

МИНИСТЕРСТВО АГРАРНОЙ ПОЛИТИКИ И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ УКРАИНЫ
ТАВРИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КУЦЕНКО ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК [621.3:537.8]:631.234

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ
АКТИВАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУР
В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор
Лисиченко Николай Леонидович

Мелитополь – 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Раздел 1 ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭМП В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА.....	15
1.1 Использование электротехнических и магнитных систем в условиях производства и переработки продукции растениеводства.....	15
1.2 Воздействие низкоинтенсивных электромагнитных полей на семена растений.....	28
1.3 Применение энергии ЭМП для стимуляции растений	31
1.4 Анализ методов и устройств для измерений функций газообмена биологических объектов.....	34
1.5 Анализ явления намагничивания в гетерогенных структурах.....	40
Выводы по разделу.....	47
Раздел 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С СЕМЕНАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР.....	48
2.1 Стационарное электрическое поле в грунте, созданное одиноким заряженным штырем.....	48
2.2 Электрическое поле в грунте, созданное системой заряженных металлических штырей.....	59
2.3 Воздействие стационарных электрических полей на семена и корневую систему сельскохозяйственных растений.....	72
2.4 Численный анализ полученных результатов.....	84
Выводы по разделу.....	88

Раздел 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА КОРНЕВУЮ СИСТЕМУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ.....	89
3.1 Поле однородно намагниченного эллипсоида.....	89
3.2 Определение внешних магнитных полей в случае статики.....	111
3.3 Поля, создаваемые системой намагниченных частиц.....	117
3.4 Анализ воздействия внешних статических магнитных полей на движение питательных веществ в корневой системе растений.....	130
Выводы по разделу.....	141
Раздел 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫТОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ.....	142
4.1 Анализ существующих систем определения диэлектрической проницаемости среды.....	142
4.2 Условия для представления поля собственных колебаний.....	145
4.3 Характеристическое уравнение для собственных частот.....	156
4.4 Основные расчетные формулы для определения электрофизических параметров внешней среды	168
Выводы по разделу.....	179
Раздел 5 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГАЗООБМЕНА РАСТЕНИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ.....	180
5.1 Разработка функциональной схемы для измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений	180
5.2 Анализ качества работы электронной системы контроля дыхания растений.....	188

5.3 Анализ влияния внутренних импульсов системы частотно-амплитудного преобразователя на точность измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений	194
5.4 Разработка генератора миллиметрового диапазона на лавинно-пролетном диоде с электронной перестройкой частоты.....	198
5.5 Анализ флуктуационных характеристик генератора на лавинно-пролетном диоде миллиметрового диапазона на точность измерения диэлектрической проницаемости газовой среды при дыхании растений ...	207
Выводы по разделу.....	214
Раздел 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВЕ.....	215
6.1 Исследование механизма намагничивания структур	215
6.2 Исследование структурных свойств электродов для создания постоянного магнитного поля в почве.....	231
6.3 Анализ модели магнитной системы электродов	237
6.4 Анализ процессов влияния магнитного поля на микроэлементы в почве.....	239
Выводы по разделу.....	245
Раздел 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗВИТИЕ ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР.....	246
7.1 Цель и задачи экспериментальных исследований.....	246
7.2 Анализ параметров и характеристик полудискового лейкосапфирового резонатора.....	246

7.3 Разработка и анализ технических параметров генератора на лавинно-пролетном диоде в системе измерения газообмена растений ...	250
7.4 Разработка установки для контроля газообмена растений.....	255
7.5 Разработка установки для обработки в электрических и магнитных полях семян и корневой системы тепличных культур	257
7.6 Определение параметров магнитного и электрического полей для повышения урожайности и качества тепличных культур.....	267
7.7 Влияние магнитного и электрического полей на развитие и урожайность тепличных культур.....	271
Выводы по разделу.....	278
ВЫВОДЫ	279
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	282
ПРИЛОЖЕНИЕ А	
Материалы расчетов многофакторного эксперимента.....	303
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	
Акты и протоколы исследований.....	310
ПРИЛОЖЕНИЕ В	
Технические условия для заказа магнитных систем	346

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АПК	– агропромышленный комплекс
УФ	– ультрафиолетовое излучение
ИК	– инфракрасное излучение
УФО	– ультрафиолетовое облучение
УЗК	– ультразвуковые колебания
СВЧ	– сверхвысокая частота
ЭМП	– электромагнитное поле
ДП	– диэлектрическая проницаемость
ОЦДР	– открытый цилиндрический диэлектрический резонатор
ЧАП	– частотно-амплитудный преобразователь
ГЛПД	– генератор на лавинно-пролетном диоде
ЛПД	– лавинно-пролетный диод
ПМНП	– пакет моделирования непрерывных процессов
КВЧ	– крайне высокая частота

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых электротехнических комплексов, рациональное и эффективное использование энергии электрического и магнитного полей в технологических процессах выращивания сельскохозяйственной продукции

является важным фактором развития агропромышленного комплекса Украины.

Обеспечение продуктами питания в мире становится первоочередной проблемой с учетом уменьшения земельных площадей для возделывания сельскохозяйственных растений и увеличения населения и улучшения условий жизни в развивающихся странах, особенно среднеазиатского региона.

Решения данной проблемы лежит в направлении максимального увеличения урожайности растений, выращенных на существующих площадях за счет интенсификации технологии выращивания, связанных с активизацией вегетационного развития, выбрасывания цветка, созревания зерна, др.

Современное овощеводство, в том числе и в сооружениях защищенного грунта, к сожалению, перенасыщено химическими соединениями, которые, как считается, активизируют и защищают растения в период развития и созревания. Понятно, что уровень экологической чистоты, полученных таким образом продуктов питания, вызывает сомнения, особенно с учетом интенсивного загрязнения окружающей среды, что повышает уровень содержания нитратов, пестицидов в продуктах питания.

Поэтому, разработка и внедрение новых электротехнических и магнитных систем в сооружениях защищенного грунта для активации гетерогенных структур является актуальной задачей для науки и практики.

Актуальность научных исследований. Проблема насыщение рынка Украины сельскохозяйственной продукцией собственного производства в настоящее время, особенно актуальна. Огурцы и томаты занимают существенную составляющую рациона человека. Сегодня, за данными статистики [204], потребление овощей населением Запорожской области не соответствует нормам, более половины продукции не удовлетворяет требованиям качества государственным стандартам Украины: ДСТУ 3246-95 и ДСТУ 3247-95 [206, 207].

Урожайность огурцов и томатов в защищенном грунте составляет в среднем 12...15 кг/м². Для повышения эффективности производства овощей необходимо внедрение современных экологически чистых энергосберегающих систем обработки почвы.

С этой целью в 2007 году принята государственная целевая программа развития украинского села на период до 2015 года, Кабинет Министров Украины утвердил концепцию «Державної цільової програми розвитку овочівництва та переробної галузі до 2020 року», «Комплексну Державну Програму реформування сільського господарства України».

Инвесторы все чаще обращают внимание на овощеводство и не только в открытом грунте, но что примечательно и в закрытом грунте, особенно такая тенденция справедлива для южных регионов Украины, районов так называемого рискованного земледелия [205].

С другой стороны экологические аспекты. В последнее время получил развитие целый ряд электротехнических комплексов, которые используют различные физические факторы воздействия на растение. Полученные зависимости эффективности положительного отклика от биотропных параметров фактора воздействия используют для получения высококачественных семян, растений, или регулируют процесс вегетации, созревания, др.

Одним из направлений активации процесса развития растений и его управления можно считать электротехнические и магнитные системы, построенные на основе преобразования электрической и магнитной энергии в энергию развития растений, которые могут влиять на семена и корневую систему, активизируя их жизнедеятельность. Поэтому разработка и внедрение электротехнических и магнитных систем в сооружениях защищенного грунта для активации гетерогенных структур с целью повышения эффективности производства, в частности увеличение урожайности тепличных культур, является актуальной задачей для науки и практики.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Исследования проводились в Таврическом государственном агротехнологическом университете и Харьковском национальном техническом университете сельского хозяйства имени Петра Василенко в соответствии с: – планов НИР ТГАТУ «Розробка наукових основ, систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки південного регіону України», номер государственной регистрации 0102U000678; – тематикой межвузовских научных и научно-технических программ по приоритетным направлениям развития науки и техники (приказ Министерства науки Украины №37 от 13.02.1996, п.2); – подпрограммой 1.12 «Розробка методів ультразвукової технології та електротехнологічних систем обробки та технічних засобів контролю якості сільськогосподарських продуктів», номер государственной регистрации 0102U000686; – подпрограммой 1.10 на 2007-2010 гг. «Розробка методів і технічних засобів енергетичного та інформаційного впливу електромагнітного поля і ультразвуку на сільськогосподарські продукти і матеріали», номер государственной регистрации 0107U008965. Подпрограммы «Розробка електромеханічних систем технологічних процесів сільськогосподарського виробництва» на 2011-2015 роки, номер государственной регистрации 0111U002556.

Государственной научно-технической программой «ДНТП-12 Енерго-та ресурсозберігаючі технології у сільськогосподарському виробництві»; «Електротехнічні технології і технічні системи підвищення продуктивності біологічних об'єктів рослинництва», номер державної реєстрації 0110U002505.

Цель исследования. Разработать научно-технические предпосылки повышения эффективности производства овощных тепличных культур на основе создания электротехнических и магнитных систем активации гетерогенных структур в сооружениях защищенного грунта.

Задачи исследования. Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать биофизическое действие совместного влияния стационарного электрического и статического магнитного полей на семена и корневую систему тепличных культур;
- выявить влияние стационарных электрических полей на процессы развития семян овощных тепличных культур;
- установить закономерности влияния статических магнитных полей на корневую систему овощных тепличных культур;
- обосновать параметры открытого цилиндрического резонатора для контроля изменения диэлектрических параметров внешней среды в сооружениях защищенного грунта ;
- разработать электронную систему для контроля газообмена растений с измерением диэлектрической проницаемости среды;
- установить взаимодействие ферромагнитных частиц гетерогенных структур со стационарным электрическим и статическим магнитным полями, сформированными в почве;
- определить эффективность использования электротехнических и магнитных систем в сооружениях защищенного грунта.

Объект исследования. Процессы преобразования электрической и магнитной энергии в энергию развития растений в гетерогенных структурах сооружений защищенного грунта.

Предмет исследования. Электротехнические и магнитные системы для активации гетерогенных структур в сооружениях защищенного грунта .

Научно-техническая проблема. Создание научно-технических основ для разработки и применения электрических и магнитных систем в сооружениях защищенного грунта для повышения урожайности, качества и экологии чистых культур.

Народно-хозяйственная задача. Повышение эффективности производства овощных тепличных культур и обеспечение качества продукции.

Научная гипотеза. Постоянные электрические и магнитные поля при обработке семян и растений в почве повышают проницаемость клеточных структур и ускоряют ферментативные реакции, что приводит к повышению всхожести, увеличению корневой системы растений, повышает их фотосинтетическую реакцию, урожайность и качество.

Методы исследования. Для решения поставленной проблемы были применены методы математического моделирования физических процессов, основные положения теории электромагнитного поля; теории вероятности, методы электродинамики для расчета резонаторных систем.

Экспериментальная проверка теоретических положений проводилась в реальных производственных условиях, а обработка полученных данных - с использованием методов математической статистики, применяя современные пакеты компьютерных программ.

Научная новизна полученных результатов:

- получили дальнейшее развитие теоретические положения по определению параметров стационарного электрического поля между металлическими штырями в почве теплиц, обосновано их расположения и взаимосвязи интенсивности электрического поля с процессами развития растений, что позволило устанавливать эффективные режимы стимуляции;

- на основе теоретических исследований впервые, для стимуляции биохимических процессов в растениях, обоснованы параметры статического магнитного поля, создаваемые в почве магнитными частицами различной формы для стимулирования развития корневой системы культурных растений, что приводит к повышению урожайности овощных культур;

- впервые установлена взаимосвязь между параметрами стационарного электрического и статического магнитного полей и количеством микроэлементов в почве (фосфор, калий и др.), которая дополнительно

учитывает численное содержание элементов доступной формы для питания растений;

- создана система контроля развития овощных тепличных культур по величине диэлектрической проницаемости газовой среды растений и получили дальнейшее развитие теоретические положения относительно процессов в системе измерения диэлектрической проницаемости газовой среды, что обусловило возможность разработки электронного устройства с заданной чувствительностью;

- впервые, в качестве дискриминатора частоты в системе измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений, обосновано применение лейкосапфирового резонатора в крайне высокочастотном диапазоне, который отличается от существующих резонаторов возможностью обеспечения точности измерения при работе на частоте 70 ГГц ;

- впервые математически интерпретирована зависимость между величиной диэлектрической проницаемости газообмена растений и параметрами стационарного электрического и статического магнитного полей, что позволило определить оптимальные параметры электротехнической и магнитной систем для обеспечения эффективного развития овощных культур в теплицах.

Практическое значение полученных результатов. Практическое значение полученных результатов заключается в том, что для повышения урожайности тепличных овощных культур создана электротехническая и магнитная системы в сооружениях защищенного грунта. Разработана система контроля развития растительных объектов по величине диэлектрической проницаемости газовой среды растений.

Применение данных систем позволило увеличить урожайность томатов сорта «Лилос» и огурцов сорта «Кураж» до 175...190%. Электротехническая и магнитная системы прошли производственную проверку в течение 2010... 2012 гг. в хозяйстве «Тепличный комбинат» г. Энергодар Запорожской обл.

Лабораторные исследования полученных плодов не обнаружили генетических изменений и увеличение количества химических элементов в плодах и растениях тепличных культур.

Технические требования для изготовления магнитных систем направлены в ОАО «Полимагнит» (г. Киев), опытный образец экспериментальной установки передан в хозяйство «Тепличный комбинат» Запорожской области.

Личный вклад соискателя. Научные положения, которые приведены в диссертации, получены соискателем лично. Автору принадлежит разработка электротехнической и магнитной систем для активации гетерогенных структур в сооружениях защищенного грунта.

В работах [2,19,26,35,36] автором проведены теоретические исследования и определены параметры стационарного электрического поля для стимуляции активных процессов в растениях; в работах [4,6,7,28] автором, на основе теоретических исследований, определены параметры статического магнитного поля для стимуляции развития корневой системы, разработаны модели и проведен анализ их электрофизических свойств. В работах [15,34] установлены зависимости влияния стационарного электрического и статического магнитного полей на количество микроэлементов в почве; в работах [20,21,22,23,24,25] получили дальнейшее развитие теоретические исследования и разработка устройств для измерения диэлектрической проницаемости газообмена растений с использованием генератора ЛПД. В работе [27] проведены технико-экономические расчеты эффективности применения электротехнических и магнитных систем в сооружениях защищенного грунта.

Исследования проводились в ТГАТУ, ХНТУСХ имени Петра Василенко, УкрГНИИ специальных сталей, сплавов и ферросплавов (г. Запорожье), КНУ имени Тараса Шевченко, Институте орошаемого садоводства имени М.Ф. Сидоренко НААН, ВП КСП «Тепличный комбинат» Запорожской области.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: ежегодных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов Таврического государственного агротехнологического университета (г. Мелитополь, ТГАТУ, 2003, 2005, 2006-2008, 2010-2012 гг.); Международной научно-практической конференции «Проблемы энергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (г. Харьков, ХНТУСХ им. П. Василенко, 2004-2007, 2010, 2012 гг.); Международных и всеукраинской научных конференциях «Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища» (г. Киев, КНУ им. Т. Шевченко, 2005-2006, 2012 гг.); Международной научно-практической конференции «Инновационные энергоресурсо-сберегающие технологии в АПК» (г. Москва, ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина, 2012 г.); Всероссийской научной конференции «Научно-техническое обеспечение АПК Юга России» (г. Зерноград, ФГБОУ ВПО Азовочерноморская государственная агроинженерная академия, 2012 г.); 5 Международной научно-практической и научно-методической конференции посвященной памяти Мартыненко И.И. «Енергозабезпечення технологічних процесів АПК» (г. Мелитополь, ТГАТУ, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Проблемы розвитку систем енергетики і автоматики в АПК» (г. Киев, Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, 2012 г.); Международной научно-производственной конференции «Современные проблемы инновационного развития агроинженерии и информационных технологий» (г. Белгород, ФГБОУ ВПО «Белгородская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Я. Горина», 2012 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 42 печатных работах, в том числе в 30 научных издательствах ВАК Украины.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, выводов, списка использованной литературы, приложений. Полный текст диссертации изложен на 349 страницах машинописного текста, который включает 95 рисунков по тексту и 11 рисунков на 8 страницах; 12 таблиц по тексту и 18 таблиц на 12 страницах. Список использованной литературы включает 210 наименований на 21 страницах, в том числе 7 иностранных публикаций, 3 приложений на 46 страницах.

РАЗДЕЛ 1

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭМП В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ ПРОДУКЦИИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

1.1 Использование электротехнических и магнитных систем в условиях производства и переработки продукции растениеводства

Главным заданием производителей сельскохозяйственной продукции является максимальная сохранность ее полезных свойств при доведении до потребителя. Важную роль в этом процессе играет электрическое и магнитное воздействие при переработке сельскохозяйственной продукции [1].

Использование электромагнитного поля в электромагнитных процессах расширяет функциональные возможности традиционных способов очистки, сортировки, сушки сырья и резко снижает энергозатраты.

Во время переработки продукции с использованием электрической и магнитной энергии важным параметром является изменение его

энергетического состояния. В обобщенном виде имеем термодинамическую тождественность изменения внутренней энергии системы

$$dU = dU_t + dU_\mu, \quad (1.1)$$

где $dU_t = \tau d\sigma$ - передача энергии теплового влияния; $\tau = k_\sigma T$;

k_σ - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура;

σ - фундаментальная энтропия системы (общепринятое определение энтропии);

dU_μ - изменение внутренней энергии, которая предопределена числом частиц продукта и их энергетическим состоянием.

Если на систему дополнительно влияют электрическим и магнитным полями, изменение внутренней энергии приобретает вид

$$dU = dU_t + dU_\mu + dU_e + dU_m, \quad (1.2)$$

где dU_e, dU_m - составляющие, вызванные соответствующими полями.

Обобщая результаты изучения влияния на сельскохозяйственную продукцию электрическим и магнитным полями можно записать

$$dU_{1,2} = \tau d\sigma + \mu dN - p dE + E dp - M dH + H dM, \quad (1.3)$$

где p - дипольный момент;

E - напряженность электрического поля, с помощью которой достигается поляризация;

M - магнитный момент образца;

H - напряженность постороннего магнитного поля.

Эта термодинамическая тождественность позволяет целенаправленно изменять соотношение между составляющими правой части с целью эффективного изменения внутренней энергии обрабатываемого сырья. Приведенные энергетические соотношения могут быть использованы при разработке новых электротехнических и магнитных систем для активации гетерогенных структур защищенного грунта.

С точки зрения исследователя, гетерогенная структура является неоднородной средой, состоящей из немагнитной или слабомагнитной матрицы с дискретно распределенными в ней ферромагнитными частицами. Гетерогенная структура включает в себя: грунт, растительные и биологические объекты, систему электродов и постоянных магнитов, примеси [163,109,161].

Привлекательным с точки зрения энергосбережения является применение электростатических полей, с помощью которых проводят сортировку и очистку разных семян от примесей.

Проведем анализ существующих способов применения энергии электромагнитного поля в технологических процессах переработки сельскохозяйственной продукции и используемых при этом устройств.

В исследованиях В.В. Шмигель и др. [2] при сортировке семян огурцов по признаку, связанному с массой семян (его толщиной), с помощью ленточного электростатического триера установлено, что из семян огурцов толщиной свыше 1,5 мм вырастают более крепкие растения, чем из семян меньшей толщины. Обратили внимание на то, что в вариантах с электростатической сепарацией на ленточном триере показатели были более высоки, чем при отборе семян без обработки в электростатическом поле триера. Это объясняется стимулирующим эффектом электростатического

поля, которое также обеспечивает значительный экономический эффект.

В литературе встречаются работы, в которых исследуется сепарация сои [3] и овса [4]. Большое количество работ касается разработки новых электросепараторов семян, определения характеристик рабочих органов диэлектрических сепараторов, теоретических вопросов работы электростатических устройств [5-9].

Важным компонентом сельскохозяйственного сырья является вода, которая создает широкий спектр жидкостей в продукции сельского хозяйства с различными физико-химическими свойствами. Она становится главным объектом, на который действуют внешние электромагнитные факторы и через которую эти факторы влияют на качество сельскохозяйственной продукции.

Известны многочисленные способы стимуляции производительности растений и животных с помощью активированной воды. Под активацией понимают временное изменение ее свойств, при разных физических влияниях, одним из которых является электрохимическое.

Во время прохождения электрического тока через водную среду, которая разделена диафрагмой, на электродах образуются продукты окисления - восстановления. Кислотная фракция (анолит) характеризуется сниженным водородным показателем (pH) и положительным значением редокс - потенциала (E_h), который измеряется в милливольтках, а щелочная (католит) - увеличенным pH и отрицательным E_h .

В живом организме католит ведет себя как стимулятор биологических процессов. Находясь в метастабильном состоянии и неся некоторый избыток потенциальной энергии, он способствует улучшению обменных процессов. Редокс-потенциал питьевой воды для бройлеров от -200 до -600 мВ способствует увеличению их живой массы.

При проведении экспериментов С.М. Хацуков установил причины уменьшения E_h воды и дал рекомендации относительно его торможения [10].

Обработка воды магнитным полем влияет на ее вязкость, плотность, диэлектрическую проницаемость, электропроводимость, поверхностное натяжение, возможность к раствору солей, диффузии, абсорбции, кристаллизации и коагуляции взвешенных частиц. Изменение этих качеств увеличивает биологическую активность.

Применение намагниченной воды для полива растений исследовалось на специальной установке, через которую протекала вода, обработанная магнитным полем с изменением полярности.

Опыты проводили на выгонке лука и во время выращивания рассады капусты. Растения питались намагниченной водой при напряженности 115 кА/м на протяжении всего опыта. Результаты оценивали за длиной и количеством побегов лука, высотой рассады и шириной листьев капусты. Длина побегов лука увеличилась на 18,3%, а их количество - на 31,2 %.

Прорастание семян капусты ускорялось на несколько дней, высота рассады увеличивалась на 13,4%, а ширина листьев - на 15,6 %.

При поливе укропа на грядке водой, обработанной магнитным полем 120 кА/м, его высота увеличилась в среднем на 15 %, а прирост урожая составлял 24 %. Результаты этих опытов, проведенных на овощных культурах, подтвердили стимулирующее действие намагниченной поливной воды [11].

Часто технологическая схема обработки воды, которая поступает из подземных источников, недостаточно эффективна из-за высокого микробного ее загрязнения.

Для обеззараживания воды проводят ее хлорирование, озонирование или ультрафиолетовое облучение, однако лучшие результаты дает использование магнитных полей. Установлено, что постоянное магнитное поле, которое действует на воду, имеет бактерицидное действие. Да, при

напряженности 40-720 А/см и времени действия 0,4-1,6 с эффект обеззараживания составляет 65-70 %, что свидетельствует о принципиальной возможности использования для этого магнитной обработки.

Уравнительное использование постоянного, переменного и импульсного электромагнитных полей показало высокую технологическую и энергетическую эффективность последнего. Частотный спектр магнитного поля очень широкий и охватывает диапазон от низкочастотного до ионизирующего.

Предыдущими лабораторными экспериментами [11, 12] было установлено, что на эффект обеззараживания питьевой воды влияют индукция импульсного поля (В, Тл), частота импульсов (f, Гц), время обработки (t, с).

Таблица 1.1-

**Результаты опытов стимулирующего действия намагниченной
поливной воды**

Вода	Коли- индекс, шт./ л	*ЗМЧ, шт./л	Нитриты, мг/л	Нитраты, мг/л	Аммиак мг/л
Выходная	120	1020	0,090	0,04	0,075
Обработанная	3	96	0,064	0,024	0,046

*ЗМЧ — общее микробное число.

Уравнение математической модели этого процесса имеет вид

$$Y = 104,02 - 7,5365 \cdot t - 0,01 \cdot f^2 - 0,0348 \cdot B^2 + 11,35 \cdot \tau + 0,1011 \cdot f - 0,81678 \cdot B + 0,19 \cdot \tau \cdot f$$

(1.4)

С помощью метода конфигураций Хука - Дживса установлены оптимальные параметры процесса обеззараживания воды: индукция магнитного поля - 11,7 Тл, частота - 12 Гц, время обработки - 0,2 с.

Результаты химико-бактериологического анализа свидетельствуют о высокой бактерицидной эффективности этого способа при незначительном изменении химических показателей качества воды (табл. 1.1)

Удельные энергетические расходы по этому способу в 4,4 раза меньше, чем при использовании ультрафиолетовой установки ОВ-50 [12].

Встречаются публикации, в которых приводят методы математического моделирования аппаратов магнитной обработки воды, теоретические выводы и практические рекомендации, из расчета элементов аппаратов магнитной обработки воды (АМОВ) [13]. Известны исследование и практика использования магнитных полей также при производстве спирта и углесодержащего сырья [14].

Исследовались три магнитных установки конструкции Харьковского МПП Нуклон, которые отличаются между собой формой магнитов и расположением их полюсов к обрабатываемому суслу. Магнитная индукция в рабочем зазоре изменяется: 60 мТ - на входе, 20 мТ - в центре, 60 мТ - на выходе.

Такая установка создает пульсирующее магнитное поле в рабочем зазоре. Сусло и сахаросодержащее сырьё обрабатывали в установках на протяжении 1-20 с в непрерывном потоке и сбрасывали.

В табл. 2 приведена динамика выделения диоксида углерода, которая зависит от накопления этанола [18, 33].

Сусло из сахаросодержащего сырья 80—89% состоит из воды, остальные - органические и минеральные соединения.

Под действием магнитных полей вода разлагается на ассоциаты и моно молекулы, при этом снижается ее поверхностное натяжение и активированная вода имеет потенциальную энергию. Такая активная среда проникает в дрожжевую клетку и ускоряет ассимиляцию углеводов.

Динамика выделения диоксида углерода

Тип магнитной установки	Выделения диоксида углерода, г			
	За 12 ч	за 24 ч	за 36 ч	за 72 ч
Нуклон КЛ	5,96	10,60	12,20	12,95
Нуклон ЗАВ	6,01	10,71	12,31	13,20
Нуклон БУР	6,13	10,95	12,50	13,64
Контроль	5,91	10,49	12,10	12,90

В научных публикациях приведены данные также о действии магнитных полей на сухие сыпучие материалы [15]. Известны магнитные системы с применением электромагнитных полей для предпосевной обработки семян зернового сорго, и приводятся расчеты установок, которые используются в этих системах. Использование магнитной энергии способствует активизации процесса роста и развития растений, а также формированию высокой урожайности этих культур.

Аппарат для предпосевной обработки семян сорго - это источник энергии; водная среда - приёмник и передатчик энергии; семена сорго - аккумулятор энергии магнитного поля. Как первичный источник энергии рассматривается переменное электромагнитное поле (ЭМП) промышленной частоты 50 Гц.

Эффект влияния магнитной энергии определяется временем, на протяжении которого она действует на объект (экспозиция).

Результаты опытов свидетельствуют, что предпосевная обработка семян ЭМП 50 Гц увеличивает на 5,7-7,1 % энергию прорастания, 6,6-8,0 % – лабораторную всхожесть и на 9,1-10,6 % – полевую всхожесть.

Предпосевная обработка семян ЭМП 50 Гц ускоряет рост и развитие растений сорго на начальных этапах онтогенеза. В исследовании масса первичных проростков (будущих стеблей) в зависимости от экспозиции увеличилась на 5,4-10,8 %, а первичных корней – на 8,3-20,8 %.

Изменились также морфологические показатели: высота растений и длительность вегетационного периода. На опытных участках высота растений была на 6-7 см большей, а зерно созревало на 8-11 дней быстрее, чем на контрольных. Урожайность сорго в опыте составляла 3,24-3,29 т/га, вызревание семян до 17-19%, что позволило собрать сорго на зерно серийными комбайнами.

