. На каждом этаже помещения должен быть план эвакуации при возникновении пожара и других ЧС. На рисунке 5.1 представлен пример плана эвакуации.

Помещение, в котором находится рабочее место, соответствует правилам пожарной безопасности. На этаже имеется несколько огнетушителей и ящиков с песком. Регулярно проверяется работа сигнализации о возникновении ЧС.



Условные обозначения:

-  - огнетушитель
-  - кнопка ручного пожарного извещателя
-  - электрощиток
-  - телефон
-  - основной выход
-  - основной путь эвакуации

Рисунок 5.1 – План эвакуации людей (первый этаж)

Для устойчивости производственных и хозяйственных связей по снабжению объекта всеми видами энергии, водой, газом проводятся следующие мероприятия согласно [37]:

- создание дублирующих источников электроэнергии, газа, воды и пара путем прокладки нескольких подводящих электро-, газо-, водо- и пароснабжающих коммуникаций и последующего их закольцовывания.

- установка автоматических выключателей, которые при коротких замыканиях и при образовании перенапряжений отключают поврежденные участки, при монтаже новых и реконструкции старых электрических сетей;

- создание обводных линий и устройств перемычек, по которым подают воду в обход поврежденных участков;

- размещение пожарных гидрантов и отключающих устройств на территории, которая не будет завалена в случае разрушений зданий и сооружений;

- внедрение автоматических и полуавтоматических устройств, которые отключают поврежденные участки без нарушения работы остальной части сети.

## **5.5 Влияние разработки на экологическую обстановку**

Разработанная модель имитатора генерирует магнитное поле с высокой степенью однородности, что позволяет улучшить качество калибровки феррозондовых магнитометров, используемых для поиска подводных объектов: трубопроводов, обломков зданий, затонувших судов, боеприпасов и др.

Таким образом, с повышением точности калибровки возрастает чувствительность поискового прибора к изменениям магнитного поля Земли, которые создаются объектами поиска. Значит, возрастает вероятность их обнаружения, извлечения и утилизации, а как следствие – вероятность улучшения экологической обстановки в морях и океанах.

## Заключение

В данной работе был проведен обзор существующих электромагнитных методов поиска ферромагнитных объектов, которые могут применяться в различных укрывающих средах, в том числе под водой. Рассмотрены основные преобразователи магнитометрического и индукционного метода. На основании проведенного анализа было определено, что магнитометрический метод поиска является наиболее предпочтительным за счет максимальной глубины обнаружения и безопасности поиска взрывоопасных объектов.

В результате моделирования в программе “COMSOL Multiphysics” была исследована зависимость распределения индукции магнитного поля Земли вблизи объекта поиска от параметров объекта и получены следующие результаты:

- вариации длины объекта от равной его диаметру до десятикратного увеличения практически не влияют на изменение магнитного поля в направлении перпендикулярном длине объекта;
- увеличение диаметра объекта прямо пропорционально увеличивает изменение магнитного поля в направлении перпендикулярном длине объекта. Для объекта диаметром 0,5 м изменение магнитного поля на расстояние 2 м составляет 1 % или 500 нТл. Аппроксимировать изменение естественного магнитного поля от ферромагнитного объекта возможно с помощью кубической параболы;
- вариации относительной магнитной проницаемости практически не влияют на изменение магнитного поля в направлении перпендикулярном длине объекта.

Для калибровки, исследования и настройки поисковых феррозондовых магнитометров был проведен расчет и моделирование имитатора магнитных аномалий с высокой степенью однородности. Были промоделированы

типовые системы, базирующиеся на конструкциях аксиальных или радиальных катушек.

По результатам моделирования для проектирования имитатора магнитных аномалий с высокой степенью однородности генерируемого магнитного поля, были выбраны катушки Гельмгольца и катушки  $\cos\theta$ . По сравнению с катушками Гельмгольца предложенная конструкция имитатора генерирует на 50 % больший объем однородного магнитного поля (с относительной неоднородностью в пределах 1 %) в аксиальном направлении и на 10 % больший – в радиальном направлении. В то же время в сравнении с катушками  $\cos\theta$  однородность магнитного поля имитатора меньше.

Повысить однородность поля имитатора можно, обеспечив питание систем катушек от разных источников тока. Это усложняет конструкцию и делает ее экономически неэффективной. Поэтому при близких значениях относительной неоднородности нет смысла изменять конструкцию. Таким образом, для калибровки феррозондовых магнитометров лучше использовать катушки  $\cos\theta$ .

## Список публикаций

1 Д.Г. Солтанова, П.Ф. Баранов. Моделирование магнитных аномалий в среде COMSOL // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т. Т.1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 200 – 201.