Таким образом, предпосевная обработка ЭМП 50 Гц семян зернового сорго способствуют как активации процессов роста и развития, так и формированию высших урожаев [16], потому использование переменного электромагнитного поля промышленной частоты приобретает значение важной агромеры.

Основными элементами разработанной методики инженерного расчета рабочего органа установки являются полюсные наконечники. Они формируют магнитное поле в объеме рабочей камеры. Обработанные магнитным полем с индукцией 0,03 Тл семена зернового сорго Зерноградское 53 по результатам полевых исследований было более жизнеспособным в сравнении с контрольным. У обработанных семян энергия прорастания увеличилась на 5,7...7,1 %, а полевая всхожесть – на 9,1...10,6 %. Это способствовало более быстрому появлению всходов, лучшей их сохранности, к моменту кущения, формированию более ровного стеблестоя, что является гарантией увеличения урожая [17].

В перерабатывающей промышленности находят применение магнитные установки, которые влияют на интенсивность сбраживания мелассы и окончательный выход спирта. Проведенные исследования [40-42] показали, что наилучшие результаты относительно интенсивности сбраживания активированного меласного сусла и синтеза этанола обеспечивает обработка их на установке НУКЛОН-БУР. Оптимальный срок обработки для увеличения выхода спирта составляет 10-20 с. Кроме того, в зрелой бражке, полученной из намагниченного, в течение этого периода сусла, накапливаются на 40 % меньше побочных и вторичных продуктов

брожения. Увеличение же срока обработки меласного сусла до 40-60 с приводит к снижению синтеза этанола на 0,3...1,1 % и увеличение накопления биомассы дрожжей на 21...32 %.

На основе проведенных испытаний специалистами НПО Нуклон-1 разработана промышленная магнитная установка, которая не нуждается в замене существующего оборудования заводов, электропитания, а также обслуживающем персонале, для эксплуатации и не продлевает технологический цикл производства. Установка сертифицирована в системе УКРСЕПРО и имеет такие основные технические характеристики: прохождение жидкости сквозь систему - 0...25 м /час; рабочее давление - и 0,4 МПа; рабочая температура жидкости - 4...80 °С; габариты - 1855 x 290 x 75 мм; масса - не выше 45 кг; срок использования - 5 лет и больше [18].

Одним из важных направлений переработки сельскохозяйственной продукции есть сушение с целью сохранности продукции длительное время. Традиционные способы сушки потребляют большое количество энергии в виде, как органического топлива, так и электрической энергии. Современное, нетрадиционное оборудование позволяет использовать с этой целью энергию солнечного света с помощью, так называемых, солнечных коллекторов, фруктосушилок и др. Солнечная энергия принадлежит к чистым видам энергии, которые не загрязняют окружающую среду. Такая технология позволяет сэкономить большое количество органического топлива и электрической энергии, которые могут быть использованы более эффективно в других технологиях.

Да, высокоэффективным является использование солнечной энергии для сушения сельскохозяйственных продуктов и зеленых кормов. При сушении зеленых кормов в высокотемпературных сушилках 30 % затрат приходится на топливо. На сушку 1 т зеленой массы расходуется 240 кг жидкого топлива или эквивалентного количества электроэнергии.

Воздушно-солнечные сушилки состоят из солнечного коллектора, в котором воздух нагревается до температуры 80...90°С, вентилятора и

теплоизолированной емкости, в которую загружают продукт для высушивания. Нагретый воздух вентилятором прогоняют сквозь продукт, благодаря чему влажность массы снижается с 70 до 12...15 %. С помощью солнечной энергии сушат овощи, фрукты, табак. Сушку проводят в камерных и радиационных сушилках. Производительность солнечной сушилki в день на каждый квадратный метр поверхности, которая воспринимает солнечные лучи, составляет для яблок – 3,3 кг, для чернослива – 1,1 кг, для винограда – 1,5 кг, для абрикоса – 1,8 кг [19-24].

В сельскохозяйственном производстве часто используют инфракрасные источники излучения. Для этого применяются различные технические средства, но больше всего – инфракрасные лампы, которые около 65 % потреблённой энергии отдают в виде ИК – излучения, 2 % – видимого и 33 % – кондуктивных и конвективных затрат на теплопроводность и теплопередачу. Как известно, ИК - излучение мало поглощается воздухом, потому большая часть энергии передается непосредственно нагреваемому объекту. Максимальная энергетическая освещенность ИК ламп – 180...550 мВт/см. Распределение спектральной энергии излучения изучалось на ИК - лампах с красным покрытием и с колбой из красного стекла. Результаты показывают, что ее максимальное значение равняется длине волн 1000...1250 нм [25].

В животноводстве доведение молодняка до кондиции требует применения не только инфракрасного (ИК), но и ультрафиолетового (УФ), облучения, которые являются важными составляющими при оптимизации локального микроклимата и ион насыщенного помещения, где находятся животные. Предлагается установка с автоматическим управлением облучения молодняка животных [26-29].

ИК и УФ облучение используется в технологиях переработки молока, в пастеризационно-охлаждающих установках [30].

Сушка продукции сельского хозяйства инфракрасными лучами широко используется и дает хорошие результаты.

Принцип действия оборудования для глубокой переработки пищевых продуктов ИК - сушкой основывается на использовании радиационно-конвективного метода сушения. Подготовленный продукт, который размещается на сетчатой поверхности и постоянно обдувается воздухом, испытывает периодическое влияние ИК - излучения. Участок спектра инфракрасного излучения подобран так, чтобы максимально активизировать молекулы воды. Воздушный поток способствует удалению влаги из продукта. Глубина проникновения ИК - излучения – 3...5 мм, температура продукта при сушении колеблется от 40 до 60 °С.

Средняя длительность сушения плодов и овощей составляет 2...3 часа, муасы и рыбы, морепродуктов – 1,5...2; картофеля и круп – 2...3; зеленых и лекарственных трав – 1...2 часа; макаронных изделий – 20 мин. ИК - сушка происходит при сравнительно низких температурах, потому в высушенном продукте сохраняется клетка, которая обеспечивает высокие органолептические характеристики (вкус, цвет, запах) продукта после его обводнения, а также сохраняется до 90 % витаминов, которые есть в сырье. Кроме того, поверхностная микрофлора выходного продукта при сушении частично подавляется: масса сушеных продуктов в 5...10, а объем – в 2...4 раза менее от натуральных. Что существенно снижает транспортные расходы и потребность в складских помещениях; срок хранения сушеной продукции в сравнении натуральными продуктами значительно растет (не меньше одного года); требования к условиям хранения (особенно температурных) и транспортировки сушеной продукции в сравнении с натуральным значительно снижаются [31,32].

В сахарной перерабатывающей промышленности применяется комбинированная обработка ультрафиолетовым облучением (УФО) и ультразвуковыми колебаниями (УЗК) сахарных растворов с целью уменьшения их микробиологического загрязнения.

В работе использована ультразвуковая установка Медитон, которая генерирует ультразвуковые колебания частотой 44 кГц, интенсивность

колебаний при этом – 2 Вт/см^2 . Обработка ультразвуком проводилась на протяжении 5...30 мин. При этом эффект удаления микробов составлял 12...83,3 %.

В пищевой промышленности для дезинфекции широко используют ультрафиолетовое облучение, в частности для обеззараживания жидких продуктов. Эффект удаления микробов составляет 24...98,3 % [33].

Предпосевная обработка семян УФ и ИК излучениям способствует повышению урожайности пшеницы на $21...29 \text{ г/м}^2$, а также позволяет сократить потребление электроэнергии при обработке семян больше чем в 10 раз [34].

В настоящее время интенсивно исследуются индуцируемые электромагнитными полями (ЭМП) структурно функциональные изменения в растительных организмах, при этом часто используется математическое моделирование, которое значительно сокращает трудоемкий, длительный и дорогой эксперимент [36].

Электромеханические системы на основе сверхвысокочастотной (СВЧ) энергии можно отнести к энергосберегающим. Они имеют специфику распространения и возможности резонансного взаимодействия с объектом, который обрабатывается, а также использование устройств, которые ее генерируют, с высоким коэффициентом полезного действия (70...85 %). Опыты позволяют сделать вывод о возможностях стимуляции, ингибирования и коррекции ростовых процессов. Энергию сверхвысоких частот разделяют на силовую (энергетическую) при плотности потока до сотен кВт на 1 м^2 и информационную (низкоэнергетическую) от десятых частиц кВт на 1 м^2 , которые используются в стационарных и мобильных устройствах, что приводит к повышению урожая в растениеводстве на 20...27 % [37] .

Анализ разных способов нагревания фуражного зерна показал, что наивысшей его интенсивности можно достичь с помощью диэлектрического нагрева в электромагнитных полях сверхвысоких частот (ЭМП СВЧ). При

этом глубина проникновения в зерно СВЧ - энергии на разрешенных для теплового нагрева диапазонах 915 и 2400 МГц на порядок выше, чем ИК - излучение. СВЧ -энергия превращается в тепловую в середине материала в зависимости от его диэлектрических свойств. Зерно условно состоит из сухого вещества и воды. Поэтому СВЧ -обработка будет обеспечивать в большей степени нагревание воды, чем сухого вещества, поскольку ее диэлектрические свойства существенно более высоки. Основная доля энергии направляется на процесс парообразования в середине капилляров зерна, которые являются необходимым условием для хранения его "взрыва". В таком случае энергозатраты на процесс микронизации должны быть значительно ниже, чем при нагревании зерновки за счет теплопроводимости от внешнего источника тепла. Эта установка прошла предварительные испытания на семенной пшенице и ячмене различной влажности.

Наиболее эффективная обработка семян кондиционной влажности 8...12 %. При этом удельные затраты энергии не превышают 120 кВт·ч одной тонны готового продукта, степень декстринизации крахмала составляет 30...60 %, снижение общего бактериального осеменения – 95...99 % [38].

Микроволновая обработка пищевых продуктов положительно влияет на их качество и питательные свойства [41]. В пищевой промышленности микроволновые процессы используются в теплотехнологиях [42]. Комбинированные методы влияния на качество, потребительские свойства и хранение, применяются чаще [43-45].

Одним из направлений, которое используется в переработке продукции сельского хозяйства, является электрогидравлический эффект или эффект Л.А. Юткина. Пределы его приложения достаточно широкие: электрогидравлическая обработка земли, воды и любых других жидкостей, стерилизация, гомогенизация жидкости, добыча масла, очистки продуктов, измельчения кормов и др. [46, 111].

Анализ научно-технических источников информации позволяет сделать вывод, что в настоящее время использование электротехнических и магнитных систем дает максимально возможный энергосберегающий эффект и потому экономически обосновано [47,48].

Диапазон применения электромагнитных полей охватывает почти всю шкалу электромагнитных колебаний: постоянных электрических и магнитных полей; радиоволн низких, средних, высоких, сверхвысоких частот, инфракрасного, видимого, ультрафиолетового диапазонов; рентгеновских и γ -лучей.

Электромагнитные поля действуют на живую ткань продукции переработки или как на физический объект. Применения электрической и магнитной энергии позволяют улучшить потребительские качества и физико-химические свойства продукции сельского хозяйства. Процесс развития данных способов и технических средств за последние годы отображен в работе Н.Ф. Бородина и В.П. Горячкина [49]. Большие возможности использования электромагнитных полей в сортировке овощей и фруктов, где в последнее время используют гидродинамические технологии [50].

Таким образом, применение энергии электромагнитных полей в растениеводстве является одним из эффективных направлений повышения урожайности биологических объектов растительного направления [51].

1.2 Воздействие низкоинтенсивных электромагнитных полей на семена растений

Исследованием возможности применения низкоинтенсивных ЭМП на семена растений занимались активно еще в конце прошлого столетия. Так, в работе Э.А. Каменира (1994) систематизированы исследования по определению реакции семян на воздействие широкого диапазона [52]. Автор придерживается принципа общего воздействия ЭМП различных частот – от 0 (постоянное электрическое поле) до 10^{20} Гц (гамма-излучение). Реакция

семян на физическое воздействие объясняется на основе теории раздражения, аналогично той, которая применяется в нейрофизиологии [53].

На основе представления не специфичности реакции семян на различные виды физического воздействия, рассматриваются испытания по активизации пшеницы (озимая, яровая), ячменя, кукурузы, гороха, гречки [54, 55].

В 148 опытах по применению низкоинтенсивного лазерного излучения зафиксировано положительное воздействие на урожайность семян в 67,6 % случаях, а для яровой пшеницы – 80,8 %, причем следует отметить, что различные физические воздействия имеют практически одинаковую вероятность положительного воздействия на проращивание и дальнейшую урожайность.

Количественной характеристикой взаимодействия физического воздействия с биологическими объектами является количество поглощенной энергии – доза. При определении дозы возникают сложности, которые связаны с необходимостью проведения многофакторных экспериментов, поэтому была разработана методика теоретического расчета величины поглощения энергии семян, в постоянном электрическом поле [52]. Анализ полученных аналитических зависимостей показал, что поглощение электрической энергии семенами практически полностью прекращается через 0,1...0,3 с. вследствие высокой проводимости семян, причем интенсивность поглощения определяется величиной диэлектрической проницаемости (ДП) семян – ϵ :

– при $\epsilon = 100$, удельное поглощение энергии составляет около $10 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$;

– при $\epsilon = 6$ – примерно $200 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$;

При уменьшении проницаемости семян удельная энергия поглощения также снижается. Так, в работе [56] произведено сравнение изоэффективного поглощения энергии для семян пшеницы при физическом воздействии различных видов:

- для лазерного излучения, интенсивностью $1,6...3,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, удельная энергия поглощения составляет $10^5...10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$ [57];
- для инфракрасного излучения – $10^7...10^8 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$;
- для ультрафиолетового излучения – $10^5...10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3}$.

Таким образом, интенсивность поглощения электрической энергии семян существенно зависит от частоты электрического поля, причем эта зависимость является нелинейной. Неспецифическое воздействие различных видов физического воздействия обусловлено изменением электрического поля в живых клетках и связанного с ним электрического потенциала, который и обуславливает реакцию клетки на внешнее воздействие. Необходимость преобразования энергии физического воздействия в электрическую энергию постоянного поля, которое реализуется биомембранами и обуславливает специфичность воздействия [58].

Эффективность физического воздействия в конечном случае обусловлена внутренней энергией клетки, а физическое воздействие является сигналом к «освобождению» этой энергии, причем независимо от его природы [59].

Разница изоэффективных энергий физического воздействия, которые указаны выше, объясняются различным КПД преобразования энергии воздействия в электрическую энергию клетки, которое реализуется клеточными мембранами. Указанное, полностью согласуется с общим представлением об информационно-энергетическом характере внешних воздействий на биологические объекты практически любой природы. Однако в реальных условиях необходимо учитывать уровень ответной реакции биологических объектов на воздействие в зависимости от длины волны или частоты ЭМП: от сверхвысокочастотных (СВЧ) до постоянных электрических и магнитных полей.

Приведенные расчеты показывают, что напряженность электрического поля в природе изменяется в широких диапазонах – от $10^2 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ при низких частотах (10^{-4} Гц), до $10^{-10} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ при высоких частотах (10^3 Гц). Причем,

наибольшее значение оно имеет в области инфракрасных частот, которые характерны для биологических ритмов характерных для жизнедеятельности всего организма.

1.3 Применение энергии ЭМП для стимуляции растений

В связи с повышением уровня загрязнения окружающей среды химическими препаратами, которые широко используются для стимуляции растений, разрабатывается ряд способов нехимического воздействия, например с помощью энергии ЭМП. В этом случае рассматривают электротехническую и магнитную систему: «почва, семена, корневая система растений - внешняя среда» с точки зрения энергоинформационного воздействия внешнего ЭМП с целью стимуляции растений. В этом случае распределение электрических потенциалов в корненасыщенной среде определялось с целью определения зоны стимуляции корневой системы растений, например при помощи постоянного электрического тока [68].

С другой стороны известно, что растительная ткань характеризуется электрохимическим и мембранным потенциалом, потенциалом действия, имеет возможность поддерживать ионный градиент по калию и натрию, который существенно влияет на скорость протекания обменных процессов и существенно зависит от внешних факторов, особенно от электромагнитного поля вокруг клетки [69,70].

Так, в процессе жизнедеятельности электрохимический потенциал занимает одно из важнейших мест в регулировании обменных процессов питания растений. Электрохимический потенциал учитывает химический потенциал μ и электрическую работу $W_{\text{эл.}}$. Замена электрохимического потенциала при транспорте ионов через мембрану из фазы А в фазу В определяется по формуле [69]

$$\Delta \tilde{\mu} = \mu_B^0 - \mu_A^0 + RT \ln \frac{C_B}{C_A} + zF \Delta \varphi, \quad (1.5)$$

где μ^0_A, μ^0_B – химический потенциал фазы А и В соответственно;

C_A, C_B – концентрация ионов фазы А и В;

$\Delta\varphi$ – разность электрических потенциалов на мембране.

Мембранный потенциал характеризуется разницей электрических потенциалов между поверхностями плазматической мембраны клетки. В состоянии покоя электрический потенциал цитоплазмы $\varphi_{ц.}$ является отрицательным относительно электрического потенциала внешней среды φ_0 (мембранный потенциал в состоянии покоя составляет $-30 \dots -100$ мВ).

Движущей силой для пассивного потока ионов через мембрану является градиент электрохимического потенциала. В соответствии с теорией поля Гольдмана-Ходжки-Катца допускают, что градиент электрического потенциала в мембране постоянный

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{E}{d}, \quad (1.6)$$

где E – мембранный потенциал;

d – толщина мембраны.

При этом плотность потока ионов через мембрану описывается выражением

$$J_s = \frac{RTu_s}{F} \left(\frac{dc_s}{dx} + \frac{c_s z_s F}{RT} \frac{E}{d} \right) \quad (1.7)$$

После выполнения ряда преобразований с учетом коэффициента проницаемости P_s плотность потока определяется по формуле [69]

$$J_s = P_s z_s \frac{FE}{RT} \frac{[s]_y - [s]_0 \exp\left(-z_s \frac{FE}{RT}\right)}{1 - \exp\left(-z_s \frac{FE}{RT}\right)} \quad (1.8)$$

Теория постоянного поля основывается на принципе независимости [71]. В соответствии с формулированием А. Ходжкина и А. Хаксли принцип независимости заключается в том, что возможность перемещения ионов в интервале времени не зависит от наличия других ионов.

С учетом принципа независимости после дальнейших преобразований получают уравнение плотности тока

$$I_s = P_s z_s^2 \frac{F^2 E}{RT} \frac{[s]_y - [s]_0 \exp\left(-z_s \frac{FE}{RT}\right)}{1 - \exp\left(-z_s \frac{FE}{RT}\right)} \quad (1.9)$$

На основании теории постоянного поля определяется мембранный потенциал, с условием, когда мембрана проницаема для нескольких видов ионов и когда суммарный ионный ток равняется нулю

$$I = 0 = I_{Na} + I_K + I_{Cl} \quad (1.10)$$

Теория постоянного поля предусматривает феномен исправления для токов, которые переносятся ионами, концентрация которых в середине и

вокруг клеток является разной. Ток, который протекает в клетке, принимают за отрицательный, а ток, направленный на внешнюю сторону клетки – положительный.

Изменение ионной проницаемости, которая происходит в ответ на деполяризацию мембраны, А. Ходжкин и А. Хаксли связывали с движением некоторых компонентов мембран, которые имеют электрический заряд или дипольный момент. В соответствии с этой гипотезой перемещение заряженных частиц под воздействием смены напряженности внешнего электрического поля мембраны приводит к изменению ее ионной проводимости и при определенных условиях приводит к стимуляции растительной ткани. В растительных клетках происходит смена ориентации дипольных моментов, при приложении потенциала прямой полярности, что приводит к стимуляции растений в целом.

При этом следует отметить, что практически неисследованными остаются вопросы магнитного поведения элементарных частиц структуры клеток под действием внешнего магнитного поля. Однако, для того, чтобы получить понятие о магнитных свойствах растительных объектов, необходимо изучить его поведение под воздействием внешних электромагнитных сил.

Поэтому, зная величину внешнего электромагнитного поля можно рассчитать необходимые электротехнические параметры и таким способом получить достаточно эффективные способы стимуляции растений.

Таким образом, изучение процессов, которые происходят под воздействием внешнего магнитного поля, являются актуальными и представляют значительный практический интерес для дальнейших научных разработок в области разработки новейших электромагнитных нанотехнологий в сооружениях защищенного грунта [19].

1.4 Анализ методов и устройств для измерений функций газообмена биологических объектов

Методы исследования газообмена биологических объектов растительного и животного происхождения разрабатывались на протяжении двух столетий и основывались на различных принципах измерения, таких как манометрия, амперметрия, массспектрометрия, радиометрия, оптико-акустический и парамагнитный анализ газов и др.

Измерения в этой области связаны с определением количества углекислого газообмена растений и семян основаны на поглощении CO_2 щелочью. Принцип измерения заключается в определении углекислоты путем количественного поглощения ее раствором щелочи и последующего измерения концентрации этого раствора по отношению к контрольному [73, 74].

Для определения концентрации раствора, поглощающего углекислоту, используют способы титрования: объемное - раствором кислоты в присутствии индикатора, электрометрическое - по величине омического сопротивления щелочи и др. Приборы на основе объемного титрования, несмотря на широкое применение, отличаются громоздкостью, хрупкостью из-за стеклянных частей, ограниченной точностью измерений [75].

Электрометрические приборы, обладая высокой чувствительностью измерений (0,004 мг CO_2 /л), не дают возможности получить очень важную для исследования процесса газообмена концентрацию CO_2 в воздухе в момент измерения [76].

Методы, основанные на измерении pH раствора при его контакте с исследуемым воздухом, с последующим вычислением по полученным данным концентрации углекислоты в воздухе, являются одними из лучших. Методы измерения pH, несмотря на хорошие качества, обладают существенными недостатками, к числу которых следует отнести визуальное определение измеряемой величины и большие ошибки измерений [77].

Измерение углекислоты по поглощению инфракрасного излучения, на основе которого разработаны оптико-акустические газоанализаторы,

отличается высокой чувствительностью и точностью измерений газообмена (до 0,001% CO₂) [78]. Однако, инерционность измерений и необходимость очищения исследуемого воздуха от водяных паров, имеющих максимум поглощения в инфракрасной области спектра, являются существенными недостатками этого способа измерения [79].

Особую группу определения газообмена составляют комплексные методы. С их помощью можно определить как количество выделенной углекислоты, так и объем поглощенного кислорода. Углекислота определяется путем поглощения ее щелочью, а кислород - путем измерения объема воды, заполняющей объем сосуда кислородом по мере изменения его объема [80].

Положительной стороной описываемых методов является возможность определять как углекислоту, так и кислород, однако их чувствительность и точность невелика и поэтому в большинстве случаев при использовании этих методов требуются длительные экспозиции [75].

При углубленном анализе газообмена следует проводить одновременное измерение газообмена биологических веществ, по количеству выделенного или поглощенного кислорода. Данные измерения - объемный газовый анализ проб газа, периодически отбираемых из приемника с объектом. Обычно при этом проба газа приводится в соприкосновение с раствором пирогаллола, и весь кислород, имевшийся в пробе, поглощается им. По изменению объема газа судят о концентрации кислорода, но такие измерения не дают возможности достоверно судить о процессах газообмена [75, 81].

Точные результаты дает метод, основанный на применении масс-спектроскопических измерений содержания компонентов в газовой смеси. Данный метод нашел применение для исследований газообмена со стабильными и радиоактивными изотопами. Несмотря на простоту принципа измерения, практическое его осуществление сопровождается многими

трудностями и требует сложной электронно-вакуумной аппаратуры [75, 81, 82].

Из всех методов исследования газообмена по кислороду наиболее широкое распространение нашел - манометрический [75]. Преимуществом манометрии является высокая чувствительность, регистрация показаний за короткий промежуток времени, возможность работы при высоком содержании кислорода и одновременно изучение газообмена двух газов (CO_2 и O_2). В силу указанных преимуществ манометрический способ занимает особое положение даже в сравнении с таким методом, как оптико-акустический [75, 81].

В основе манометрического метода широкое распространение получил метод Варбурга. Обычно манометрический прибор представляет собой термостатную ванну, снабженную специальным механизмом для укрепления и приведения в качательное движение набора манометров с присоединенными к ним на шлифах сосудиками. Из разработанных в последнее время приборов манометрического типа заслуживает внимание респирометр с повышенной точностью и графической записью процесса газообмена [82]. Поставленная цель достигается с помощью применения в микрореспирометрах стандартных микропипеток (0,1 мм) с ценой деления $0,001 \text{ мм}^3$. Тонкий внутренний диаметр микропипетки позволяет улавливать малые перемещения водяного столба манометрической жидкости. Существенными недостатками рассмотренных устройств являются: необходимость калибровки измерительных сосудов, громоздкая и хрупкая манометрическая техника, невозможность автоматизации процесса измерений. В связи с вышеизложенным, необходимо разработать респирометры, исключая указанные недостатки.

Из анализа литературных данных [83, 84] следует, что измерение функций дыхания биологических веществ можно проводить по изменению диэлектрической проницаемости газа, окружающего биологический объект.

Поляризация $P(\omega)$ газа атмосферы, возникающая под влиянием поля СВЧ, определяется [84, 193]

$$P(\omega) = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3KT} \cdot \frac{1}{1 + I\omega\tau} \right], \quad (1.11)$$

где ε - диэлектрическая проницаемость;

M - молекулярный вес;

ρ - плотность газа;

N - число Авогадро;

α_0 - средняя поляризуемость молекулярного газа;

μ - постоянный дипольный момент;

K - постоянная Больцмана;

T - абсолютная температура;

τ - время релаксации.

Для внешних полей с частотой меньше 100 ГГц $\omega\tau \ll 1$ и выражение (1.11) записывается

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N}{3} \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3KT} \right] \quad (1.12)$$

Для неполярных газов $\mu=0$, а выражение (1.12) имеет вид

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{4\pi N\alpha_0}{3} \quad (1.13)$$

Выражение (1.13) для идеального газа запишется

$$\varepsilon - 1 = K_1 \frac{P}{T} \quad (1.14)$$

Для полярных газов

$$\varepsilon - 1 = \frac{\rho}{M} 4\pi N \left[\alpha_0 + \frac{\mu^2}{3KT} \right] \quad (1.15)$$

и с учетом (1.14)

$$\varepsilon - 1 = K_2 \frac{P}{T} \left(A + \frac{B}{T} \right), \quad (1.16)$$

где K_2 , A , B - постоянные коэффициенты.

Предполагая выполнимость закона о парциальных давлениях (закон Дальтона) диэлектрическая проницаемость смеси полярных и неполярных газов можно записать как сумму вида

$$\varepsilon - 1 = \sum_i K_{1i} \frac{P_i}{T} + \sum_q K_{2q} \frac{Pq}{T} \left(Aq + \frac{Bq}{T} \right). \quad (1.17)$$

С учетом наличия при газообмене углекислого газа (CO_2), сухого воздуха и водяного пара, выражение для « ε » запишется

$$\varepsilon - 1 = K_{11} \frac{P_d}{T} + K_{21} \frac{l}{T} \left(A + \frac{B}{T} \right) + K_{12} \frac{P_l}{T}, \quad (1.18)$$

где P_d - давление сухого воздуха;

l - парциальное давление водяного пара;

P_l - парциальное давление CO_2 .

Из анализа (1.18) следует, что с использованием метода измерений функции дыхания биологических объектов по величине ДП газа отпадает необходимость в определении количества O_2 и CO_2 , так как любые количественные изменения CO_2 и O_2 будут пропорциональны изменению ДП газа, окружающего объект.