2 D. Soltanova, P. Baranov, V. Baranova, A. Chudinova Simulating magnetic field of a ferromagnetic pipe underwater in COMSOL Multiphysics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, V. 93, Iss. 1, № 012023 (2015). (Scopus)

## Список использованных источников

- 1 Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Выбор электромагнитного метода зондирования для поиска объектов в толще укрывающих сред. [Электронный ресурс]: Специальная техника. – Режим доступа: <http://www.st.ess.ru>. – Загл. с экрана (дата обращения: 18.10.14).
- 2 Никифоров В.М. Бессонова Е.А. Опыт применения магниторазведки для обнаружения ферромагнитных объектов на акватории залива Петра Великого // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – №1(3). – С. 58-65.
- 3 Прищепов С.К., Власкин К.И. Магнитометрический прибор для обнаружения скрытых подземных объектов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – № 1. – С. 111-113.
- 4 Панин В.В., Степанин Б.М. Практическая магнитометрия. Измерение магнитных полей и электрических токов с помощью пассивных индукционных и холловских преобразователей. – М: Машиностроение, 1978. – 119 с.
- 5 Арбузов С.О. Магниточувствительные поисковые приборы // Специальная техника. – 2000. – №6. – С. 12-19.
- 6 Доронин Ю.П., Степанюк И.А. Электромагнитное поле океана. Учебное пособие. – С-Пб.: изд. РГГМИ, 1992. – 87 с.
- 7 Бровин А. Аппаратура подводного поиска. Обнаружение и очистка прибрежных акваторий от взрывоопасных объектов // Техника и вооружение. – 2011. – №10. – С. 41-45.
- 8 Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В. Магнитометрические преобразователи, приборы, установки. – Л.: Энергия, 1972. – 272 с.
- 9 Афанасьев Ю.В. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969. – 168 с.
- 10 Прищепов, С. К. Преобразователи физических величин на основе аморфных сплавов / С.К. Прищепов, Ю.Н. Кочемасов // Материалы VIII международной НТК «Датчик-96». – Гурзуф, 1996, т.2. – С.263–265.

11 Прищепов, С. К. Определение погрешностей направленности дифференциальных феррозондов / С. К. Прищепов, К. И. Власкин, Ю. Г. Кудряшов // Материалы 8 Международной НТК «ИКИ-2007». – Барнаул: АлтГТУ, 2007. – С.83 – 85.

12 Chong, L. MEMS micro fluxgate sensors with mutual vertical excitation coils and detection coils / L. Chong, R. Wang, Y. Zhou, Z. Zhou. // Microsystem Technologies. – 2009, vol. 15, №7. – P. 969–972.

13 Fluxgate sensors having CoNbZr magnetic core and fabrication method thereof [Text]: pat. 0085535A1 US: Int.Cl. G01R33/04/ K. Na, J. Yuan, S. Choi – 2005-98597; priority data. 19.10.2005; pub. date 19.04.2007.

14 Dezuari, O. A new hybrid technology for planar fluxgate sensor fabrication / O. Dezuari, E. Belloy, S. E. Gilbert, M. A. M. Gijss // IEEE Transactions on magnetics. – 1999, vol.35, № 4. – P.2111–2117.

15 Власкин К.И. Разработка электромагнитных систем малогабаритных прецизионных преобразователей феррозондового типа: диссертация ... канд. физ.-мат. наук. – Ижевск, 2014. – 150 с.

16 Цифровой магнитометр. [Электронный ресурс]: Drillings.ru. Буровой портал. – Режим доступа: <http://www.drillings.ru/magnitometr> (дата обращения: 27.10.15).

17 Продукция компании Marine Magnetics. [Электронный ресурс]: AGT Systems and Service. Геофизическая аппаратура, программное обеспечение и оборудования для геологоразведочной отрасли. – Режим доступа: <http://www.agtsys.ru/catalog/geofizika/morskaya-geofizika/produkcija-kompanii-marine-magnetics> (дата обращения: 30.10.15).

18 Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 184с.

19 R.J. Hanson, F.M. Pipkin Magnetically Shielded Solenoid with Field of High Homogeneity // Review of Scientific Instruments. – 1965. – V. 36. – № 2. – P. 179–188.

20 Schill R.A., Karin H. Characterizing and calibrating a large Helmholtz coil at low ac magnetic field levels with peak magnitudes below the earth's magnetic field // Review of Scientific Instruments. – 2001. – V. 72. – № 6. – P. 2769–2776.

21 Po Gyu Park, Kim Y.G., Kalabin V.N., Shifrin V.Y., AC magnetic flux density standards in the low frequency range // Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. CPEM 2008. – Broomfield, June 8–13, 2008. – P. 456–457.

22 Po Gyu Park, Kim Y.G., Kim W.S., Shifrin V.Y., AC/DC magnetic flux density standard systems at KRISS // Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest. CPEM 2010. – Daejeon, June 13–18, 2010. – P. 312–313.