Диэлькометрические методы измерения дыхания биологических веществ предъявляют высокие требования к чувствительности измерений: до 10^{-8} для $\Delta\epsilon'$ и $10^{-6} - 10^{-7}$ для $\Delta\epsilon''$. Из анализа измерений ДП газов следует, что резонаторные методы измерения ДП газов могут быть использованы для измерения функции дыхания биологических объектов [202]. Теория всех методов проста и справедлива для всех типов резонаторов. Соотношения для диэлектрических параметров газа имеет вид [83]

$$\Delta\epsilon' = \frac{2\Delta f}{f_0}; \Delta\epsilon'' = \left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_2} \right), \quad (1.19)$$

где Δf - изменение частоты резонатора при дыхании биологического объекта;

Q_0 и Q_l - добротности резонатора без газообмена и при наличии газообмена.

Однако данный вопрос требует не столько теоретических, сколько экспериментальных исследований.

1.5 Анализ явления намагничивания в гетерогенных структурах

Известно, что магнитные свойства электротехнологического оборудования при работе в магнитных полях в значительной мере зависят от структуры металлов и с этой точки зрения являются актуальными для дальнейших исследований. Данные известных научных исследований [96-100] указывают на значительный объем работ, которые имеют научный и практический характер.

Предположим, что ферромагнитные частицы равномерно распределены в немагнитной матрице. При внесении такой системы в магнитное поле размеры системы будут изменяться.

При наличии магнитного поля частицы намагничиваются и приобретают магнитные моменты μ_i , которые обусловлены наличием магнитных зарядов частиц. Под действием магнитного поля ферромагнетик изменяет свои размеры (деформируется). Для того чтобы описать деформацию сплошной среды, необходимо рассмотреть отдельную частицу вместе с некоторой бесконечно малой ее окрестностью.

Деформацию тела вблизи данной частицы разложим на составляющие движения:

- поступательное перемещение частиц вместе с окрестностью из точки $\bar{r}$ в точку $\bar{r}'$;
- поворот окрестности как твердого вокруг некоторой оси, проходящей через частицу, то есть через точку $\bar{r}'$;
- перемещение одних частиц окрестности относительно других частиц, при котором изменяется расстояние между этими частицами при деформации [96].

Рассмотрим уравнение равновесия сплошной среды. Выделим объем V и частицу с объемом V_i . Применим к этому объему условия деформации тела вблизи данной частицы и условия равновесия сплошной среды, а именно:

- главный вектор всех сил, приложенных к частицам объема, включая и силы инерции, равен нулю;

– главный момент относительно какой-либо точки всех сил, приложенных к частицам объема, включая и силы инерции, равен нулю.

Если обозначить через ρ плотность; $\bar{F}$ - заданную внешнюю силу, приходящуюся на единицу массы; $\bar{P}_n$ - напряжения, на площадку с нормалью $\bar{n}$; Π - тензор напряжения (рис. 1.1), в этом случае указанные условия сводятся к следующим двум уравнениям:

$$\int_V \rho \cdot \bar{F} \cdot dv + \oint_S \bar{P}_n ds = 0, \quad (1.20)$$

$$\int_V \rho [\bar{r}, \bar{F}] \cdot dv + \oint_S [\bar{r}, \bar{P}_n] \cdot ds = 0 \quad (1.21)$$

так как

$$\oint_S \bar{P}_n ds = \int_V \text{div} \Pi \cdot dv \quad (1.22)$$

в этом случае уравнение (1.22) можно задавать в виде

$$\int_V \{ P\bar{F} + \text{div}\Pi \} dv = 0 \quad (1.23)$$

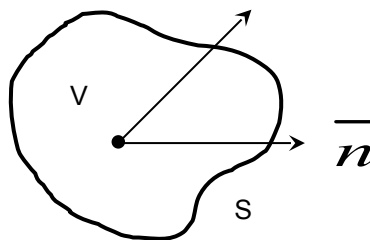


Рис.1.1.1. Часть выделенного объема континуума модели

В силу произвольности объема V следует основное уравнение механики сплошной среды

$$\rho \cdot \bar{F} + \text{div} \Pi = 0, \quad (1.24)$$

где $\rho \cdot \bar{F} = \psi$ - объемная сила, тогда уравнение (1.24) принимает вид

$$\psi + \text{div} \Pi = 0 \quad (1.25)$$

Покажем, что тензор упругих напряжений есть симметричный тензор. Для этого преобразуем в формуле (1.21) поверхностный интеграл в объемный интеграл [97]

$$\begin{aligned} \oint_S [\bar{r}, \bar{P}_n] \cdot ds &= \oint_S \left[[\bar{r}, \bar{P}_1] \cos(\bar{n}, x_1) + [\bar{r}, \bar{P}_2] \cos(\bar{n}, x_2) + [\bar{r}, \bar{P}_3] \cos(\bar{n}, x_3) \right] \cdot ds = \\ &= \int_V \left\{ \frac{\partial [\bar{r}, \bar{P}_1]}{\partial x_1} + \frac{\partial [\bar{r}, \bar{P}_2]}{\partial x_2} + \frac{\partial [\bar{r}, \bar{P}_3]}{\partial x_3} \right\} \cdot dv = \int_V \left\{ \left[\bar{r}_1 \left(\frac{\partial \bar{P}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{P}_3}{\partial x_3} \right) + \left[\frac{\partial \bar{r}}{\partial x_1}, \bar{P}_1 \right] + \right. \right. \\ &+ \left. \left[\frac{\partial \bar{r}}{\partial x_2}, \bar{P}_2 \right] + \left[\frac{\partial \bar{r}}{\partial x_3}, \bar{P}_3 \right] \right\} \cdot dv = \int_V \left[\bar{r}_1 \cdot \text{div} \bar{I} \right] \left[\bar{i}_1 \cdot \bar{P}_1 \right] + \left[\bar{i}_2 \cdot \bar{P}_2 \right] + \left[\bar{i}_3 \cdot \bar{P}_3 \right] \cdot dv \end{aligned} \quad (1.26)$$

или

$$\int_V [\bar{r}_1 \cdot \psi + \text{div} \Pi] \cdot dv + \int_V [\bar{i}_1 \cdot \bar{P}_1] + [\bar{i}_2 \cdot \bar{P}_2] + [\bar{i}_3 \cdot \bar{P}_3] \cdot dv = 0 \quad (1.27)$$

В полученном уравнении (1.27) исходя из уравнения (1.24) первый интеграл равен нулю, а второй в силу произвольности объема дает выражение

$$[\bar{i}_1 \cdot \bar{P}_1] + [\bar{i}_2 \cdot \bar{P}_2] + [\bar{i}_3 \cdot \bar{P}_3] = 0 \quad (1.28)$$

Условие (1.28) является условием симметричности тензора Π . Если уравнение (1.28) умножить векторно на любой вектор $\bar{a}$, то получим произведение вида:

$$\begin{aligned} [[\bar{i} \cdot \bar{P}_1] \cdot \bar{a}] &= \bar{P}_1(\bar{i} \cdot \bar{a}) - \bar{i}(\bar{P}_1 \cdot \bar{a}) \\ \bar{P}_1(\bar{i}_1 \cdot \bar{a}) + \bar{P}_2(\bar{i}_2 \cdot \bar{a}) + \bar{P}_3(\bar{i}_3 \cdot \bar{a}) - \bar{i}_1(\bar{P}_1 \cdot \bar{a}) - \bar{i}_2(\bar{P}_2 \cdot \bar{a}) - \bar{i}_3(\bar{P}_3 \cdot \bar{a}) &= 0 \\ \bar{P}_1(\bar{i}_1 \cdot \bar{a}) + \bar{P}_2(\bar{i}_2 \cdot \bar{a}) + \bar{P}_3(\bar{i}_3 \cdot \bar{a}) &= (\bar{I} \cdot \bar{a}) \\ \bar{i}_1(\bar{P}_1 \cdot \bar{a}) + \bar{i}_2(\bar{P}_2 \cdot \bar{a}) + \bar{i}_3(\bar{P}_3 \cdot \bar{a}) &= (\bar{I} \cdot \bar{a}) \end{aligned} \quad (1.29)$$

$(\Pi_c \cdot \bar{a}) - (\Pi \cdot \bar{a}) = 0$, откуда $(\Pi_c - \Pi) \cdot \bar{a} = 0$ в силу произвольности вектора $\bar{a}$ получим выражение

$$\Pi_c = \Pi \quad (1.30)$$

Таким образом, тензор напряжений Π является симметричным. Рассмотрим, как изменяется объем тела под действием внешних сил. Обозначим вектор смещения некоторой частицы M тела выражением

$$\bar{u} = \bar{M}_o \cdot \bar{M}, \quad (1.31)$$

где M_0 - положение точки до деформации тела;

M - положение после деформации.

Для этого тела запишем уравнение механики сплошной среды

$$\psi + \text{div} \Pi = 0, \quad (1.32)$$

где $\Pi = \delta$ - направление.

Чтобы получить основное уравнение теории упругости, необходимо установить связь между напряжениями (δ) и деформацией тела ($\bar{u}$).

Возьмем две соседние частицы упругого тела M_0 и M_1 , положение которых до деформации характеризовалось радиус-векторами $\bar{r}$ и $\bar{r} + d\bar{r}$, а после деформации положение этих точек будет характеризоваться радиус-векторами $\bar{r}' = \bar{r} + \bar{u}(r)$ или $\bar{r} + d\bar{r} = \bar{r} + d\bar{r} + u(\bar{r} + d\bar{r}) = \bar{r} + d\bar{r} + \bar{u} + d\bar{u}$, следовательно, смещение второй частицы после деформации будет

$$\bar{u}(\bar{r} + d\bar{r}) = \bar{u} + d\bar{u} = \bar{u} \left(\frac{d\bar{u}}{d\bar{r}} \cdot d\bar{r} \right) \quad (1.33)$$

применяя формулу

$$\bar{u}(\bar{r} + d\bar{r}) = d\bar{a} \cdot (\Phi, d\bar{r}) + \frac{1}{2} [\text{rot} \bar{a}, d\bar{r}] \quad \Phi = \frac{1}{2} \left[\frac{d\bar{a}}{d\bar{r}} + \nabla \bar{a} \right] \quad (1.34)$$

или

$$\bar{u}(\bar{r} + d\bar{r}) = \bar{u} + (\Phi, d\bar{r}) + \frac{1}{2} [\text{rot} \bar{u}, d\bar{r}], \quad (1.35)$$

где Φ – симметричная часть тензора $\frac{d\bar{u}}{d\bar{r}}$ с компонентами.

$$\left. \begin{aligned} \hat{O}_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1}; & \hat{O}_{12} = \hat{O}_{21} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \\ \hat{O}_{22} &= \frac{\partial u_2}{\partial x_2}; & \hat{O}_{23} = \hat{O}_{32} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \hat{O}_{33} &= \frac{\partial u_3}{\partial x_3}; & \hat{O}_{13} = \hat{O}_{31} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

Первый член $\bar{u}$ уравнения (1.35) характеризует смещение частицы M_o , а второй $(\Phi, d\bar{r})$ - деформацию частицы. Поэтому бесконечно малое перемещение континуума модели определяется уравнением (1.35), которое состоит [98]:

- из поступательного перемещения частицы, как одного целого;
- из вращательного перемещения частицы;
- из деформации частицы.

Диагональные элементы симметричного тензора Φ имеют следующее значение. Если взять точку M_1 так, что вектор $d\bar{r} = \overline{M_o M_1}$ будет направлен параллельно оси x , а $dx_2 = dx_3 = 0$, то после деформации вектор $\overline{M_o M_1}$ превратится в вектор $d\bar{r} + d\bar{u}$ с проекциями

$$dx_1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \cdot dx; \quad \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \cdot dx; \quad \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \cdot dx \quad (1.37)$$

расстояние между частицами M_o и M_1 , после деформации будет

$$dx_1 \sqrt{\left(1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1}\right)^2} \approx dx_1 \left(1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right) \quad (1.38)$$

Относительное удлинение рассматриваемого образца после деформации равно

$$\frac{dx_1 \left(1 + \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right) - dx_1}{dx_1} = \frac{du_1}{dx_1} = \Phi_{11} \quad (1.39)$$

Диагональные элементы тензора Φ определяют относительные удлинения после деформации линейных элементов, параллельных осям координат [98].

Определим значение первого инварианта тензора Φ

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \Phi \cdot \text{div} \bar{u} \quad (1.40)$$

Если взять параллелепипед с ребрами dx_1, dx_2, dx_3 , параллельными осям координат, то после деформации его ребра удлинятся и будут равными (с точностью до бесконечно малых величин второго порядка)

$$dx_1(1 + \Phi_{11}); \quad dx_2(1 + \Phi_{22}); \quad dx_3(1 + \Phi_{33}) \quad (1.41)$$

После деформации объем параллелепипеда будет равен

$$\begin{aligned} dv_1 &= dx_1 dx_2 dx_3 (1 + \hat{O}_{11}) + (1 + \hat{O}_{22}) + (1 + \hat{O}_{33}) \approx \\ &\approx dx_1 dx_2 dx_3 (1 + \hat{O}_{11} + \hat{O}_{22} + \hat{O}_{33}) \end{aligned} \quad (1.42)$$

Сравнивая это выражение с первоначальным объемом параллелепипеда $dv_1 = dx_1 dx_2 dx_3$, имеем, что

$$\Phi_{11} + \Phi_{22} + \Phi_{33} = \frac{dv_1 - dv}{dv} \quad (1.43)$$

Уравнение (1.43) дает относительное изменение объема элемента, а его тензор имеет три взаимно перпендикулярных направления. Если соответствующие главные значения тензора Φ обозначим через $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, то уравнение (1.43) можно записать в виде

$$\varepsilon_{kk} = \frac{\partial u_k}{\partial x_k} = \text{div} u, \quad (1.44)$$

где $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ - относительное изменение объема.

Таким образом, с помощью векторного и тензорного исчисления описано явление и механизм взаимодействия ферромагнитных частиц в неферромагнитной матрице при наложении магнитного поля в гетерогенных системах. При наложении магнитного поля необходимо учитывать деформацию системы, состоящую из поступательного перемещения частиц, как одного целого, из вращательного перемещения частицы и деформации частиц [101].

Выводы по разделу:

1. Из анализа научно-технической литературы установлено, что для повышения продуктивности тепличных культур необходимо использовать электротехнические и магнитные системы с контролем развития растений по величине диэлектрической проницаемости газообмена растений с окружающей средой.

2. Изучение процессов преобразования электрической и магнитной энергии в гетерогенных структурах сооружений защищенного грунта являются актуальными и представляют значительный практический интерес для дальнейших научных исследований.

3. Наиболее полно отображают методы векторного и тензорного исчисления явления и механизм взаимодействия ферромагнитных частиц в неферромагнитной матрице при наложении магнитного поля в гетерогенных системах. При наложении магнитного поля необходимо учитывать деформацию системы, состоящую из поступательного перемещения частиц, как одного целого, из вращательного перемещения частицы и деформации частиц.

РАЗДЕЛ 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С СЕМЕНАМИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

2.1 Стационарное электрическое поле в грунте, созданное одиноким заряженным штырем

Как было показано, существует достаточно большое число работ отечественных и зарубежных авторов, в которых с теоретической и экспериментальной точек зрения, рассматривается взаимодействие высокочастотных электромагнитных полей СВЧ и КВЧ диапазонов с биологическими объектами разной природы и с разными геометрическими и электрофизическими свойствами. В результате этого взаимодействия можно получать изменение жизненных процессов, происходящих в тканях этих объектов. Такие изменения могут нести как позитивный, так и негативный характер.

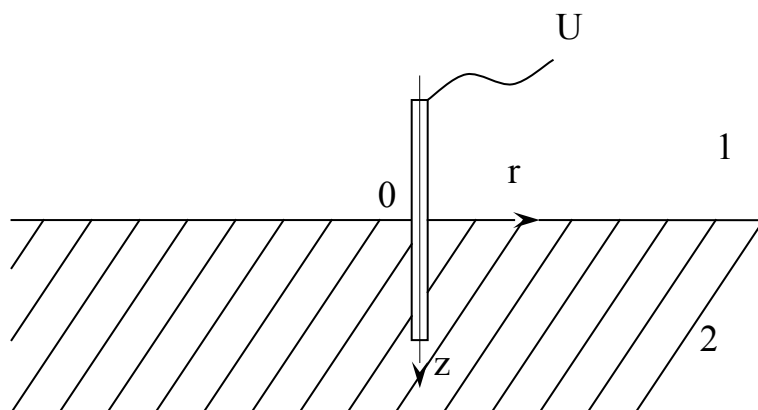
Исследования подобного рода проводились и с семенами сельскохозяйственных культур с целью повышения их урожайности,

улучшения биохимических свойств, а также устойчивости по отношению к возможным вредителям. При этом, как правило, подобная обработка семян электромагнитными полями происходила в воздушной среде в свободном пространстве или в направляющих системах.

Однако следует отметить, что стимулирующее или ингибирующее действие на биологические объекты может оказывать и стационарное электрическое поле, в котором находятся данные объекты. В полной мере это относится и к семенам и корневым системам сельскохозяйственных культур, находящихся в грунте.

Очевидно, что для проведения теоретического исследования такого взаимодействия необходимо вначале рассмотреть модель распределения электростатического поля в почве, вызванного помещенным в грунт единичным заряженным штырем, а также системой таких штырей, как с одноименными, так и с разноименными зарядами. Подобные исследования и будут проведены в данном разделе.

Итак, пусть в землю помещен одиночный металлический штырь с заданными размерами и заданным постоянным потенциалом, поданным на него (рис. 2.1). Поверхность земли при этом будем считать плоской.



1 - пространство над поверхностью почвы; 2 - почва

Рис. 2.1. Одиночный металлический штырь в грунте, с подведенным напряжением U

Среда 1, находящаяся над границей раздела, является воздухом и характеризуется диэлектрической проницаемостью ε_1 и магнитной проницаемостью μ_0 , среда 2 - это почва с проницаемостями ε_2 и μ_0 . Поскольку обе указанные среды являются немагнитными, то их магнитные проницаемости одинаковы и равны проницаемости свободного пространства μ_0 . Диэлектрическую проницаемость воздуха можно считать такой же, как и у свободного пространства, то есть $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$.

В принципе создаваемое заряженным штырем в почве поле не является настоящим электростатическим, поскольку почва обладает некоторой электропроводностью ($\sigma \neq 0$), причем величина этой электропроводности растет с ростом влажности почвы и увеличением в ней количества различных микроэлементов. Следовательно, заряженный штырь постепенно терял бы свой заряд при отсутствии подаваемого на него постоянного напряжения. Но поскольку в данном случае электропроводность не очень велика, а создаваемые заряженным штырем токи достаточно малы, можно считать, что магнитная энергия процесса остается пренебрежимо малой по сравнению с электрической. Поэтому в дальнейшем будем пользоваться представлениями электростатики.

Как известно [102], система уравнений Максвелла в случае электростатики имеет вид:

$$\begin{cases} \text{rot} \vec{E} = 0; \\ \text{div} \vec{D} = \rho; \\ \vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}, \end{cases} \quad (2.1)$$

где $\vec{E}$ - вектор напряженности электрического поля; $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \vec{E}$ - вектор электрической индукции;

ρ - плотность электрического заряда;

ε_0 - электрическая постоянная;

ε_2 - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Считая почву, в которой находится заряженный металлический штырь, изотропной и квазиоднородной, применим к первому уравнению (2.1) операцию rot

$$\text{rot rot} E = 0$$

откуда получаем [103, 104]

$$\text{grad div} E - \Delta E = 0$$

или с учетом второго и третьего равенств (2.1)

$$\Delta E = \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_2}, \quad (2.2)$$

где Δ - оператор Лапласа.

В том случае, если плотность электрического заряда ρ равна нулю или константе, уравнение (2.2) приобретает вид

$$\Delta E = 0, \quad (2.3)$$

что соответствует нашему предположению об исчезающе малой величине токов, вызванных одиночным заряженным металлическим штырем. Таким образом, рассматриваемая задача сводится к векторному уравнению Лапласа относительно напряженности электрического поля E .

Однако, учитывая известное соотношение [104, 105]

$$E = -\text{grad} \psi, \quad (2.4)$$

удобнее записать и решить скалярное уравнение Лапласа для потенциала ψ . Действительно, из второго уравнения (2.1) получаем

$$\text{div} \varepsilon_0 \varepsilon_2 E = \rho$$

или

$$- \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_2 \operatorname{grad} \psi = \rho \quad (2.5)$$

Поскольку почву мы считаем изотропной и однородной, то окончательно из (2.5) с учетом соотношения $\operatorname{div} \operatorname{grad} \psi = \Delta \psi$ и равенства нулю плотности электрического заряда получаем

$$\Delta \psi = 0, \quad (2.6)$$

то есть скалярное уравнение Лапласа для электрического потенциала.

Решим краевую задачу Дирихле [105] для уравнения Лапласа (2.6). Для этого используем метод разделения переменных.

Пусть штырь, помещенный в землю, имеет цилиндрическую форму. Кроме того, его длина значительно больше глубины, на которой находятся семена сельскохозяйственных растений или их корневая система. В этом случае задачу о распределении электрического потенциала в почве можно решать в двумерном варианте в полярной системе координат. Кроме того, поскольку по металлическому штырю электрический заряд распределяется равномерно, то градиент потенциала вдоль штыря будет равен нулю.

Следовательно, $\left. \frac{\partial \psi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$ и вертикальная составляющая напряженности электрического поля будет отсутствовать.

Итак, находим функцию ψ , удовлетворяющую уравнению (2.6) вне поперечного сечения металлического штыря и граничному условию:

- на границе сечения штыря

$$\psi = U, \quad (2.7)$$

где U - поданное на штырь напряжение.

Рассмотрим полярную систему координат (r, φ) с началом в центре круга, который совпадает с осью цилиндрического штыря (рис. 2.1). В этой системе координат уравнение (2.6) будет иметь вид [104, 105]

$$\Delta\psi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (2.8)$$

Задачи подобного типа можно решать методом разделения переменных [105], поэтому положим

$$\psi(r, \varphi) = R(r) \Phi(\varphi) \quad (2.9)$$

Подставим (2.9) в (2.8)

$$\Phi(\varphi) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) + R(r) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (2.10)$$

Поскольку предполагается, что выражение (2.9) нулю не равно, а решение ищется вне стержня, то есть $r \neq 0$, умножим обе части (2.10) на

$\frac{r^2}{R(r) \Phi(\varphi)}$. В результате получаем

$$\frac{r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right)}{R(r)} = - \frac{\frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2}}{\Phi(\varphi)} \quad (2.11)$$

Очевидно, что изменение r не может повлиять на правую часть равенства (2.11), а изменение φ - на левую. Следовательно, это равенство возможно лишь в случае, если обе его части равны константе k . Таким образом, получаем два уравнения:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) - kR(r) = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^2 \hat{O}(\varphi)}{\partial \varphi^2} + k\hat{O}(\varphi) = 0$$

Второе уравнение (2.12) является однородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Корни его характеристического уравнения будут $\pm i\sqrt{k}$. Следовательно, решение самого уравнения имеет вид [102]

$$\Phi(\varphi) = C_1 \cos \sqrt{k}\varphi + C_2 \sin \sqrt{k}\varphi, \quad (2.13)$$

Поскольку рассматриваемая задача имеет осевую симметрию, то при обходе вокруг стержня на 360° функция $\psi(r, \varphi)$ должна вернуться к своему исходному значению. Это возможно при условии, что $\Phi(\varphi + 2\pi) = \Phi(\varphi)$, так как именно эта функция отвечает за зависимость от угловой координаты φ . Очевидно, что это возможно лишь при условии $\sqrt{k} = n$, где n - целое число. Таким образом

$$\Phi_n(\varphi) = C_{1n} \cos n\varphi + C_{2n} \sin n\varphi. \quad (2.14)$$

Решение первого уравнения (2.12) будем искать в виде

$$R(r) = r^m \quad (2.15)$$

Подставим (2.15) в это уравнение. В результате получаем

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial R(r^m)}{\partial r} \right) - k R(r^m) = 0. \quad (2.16)$$

После дифференцирования (2.16) и сокращения его на r^m получаем равенство $m^2 - n^2$ или $m = \pm n$. Таким образом,

$$R_n(r) = C_{3n} r^n + C_{4n} r^{-n} \quad (2.17)$$

Так как решение задачи должно быть ограничено на бесконечности, необходимо положить C_{3n} равным нулю. Следовательно,

$$\psi_n = C_{4n} r^{-n} (C_{1n} \cos n\varphi + C_{2n} \sin n\varphi) = \frac{1}{r^n} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \quad (2.18)$$

где $A_n = C_{1n} C_{4n}$, $B_n = C_{2n} C_{4n}$.

Очевидно, что решением задачи Дирихле для скалярного уравнения Лапласа (2.6) будет сумма всех решений (2.18)

$$\psi(r, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{r^n} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) \quad (2.19)$$

Чтобы получить частное решение рассматриваемой задачи из общего решения (2.19) необходимо воспользоваться граничным условием (2.7)

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{r_0^n} (A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi) = U, \quad (2.20)$$

где r_0 - радиус кругового сечения металлического штыря.

Будем считать, что напряжение U является функцией угловой координаты φ полярной системы координат. В этом случае его можно разложить в ряд Фурье [104] на отрезке $[0, 2\pi]$

$$U(\varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi. \quad (2.21)$$

Коэффициенты данного разложения определяются из соотношений [104]:

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U d\varphi = 2U \quad (2.22)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U \cos n\varphi d\varphi = 0 \quad (2.23)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U \sin n\varphi d\varphi = \frac{U}{n\pi} (1 - (-1)^n) \quad (2.24)$$

Сравнивая между собой ряды (2.20) и (2.21), получаем

$$A_0 = U; \frac{A_n}{r_0^n} = 0; \frac{B_n}{r_0^n} = \frac{U}{n\pi} (1 - (-1)^n)$$

то есть

$$A_0 = U; A_n = 0; B_n = \frac{Ur_n^0}{n\pi} (1 - (-1)^n) \quad (2.25)$$

Таким образом, частное решение для распределения электрического потенциала, в почве вокруг заряженного электрического штыря с заданными граничными условиями имеет вид

$$\psi(r, \varphi) = U + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \frac{U}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin n\varphi \quad (2.26)$$

Полученное выражение (2.26) позволяет найти напряженность создаваемого штырем электрического поля. С этой целью воспользуемся известным соотношением [102, 104]

$$E = - \text{grad} \psi$$

В полярной системе координат оно имеет вид

$$\vec{E} = - \frac{\partial \psi}{\partial r} \vec{e}_r^0 - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \vec{e}_\varphi^0, \quad (2.27)$$

где $\vec{e}_r^0$, $\vec{e}_\varphi^0$ - единичные орты по осям r и φ , соответственно.

Таким образом, в рассматриваемой задаче

$$\vec{E} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Ur_0^n}{\pi r^{n+1}} (1 - (-1)^n) \sin n\varphi \vec{e}_r^0 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Ur_0^n}{\pi r^{n+1}} (1 - (-1)^n) \cos n\varphi \vec{e}_\varphi^0 \quad (2.28)$$

При этом величина модуля напряженности электрического поля будет выглядеть следующим образом

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_\varphi^2} = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_0^n}{r^{n+1}} \quad (2.29)$$

где n - нечетно.

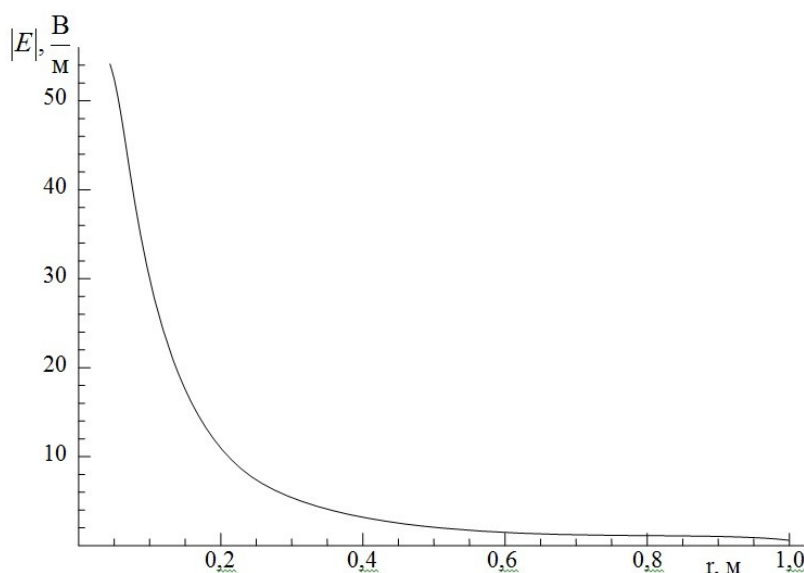


Рис. 2.2 Зависимость напряженности электрического поля в почве от расстояния до одиночного металлического штыря

На основании выражения (2.29) проведены численные расчеты распределения модуля напряженности электрического поля, создаваемого одиночным заряженным металлическим штырем, в плоскости перпендикулярной его оси (рис. 2.2). При этом напряжение, подаваемое на

штырь, бралось равным 100 В; радиус штыря - 0,01 м; рассматривалась зона вокруг штыря с радиусом до 1 м.