23 Andres F. Restrepo Alvarez. Study and analysis of magnetic field homogeneity of square and circular Helmholtz coil pairs: A Taylor series approximation // Andean Region International Conference (ANDESCON), vol.10, 1109, 2012 VI. – p.77-80

24 J. Dinale, J. Vrbancich. Generation of long prolate volumes of uniform magnetic field in cylindrical saddle-shaped coils // Measurement Science and Technology, vol. 25, 3, 2014. P.35903 (13pp)

25 F. Bonetto, E. Ansaldo, M. Polello. Saddle Coils for uniform static magnetic field generation in NMR experiments // Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, vol. 29B, 1, pages 9 – 19, 2006.

26 Seungmun Jeon, Gunhee Jang, Hyunchul Choi, and Sukho Park. Magnetic navigation system with gradient and uniform saddle coils for the wireless manipulation of micro-robots in human blood vessels. [Электронный ресурс]: IEEE Xplore. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5467448> (дата обращения 25.02.2016).

27 А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.

28 Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F., Petroff J.C., Rich C., Spear P., Singh I., Sanghera H., Han X. 3D magnetometer for a dilution refrigerator //

Proceedings of the 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), August 10-17, 2011, Beijing, China, Institute of Physics at Chinese Academy of Sciences.

29 On-Axis Field of an Ideal Helmholtz Coil. [Электронный ресурс]: Magnet formulas. – Режим доступа: <http://www.netdenizen.com/emagnet/helmholtz/idealhelmholtz.htm>

30 В.Ю. Конотопский. Методические указания к выполнению раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» магистерских диссертаций для всех специальностей ИК. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического-го университета, 2015. – 29 с.

31 Н.Н. Грачёв, Л.О. Мырова. Защита человека от опасных излучений / Н.Н. Грачёв. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2005.– 320 с.

32 В.Ф. Панин, А.И. Сечин, В.Д. Федосова. Экология для инженера // под ред. проф. В.Ф. Панина. – М: Издательский дом «Ноосфера», 2000. – 284 с.

33 СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно – эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы» [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901865498>. – Загл. с экрана (дата обращения: 15.05.2014).

34 СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046>. – Загл. с экрана (дата обращения: 3.05.2014).

35 СНИП 23-05-95\* «Естественное и искусственное освещение» (с Изменением N 1) [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026>. – Загл. с экрана (дата обращения: 12.05.2014).

36 О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.

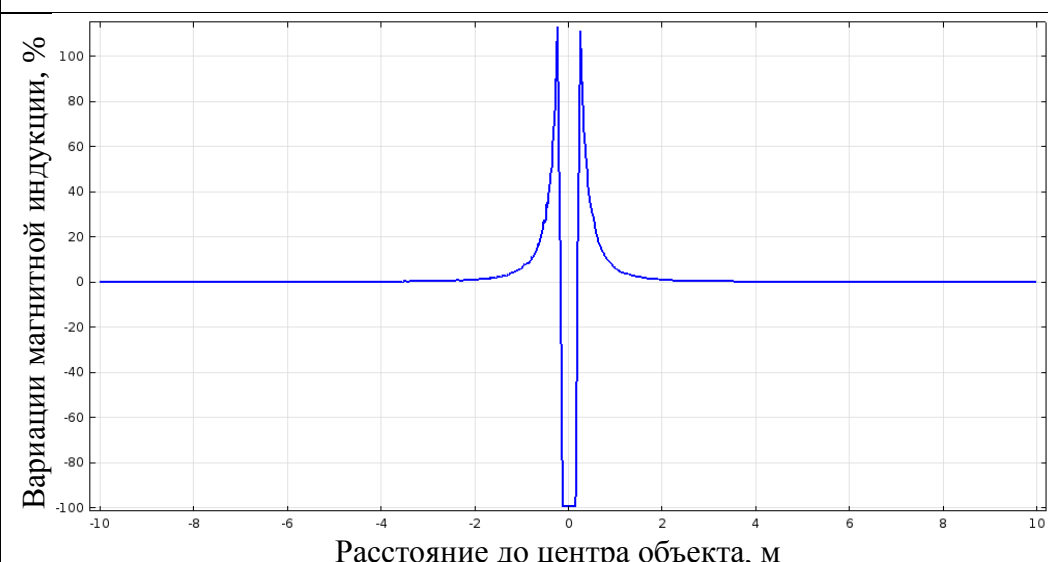
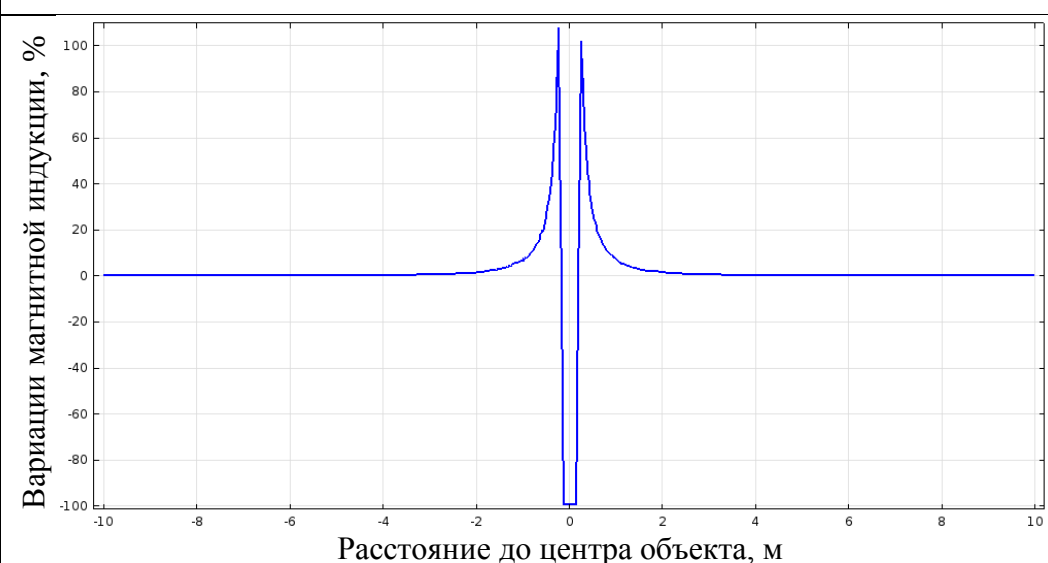
37 Мероприятия, направленные на повышение устойчивости функционирования объектов экономики [Электронный ресурс]: Информация по гражданской обороне, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций. – Режим доступа: <http://gochs.info/p287.htm>. – Загл. с экрана (дата обращения: 20.05.2014).

## Приложение А

(обязательное)

### Вариации индукции магнитного поля Земли вблизи объекта при различных значениях параметров объекта

Таблица А.1 – Вариации индукции магнитного поля Земли вблизи объекта в зависимости от расстояния до объекта при различных длинах объекта поиска

| Длина объекта     | Вариации магнитной индукции в зависимости от расстояния до объекта                   |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $l = 1 \text{ м}$ |   |
| $l = 2 \text{ м}$ |  |

Продолжение таблицы А.1

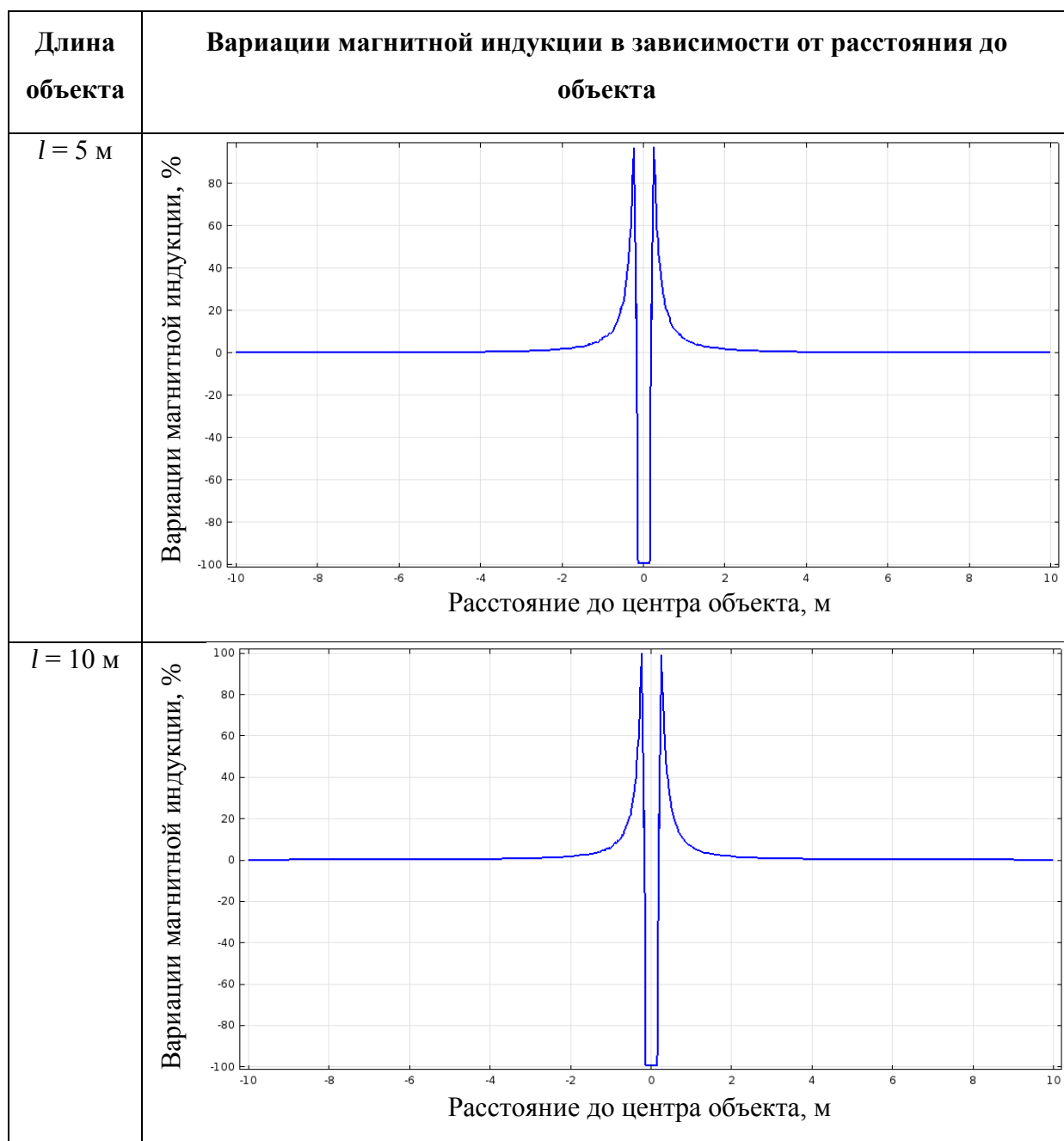
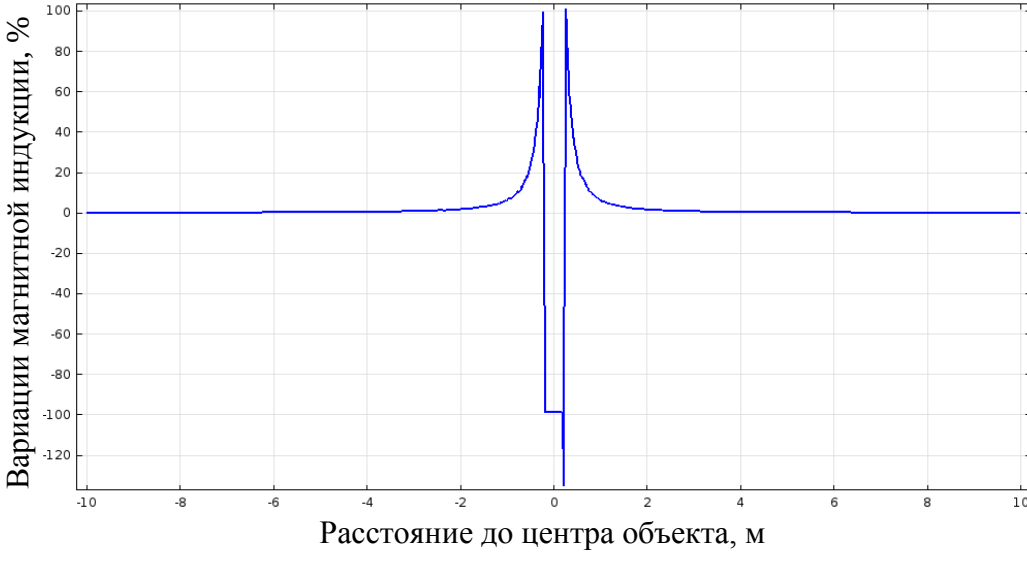
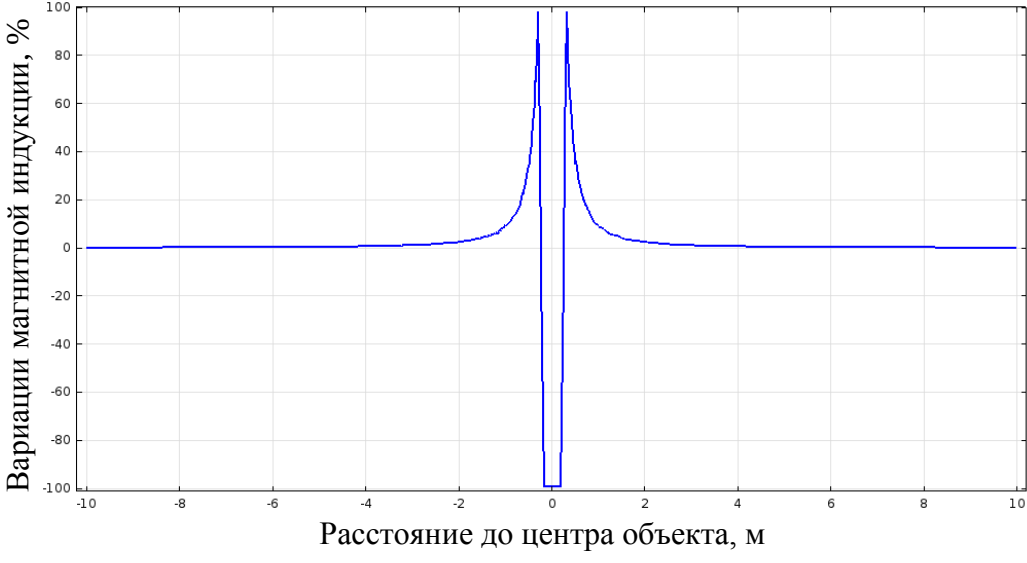