Приведенные выше выражения (2.26) и (2.29) относятся к случаю, когда центр системы координат совпадает с осью заряженного штыря. Однако, поскольку распределение электромагнитного поля инвариантно относительно выбранной системы координат, то при переходе к системе координат, у которой центр находится в произвольной точке, характер указанных выражений не изменятся. Несколько другой вид будут иметь лишь координаты рассматриваемой точки.

Пусть начало координат не совпадает с осью заряженного металлического штыря, погруженного в почву (рис. 2.3). Здесь $\vec{r}'$ соответствует радиус-вектору точки, совпадающей с осью штыря в перпендикулярной к нему плоскости; $\vec{r}_0$ - радиус-вектор точки N , лежащей на поверхности штыря; $\vec{r}$ - радиус-вектор произвольной точки M , в которой исследуется созданное штырем электрическое поле.

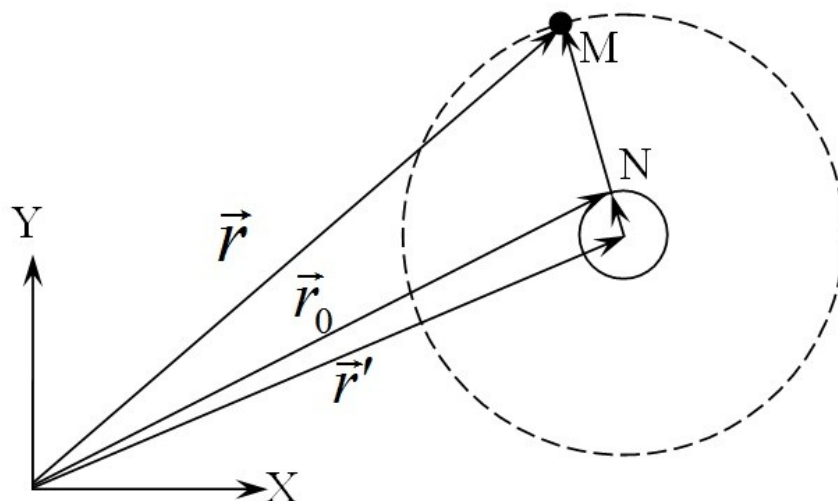


Рис. 2.3. Произвольное расположение одиночного металлического штыря в прямоугольной декартовой системе координат

В этом случае выражение (2.26) примет вид

$$\psi(r, \varphi) = U + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\vec{r}_0 - \vec{r}'|}{|r - r'|} \right)^n \frac{U}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin n\varphi, \quad (2.30)$$

а выражение (2.29) –

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_\varphi^2} = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{r}_0 - \vec{r}'|^n}{|r - r'|^{n+1}} \quad (2.31)$$

В дальнейшем будем использовать именно полученные выражения (2.30), (2.31).

2.2 Электрическое поле в грунте, созданное системой заряженных металлических штырей

Рассмотрим вначале стационарное электрическое поле, создаваемое двумя металлическими штырями. Будем считать, что на штыри подается одинаковый по величине, но противоположный по знаку потенциал $+U$ и $-U$. В отличие от рассмотренной выше задачи в данном случае создается перепад напряжений между штырями, что повлечет за собой возникновение токов, текущих между ними в почве. Однако, если грунт сухой, то его относительная диэлектрическая проницаемость ε_2 лежит в пределах 3...6, а удельная проводимость σ - в пределах $10^{-5} \dots 10^{-3} \frac{\text{См}}{\text{м}}$; для влажного грунта ε_2 лежит в пределах 10...30, а σ - $10^{-3} \dots 10^{-2} \frac{\text{См}}{\text{м}}$ [106]. Следовательно, величина текущего между штырями тока достаточно мала, чтобы создавать

существенное магнитное поле и оказывать достаточное влияние на величину существующего между штырями стационарного электрического поля.

Итак, пусть в почву погружены два металлических штыря с одинаковыми радиусами r_0 , оси которых для простоты лежат на координатной оси OX и равноудалены от начала координат (рис. 2.4). Такое расположение начала координат не является принципиальным, но дает возможность получить более простые аналитические выражения для потенциала и напряженности создаваемого стационарного электрического поля.

Поскольку создаваемые различными источниками электрические поля обладают свойством суперпозиции, то потенциал поля находится из выражения

$$\psi(r, \varphi) = \sum_{i=1}^2 \left[U_i + \frac{2U_i}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\vec{r}_0 - \vec{r}_i|}{|r - r_i|} \right)^n \frac{\sin n\varphi}{n} \right], \quad (2.32)$$

а модуль напряженности поля - из соотношения

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_\varphi^2} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^2 \left[U_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{r}_0 - \vec{r}_i|^n}{|r - r_i|^{n+1}} \right] \quad (2.33)$$

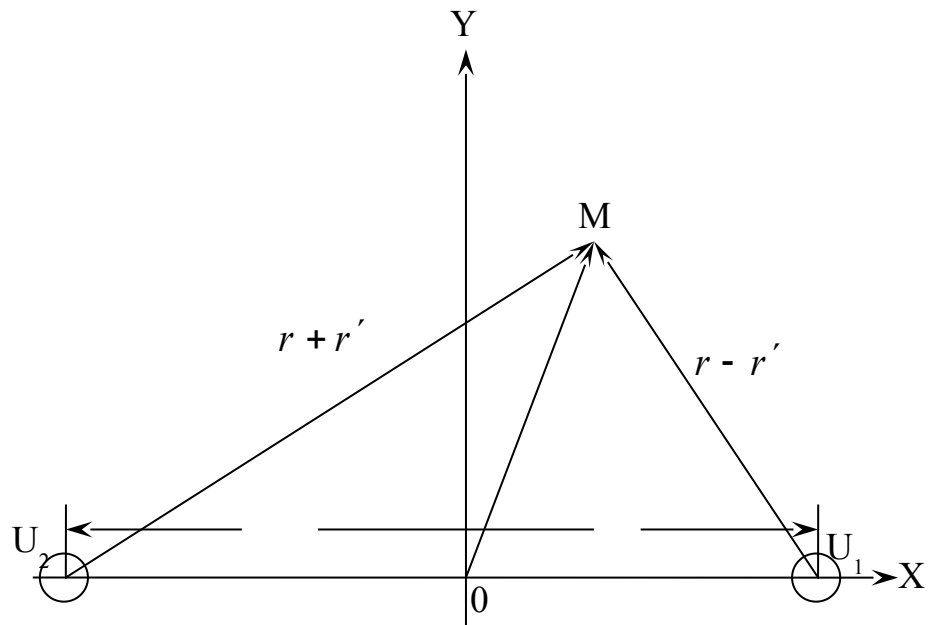


Рис. 2.4. Расположение двух параллельных заряженных штырей в плоскости, перпендикулярной их оси

В приведенных выражениях (2.32), (2.33) $r_1 = r'$, $r_2 = -r'$, $U_1 = U$, $U_2 = -U$, n - четное. Таким образом, для рассматриваемой на рис. 2.4 системы штырей потенциал и напряженность электрического поля выглядят следующим образом:

$$\psi(r, \varphi) = \frac{2U_i}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{|\vec{r}_{01} - \vec{r}'|}{|r - r'|} \right)^n - \left(\frac{|\vec{r}_{02} - \vec{r}'|}{|r - r'|} \right)^n \right] \frac{\sin n\varphi}{n} \quad (2.34)$$

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_\varphi^2} = \frac{2U}{\pi} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{r}_{01} - \vec{r}'|^n}{|r - r'|^{n+1}} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{r}_{02} - \vec{r}'|^n}{|r - r'|^{n+1}} \right] \quad (2.35)$$

Приведенные выше выражения позволяют построить картину распределения линий равных значений модуля стационарного электрического поля, вокруг погруженных в землю электрических штырей в плоскости, перпендикулярной их оси (рис. 2.5).

Расчет произведен в предположении, что потенциал между штырями равен 100 В, расстояние между ними равно 1 м, центр системы координат находится между штырями в точке с координатами (0, 0).

Распределение линий равного уровня рассмотрено в прямоугольнике со сторонами 3 м по осям ОХ и ОУ. Очевидно, что наибольший градиент напряженности создаваемого поля расположен на линии, соединяющей оси рассматриваемых штырей.

На рис. 2.6 приведена зависимость модуля напряженности электрического поля на линии, соединяющей оси двух штырей, от расстояния между этими осями. Из приведенного графика видно, что максимум напряженности приходится на участки, которые на рис. 2.5 остались белыми. При этом в случае разноименных зарядов на штырях посередине между их осями напряженность электрического поля становится равной нулю.

Из проведенных численных расчетов можно сделать вывод, что наибольшее воздействие на семена сельскохозяйственных растений статическое электрическое поле будет оказывать на участках, равноудаленных от нулевой координаты, то есть середины расстояния между осями штырей.

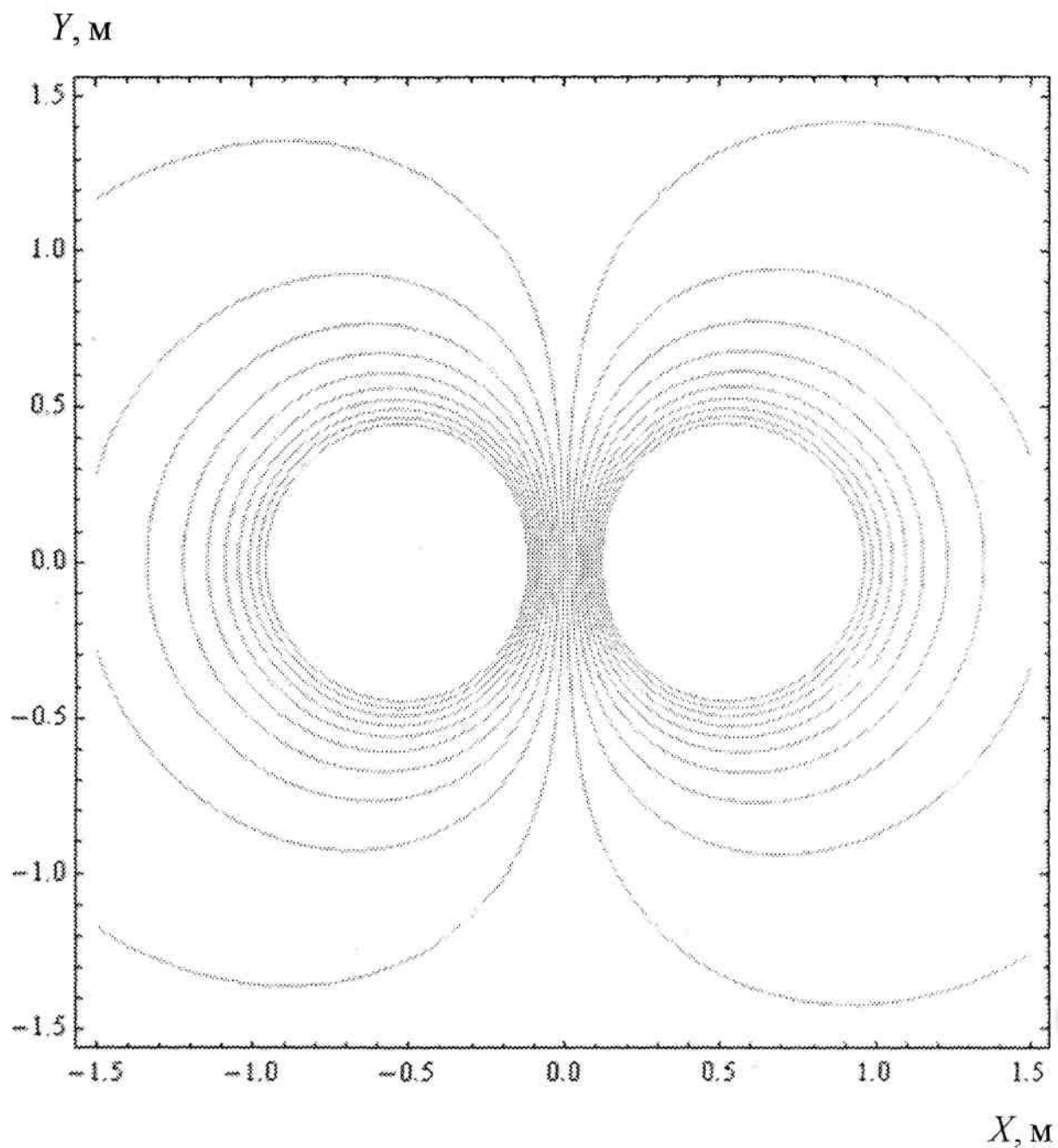


Рис. 2.5. Распределения линий равных значений модуля стационарного электрического поля вокруг погруженных в землю электрических штырей

При этом для данных расстояний между заряженными штырями границы этих участков лежат в пределах $\pm 0,25 \dots \pm 0,40$ м. При необходимости иметь другие размеры обрабатываемых участков следует изменить расстояние между штырями.

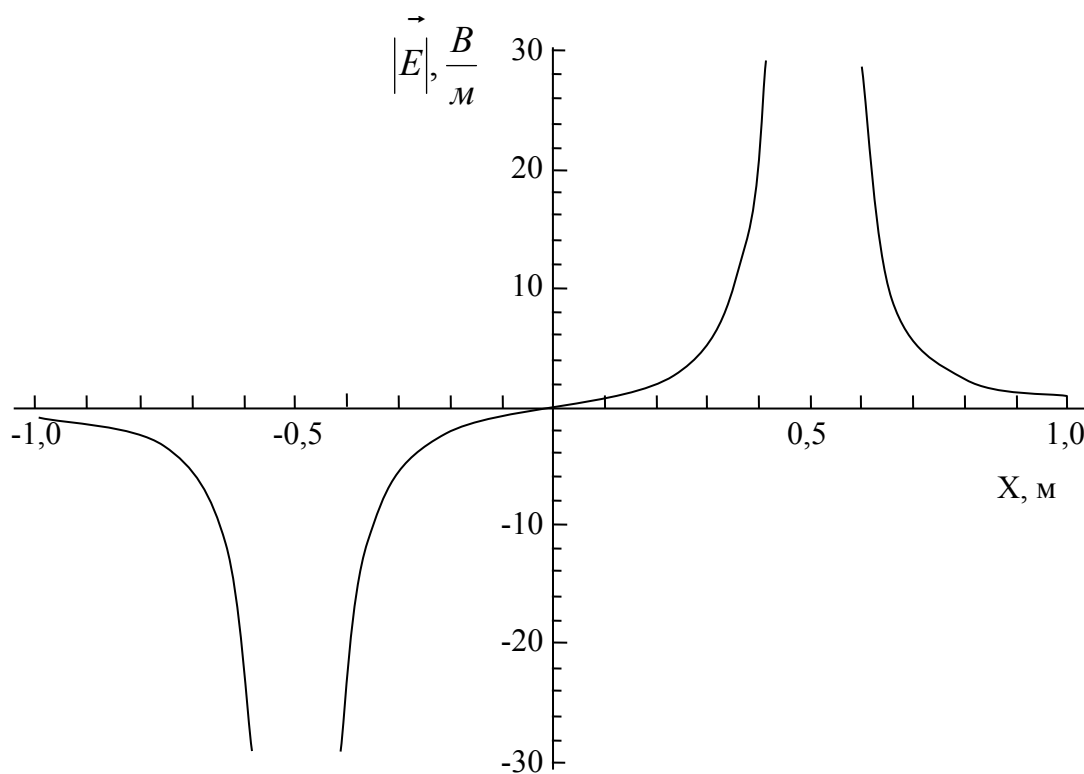


Рис. 2.6. Зависимость модуля напряженности электрического поля $|\vec{E}|$ от расстояния между осями двух штырей

Рассмотрим теперь участок грунта в форме квадрата, содержащий четыре заряженных штыря в его вершинах (рис. 2.7).

Участок расположен параллельно поверхности грунта. Начало прямоугольной системы координат расположено в центре квадрата равноудаленно от заряженных стержней. На всех стержнях имеется напряжение одинаковой величины U , но с чередующимся знаком. Иначе говоря, у каждого стержня ближайшие соседи имеют потенциал противоположного знака. Расстояние от центра системы координат до точки наблюдения M характеризуется радиус-вектором r , расстояние от начала координат до осей заряженных штырей определяется радиус-векторами r_1' , r_2' , r_3' и r_4' , соответственно. Таким образом, в точке M суммируются напряженности плоских электростатических полей, приходящих от вершин

квадрата с расстояний $r - r'_1$, $r - r'_2$, $r - r'_3$, $r - r'_4$. Длина сторон квадрата равна l .

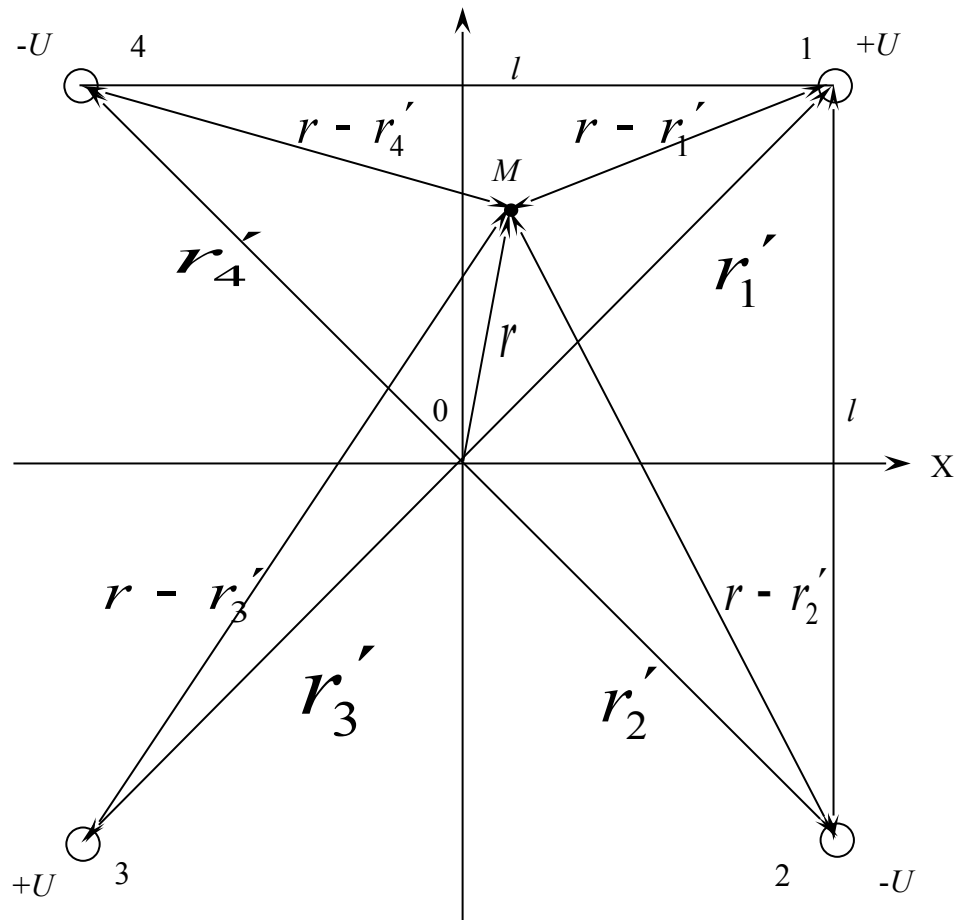


Рис. 2.7. Участок грунта в форме квадрата, содержащий четыре заряженных штыря в его вершинах

Определим модуль напряженности электростатического поля в точке M . С этой целью вновь воспользуемся выражением (2.33), но в виде

$$|\vec{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_\varphi^2} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^2 \left[U_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\vec{r}_{0i} - \vec{r}_i|^n}{|r - r_i|^{n+1}} \right] \quad (2.36)$$

В развернутом виде данное равенство выглядит следующим образом

$$|\vec{E}| = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\vec{r}_{01} - \vec{r}_1'|^n}{|r - r_1'|^{n+1}} - \frac{|\vec{r}_{02} - \vec{r}_2'|^n}{|r - r_2'|^{n+1}} + \frac{|\vec{r}_{03} - \vec{r}_3'|^n}{|r - r_3'|^{n+1}} - \frac{|\vec{r}_{04} - \vec{r}_4'|^n}{|r - r_4'|^{n+1}} \right) \quad (2.37)$$

Как и выше, здесь n - четное.

Проведен расчет для определения линий равных напряженностей электростатического поля, создаваемого четырьмя заряженными штырями в почве (рис. 2.8).

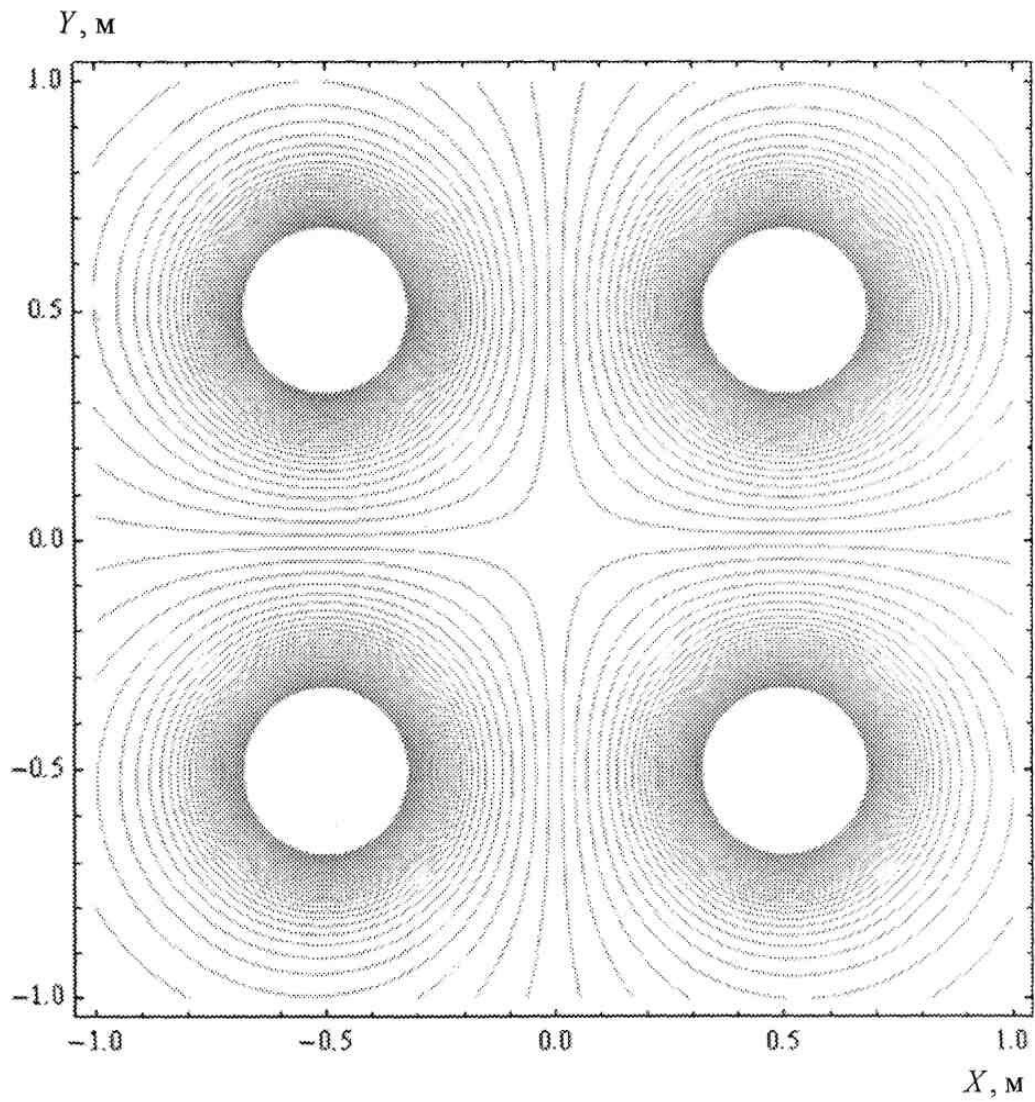


Рис. 2.8. Линии равных напряженностей электростатического поля, создаваемого четырьмя заряженными штырями в почве (диаметр штырей - 1 см)

Расчет проведен в предположении, что расстояние между осями штырей, лежащих на одной стороне квадрата, равен 1 м, величина подаваемого на них напряжения - ± 50 В, штыри имеют диаметр, равный 1 см. Расположение силовых линий показывает, что наиболее благоприятное нахождение семян растений или их корневой системы с точки зрения максимального воздействия внешнего электростатического поля - это линия, соединяющая оси заряженных штырей. Аналогичный расчет, сделанный для металлических штырей с диаметром 2 см (рис. 2.9), дает возможность сделать вывод о том, плотность силовых линий между разноименно заряженными штырями возрастает, то есть участок почвы, на котором напряженность электростатического поля минимальна, становится уже.

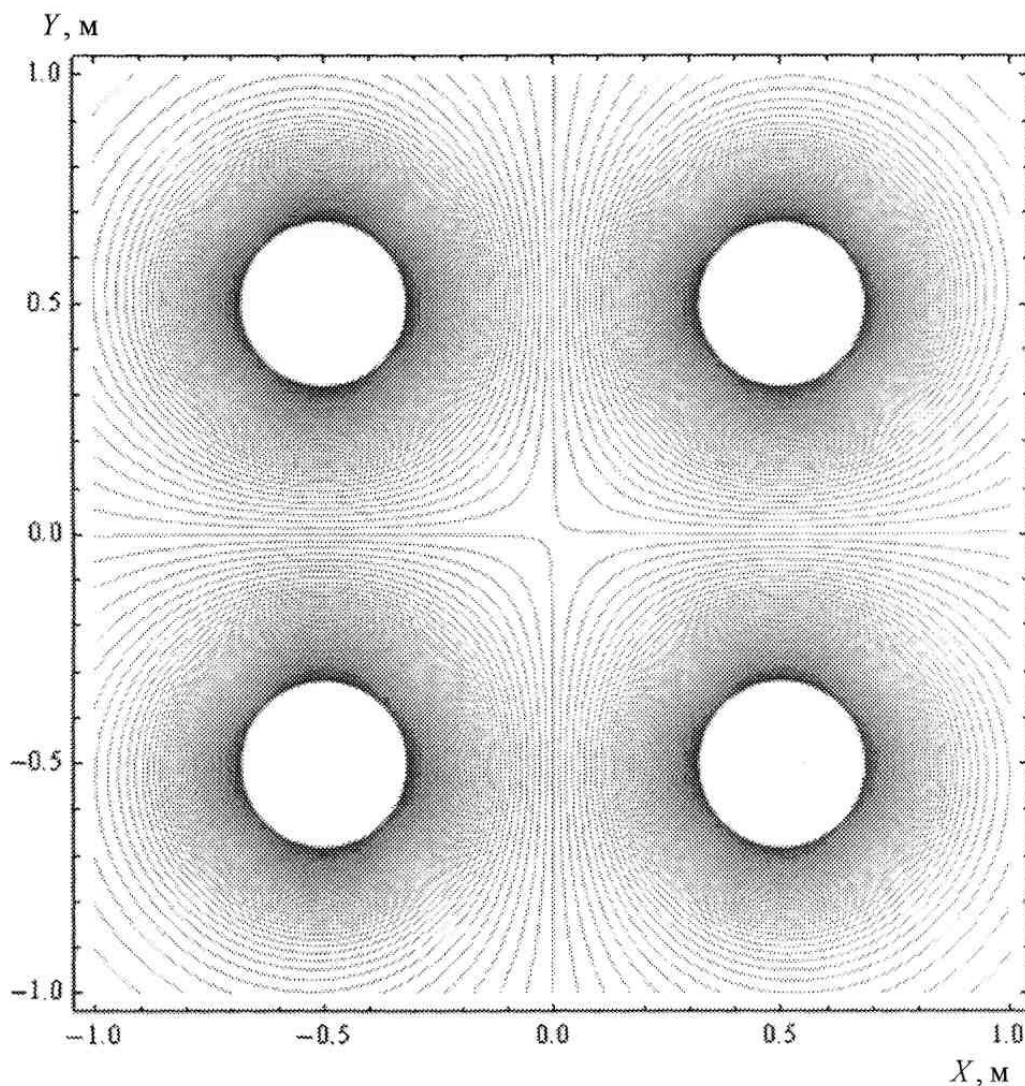


Рис. 2.9. Линии равных напряженностей электростатического поля, создаваемого четырьмя заряженными штырями в почве (диаметр штырей - 2 см)

Расчеты, проведенные для штырей с разными диаметрами, показали, что оптимальным является именно диаметр в 2 см.

Белые участки вокруг каждого из штырей связаны с тем, что там резко возрастает напряженность электростатического поля, и плотность расположения линий равной напряженности становится слишком большой. Для иллюстрации сказанного были проведены расчеты распределения напряженности электростатического поля по линии, соединяющей оси штырей (рис. 2.10), и по линии, смещенной вниз на 0,25 м (рис. 2.11). Данное расстояние выбрано по результатам расчета, приведенного на рис. 2.6.

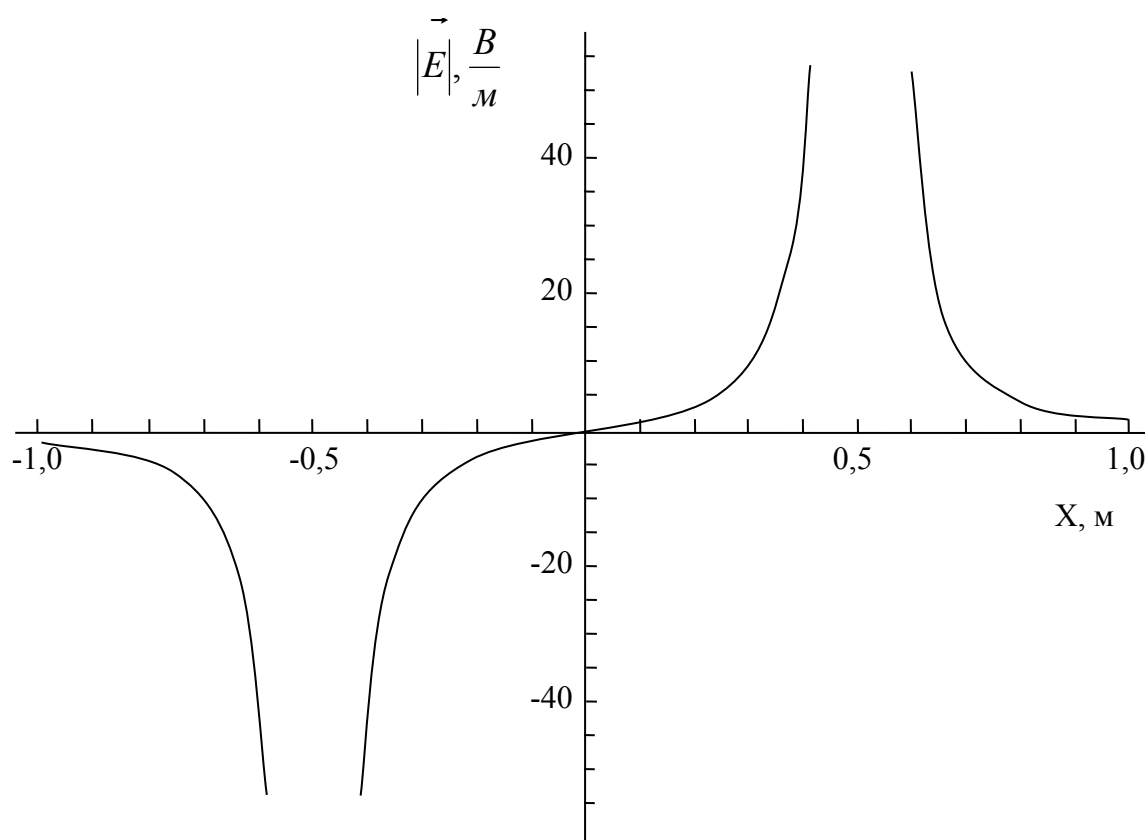


Рис. 2.10. Распределение напряженности электростатического поля по линии, соединяющей оси противоположно заряженных штырей

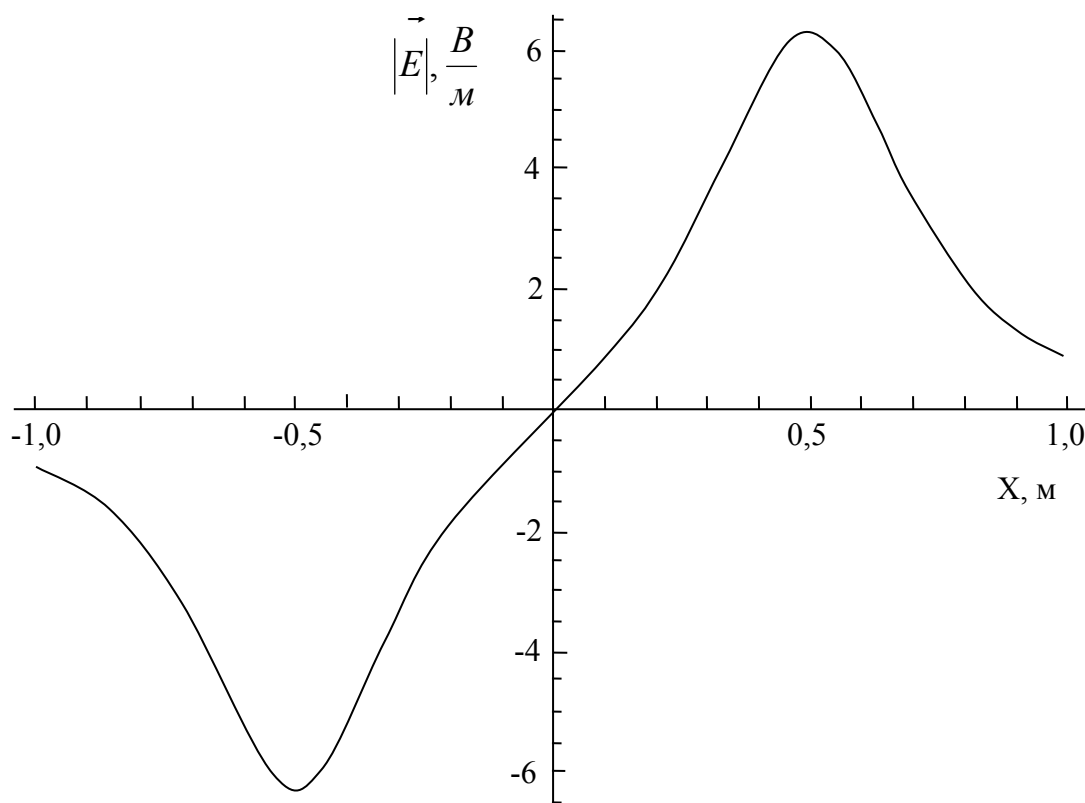


Рис. 2.11. Распределение напряженности электростатического поля по линии, смещенной вниз на 0,25 м от осей штырей

Проведен расчет распределения напряженности статического электромагнитного поля на линиях с различным удалением от прямой, соединяющей оси стержней (рис. 2.12).

Из анализа рис. 2.12 следует, что с увеличением смещения интересующей нас линии от прямой, соединяющей оси стержней, распределение напряженности электростатического поля становится более гладким, но сами амплитуды при этом уменьшаются. В случае смещения на 0,1 м максимальная амплитуда становится примерно в 9 раз больше. Данный результат говорит о том, что в зависимости от преследуемой цели семена либо корневая система растений должны находиться в области максимальной амплитуды электростатического поля (при более высокоэнергетическом воздействии) или могут быть распределены равномерно (когда энергия воздействующего поля может иметь умеренную величину).

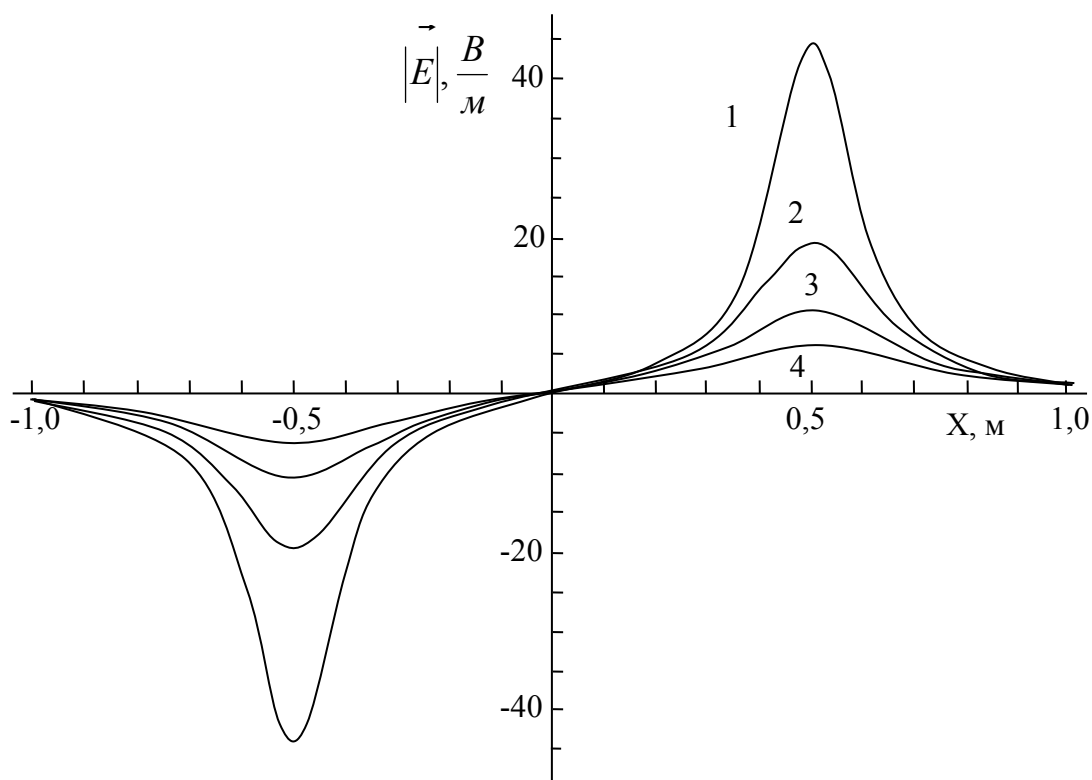


Рис. 2.12. Распределение напряженности электростатического поля по линии, смещенной вниз от осей штырей: 1 - смещение на 0,1 м; 2 - смещение на 0,15 м; 3 - смещение на 0,2 м; 4 - смещение на 0,25 м

Таким образом, в зависимости от посадочного материала и преследуемой цели можно выбирать различное расположение заряженных металлических штырей.

На рис. 2.13 представлена зависимость амплитуды модуля напряженности электростатического поля от координат точек почвы между заряженными штырями. Данный рисунок подтверждает результаты расчетов на рис. 2.8, 2.9, но в трехмерном изображении. Выступы и провалы на поверхности соответствуют расположению штырей. Данный график подтверждает сделанные выше выводы об оптимальных местах расположения сельскохозяйственных растений.

Как было сказано, приведенные выше аналитические и графические результаты не учитывают возникающих в почве в этом случае слабых токов.

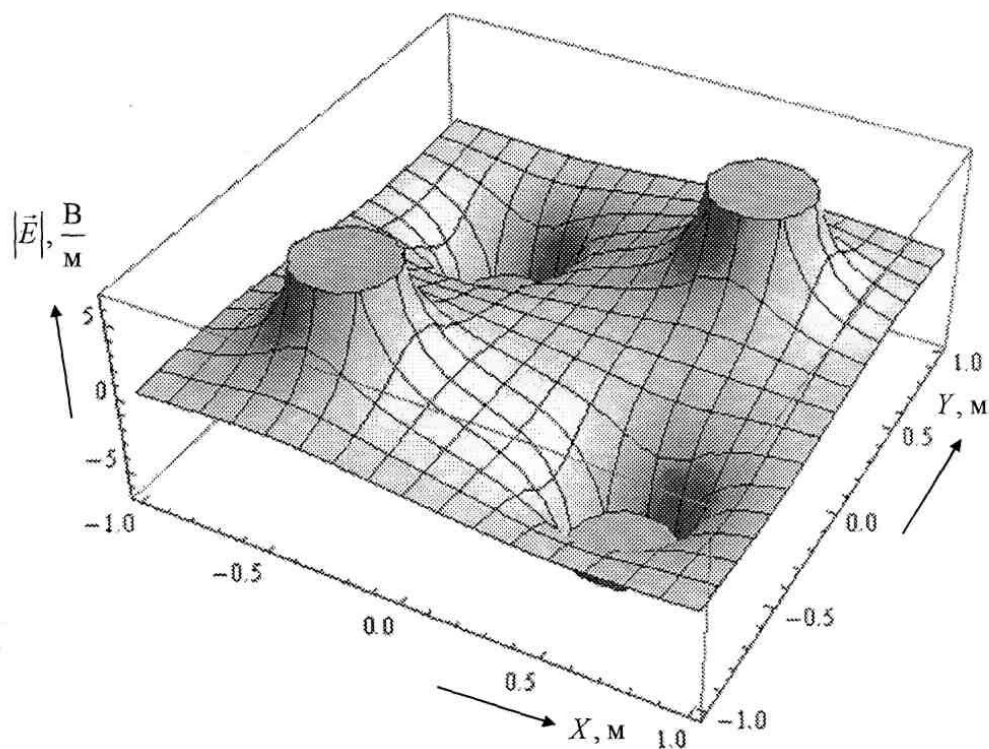


Рис. 2.13. Зависимость амплитуды модуля напряженности электростатического поля от координат точек почвы между заряженными штырями

Они в свою очередь являются причиной появления меняющегося в различных точках грунта заряда. Поскольку мы считаем глубину погружения штырей достаточно большой, то плотность заряда можно считать зависящей только лишь от двумерных координат (x, y) , но не зависящей от вертикального погружения в землю z .

Выясним теперь, какой заряд создают в почве погруженные в нее два штыря, чтобы оценить поправку к электростатическому полю, полученному выше. С этой целью воспользуемся вторым равенством из (2.1). Поскольку грунт можно считать однородной и изотропной средой, то, учитывая третье выражение из (2.1), данное равенство можно записать следующим образом

$$\varepsilon_0 \varepsilon_2 \operatorname{div} E = \rho \quad (2.38)$$

Подставим в (2.38) выражение (2.28) с учетом (2.36). В результате получаем для полярной системы координат [3] плотность электрического заряда, возникающего в почве между заряженными штырями

$$\rho = \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_2}{\pi} \sum_{i=1}^k \left\{ U_i \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left[\frac{|\vec{r}_{01} - \vec{r}_i|^n}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^{n+1}} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} \right) - \frac{|\vec{r}_{02} - \vec{r}_i|^n}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^{n+1}} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} \right) \right] \sin n\varphi \right\}, \quad (2.39)$$

где k - число погруженных в почву штырей.

Однако полученная плотность электрического заряда соответствует неограниченной среде. В нашем же случае имеется граница раздела двух сред между почвой и воздухом с разными диэлектрическими проницаемостями. В этом случае возникает поле заряда, как бы отраженного от границы раздела сред. Используя метод зеркальных изображений [107] поле заряда в грунте находится как наложение первоначального поля и поля отраженного заряда, имеющего величину

$$\rho' = \rho \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2 + 1} \quad (2.40)$$

В этом случае, очевидно, возникающий в почве потенциал будет удовлетворять не уравнению Лапласа (2.6), а уравнению Пуассона [4]

$$\Delta\psi = - \frac{\rho + \rho'}{\varepsilon_0 + \varepsilon_2} \quad (2.40)$$

Как известно [105, 106] решение уравнения Пуассона в случае неограниченной среды можно записать, воспользовавшись следующей формулой

$$\psi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{\rho(r') + \rho'(r')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dv', \quad (2.41)$$

где V - объем грунта, по которому берется интеграл:

r' - координата точки расположения заряда.

На основании (2.41) были проведены численные расчеты создаваемой дополнительно напряженности электрического поля. Число штырей m бралось равным четырем, объем грунта брался в пределах ячейки из этих четырех штырей на глубину 0,5 м. Полученные результаты говорят о том, что добавка к уже существующему электростатическому полю не превышает 10 %. Эта величина лежит в пределах погрешности самих расчетов с учетом ошибки задания диэлектрической проницаемости грунта. Таким образом, в дальнейшем при практических расчетах воздействия электростатического поля на сельскохозяйственные культуры эту поправку можно не учитывать.

2.3 Воздействие стационарных электрических полей на семена и корневую систему сельскохозяйственных растений

Благодаря успехам биофизики стало известно, что большинство клеток несут на своей поверхности и на поверхности своих органоидов электрический заряд. С помощью электрофореза можно измерить потенциал частиц и клеток любого размера. Поскольку поверхность клеток заряжена отрицательно по отношению к вмещающей их среде, при электрофорезе клетки движутся к аноду.

Исследователям удалось выяснить количество и знак электрических зарядов в некоторых тканевых и органных клетках и тем самым приблизиться к пониманию роли, которую играют электрические заряды при выполнении этими органами тех или иных функций, как в норме, так и при патологии. В свете этих работ каждая живая клетка может быть сугубо схематически рассматриваема как специализированная электростатическая система, а весь организм как комплекс этих совокупностей, взаимосвязанных и непрерывно взаимодействующих одна с другой.

Учитывая электрические свойства, которыми обладают тканевые клетки, естественно предположить, что внешние электромагнитные поля должны оказывать на них определенное влияние. Естественно, что это в полной мере относится как к переменным, так и к стационарным электрическим полям. Следует ожидать, что электростатические поля должны менять концентрацию жизненно важных ионов на поверхности клеточных мембран. Существующие исследования подтверждают возможность воздействия с помощью внешних электрических полей на процессы, происходящие на клеточном уровне.

Внешние электростатические поля не только меняют концентрацию ионов на мембранах, но и могут приводить к потере клетками определенного типа ионов, о чем свидетельствуют результаты различных экспериментов. В данной работе предлагаются модели взаимодействия полей с биообъектами [108, 114].

Изменение концентрации ионов в возбудимой клетке связано с тем, что ее мембрана обладает свойством избирательной проницаемости. Это

означает, что определенные типы ионов могут легко проходить сквозь мембрану, а другие типы ионов проходят с трудом или совсем не могут пройти. Как известно, ионные составы внутри и вне клеток сильно различаются. В связи с этим имеет место начальное диффузионное движение ионов способных проникнуть сквозь мембрану. Это ведет к накоплению зарядов на обеих сторонах мембраны как на емкости и к возникновению электрического поля на мембране. Таким образом, мембрана вызывает не только движение ионов сквозь нее, но и способствует возникновению электрического поля. Указанные процессы хорошо описываются уравнением Нернста-Планка, которое позволяет определить равновесные условия, соответствующие термодинамическим закономерностям [110].

Диффузия ионов ведет к накоплению положительного заряда во внешней для клетки среде и оставляет внутри клетки избыток отрицательного заряда, который благодаря электростатическим силам собирается на мембране. Это приводит к образованию электростатического поля, направленного от внешней к внутренней среде, которое возрастает по величине, по мере диффузии положительных ионов изнутри клетки наружу. Возрастающее электрическое поле все более препятствует диффузии, пока она не прекращается совсем и не наступает равновесие [112].

При равновесии сила электрического поля в точности компенсирует диффузионную силу. Как известно [110], количественно диффузия описывается законом Фика

$$j_d = - D \text{grad} C, \quad (2.42)$$

где D - коэффициент пропорциональности или постоянная Фика;

C - концентрация некоторого вещества как функция пространственных координат.

Плотность тока j_d представляет собой число ионов, проходящих за единицу времени через единичную площадку поверхности мембраны. Обычно постоянная Фика определяется опытным путем.

В связи с наличием у ионов заряда на них действуют также силы со стороны электрического поля. Интенсивность возникающего в результате этого потока j_e зависит от подвижности ионов данного сорта. Подвижность характеризуется величиной v_p , то есть скоростью, достигаемой под действием поля единичной напряженности для ионов данного типа. Если валентность иона Z_p , то плотность ионного потока описывается формулой

$$j_e = -v_p \frac{Z_p}{|Z_p|} C_p \text{grad} \psi, \quad (2.43)$$

где $(\text{grad} \psi)$ - напряженность электрического поля;

$\frac{Z_p}{|Z_p|}$ - знак силы, действующей на ион типа p .

Таким образом, выражение (2.43) не что иное, как произведение концентрации ионов на их скорость, то есть поток ионов через единичную площадку под воздействием электрического поля. Обычно плотность потока выражается в молях на единицу площади поверхности за секунду. Сравнивая выражение (2.43) с законом Ома $J = -\sigma \text{grad} \psi$, подвижность v_p можно интерпретировать как величину пропорциональную удельной проводимости. Ионная подвижность зависит от вязкости среды, размера иона и его заряда.

Между подвижностью ионов и их коэффициентом диффузии существует связь, которая называется уравнением Эйнштейна

$$D_p = \frac{v_p RT}{|Z_p| F} \quad (2.44)$$

где T - абсолютная температура;

F - число Фарадея;

R - газовая постоянная.

Очевидно, что при наличии, как диффузионных сил, так и сил электрического поля полная плотность ионов данного сорта равна

$$j_p = j_d + j_e$$

или

$$\begin{aligned} j_p &= -D_p \text{grad} C_p - \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi = \\ &= -D_p \left(\text{grad} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \right), \end{aligned} \quad (2.45)$$

что получено с использованием уравнения Эйнштейна (2.44). Выражение (2.45) и есть уравнением Нернста-Планка.

Поскольку размерность уравнения (2.45) - моль на единицу площади поверхности за единицу времени, то для перехода к плотности электрического тока необходимо умножить это выражение на заряд, переносимый каждым молекулой, то есть на $F Z_p$. В результате получим

$$J_p = -D_p F Z_p \left(\text{grad} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \right), \quad (2.46)$$

где J_p - плотность электрического тока, обусловленного движением ионов, которая выражается в кулонах на m^2 .

Как было сказано выше, при равенстве сил электрического поля и диффузионных сил плотность электрического тока, обусловленного движением ионов (2.46), становится равной нулю, то есть $J_p = 0$. Таким образом,

$$D_p F Z_p \left(\text{grad} C_p + \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \right) = 0,$$

откуда следует

$$\text{grad} C_p = - \frac{Z_p C_p F}{RT} \text{grad} \psi \quad (2.47)$$

Для простоты будем считать, что все величины меняются по нормальному к мембране направлению, которое совпадает в полярной системе координат с координатой r . Это возможно сделать, поскольку практически каждый участок мембраны можно считать плоским [110]. Тогда, используя выражение для градиента в полярной системе координат (2.27), можно (2.47) представить в виде

$$\frac{dC_p}{dr} = - \frac{Z_p C_p F}{RT} \frac{d\psi}{dr} \quad (2.48)$$

Получено дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными C_p и ψ . Разделяя эти переменные и интегрируя левую и правую части по толщине мембраны, на которой установилось равновесие, получаем равенство

$$\int_{r_i}^{r_e} \frac{dC_p}{C_p} = - \frac{Z_p F}{RT} \int_{r_i}^{r_e} d\psi, \quad (2.48)$$

где r_i - координата, соответствующая внутренней стенке мембраны, а r_e - внешней.

В результате интегрирования получается соотношение

$$\ln \frac{C_{pe}}{C_{pi}} = - \frac{Z_p F}{RT} (\psi_e - \psi_i) \quad (2.49)$$

где C_{pe} и C_{pi} - концентрация ионов типа p снаружи и внутри мембраны, соответственно;

ψ_e и ψ_i - внешний и внутренний потенциал мембраны.

Из равенства (2.49) следует, что в условиях равновесия потенциал мембраны равен

$$U_m = \psi_i - \psi_e = \frac{RT}{Z_p F} \ln \frac{C_{pe}}{C_{pi}} \quad (2.50)$$

Проведенные вычисления по формуле (2.50) позволили определить диапазон величин потенциала покоя, создаваемого основными типами ионов внутри и внеклеточной среды, таких как калий, натрий, хлор и др. Концентрации этих ионов брались из справочных материалов [112]. Полученные результаты лежат в диапазоне от 70 мВ до 105 мВ, то есть в среднем, с учетом концентраций этих ионов, потенциал покоя на мембране равен примерно 70 мВ.

Построенная выше математическая модель позволяет исследовать протекание обменных процессов на уровне мембраны клетки в установившемся режиме, то есть когда силы диффузии компенсируются силами возникающего на мембране электрического поля. Очевидно, что изменение внешних условий, в которых находится биологическая ткань, может нарушить данное равновесие и привести к изменению процесса диффузии ионов, следствием чего будет изменение гомеостаза в семенах сельскохозяйственных растений или в их корневой системе, поскольку речь идет о возникновении дополнительного электростатического поля в грунте. Выясним, каким образом происходят данные изменения.

Из анализа экспериментальных данных и теоретических моделей следует [108, 109], что объединенные процессы связи поверхностных взаимодействий с внутриклеточными механизмами сначала распространяются по поверхности мембраны, а затем информация передается внутрь клетки, что также представляет собой новый принцип в моделях молекулярной биологии процессов возбуждения.

Чтобы выяснить, каким образом изменяют обменные процессы внешние электростатические поля, рассмотрим задачу о диффузии вещества во внутреннюю область клетки через мембрану [110, 112]. Ионы могут проходить через мембрану под действием химического или электрического потенциала в качестве движущей силы. Для того чтобы получить суммарный поток ионов через мембрану посредством химического потенциала, необходима разница в активности двух поверхностей мембраны. Скорость переноса ионов может быть увеличена, если ионам оказывается помощь каким-то несущим элементом. Это является результатом каких-то еще полностью не объясненных механизмов переноса, которые работают только в живой материи. В этих случаях можно достигать быстрого прохода ионов, несмотря на низкую проникающую способность самого иона.

Часто случается, что ион переносится против разности электрохимического потенциала. Это, как предполагают, происходит

посредством поглощающего энергию несущего механизма. Известны многие подобные явления, в особенности для натрия и калия. Это объясняет тот факт, что внутренняя часть клетки очень часто имеет высокую концентрацию калия и низкую концентрацию натрия по сравнению с окружающей средой. Эти явления называются соответственно натриевым и калиевым насосом.

Этот так называемый активный перенос зависит от энергии, находящейся вне своей собственной системы. Энергия и носитель производятся клеткой. Энергия приходит из митохондрий, а носитель - из механизмов клетки. Принимая во внимание, что мембрана очень тонкая, процесс проникновения вещества через нее описывается уравнением [110-113]

$$\frac{1}{S} \frac{dm}{dt} = D(C_e - C_i), \quad (2.51)$$

где S - площадь поперечного сечения мембраны;

m - масса проходящего вещества;

D - проницаемость мембраны;

C_e, C_i - концентрация ионов вне и внутри клетки.

Математические задачи о диффузии вещества во внутреннюю область клетки сильно упрощаются, если скорость проникновения вещества через клеточную оболочку много меньше скорости диффузии по обе ее стороны. Следствием дополнительной диффузии внутрь клетки под действием внешних факторов будет увеличение объема клетки.