Таблица А.2 – Вариации индукции магнитного поля Земли вблизи объекта в зависимости от расстояния до объекта при различных диаметрах объекта поиска

| Диаметр<br>объекта | Вариации магнитной индукции в зависимости от расстояния до<br>объекта                |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $D = 0,5$ м        |   |
| $D = 0,6$ м        |  |

Продолжение таблицы А.2

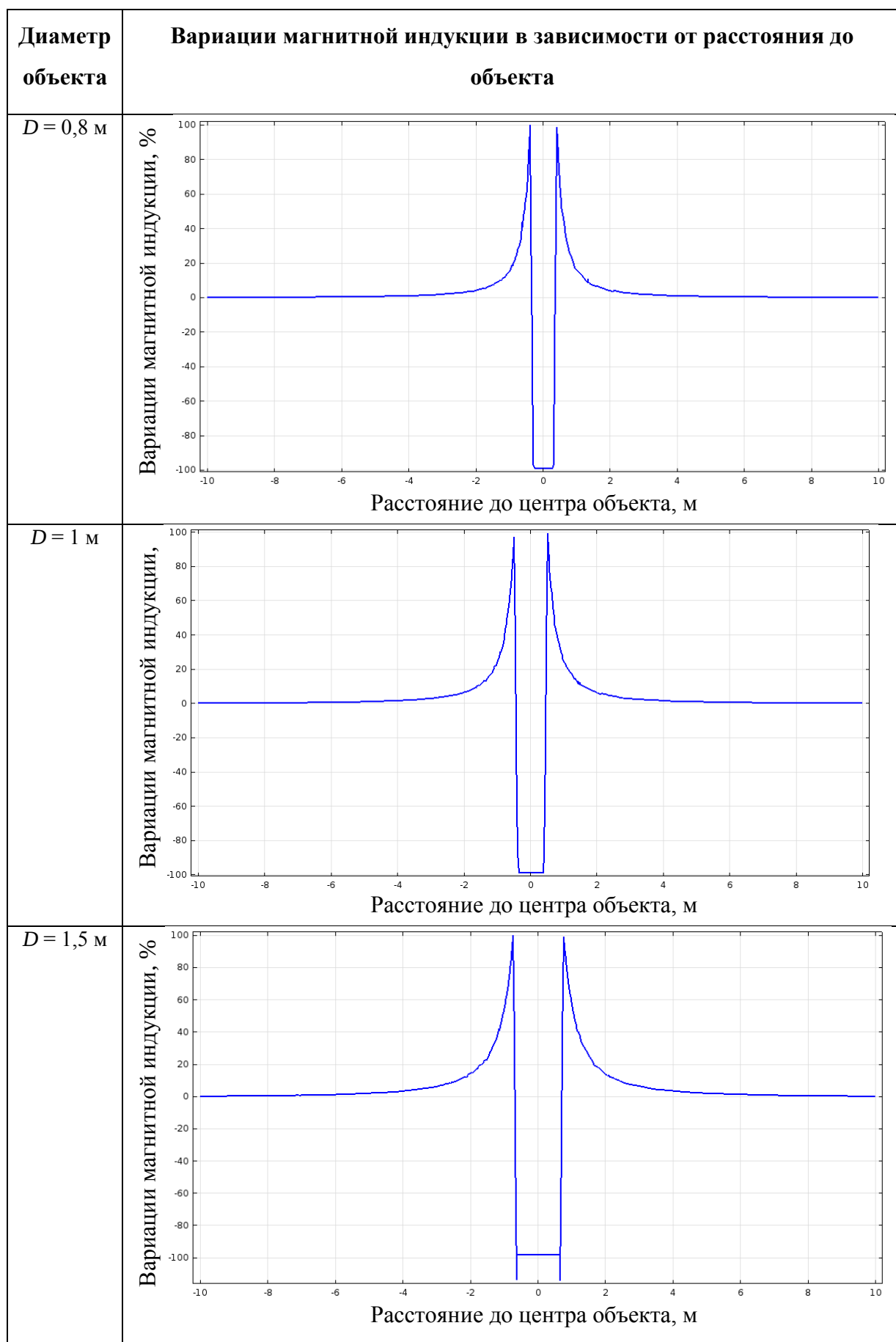
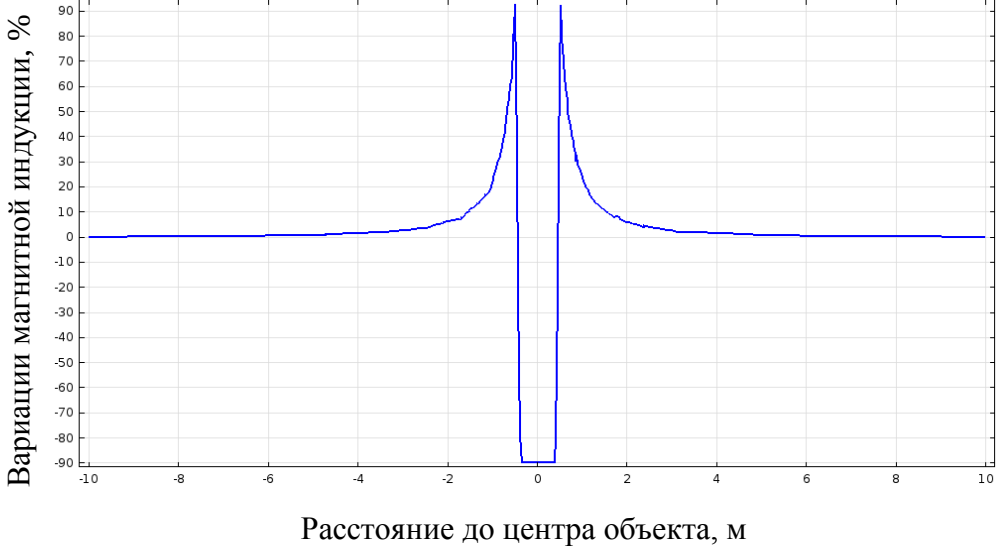
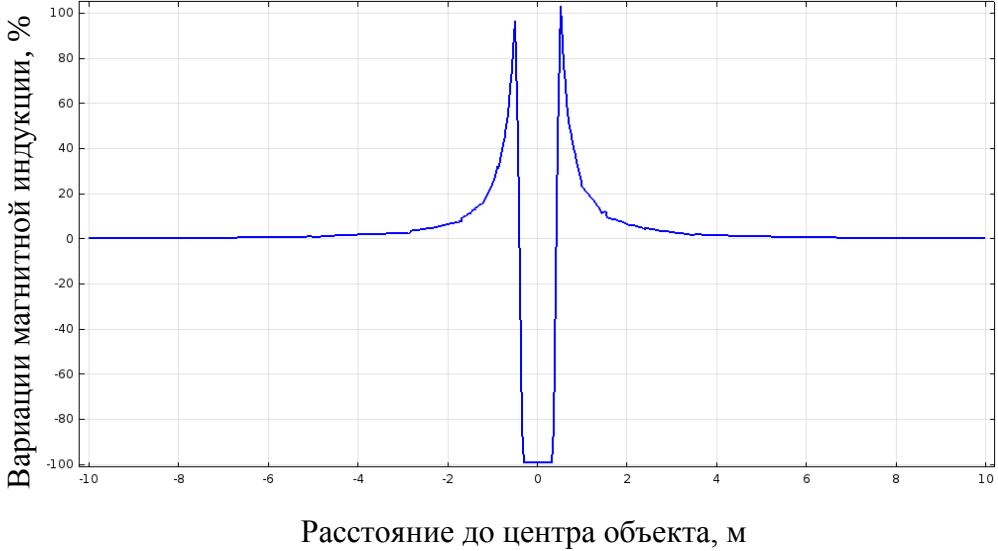
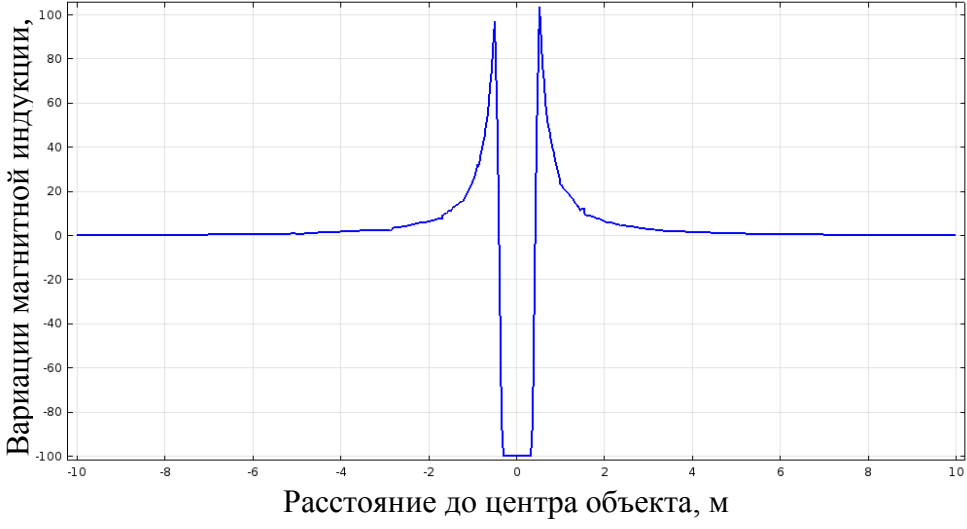
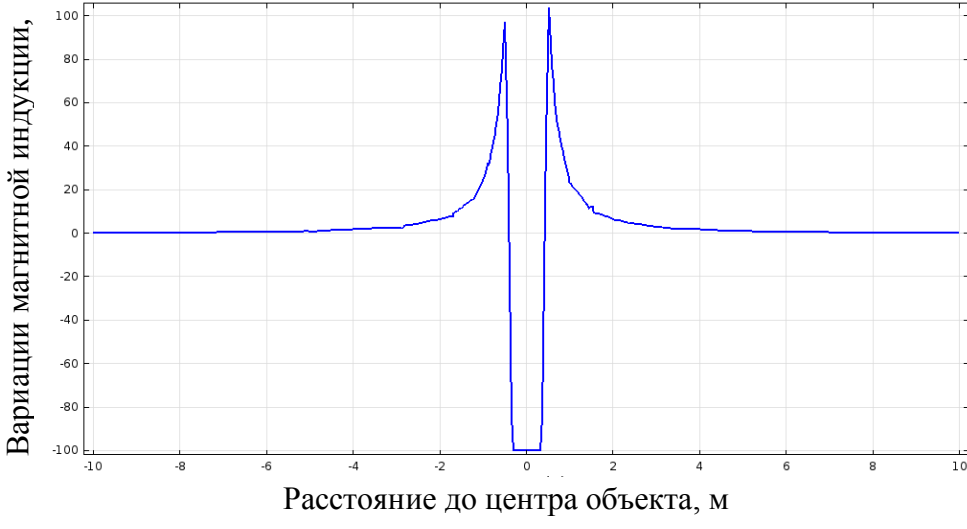


Таблица А.3 – Вариации индукции магнитного поля Земли вблизи объекта в зависимости от расстояния до объекта при различных значениях относительной магнитной проницаемости материала

| Относительная магнитная проницаемость | Вариации магнитной индукции в зависимости от расстояния до объекта                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mu_0 = 100$                         |   |
| $\mu_0 = 1000$                        |  |

Продолжение таблицы А.3

| Относительная магнитная проницаемость | Вариации магнитной индукции в зависимости от расстояния до объекта                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mu_0 = 10000$                       |    |
| $\mu_0 = 100000$                      |  |

## Приложение Б

(обязательное)

### Расчет трудоемкости выполнения работ

Таблица Б.1 – Трудоемкость выполнения работ

| Этап                                                                                     | Исполнители | Продолжительность работ, дни |           |          | Длительность работ, чел.-дн. |       |      |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------|-----------|----------|------------------------------|-------|------|-------|
|                                                                                          |             |                              |           |          | Трд                          |       | Ткд  |       |
|                                                                                          |             | $t_{min}$                    | $t_{max}$ | $t_{ож}$ | НР                           | И     | НР   | И     |
| 1                                                                                        | 2           | 3                            | 4         | 5        | 6                            | 7     | 8    | 9     |
| Постановка задачи                                                                        | НР          | 2                            | 4         | 2,8      | 3,36                         | -     | 4,11 | -     |
| Разработка и утверждение ТЗ                                                              | НР, И       | 2                            | 4         | 2,8      | 3,36                         | 0,336 | 4,11 | 0,41  |
| Подбор и изучение материалов по тематике                                                 | НР, И       | 12                           | 15        | 13,2     | 7,92                         | 15,84 | 9,69 | 19,34 |
| Разработка календарного плана                                                            | НР, И       | 2                            | 4         | 2,8      | 3,36                         | 0,336 | 4,11 | 0,41  |
| Обсуждение литературы                                                                    | НР, И       | 5                            | 10        | 7        | 2,52                         | 8,4   | 3,08 | 10,28 |
| Моделирование и исследование магнитных аномалий в компьютерной среде COMSOL Multiphysics | НР, И       | 5                            | 10        | 7        | 2,52                         | 8,4   | 3,08 | 10,28 |
| Формулировка требований к точности поисковых магнитометров                               | НР, И       | 2                            | 4         | 2,8      | 1,01                         | 3,36  | 1,23 | 4,11  |

Продолжение таблицы Б.1

| Этап                                                                                              | Исполнители | Продолжительность работ, дни |           |          | Длительность работ, чел.-дн. |       |          |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------|-----------|----------|------------------------------|-------|----------|--------|
|                                                                                                   |             |                              |           |          | $T_{РД}$                     |       | $T_{КД}$ |        |
|                                                                                                   |             | $t_{min}$                    | $t_{max}$ | $t_{ож}$ | НР                           | И     | НР       | И      |
| 1                                                                                                 | 2           | 3                            | 4         | 5        | 6                            | 7     | 8        | 9      |
| Моделирование и исследование типов калибровочных катушек в компьютерной среде COMSOL Multiphysics | И           | 15                           | 21        | 17,4     | 6,26                         | 20,88 | 7,67     | 25,56  |
| Проектирование имитатора магнитных аномалий, анализ полученных результатов                        | И           | 7                            | 12        | 9        | 3,24                         | 10,8  | 3,96     | 13,22  |
| Оформление расчетно-пояснительной записки                                                         | И           | 15                           | 21        | 17,4     | -                            | 20,88 | -        | 25,56  |
| Оформление графического материала                                                                 | И           | 7                            | 10        | 8,2      | -                            | 9,84  | -        | 12,04  |
| Итого:                                                                                            |             |                              |           | 90,4     | 33,55                        | 99,07 | 41,07    | 121,26 |