Следует отметить, что даже при очень больших изменениях объема площадь поверхности клетки остается почти постоянной. Таким образом, по объему можно судить о концентрации веществ внутри клетки. Поскольку площадь поверхности не меняется, то можно вычислить коэффициент проницаемости D . Удобнее измерять не площадь, а величину проницаемости

$$P = D \cdot S \quad (2.52)$$

Поскольку, как было сказано, диффузия протекает быстрее, чем проникновение через мембрану, то можно считать, что

$$C_i = \frac{m}{V}, \quad (2.53)$$

где V - объем клетки.

Тогда уравнение (2.51) примет вид

$$\frac{dm}{dt} = P \left(C_e - \frac{m}{V} \right) \quad (2.54)$$

По мере увеличения в клетке концентрации вещества, через оболочку возникает ток воды, направленный внутрь. Предположим, что равновесие для воды устанавливается мгновенно. Это допущение эквивалентно тому, что осмотическое давление внутри клетки, определяемое суммой концентраций проникающего C_i и непроникающего C_0 вещества, совпадает с осмотическим давлением вещества в окружающей среде, концентрация которого постоянна и равна C_e

$$C_e = C_{i0} + C_0 = C_i + \frac{C_0 V_0}{V} = \frac{m + C_0 V_0}{V}, \quad (2.55)$$

где C_0 - концентрация C_i , в начальный момент времени;

V_0 - объем клетки в начальный момент времени.

Из (2.55) следует:

$$m = C_e V - C_0 V_0 \quad (2.56)$$

$$dm = C_e dV. \quad (2.57)$$

Подставляя (2.57) в уравнение (2.54), получим с учетом (2.56)

$$\frac{dV}{dt} = P \left(1 - \frac{m}{C_e V} \right) = P \left(1 - \frac{C_e V - C_0 V_0}{C_e V} \right) = P \frac{C_0 V_0}{C_e V} \quad (2.58)$$

Это уравнение описывает изменение объема клетки при отсутствии внешнего электромагнитного поля.

Пусть теперь биологическая клетка находится во внешнем электростатическом поле, создаваемом погруженными в почву заряженными металлическими штырями, как это было показано в п. 2.2 (2.37)

$$|\vec{E}| = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\vec{r}_{01} - \vec{r}_1|^n}{|\vec{r} - \vec{r}_1|^{n+1}} - \frac{|\vec{r}_{02} - \vec{r}_2|^n}{|\vec{r} - \vec{r}_2|^{n+1}} + \frac{|\vec{r}_{03} - \vec{r}_3|^n}{|\vec{r} - \vec{r}_3|^{n+1}} - \frac{|\vec{r}_{04} - \vec{r}_4|^n}{|\vec{r} - \vec{r}_4|^{n+1}} \right)$$

направленном перпендикулярно плоскости поперечного сечения клетки, которую будем считать шаром.

В этом случае в результате влияния внешнего электростатического поля возникает некоторый эквивалентный ему дополнительный заряд ионов в клетке с концентрацией C_e . Чтобы найти эту концентрацию, поступим

следующим образом. Воспользуемся вторым уравнением из системы (2.1). Возьмем от обеих частей этого уравнения интеграл по объему сосредоточения этого заряда V_1

$$\iiint_{V_1} \operatorname{div} D dV = \iiint_{V_1} \rho dV \quad (2.59)$$

Поскольку все исследуемые среды считаются однородными и изотропными, то (2.59) можно записать в виде

$$\varepsilon_3 \varepsilon_0 \iiint_{V_1} \operatorname{div} E dV = \iiint_{V_1} \rho dV, \quad (2.60)$$

где ε_3 - относительная диэлектрическая проницаемость биологической ткани (зерна, корневой системы и т.д.)

Тогда, учитывая, что правая часть (2.60) - это эквивалентный дополнительный заряд ионов, а к левой части применяя теорему Остроградского-Гаусса [103, 104], получаем

$$4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0|E|a^2 = qV_1C_\vartheta, \quad (2.61)$$

где a - радиус шара, эквивалентного клетке;

q - заряд иона, или

$$C_\vartheta = \frac{4\pi\varepsilon_3\varepsilon_0a^2}{qV_1}|\vec{E}|. \quad (2.62)$$

Уравнение (2.58) с учетом внешнего электростатического поля будет иметь вид

$$\frac{dV}{dt} = P \frac{C_0 V_0}{C_e V} + P \frac{4\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2}{C_e q V_1} |\vec{E}| \quad (2.63)$$

Для упрощения этого уравнения положим $V = V_1$, что с достаточной для поставленной задачи точностью соответствует реальной ситуации. Тогда

$$\frac{dV}{dt} = \frac{P}{C_e V} \left(C_0 V_0 + \frac{4\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2}{q} |\vec{E}| \right), \quad (2.64)$$

где $|\vec{E}|$ берется из выражения (2.37).

Очевидно, что (2.64) является дифференциальным уравнением первого порядка с разделяющимися переменными. Интегрируя это уравнение, получаем

$$V^2 = \frac{2P}{C_e} \left(C_0 V_0 + \frac{4\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2}{q} |\vec{E}| \right) t + C \quad (2.65)$$

Так как в начальный момент времени $t = 0$ объем клетки $V = V_0$, то значение постоянной интегрирования будет

$$C = V_0^2.$$

Таким образом, частное решение уравнения (2.64), с учетом зависимости начального объема рассматриваемой клетки и концентрации непроникающего вещества C_0 от потенциала на его мембране [110-113], имеет вид

$$V^2 = V_0^2 + \frac{2P}{C_e} \left(C_0 V_0 e^{-\frac{FU_{0m}}{RT}} + \frac{4\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2}{q} |\vec{E}| \right) \cdot t, \quad (2.66)$$

где F - число Фарадея;

U_{0m} - потенциал на мембране в начальный момент времени;

R - газовая постоянная;

T - абсолютная температура.

Это решение (2.66) позволяет определить изменение объема клетки за счет проникающих в нее веществ под действием внешнего электростатического поля.

Очевидно, что изменение объема клетки, связанное с увеличением концентрации ионов внутри нее, приведет к изменению потенциала на мембране. Используя введенное ранее понятие эквивалентного заряда, получим для потенциала на мембране клетки следующее выражение

$$\psi^2 = U_{0m}^2 + \frac{PC_e q d^2}{2\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2} \left(\frac{qC_0 V_0}{4\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2} e^{-\frac{FU_{0m}}{RT}} + |\vec{E}| \right) \cdot t, \quad (2.67)$$

где d - толщина мембраны.

Отсюда следует

$$\psi = \sqrt{U_{0m}^2 + \frac{PC_e q d^2}{2\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2} \left(\frac{qC_0 V_0}{4\pi\epsilon_3\epsilon_0 a^2} e^{-\frac{FU_{0m}}{RT}} + |\vec{E}| \right) \cdot t} \quad (2.68)$$

Полученное выражение (2.68) позволяет оценить процессы, происходящие на клеточном уровне в клетках семян или корневой системы растений, находящихся в почве под воздействием электростатического поля. Это связано с тем, что величина мембранного потенциала влияет на протекание обменных процессов в клетке и показывает, каким образом изменяются ее энергетические показатели.

2.4 Численный анализ полученных результатов

Для выражений (2.66) и (2.68) проведен численный расчет с учетом различных исходных данных.

На рис. 2.14 представлено отклонение объема растительной клетки среднестатистического размера от своего усредненного значения в зависимости от времени нахождения в электростатическом поле, распределенном в грунте (2.37).

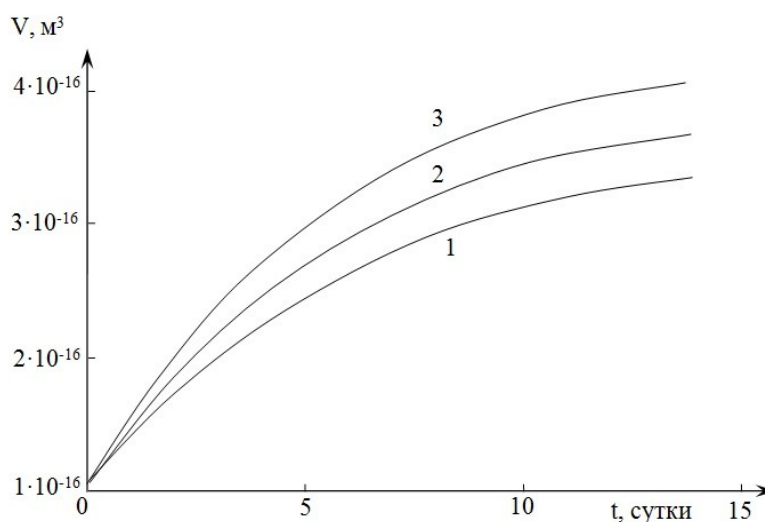


Рис. 2.14. Зависимость объема биологической клетки от времени воздействия электростатического поля: 1 - смещение на 0,25 м; 2 - смещение на 0,2 м; 3 - смещение на 0,15 м

Взяты точки нахождения клетки в данном поле, которые смещены от линий, соединяющих оси металлических штырей, на 0,15 м, 0,2 м и 0,25 м по OX и OY . Постоянные, которые входят в (2.66), взяты из соответствующей литературы [110-113]. Полученные результаты соответствуют изменению эффективного радиуса клетки в диапазоне $3,12 \cdot 10^{-4} \dots 3,23 \cdot 10^{-4}$ см. Напряженность поля такая, как это посчитано в п. 2.2.

Различная интенсивность воздействия электростатического поля на клетки в разных точках связана с различной напряженностью поля в этих

точках, что подтверждает сделанный выше вывод. При необходимости более существенного влияния на процессы, протекающие в клетке, желательно расположение семян или корневых систем в большей близости к заряженному штырю и наоборот.

Однако данные кривые не могут дать ответ на вопрос, к каким последствиям может привести данное воздействие на клетку: к положительным или отрицательным. Поэтому необходимо исследование не только зависимости объема клетки от времени и амплитуды воздействия электростатическим полем, но и величины потенциала, возникающего при этом на мембране клетки. На этот вопрос могут дать ответ вычисления, выполненные на основании выражения (2.68). Вычисления проводились в предположении, что потенциал покоя на мембране клетки равен 70 мВ. Результаты вычислений приведены на рис. 2.15 -2.18.

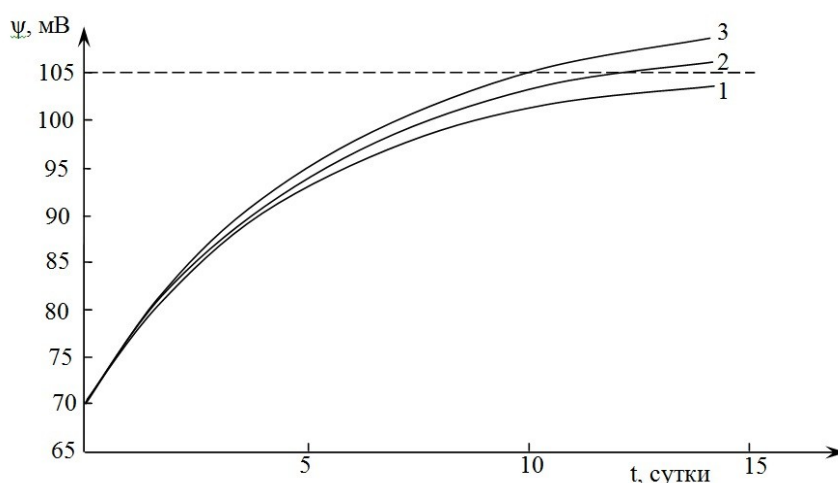


Рис. 2.15. Зависимость мембранного потенциала биологической клетки от времени воздействия электростатического поля при одинаковом потенциале покоя (сухой грунт): 1 - смещение на 0,25 м; 2 - смещение на 0,2 м; 3 - смещение на 0,15 м

Зависимость наведенного на мембране клетки потенциала от времени воздействия электростатического поля представлена на рис. 2.15, 2.16. При этом в обоих случаях исходный потенциал покоя мембраны был одинаков и равнялся 70 мВ. В том случае, когда почва была сухой, в промежутке между

десятыми и пятнадцатыми сутками воздействия потенциал возрастал примерно до 105 мВ и превышал его (штриховая линия).

Скорость достижения этого потенциала различна в точках, удаленных на разное расстояние от осей заряженных металлических штырей. Очевидно, что величина потенциала 105-110 мВ не должно вести к гибели клеток.

В случае влажной почвы (рис. 2.16) достижение потенциала в 105 мВ наступает раньше - уже после восьми дней воздействия. Это связано с возникновением в этом случае небольших почвенных токов, которые увеличивают концентрацию ионов внутри и вне клетки и повышают мембранный потенциал.

Таким образом, при использовании грунтового электростатического поля, можно получить активизацию обменных процессов и, соответственно, повышение урожая. Следует также отметить, что данные результаты получены для разности потенциалов между штырями в 70 В. Увеличивая или уменьшая эту разность, можно ускорить или наоборот замедлить протекающие в клетке процессы.

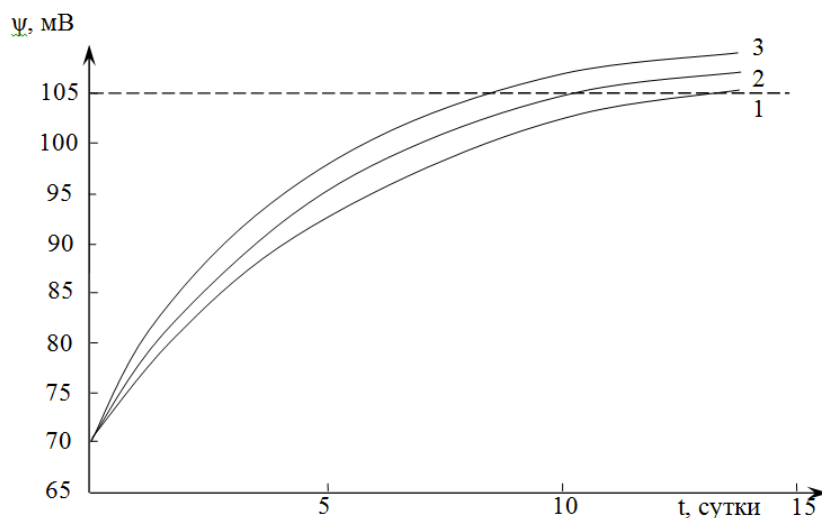


Рис. 2.16. Зависимость мембранного потенциала биологической клетки от времени воздействия электростатического поля при одинаковом потенциале покоя (влажный грунт): 1 - смещение на 0,25 м; 2 - смещение на 0,2 м; 3 - смещение на 0,15 м.

На рис. 2.17, 2.18 рассмотрено воздействие электростатического поля на клетки, у которых потенциал покоя был различен. Он был меньше или больше среднего потенциала (штрихпунктирная линия).

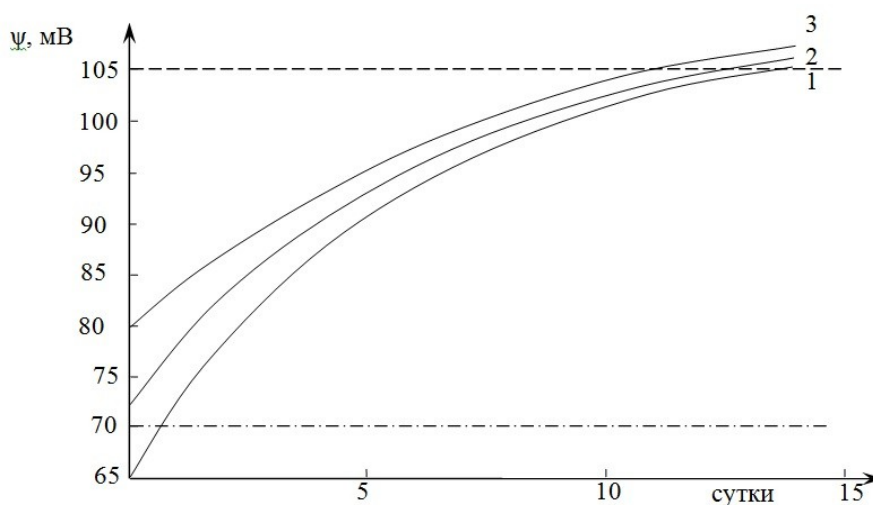


Рис. 2.17. Зависимость мембранного потенциала биологической клетки от времени воздействия электростатического поля при разных потенциалах покоя (сухой грунт): 1 - смещение на 0,25 м; 2 - смещение на 0,2 м; 3 - смещение на 0,15 м

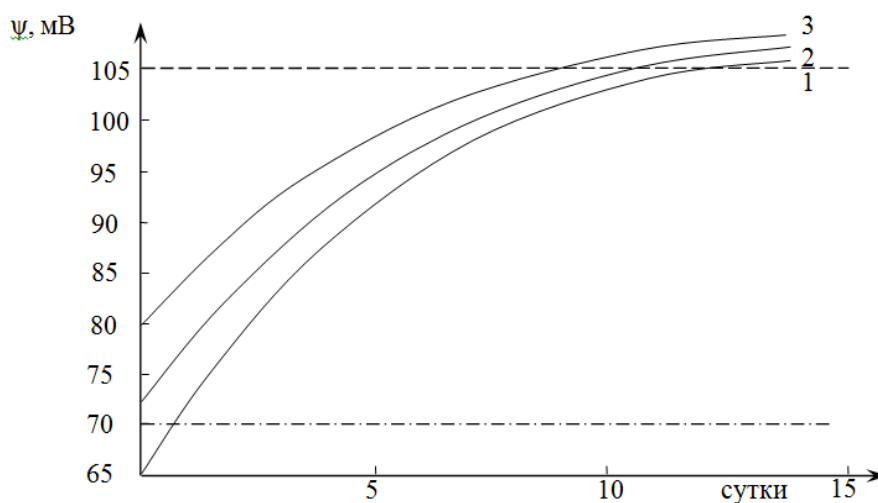


Рис. 2.18. Зависимость мембранного потенциала биологической клетки от времени воздействия электростатического поля при разных потенциалах покоя (влажный грунт): 1 - смещение на 0,25 м; 2 - смещение на 0,2 м; 3 - смещение на 0,15 м

В этом случае, с течением времени разброс между кривыми для точек с разными напряженностями электростатического поля уменьшается, то есть наличие внешнего поля корректирует течение обменных процессов для клеток с завышенным или заниженным потенциалом покоя. Отсюда следует, что внешнее электростатическое поле может использоваться не только для стимуляции или угнетения растительных клеток, но и для оптимизации этих процессов независимо от существовавших начальных условий.

Полученные результаты показывают сложность происходящих в клетках диффузионных и обменных процессов под влиянием внешнего электростатического поля. Выявлено существенное влияние на объем клетки и потенциал на ее мембране со стороны указанного поля. Необходимо отметить, что изменение концентрации ионов внутри клетки зависит не только от времени воздействия, но и от его амплитуды, влажности почвы, а также исходного состояния биологического материала. Полученные результаты подтверждают возможность искусственного влияния с помощью электростатического поля на протекание этих процессов в тканях растений. При этом выявлена существенная зависимость указанных процессов от амплитуды и времени такого воздействия.

Выводы по разделу:

1. Для создания мембранного потенциала на биологической клетке тепличных культур не более 105 мВ, напряжение между металлическими штырями в почве должно составлять не более 70 В, а смещение растений от оси между штырями не менее 0,2 м.
2. Для стимуляции развития растений в теплицах, при напряжении между штырями в 70 В, штыри располагаются в вершинах квадрата со стороной 1 м.

РАЗДЕЛ 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА КОРНЕВУЮ СИСТЕМУ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ

3.1 Поле однородно намагниченного эллипсоида

В предыдущем разделе был рассмотрен вопрос о воздействии постоянных электрических полей, создаваемых погруженными в почву заряженными металлическими штырями, на обменные процессы в семенах сельскохозяйственных культур. Данная задача является более традиционной с точки зрения изучения взаимодействия внешних физических полей с различными сельскохозяйственными растениями, а также их семенами при предпосевной обработке и в процессе их вегетации. При этом достаточно мало внимания уделяется тому факту, что и магнитные поля могут оказывать существенное влияние на жизненные процессы в растениях. В полной мере это относится и к статическим магнитным полям, которые оказались практически вне пределов внимания исследователей. Следует, однако, отметить, что наличие постоянного или переменного магнитного поля может оказывать существенное влияние на движение питательных веществ в корневой системе растений, поскольку этот процесс связан с движением положительно или отрицательно заряженных ионов. Как известно, внешнее магнитное поле изменяет траектории движения заряженных частиц и в результате может оказать как положительное, так и отрицательное влияние на жизненные процессы в растениях [114-116].

В данной работе как раз и рассмотрено влияние магнитостатических полей на корневую систему различных растений. Этого можно достигнуть посредством погружения в верхний слой почвы намагниченных частиц. Очевидно, что рассмотрение данного вопроса невозможно без

моделирования распределения в грунте статических магнитных полей, созданных такими частицами. При этом будем для простоты считать, что все частицы находятся на одинаковой глубине, в общем случае имеют форму эллипсоида и расположены в узлах сетки, составленной из квадратов (рис. 3.1).

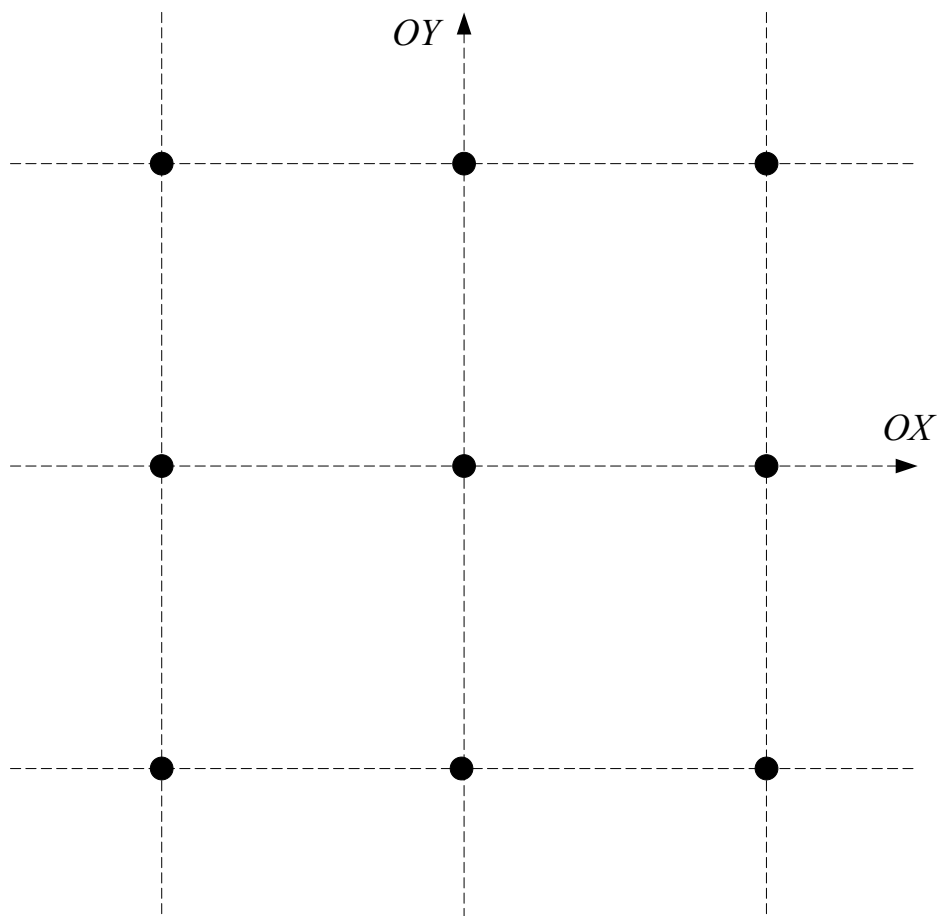


Рис. 3.1. Расположение системы намагниченных частиц в плоскости, параллельной поверхности грунта

Очевидно, что решение данной задачи необходимо начать с исследования поля созданного одиночным намагниченным телом. Итак, пусть имеется постоянно и однородно намагниченный эллипсоид, размеры полуосей которого – a , b и c , которые коллинеарны осям координат OX , OY и OZ , соответственно. Естественно, что можно не учитывать направление намагничивания эллипсоида, поскольку данный вектор можно

разложить по трем его составляющим, которые будут параллельны главным осям или, что тоже самое, осям выбранной системы координат. Кроме того, поскольку намагниченную частицу окружает изотропная немагнитная среда – грунт, то не имеет значения, какую составляющую вектора намагничивания мы выберем. Поэтому в дальнейшем будет рассмотрен случай, когда вектор намагничивания M_0 постоянен и коллинеарен оси a (оси OX).

Поскольку рассматривается однородное намагничивание эллипсоида, то внутри него плотность магнитного заряда $\rho^M = -\operatorname{div} M_0 = 0$, поэтому потенциал, создаваемый данным эллипсоидом, определяется лишь поверхностными зарядами, плотность которых равна $\sigma^M = n \cdot M_0$, где n – единичная нормаль к поверхности эллипсоида. Данная задача полностью эквивалентна задаче о поле, создаваемым поляризованным диэлектрическим эллипсоидом [117].

Итак, методы, развитые для исследования электростатического поля, широко применимы и к магнитостатическому полю. Любое электростатическое поле, может быть заменено тождественным по структуре электростатическим полем, создаваемым соответствующим распределением электрических диполей. Однако эта эквивалентность чисто формальная. В магнитостатике нет величины, соответствующей свободному заряду. Каковы бы ни были аналитические преимущества электростатической аналогии, необходимо помнить, что физическая структура поля, создаваемого намагниченными частицами, принципиально отличается от строения поля любой конфигурации электрических зарядов.

Изучение воздействия статических магнитных полей на корневую систему растений по заданному полю является одной из новых задач электромагнитной биологии. Так как экспериментальное исследование распределения внутренних полей провести практически невозможно, встает вопрос о решении этой задачи теоретическими методами.

С точки зрения магнитостатики все задачи подобного типа сводятся к задачам взаимодействия магнитных полей намагниченных тел, с потерями или без них, сферической, эллипсоидальной и цилиндрической формы.

Казалось бы, задачи подобного вида довольно детально исследованы как в монографиях, так и в отдельных публикациях [117, 118]. Однако следует иметь в виду, что, кроме общих подходов к нахождению суммарных магнитных полей, частные задачи ставят дополнительные требования к соотношению линейных размеров и форме намагниченных частиц, к внутренней структуре, связанной с неоднородностью и так далее.

Существенным является и то, что известные строгие и приближенные методы приводят очень часто к достаточно громоздким вычислениям, связанным с весьма серьезными трудностями математического характера и к использованию мощной вычислительной техники. В то же время прикладная сторона магнитного воздействия на корневую систему растений, связанная с конкретными техническими разработками специальных систем, требует как простых подходов, так и простых решений поставленных задач, которыми бы могли пользоваться лица, не имеющие специальной подготовки в области электродинамики и математики.

Одним из возможных подходов для получения, с одной стороны, простого, а с другой - достаточно универсального решения, может служить использование в качестве математической модели исследование распространения низкочастотных электромагнитных излучений. В этом случае магнитные статические поля можно получить как предельный случай при стремлении частоты колебаний ω к нулю (или длины волны λ к бесконечности). Данный подход удобен и тем, что позволит в дальнейшем при необходимости изучать воздействие переменных магнитных полей на растения, находящиеся в почве. Такое решение можно получить для тел, линейные размеры которых малы по сравнению с длиной падающей волны. В этом случае поля внутри и вне рассеивающего тела можно разложить по

малому параметру $\frac{a}{\lambda}$, где a - линейные размеры тела, λ - длина рассеиваемой волны. Получение необходимых нам формул магнитостатики

будет произведено при вычислении предела $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \frac{a}{\lambda}$.

В работах [113, 114] предложен метод решения для однородных малых тел, который позволяет получить довольно простые выражения для внутренних и внешних полей. Будем исследовать поле, создаваемое одиночным намагниченным телом, не на основе уравнений Максвелла в дифференциальной форме, а на основе интегральных уравнений, эквивалентных уравнениям Максвелла совместно с граничными условиями на границе тела с окружающей средой [115, 116].

Пусть грунт, в котором находится намагниченное тело, однороден и характеризуется диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ_c и $\mu_c = \mu_0$, где μ_0 - магнитная проницаемость свободного пространства. Тогда электромагнитное поле E и H во всех точках этого пространства будет описываться уравнениями Максвелла:

$$\begin{cases} \vec{\text{rot}} E = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}; \\ \vec{\text{rot}} H = \epsilon_c \frac{\partial E}{\partial t}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Учитывая зависимость полей от времени как $e^{i\omega t}$, где ω - круговая частота, получаем:

$$\begin{cases} \vec{\text{rot}} E + i\omega\mu_0 H = 0; \\ \vec{\text{rot}} H - i\omega\epsilon_c E = 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Если намагниченный объект характеризуется проницаемостями ε и μ , то в его внутренних точках поле будет описываться уравнениями:

$$\begin{cases} \text{rot } \vec{E} + i\omega\mu_0 \vec{H} = \vec{g}^M; \\ \text{rot } \vec{H} - i\omega\varepsilon_c \vec{E} = \vec{g}^3, \end{cases} \quad (3.3)$$

где $\vec{g}^3 = i\omega(\varepsilon - \varepsilon_c) \vec{E}$;

$\vec{g}^M = i\omega(\mu_0 - \mu) \vec{H}$.

Диэлектрическая проницаемость ε и магнитная - μ рассматриваются как функции координат и меняются скачкообразно при переходе от тела к окружающей среде. В связи с этим уравнения (3.3) можно рассматривать как описывающие не только намагниченный объект, но и все пространство.

Приведем (3.3) к уравнениям второго порядка, но зависящим только от одного вектора - $\vec{E}$ или $\vec{H}$. Для этого применим операцию *rot* к обеим частям выражений (3.3), учитывая, что [7]

$$\text{rot rot } \vec{a} = \text{grad div } \vec{a} - \Delta \vec{a}.$$

После преобразований получаем:

$$\begin{cases} \text{grad div } \vec{E} - \Delta \vec{E} - k^2 \vec{E} = \text{rot } \vec{g}^M - i\omega\mu_0 \vec{g}^3; \\ \text{grad div } \vec{H} - \Delta \vec{H} - k^2 \vec{H} = \text{rot } \vec{g}^3 + i\omega\varepsilon_c \vec{g}^M, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $k = \omega\sqrt{\varepsilon_c \mu_0}$ - волновое число в почве.

Используя функцию Грина [118], можно привести уравнения (3.4) к интегральным уравнениям Максвелла совместно с граничными условиями на границе раздела двух сред [111-113]:

$$\begin{aligned}
\vec{E}(\vec{r}) &= \vec{E}_0(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} (\text{grad div} + k^2) \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}' - \\
&\quad - \frac{i\omega\mu_0}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'; \\
\vec{H}(\vec{r}) &= \vec{H}_0(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} (\text{grad div} + k^2) \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}' + \\
&\quad + \frac{i\omega\varepsilon_c}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}',
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$f(|\vec{r} - \vec{r}'|) = \frac{e^{-ik|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|}; \tag{3.6}$$

где - $E_0(r)$ и $H_0(r)$ - электрическое и магнитное поля соответственно, которые были бы в точке r при отсутствии намагниченного тела.

Интегралы в (3.5) распространяются на весь объем V , занимаемый намагниченным телом.

Смысл полей, стоящих слева в выражениях (3.5), зависит от положения точки r . Если эта точка находится внутри объема V , занимаемого рассматриваемым телом, то поля, стоящие слева, представляют собой поля в этом теле, то есть это те же поля, что и под знаком интеграла справа. В этом случае (3.5) представляет собой не что иное, как линейные неоднородные интегральные уравнения, определяющие электромагнитное поле внутри тела с диэлектрической и магнитной проницаемостями ε и μ . Если же точка r лежит вне области V , то (3.5) являются равенствами, определяющими полное поле вне намагниченного тела через невозмущенное поле (первое слагаемое) и возмущенное, связанное с намагниченным объектом (второе слагаемое).

Возмущение поля можно выразить через электрический и магнитный потенциалы Герца $\vec{I}^{\text{э}}$ и $\vec{I}^{\text{м}}$ с помощью соотношений [2]:

$$\begin{cases} E_{\text{возм}} = (\text{grad div} + k^2) \Pi^{\text{э}} - i\omega\mu_0 \text{rot} \Pi^{\text{м}}; \\ \vec{H}_{\text{возм}} = (\text{grad div} + k^2) \vec{\Pi}^{\text{м}} + i\omega\varepsilon_c \text{rot} \vec{\Pi}^{\text{э}}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Сравнивая (3.7) с (3.5), можно прийти к выводу, что

$$\vec{\Pi}^{\text{э}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'; \quad (3.8)$$

$$\vec{\Pi}^{\text{м}} = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'.$$

Имея в виду, что $(\varepsilon - \varepsilon_c) \vec{E} = \vec{P}^{\text{э}}$ не что иное, как вектор электрической поляризации, а $(\mu - \mu_0) \vec{H} = \vec{P}^{\text{м}}$ - магнитной, получаем:

$$\vec{\Pi}^{\text{э}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_c} \int_V \vec{P}^{\text{э}}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'; \quad (3.9)$$

$$\vec{\Pi}^{\text{м}} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_V \vec{P}^{\text{м}}(\vec{r}') f(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}'.$$

Учитывая (3.8), выражения для индуцированных полей намагниченными частицами (3.5) можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) + (\text{grad div} + k^2) \vec{\Pi}^{\text{э}} - i\omega\mu_0 \text{rot} \vec{\Pi}^{\text{м}}; \\ \vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_0(\vec{r}) + (\text{grad div} + k^2) \vec{\Pi}^{\text{м}} + i\omega\varepsilon_c \text{rot} \vec{\Pi}^{\text{э}}. \end{cases} \quad (3.10)$$

Определение решения интегральных уравнений (3.5), дающее внутренние поля, можно значительно упростить, если учесть, что рассматриваются намагниченные объекты, линейные размеры которых малы по сравнению с длиной падающей волны. В этом случае выражения для полей внутри рассеивателя, а также в ближней зоне можно разложить по степеням малого параметра $\frac{l}{\lambda}$, где l - наибольший линейный размер эллипсоида. Это же можно сделать и с $f(|r - r'|)$ [116].

Так как зависимость электрического и магнитного поля от r связана с множителем $e^{-ik|r-r'|}$, то, воспользовавшись степенным рядом для этой функции

$$e^{-ik|\vec{r}-\vec{r}'|} = 1 - ik|\vec{r}-\vec{r}'| + \frac{(ik|\vec{r}-\vec{r}'|)^2}{2!} - \dots;$$

получим

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) &= E^{(0)}(\vec{r}) + (ik)E^{(1)}(\vec{r}) + (ik)^2 E^{(2)}(\vec{r}) + \dots; \\ \vec{H}(\vec{r}) &= H^{(0)}(\vec{r}) + (ik)H^{(1)}(\vec{r}) + (ik)^2 H^{(2)}(\vec{r}) + \dots. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Кроме того,

$$f(|\vec{r}-\vec{r}'|) = \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2}|\vec{r}-\vec{r}'| + \dots \quad (3.12)$$

Подставим (3.11) и (3.12) в (3.5):

$$E^{(0)}(\vec{r}) + (ik)E^{(1)}(\vec{r}) + (ik)^2 E^{(2)}(\vec{r}) + \dots = E_0^{(0)}(\vec{r}) + (ik)E_0^{(1)}(\vec{r}) +$$

$$\begin{aligned}
& +(ik)^2 \vec{E}_0^{(2)}(\vec{r}) + \dots + \frac{1}{4\pi} (\text{grad div} + k^2) \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left[\vec{E}^{(0)}(\vec{r}') + \right. \\
& \left. + (ik) \vec{E}^{(1)}(\vec{r}') + (ik)^2 \vec{E}^{(2)}(\vec{r}') + \dots \right] \cdot \left[\frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots \right] d\vec{r}' - \\
& - \frac{i\omega\mu_0}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left[\vec{H}^{(0)}(\vec{r}') + (ik) \vec{H}^{(1)}(\vec{r}') + (ik)^2 \vec{H}^{(2)}(\vec{r}') + \dots \right] \times \\
& \times \left[\frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots \right] d\vec{r}';
\end{aligned} \tag{3.13}$$

$$\begin{aligned}
& H^{(0)}(\vec{r}) + (ik) H^{(1)}(\vec{r}) + (ik)^2 H^{(2)}(\vec{r}) + \dots = H_0^{(0)}(\vec{r}) + (ik) H_0^{(1)}(\vec{r}) + \\
& + (ik)^2 H_0^{(2)}(\vec{r}) + \dots + \frac{1}{4\pi} (\text{grad div} + k^2) \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left[\vec{H}^{(0)}(\vec{r}') + \right. \\
& \left. + (ik) \vec{H}^{(1)}(\vec{r}') + (ik)^2 \vec{H}^{(2)}(\vec{r}') + \dots \right] \cdot \left[\frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots \right] d\vec{r}' + \\
& + \frac{i\omega\varepsilon_c}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left[\vec{E}^{(0)}(\vec{r}') + (ik) \vec{E}^{(1)}(\vec{r}') + (ik)^2 \vec{E}^{(2)}(\vec{r}') + \dots \right] \times \\
& \times \left[\frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots \right] d\vec{r}'.
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Приравнявая слагаемые с одинаковыми степенями (ik) слева и справа, можно получить систему уравнений для нулевого, первого и других приближений. Так, для нулевого приближения, который нас и интересует (случай квазистатики), имеем:

$$\begin{aligned}
\vec{H}^{(0)}(\vec{r}) = & \vec{H}_0^{(0)}(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \text{grad div} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}^{(0)}(\vec{r}') \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}' + \\
& + \frac{i\omega\varepsilon_c}{4\pi} \text{rot} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}^{(0)}(\vec{r}') \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'.
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Используя теперь известные соотношения для дифференциальных операторов [117], а также то, что они действуют на переменную r , преобразуем (3.15):

$$\begin{aligned}\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{E}_0^{(0)}(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}^{(0)}(\vec{r}') \cdot \text{grad} \right) \text{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'; \\ \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{H}_0^{(0)}(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}^{(0)}(\vec{r}') \cdot \text{grad} \right) \text{grad} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'.\end{aligned}\quad (3.16)$$

Рассмотрим решение уравнений, определяющих электрические и магнитные поля (3.16), в нулевом приближении. В качестве характерной формы для тел,

удовлетворяющих требованию $\frac{l}{\lambda} \ll 1$, можно считать эллипсоид. В этом случае для решения интегральных уравнений (3.16) целесообразно ввести вспомогательную функцию W , являющуюся ньютоновским потенциалом однородного эллипсоида [119]

$$W(\vec{r}) = \int_V \frac{d\vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (3.17)$$

То, что переменные r и r' стоят под знаком интеграла в виде линейной комбинации $(r - r')$, позволяет перейти от dr' к dr с заменой знака дифференциала

$$W(\vec{r}) = \int_V \frac{d\vec{r}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (3.18)$$

Но в этом случае дифференциальные операторы под знаком интеграла сводятся к вычислению вторых производных от ньютоновского потенциала, а множитель $\vec{E}^{(0)}(\vec{r}')$ выходит за знак интеграла. В том случае, когда

ньютоновский потенциал есть квадратичная функция координат, его вторая производная равна константе. Следовательно, характер $E^{(0)}(\vec{r})$ зависит от свободного члена интегрального уравнения. Действительно, первое уравнение (3.16) принимает вид

$$\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) - \frac{1}{4\pi} \left(\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}^{(0)}(\vec{r}) \cdot \text{grad} \right) \text{grad} W = \vec{E}_0^{(0)}(\vec{r}) \quad (3.19)$$

или

$$\sum_{m=1}^3 E_m^{(0)} \left[\delta_{nm} - \frac{1}{4\pi} \sum_{p=1}^3 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \delta_{mp} \right) \frac{\partial^2 W}{\partial x_p \partial x_n} \right] = E_{0n}^{(0)} \quad (3.20)$$

где m, n, p - номер координаты;

$\delta_{\alpha\beta}$ - символ Кронекера, который равен нулю, если $\alpha \neq \beta$, и равен единице, если $\alpha = \beta$.

Аналогичное выражение получаем и для второго уравнения (3.16)

$$\vec{H}^{(0)}(\vec{r}) - \frac{1}{4\pi} \left(\left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) \cdot \text{grad} \right) \text{grad} W = \vec{H}_0^{(0)}(\vec{r}) \quad (3.21)$$

или

$$\sum_{m=1}^3 H_m^{(0)} \left[\delta_{nm} - \frac{1}{4\pi} \sum_{p=1}^3 \left(\frac{\mu}{\mu_0} - \delta_{mp} \right) \frac{\partial^2 W}{\partial x_p \partial x_n} \right] = H_{0n}^{(0)} \quad (3.22)$$

Выясним характер $E_0^{(0)}(\vec{r})$. Для этого разложим $E_0(r)$ в степенной ряд по параметру малости $\frac{l}{\lambda}$, или что то же самое $k|r - r'|$. Так как

$$E_0(\vec{r}) = E_0 e^{-ik|r - r'|} \quad (3.23)$$

где E_0 - амплитуда электрической составляющей падающего поля, то, пользуясь степенным рядом для экспоненциальной функции, имеем

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = E_0 \left(1 - ik|\vec{r} - \vec{r}'| - \frac{k^2 |\vec{r} - \vec{r}'|^2}{2} + \dots \right) \quad (3.24)$$

Первое слагаемое, то есть нулевое приближение данного ряда, и есть $E_0^{(0)}(\vec{r})$. Следовательно,

$$E_0^{(0)}(\vec{r}) = E_0 \quad (3.25)$$

то есть правая часть уравнений (3.19) и (3.20) является константой. Отсюда следует, что и $E^{(0)}(\vec{r})$ также будет константой.

Проведя аналогичные рассуждения для $H_0^{(0)}(\vec{r})$, получим, что нулевое приближение для внутреннего магнитного поля также константа, то есть

$$H_0^{(0)}(\vec{r}) = H_0 \quad (3.26)$$

и зависит от электромагнитных характеристик намагниченной частицы и ее размеров так же, как и электрическая составляющая.

Итак, в том случае, если ньютоновский потенциал есть квадратичная функция координат, то нулевое приближение для электрической и магнитной составляющей поля внутри намагниченной частицы будет иметь тот же характер, что и внешнее поле. Если внешнее поле однородно, то и внутреннее также однородно. Этот же вывод касается и приближений более высокого порядка. Но известно [119], что в случаях, когда тело имеет форму эллипсоида, ньютоновский потенциал (3.17) является именно квадратичной функцией координат внутренних точек эллипсоида

$$W(\vec{r}) = \xi - \pi abc(I_1 x^2 + I_2 y^2 + I_3 z^2) \quad (3.27)$$

где a, b, c - размеры полуосей эллипсоида (рис. 3.2);

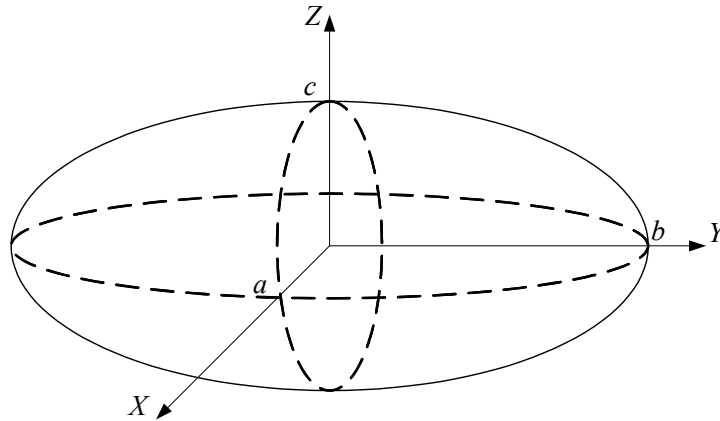


Рис. 3.2. Эллипсоидальная намагниченная частица

где I_1, I_2, I_3 - константы, выражающиеся через эллиптические интегралы:

$$I_1 = \int_0^\infty \frac{ds}{(a^2 + s)R(s)}, \quad I_2 = \int_0^\infty \frac{ds}{(b^2 + s)R(s)}, \quad I_3 = \int_0^\infty \frac{ds}{(c^2 + s)R(s)} \quad (3.28)$$

$$R(s) = \sqrt{(a^2 + s)(b^2 + s)(c^2 + s)}$$

где ξ - произвольная константа.

Приведенные выше результаты показывают, что внутреннее электрическое и магнитное поле эллипсоида однородно, если таковым является внешнее поле. Для вычисления компонент внутреннего поля воспользуемся выражениями (3.20) и (3.22). Учитывая, что номер 1 соответствует x -компоненте, 2 - y -компоненте, а 3 - z -компоненте, получаем систему уравнений для статического электрического поля:

$$\begin{cases} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) abc I_1 \right] E_x^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} abc I_1 E_y^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} abc I_1 E_z^{(0)} = E_{0x}^{(0)}; \\ \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} abc I_2 E_x^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) abc I_2 \right] E_y^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} abc I_2 E_z^{(0)} = E_{0y}^{(0)}; \\ \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} abc I_3 E_x^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} abc I_3 E_y^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) abc I_3 \right] E_z^{(0)} = E_{0z}^{(0)} \end{cases} \quad (3.29)$$

и статического магнитного поля:

$$\begin{cases} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) abc I_1 \right] H_x^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} abc I_1 H_y^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} abc I_1 H_z^{(0)} = H_{0x}^{(0)}; \\ \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} abc I_2 H_x^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) abc I_2 \right] H_y^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} abc I_2 H_z^{(0)} = H_{0y}^{(0)}; \\ \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} abc I_3 H_x^{(0)} + \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} abc I_3 H_y^{(0)} + \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) abc I_3 \right] H_z^{(0)} = H_{0z}^{(0)}. \end{cases} \quad (3.30)$$

Системы (3.29) и (3.30) неоднородны и поэтому имеют решения в том случае, если их детерминанты Δ_ε для (3.29) и Δ_μ для (3.30) отличны от нуля.

Согласно методу Крамера [10] решение (3.20) имеет вид

$$E_x^{(0)} = \frac{\Delta_{\vartheta x}}{\Delta_{\vartheta}}; \quad E_y^{(0)} = \frac{\Delta_{\vartheta y}}{\Delta_{\vartheta}}; \quad E_z^{(0)} = \frac{\Delta_{\vartheta z}}{\Delta_{\vartheta}}. \quad (3.31)$$

Здесь

$$\Delta_{\vartheta} = \begin{vmatrix} 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_1 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_1 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_1 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_2 & 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_2 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_2 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_3 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_3 & 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_3 \end{vmatrix}; \quad (3.32)$$

$$\Delta_{\vartheta x} = \begin{vmatrix} E_{0x}^{(0)} & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_1 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_1 \\ E_{0y}^{(0)} & 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_2 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_2 \\ E_{0z}^{(0)} & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_3 & 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_3 \end{vmatrix}; \quad (3.33)$$

$$\Delta_{\vartheta y} = \begin{vmatrix} 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_1 & E_{0x}^{(0)} & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_1 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_2 & E_{0y}^{(0)} & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_2 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_3 & E_{0z}^{(0)} & 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_3 \end{vmatrix} \quad (3.34)$$

$$\Delta_{yz} = \begin{vmatrix} 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_1 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_1 & E_{0x}^{(0)} \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_2 & 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} I_2 & E_{0y}^{(0)} \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_3 & \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \frac{abc}{2} I_3 & E_{0z}^{(0)} \end{vmatrix} \quad (3.35)$$

определители, составленные из соответствующих коэффициентов системы (3.39).

Вычисляя определители (3.32) – (3.35), с учетом соотношения

$$I_1 + I_2 + I_3 = \frac{2}{abc} \quad (3.36)$$

получаем:

$$\Delta_{\vartheta} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 (I_1 I_2 + I_1 I_3 + I_2 I_3) + \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^3 I_1 I_2 I_3;$$

$$\begin{aligned} \Delta_{yx} = & \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_2 + I_3) - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 I_3 \right] E_{0x}^{(0)} - \\ & - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 (I_1 + I_2) E_{0y}^{(0)} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 (I_1 + I_3) E_{0z}^{(0)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{\dot{y}y} = & -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 (I_1 + I_2) E_{0x}^{(0)} + \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_1 + I_3) - \right. \\
& \left. - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 I_3 \right] E_{0y}^{(0)} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 (I_2 + I_3) E_{0z}^{(0)}; \\
\Delta_{\dot{y}z} = & -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_3 (I_1 + I_3) E_{0x}^{(0)} - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_3 (I_2 + I_3) E_{0y}^{(0)} + \\
& + \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_1 + I_2) - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 I_2 \right] E_{0z}^{(0)}.
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Аналогичным образом находится решение системы (3.30). При этом

$$H_x^{(0)} = \frac{\Delta_{\dot{y}x}}{\Delta_{\dot{y}}}; \quad H_y^{(0)} = \frac{\Delta_{\dot{y}y}}{\Delta_{\dot{y}}}; \quad H_z^{(0)} = \frac{\Delta_{\dot{y}z}}{\Delta_{\dot{y}}}. \tag{3.38}$$

Но в этом случае соответствующие определители имеют вид:

$$\begin{aligned}
\Delta_{\dot{m}} = & \frac{\mu}{\mu_0} - \left(\frac{2\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 (I_1 I_2 + I_1 I_3 + I_2 I_3) + \left(\frac{3\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^3 I_1 I_2 I_3; \\
\Delta_{\dot{m}x} = & \left[1 + \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_2 + I_3) - \left(\frac{2\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 I_3 \right] E_{0x}^{(0)} - \\
& - \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 (I_1 + I_2) E_{0y}^{(0)} - \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 (I_1 + I_3) E_{0z}^{(0)};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{my} = & -\frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 (I_1 + I_2) E_{0x}^{(0)} + \left[1 + \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_1 + I_3) - \right. \\
& \left. - \left(\frac{2\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 I_3 \right] E_{0y}^{(0)} - \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 (I_2 + I_3) E_{0z}^{(0)}; \\
\Delta_{iz} = & -\frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_3 (I_1 + I_3) E_{0x}^{(0)} - \frac{\mu}{\mu_0} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_3 (I_2 + I_3) E_{0y}^{(0)} + \\
& + \left[1 + \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_1 + I_2) - \left(\frac{2\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 I_2 \right] E_{0z}^{(0)}.
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Подставляя (3.37) в (3.31), окончательно получаем следующие выражения для внутренних электрических полей намагниченной частицы в нулевом приближении

$$\vec{E}^{(0)} = \frac{\tilde{A}_{\dot{y}}}{\Delta_{\dot{y}}} \vec{E}_0^{(0)}, \tag{3.40}$$

где $\tilde{A}_{\dot{y}}$ - матрица, равная

$$\begin{pmatrix} a_{\dot{y}11} & a_{\dot{y}12} & a_{\dot{y}13} \\ a_{\dot{y}21} & a_{\dot{y}22} & a_{\dot{y}23} \\ a_{\dot{y}31} & a_{\dot{y}32} & a_{\dot{y}33} \end{pmatrix}. \tag{3.41}$$

Элементы матрицы (3.41) определяются выражениями:

$$a_{\dot{y}11} = 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_2 + I_3) - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 I_3;$$

$$\begin{aligned}
a_{\text{э}12} &= -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 (I_1 + I_2); \\
a_{\text{э}13} &= -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 (I_1 + I_3); \\
a_{\text{э}21} &= -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 (I_1 + I_2); \\
a_{\text{э}22} &= 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_1 + I_3) - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 I_3; \\
a_{\text{э}23} &= -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_2 (I_2 + I_3); \\
a_{\text{э}31} &= -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_3 (I_1 + I_3); \\
a_{\text{э}32} &= -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_3 (I_2 + I_3); \\
a_{\text{э}33} &= 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{abc}{2} (I_1 + I_2) - \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left(\frac{abc}{2} \right)^2 I_1 I_2.
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Выражения (3.39) и (3.42) позволяют из (3.40) находить электрическую составляющую внутреннего поля для приближения статики.

Внутренние магнитные поля намагниченной частицы в приближении статики определяются из аналогичного выражения

$$\vec{H}^{(0)} = \frac{\tilde{A}_i}{\Delta_i} \vec{H}_0^{(0)}, \tag{3.43}$$

где матрица

$$\tilde{A}_i = \begin{pmatrix} a_{i11} & a_{i12} & a_{i13} \\ a_{i21} & a_{i22} & a_{i23} \\ a_{i31} & a_{i32} & a_{i33} \end{pmatrix}. \quad (3.44)$$

Элементы матрицы (3.44) аналогичны выражениям (3.42), в которых в этом случае необходимо ε заменить на μ , а ε_c на μ_0 .

Из выражений (3.28) – (3.44) следует, что основная сложность при определении внутренних полей связана с вычислением эллиптических интегралов, все остальные операции являются арифметическими. В случае если рассеиватель имеет форму вытянутого или сплюснутого эллипсоида, то удастся найти более простые выражения для эллиптических интегралов. Так, в случае вытянутого эллипсоида $a = c > b$ имеем:

$$I_1 = I_3 = \frac{1}{(a^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}} \left(\arccos \frac{b}{a} - \frac{b}{a^2} \sqrt{a^2 - b^2} \right); \quad (3.45)$$

$$I_2 = \frac{2}{(a^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1}{b} \sqrt{a^2 - b^2} - \arccos \frac{b}{a} \right).$$

Если же эллипсоид сплюснутый, то $b = c < a$ и

$$I_1 = \frac{2}{(a^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}} \left(\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} - \frac{1}{a} \sqrt{a^2 - b^2} \right); \quad (3.46)$$

$$I_2 = I_3 = \frac{1}{(a^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{a}{b^2} \sqrt{a^2 - b^2} - \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \right).$$

Из выражений (3.45) и (3.46) можно получить при необходимости значения эллиптических интегралов для тонкого цилиндра и диска. В первом случае необходимо устремить к нулю b , во втором - b и c .

Несомненный интерес представляет случай, когда рассеиватели имеют форму шара. Этот случай можно рассмотреть, положив в эллипсоиде все полуоси равными между собой, то есть $a = b = c = R$. При этом из (3.28) получаем:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \int_0^{\infty} \frac{ds}{(R^2 + s)^{\frac{5}{2}}} = \frac{2}{3R^3}. \quad (3.47)$$

Выражение (3.47) позволяет значительно упростить как формулы для $\Delta_{\text{э}}$ и $\Delta_{\text{м}}$ (3.37), (3.39), так и матрицы $\tilde{A}_{\text{э}}$ и $\tilde{A}_{\text{м}}$ (3.41), (3.44):

$$\Delta_{\text{э}} = 4 \frac{3\varepsilon + 2\varepsilon_{\text{с}}}{27\varepsilon_{\text{с}}}; \quad (3.48)$$

$$\Delta_{\text{м}} = 4 \frac{3\mu + 2\mu_0}{27\mu_0} \quad (3.49)$$

$$\tilde{A}_{\text{э}} = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon + 7\varepsilon_{\text{с}}}{9\varepsilon_{\text{с}}} & -\frac{2\varepsilon}{9\varepsilon_{\text{с}}} & -\frac{2\varepsilon}{9\varepsilon_{\text{с}}} \\ \frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} \\ -\frac{2\mu}{9\mu_0} & \frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} \\ -\frac{2\mu}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} & \frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} \end{pmatrix} \quad (3.50)$$

$$\tilde{A}_{\text{м}} = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon + 7\varepsilon_{\text{с}}}{9\varepsilon_{\text{с}}} & -\frac{2\varepsilon}{9\varepsilon_{\text{с}}} & -\frac{2\varepsilon}{9\varepsilon_{\text{с}}} \\ \frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} \\ -\frac{2\mu}{9\mu_0} & \frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} \\ -\frac{2\mu}{9\mu_0} & -\frac{2\mu}{9\mu_0} & \frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

3.2 Определение внешних магнитных полей в случае статики

Как показано выше (3.10), поля, рассеянные на намагниченных объектах малых размеров, могут быть определены с помощью электрического потенциала Герца (3.8). Однако, воспользовавшись тем, что

$\frac{l}{\lambda} \ll 1$, соотношение (3.8) можно существенно упростить.

Рассмотрим вначале ближнее поле. Очевидно, в этой зоне соотношение $\frac{l}{\lambda} \ll 1$ остается справедливым. Поэтому разложим электрический и магнитный потенциалы Герца по малому параметру аналогично тому, как это было сделано для внутреннего электрического и магнитного полей (3.11):

$$\Pi^3(\vec{r}) = \Pi_{(0)}^3(\vec{r}) + (ik) \Pi_{(1)}^3(\vec{r}) + (ik)^2 \Pi_{(2)}^3(\vec{r}) + \dots \quad (3.52)$$

$$\Pi^M(\vec{r}) = \Pi_{(0)}^M(\vec{r}) + (ik) \Pi_{(1)}^M(\vec{r}) + (ik)^2 \Pi_{(2)}^M(\vec{r}) + \dots \quad (3.53)$$

Тогда, воспользовавшись (3.8), (3.9) и (3.12) имеем:

$$\begin{aligned} \vec{I}_{(0)}^{\dot{y}}(\vec{r}) + (ik) \vec{I}_{(1)}^{\dot{y}}(\vec{r}) + (ik)^2 \vec{I}_{(2)}^{\dot{y}}(\vec{r}) + \dots = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \left[\vec{E}^{(0)}(\vec{r}') + \right. \\ \left. + (ik) \vec{E}^{(1)}(\vec{r}') + (ik)^2 \vec{E}^{(2)}(\vec{r}') + \dots \right] \left[\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots \right] d\vec{r}'; \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \vec{I}_{(0)}^{\dot{i}}(\vec{r}) + (ik) \vec{I}_{(1)}^{\dot{i}}(\vec{r}) + (ik)^2 \vec{I}_{(2)}^{\dot{i}}(\vec{r}) + \dots = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \left[\vec{H}^{(0)}(\vec{r}') + \right. \\ \left. + (ik) \vec{H}^{(1)}(\vec{r}') + (ik)^2 \vec{H}^{(2)}(\vec{r}') + \dots \right] \left[\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} - ik - \frac{k^2}{2} |\vec{r} - \vec{r}'| + \dots \right] d\vec{r}'. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Данные равенства будут справедливы, если приравнять между собой коэффициенты при одинаковых степенях (ik) , что дает для приближения статики:

$$\vec{\Pi}_{(0)}^{\dot{y}}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \frac{\vec{E}^{(0)}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'; \quad (3.56)$$

$$\vec{\Pi}_{(0)}^{\dot{m}}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \frac{\vec{H}^{(0)}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d\vec{r}'. \quad (3.57)$$

Определим нулевое приближение, воспользовавшись (3.40) и (3.43):

$$\vec{I}_{(0)}^{\dot{y}}(\vec{r}) = \frac{\tilde{A}_{\dot{y}}}{4\pi \Delta_{\dot{y}}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}_0^{(0)} \int_V \frac{d\vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}; \quad (3.58)$$

$$\vec{\Pi}_{(0)}^{\dot{m}}(\vec{r}) = \frac{\tilde{A}_{\dot{m}}}{4\pi \Delta_{\dot{m}}} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}_0^{(0)} \int_V \frac{d\vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (3.59)$$

В выражениях (3.58), (3.59) интеграл определяет ньютоновский потенциал эллипсоида для внешних точек:

$$\oint_V \frac{\vec{dr'}}{|r - r'|} = W'(\vec{r}) \quad (3.60)$$

Известно [119], что он равен

$$W'(\vec{r}) = \pi abc \int_t^\infty \left(1 - \frac{x^2}{a^2 + s} - \frac{y^2}{b^2 + s} - \frac{z^2}{c^2 + s} \right) \frac{ds}{R(s)} \quad (3.61)$$

где t - наибольший корень уравнения

$$\frac{x^2}{a^2 + t} + \frac{y^2}{b^2 + t} + \frac{z^2}{c^2 + t} - 1 = 0 \quad (3.62)$$

Для произвольного эллипсоида определение t связано с решением задачи об исследовании функции трех переменных x, y, z на экстремум.

Значительно проще эта задача выглядит в том случае, когда рассеивателем является шар. Действительно, в этом случае (3.62) принимает вид

$$\frac{x^2}{R^2 + t} + \frac{y^2}{R^2 + t} + \frac{z^2}{R^2 + t} - 1 = 0 \quad (3.63)$$

Учитывая, что x, y, z - координаты точек, лежащих на поверхности шара, и переходя к сферическим координатам

$$x = R \cos \varphi \sin \theta; \quad y = R \sin \varphi \sin \theta; \quad z = R \cos \theta, \quad (3.64)$$

преобразуем (3.63)

$$R^2 = R^2 + t. \quad (3.65)$$

Отсюда следует, что $t = 0$.

Таким образом, значение ньютоновского потенциала (3.61) для шара определяется вычислением интеграла

$$\begin{aligned}
 W'(\vec{r}) &= \pi R^3 \int_0^\infty \left(1 - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{R^2 + s} \right) \frac{ds}{(R^2 + s)^{\frac{3}{2}}} = \\
 &= \pi R^3 \left(2 \frac{3R^2 - x^2 - y^2 - z^2}{3R^3} \right) = \frac{2\pi}{3} (3R^2 - x^2 - y^2 - z^2),
 \end{aligned}
 \tag{3.66}$$

где x, y, z - координаты точек, в которых определяется потенциал по отношению к центру шара.

Чтобы найти возбужденные поля в ближней зоне, необходимо (3.58), (3.59) с учетом (3.61) подставить в (3.10). Приближение статики, в частности, задается с учетом $\omega = 0$ выражениями:

$$\begin{aligned}
 \vec{E}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{E}_0^{(0)} + \tilde{P} \frac{\tilde{A}_y}{4\pi \Delta_y} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \vec{E}_0^{(0)} W'(\vec{r}); \\
 \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{H}_0^{(0)} + \tilde{P} \frac{\tilde{A}_i}{4\pi \Delta_i} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}_0^{(0)} W'(\vec{r}),
 \end{aligned}
 \tag{3.67}$$

где $\tilde{P}$ - дифференциальный оператор, равный

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2}{\partial y^2} & \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{pmatrix}
 \tag{3.68}$$

Так как $\tilde{P}$ действует на координаты вектора r , (3.67) можно записать в несколько иной форме:

$$\begin{aligned}\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{E}_0^{(0)} + \frac{\tilde{A}_3}{4\pi\Delta_3} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \tilde{P} \cdot \vec{E}_0^{(0)} \cdot W'(\vec{r}); \\ \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{H}_0^{(0)} + \frac{\tilde{A}_M}{4\pi\Delta_M} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \tilde{P} \cdot \vec{H}_0^{(0)} \cdot W'(\vec{r}).\end{aligned}\quad (3.69)$$

Соотношения (3.69) позволяют определить внешние по отношению к намагниченной частице поля. В частности, если форма рассеивателя шарообразная, необходимо в (3.69) подставить (3.66). Тогда, с учетом воздействия оператора $\tilde{P}$ на $W'(\vec{r})$, внешние поля будут определяться из следующих выражений:

$$\begin{aligned}\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{E}_0^{(0)} + \frac{\tilde{A}_y}{4\pi\Delta_y} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \tilde{R} \vec{E}_0^{(0)}; \\ \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) &= \vec{H}_0^{(0)} + \frac{\tilde{A}_i}{4\pi\Delta_i} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \tilde{R} \vec{H}_0^{(0)}.\end{aligned}\quad (3.70)$$

где

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} -\frac{4\pi}{3} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4\pi}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{4\pi}{3} \end{pmatrix} = -\frac{4\pi}{3} \tilde{E}, \quad (3.71)$$

где $\tilde{E}$ - единичная матрица третьего порядка.

В том случае, когда необходимо определить рассеянное поле в дальней зоне, нужно в (3.8) функцию $f(|r - r'|)$ (3.6) разложить по сферическим функциям [112]

$$\frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|} = -ik \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) P_n(\cos \theta) j_n(k|r'|) h_n^{(2)}(k|r|) \quad (3.72)$$

где $P_n(\cos \theta)$ - полином Лежандра n -ой степени;

θ - угол между векторами r и r' ;

$j_n(k|r'|)$ и $h_n^{(2)}(k|r|)$ - сферические функции Бесселя n -го порядка.

Так как в рассматриваемом нами случае $k|r'| \ll 1$, разложение (3.72) можно представить в виде

$$\frac{e^{-ik|r-r'|}}{|r-r'|} = \frac{e^{-ik|r|}}{|r|} + \frac{k}{|r|} \left(1 - \frac{i}{k|r|} \right) \cos \theta \cdot e^{-ik|r|} + \dots \quad (3.73)$$

Подстановка (3.73) и (3.11) в (3.8) позволяет представить потенциалы Герца в виде слагаемых, описывающих мультипольные поля рассеяния. В частности, дипольная часть поля рассеяния описывается нулевым приближением электрического и магнитного потенциалов Герца:

$$\begin{aligned} \vec{\Pi}_{(0)}^e(\vec{r}) &= \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ik|r|}}{|r|} \int_V \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_c} - 1 \right) \vec{E}^{(0)}(\vec{r}') d\vec{r}'; \\ \vec{\Pi}_{(0)}^m(\vec{r}) &= \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-ik|r|}}{|r|} \int_V \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \vec{H}^{(0)}(\vec{r}') d\vec{r}', \end{aligned} \quad (3.74)$$

которые, в основном, и определяют поле в волновой зоне.

Преобразуем (3.74) с учетом (3.40) и (3.43):

$$\begin{aligned}\vec{I}_{(0)}^{\dot{y}}(\vec{r}) &= \frac{V}{4\pi\Delta_{\dot{y}}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \tilde{A}_{\dot{y}} \vec{E}_0^{(0)} \frac{e^{-ik|\vec{r}|}}{|\vec{r}|}; \\ \vec{I}_{(0)}^{\dot{i}}(\vec{r}) &= \frac{V}{4\pi\Delta_{\dot{i}}} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \tilde{A}_{\dot{i}} \vec{H}_0^{(0)} \frac{e^{-ik|\vec{r}|}}{|\vec{r}|},\end{aligned}\quad (3.75)$$

где V - объем намагниченного тела.

В случае шара $\tilde{A}_{\dot{y}}$, $\tilde{A}_{\dot{i}}$, $\Delta_{\dot{y}}$ и $\Delta_{\dot{i}}$ определены в (3.48) - (3.51), а

$V = \frac{4}{3}\pi R^3$, где R - радиус шара.

Соотношение (3.75) позволяет найти электрическую и магнитную составляющие возбужденного статического поля в дальней зоне в дипольном приближении.

Из (3.10) получаем:

$$\vec{E}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{E}_0^{(0)} + \tilde{P} \frac{V}{4\pi|\vec{r}|\Delta_{\dot{y}}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right) \tilde{A}_{\dot{y}} \vec{E}_0^{(0)};$$

(3.76)

$$\vec{H}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{H}_0^{(0)} + \tilde{P} \frac{V}{4\pi|\vec{r}|\Delta_{\dot{i}}} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \tilde{A}_{\dot{i}} \vec{H}_0^{(0)},$$

где $\tilde{P}$ задано в (3.68).

3.3 Поля, создаваемые системой намагниченных частиц

В п. 3.2 получены выражения, описывающие статическое электрическое и магнитное поле, которое создают вокруг себя частицы, несущие электрический или магнитный заряд. При этом сами заряды могут

быть как постоянными, так и переменными. Однако полученные поля соответствуют одиночному источнику. Определим величины полей в том случае, когда имеется система частиц, несущих на себе какой-то заряд. Будем при этом учитывать, что в нашем случае это система намагниченных частиц, расположенных для простоты в узлах прямоугольной сетки, как это было сказано в п. 3.1. Центр системы координат расположен в центре квадрата (рис. 3.3). Кроме того, будем считать для простоты, что все частицы имеют форму шара.

Поскольку рассматривается случай воздействия намагниченных частиц, внесенных в почву, на корневую систему растений, то в (3.76) следует положить $E_0^{(0)} = 0$, а также учесть то, что эти частицы создают статические магнитные поля, то есть $\omega = 0$. В результате данных предположений (3.76) приобретает вид

$$\vec{H}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{H}_0^{(0)} + \tilde{P} \frac{\vec{V}}{4\pi|\vec{r}|\Delta_m} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \tilde{A}_m \vec{H}_0^{(0)}. \quad (3.77)$$

При этом статические электрические поля считаются равными нулю.

Выясним теперь, как изменится результирующее магнитное поле в произвольной точке почвы в результате взаимодействия системы рассматриваемых частиц. Как и в предыдущем разделе будем рассматривать суммарное поле, создаваемое системой из четырех намагниченных сфер, расположенных в вершинах квадрата. Плоскость, в которой лежат частицы, параллельна поверхности почвы (рис. 3.1). Расстояние между частицами таково, что можно рассматривать взаимодействие между ними посредством создаваемых ими полей, то есть пользоваться выражением (3.77).

Поля в такой системе будут определяться как сумма полей, поэтому в (3.77) появится выражение, определяющее магнитные поля, создаваемые внутри каждой намагниченной частицы соседними элементами

$$\vec{H}^{(0)}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^4 \tilde{P} \frac{\vec{V}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}_{0n}|\Delta_m} \left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1 \right) \tilde{A}_m \sum_{m=1}^4 \vec{H}_{0n}^{(0)}(\vec{r}_{0n} - \vec{r}_{0m}). \quad (3.78)$$

где r - произвольная точка внутри рассматриваемого квадрата;
 r_{0n} - координаты центров всех рассматриваемых намагниченных частиц;
 r_{0m} - координата центра намагниченной частицы, которая создает поле в точке r_{0n} .

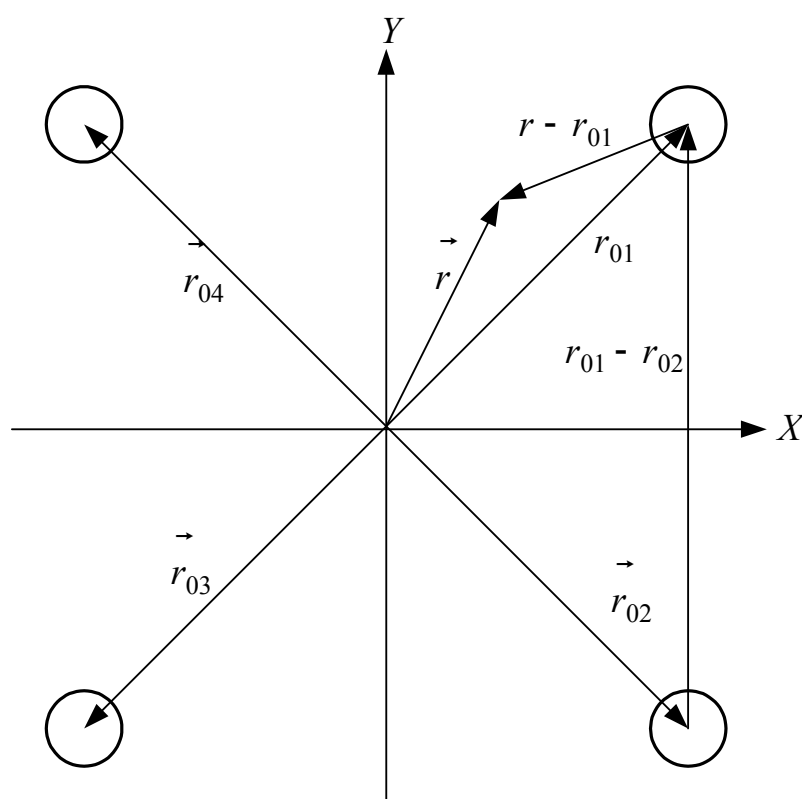


Рис. 3.3. Расположение намагниченных частиц и координаты их центров

Записывая выражение 3.78 в виде системы из четырех уравнений с четырьмя неизвестными амплитудами статических магнитных полей для центров каждой из намагниченных частиц рассматриваемой системы, можно найти значения этих амплитуд и, следовательно, определить напряженность

магнитного поля в произвольной точке. Подставляя затем найденные амплитуды в (3.78), определяем величину магнитного поля в произвольной точке r .

На основе предложенной модели был произведен расчет статических магнитных полей, создаваемых системой намагниченных частиц.

С целью упрощения расчетов положим, что намагниченные частицы ориентированы так, что вектор магнитного поля $H_{0n}^{(0)}$, создаваемого ими, направлен по оси OX , то есть имеет только одну составляющую $H_{0nx}^{(0)}$. Данное предположение не умаляет общность расчетов, так как позволяет получить полную картину распределения магнитных полей в почве между намагниченными частицами и просчитать амплитуды этих полей в различных точках. Если при этом пренебречь возможной анизотропией частиц, то с учетом (3.49), (3.51) и (3.66) для расчетов можно воспользоваться следующим выражением

$$\vec{H}^{(0)}(r) = \frac{9R^3(\mu - \mu_0)}{12\mu + 8\mu_0} \sum_{n=1}^4 \vec{G}(\vec{r} - \vec{r}_{0n}), \quad (3.79)$$

где вектор $G(\vec{r} - \vec{r}_{0n})$ содержит следующие компоненты

$$+ \frac{2\mu}{3\mu_0} \cdot \frac{(x - x_{0n})(y - y_{0n})}{\left(\sqrt{(x - x_{0n})^2 + (y - y_{0n})^2}\right)^5} \Bigg] H_{0nx}; \quad (3.80)$$

$$G_y(\vec{r} - \vec{r}_{0n}) = - \left[\frac{\mu + 7\mu_0}{9\mu_0} \cdot \frac{(x - x_{0n})(y - y_{0n})}{\left(\sqrt{(x - x_{0n})^2 + (y - y_{0n})^2}\right)^5} + \right. \\ \left. + \frac{2\mu}{3\mu_0} \cdot \frac{(x - x_{0n})^2 - 2(y - y_{0n})^2}{\left(\sqrt{(x - x_{0n})^2 + (y - y_{0n})^2}\right)^5} \right] H_{0nx}; \quad (3.81)$$

$$G_z(\vec{r} - \vec{r}_{0n}) = 0. \quad (3.82)$$

Таким образом, из выражений (3.80) – (3.82) следует, что созданное в почве магнитостатическое поле будет содержать компоненты $H_x^{(0)}(\vec{r})$ и $H_y^{(0)}(\vec{r})$. Распределение поля по глубине считаем для простоты отсутствующим.

Полученные выше выражения позволяют произвести расчет распределения магнитостатических полей при различных параметрах намагниченных частиц в горизонтальной плоскости, которая параллельна поверхности почвы.

В качестве образца были рассмотрены единичные сферические намагниченные объекты. Объекты были расположены в вершине квадрата со стороной равной 60 см. Радиус сфер взят равным 0,3 см. Считалось, что сферы являются смесью ферромагнитных порошков со средней относительной магнитной проницаемостью $\mu = 5000$. Напряженность создаваемого ими магнитного поля бралась равной $5 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$. Получено распределение векторного статического поля $H^{(0)}(\vec{r})$ как внутри квадрата (рис. 3.4), так и с учетом областей почвы, прилегающих с внешней стороны.

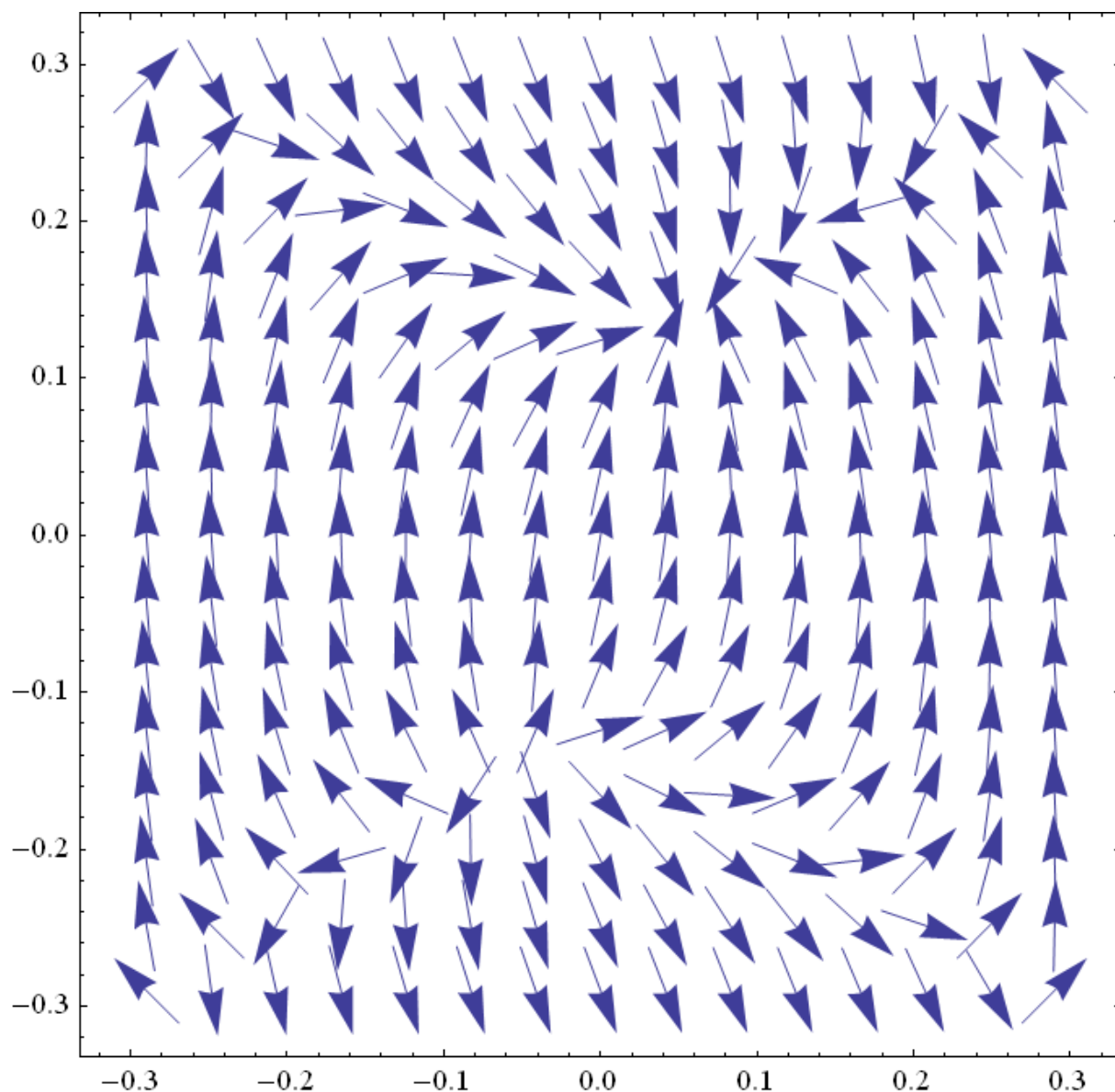


Рис. 3.4. Распределение векторного статического поля $H^{(0)}(\vec{r})$ внутри квадрата с вершинами в точках расположения намагниченных сфер

Полученные графики позволяют оценить однородность и стабильность в ориентации векторов магнитного поля. Так, из более детального графика (рис. 3.4) следует, что между создающими стационарное магнитное поле сферами направление векторов практически не меняется, что позволяет сделать вывод о практически неизменном воздействии этих полей на корневую систему растений.

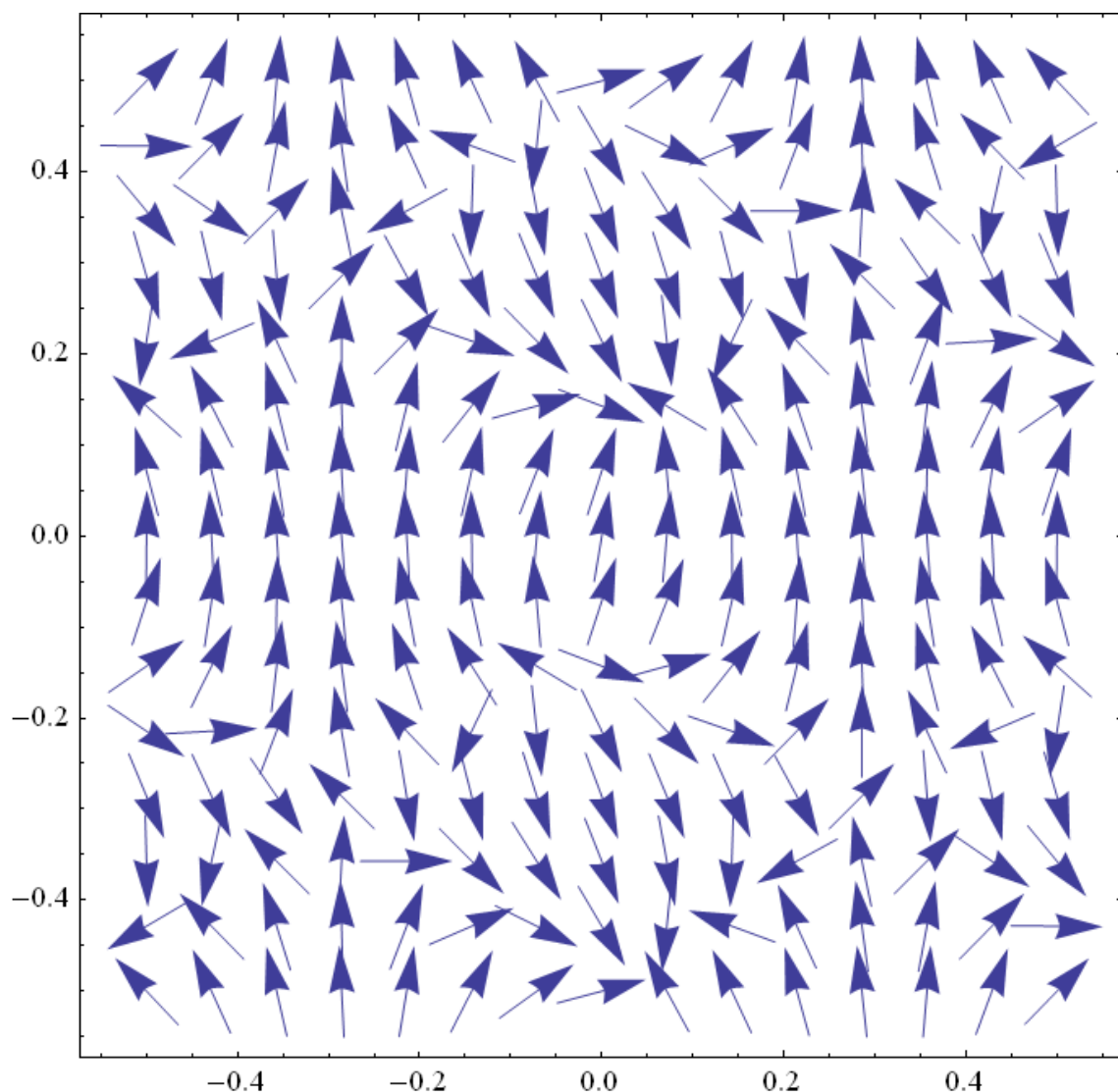


Рис. 3.5. Распределение векторного статического поля $H^{(0)}(\vec{r})$ в почве с учетом областей между намагниченными сферами и вне квадрата

Анализ рис. 3.5 показывает, что некоторая хаотичность в ориентации векторов возникает лишь вблизи элементов, создающих магнитное поле. Таким образом, следует вывод, что для получения однородного результата необходимо располагать создающие магнитное поле объекты на некотором удалении от растений.

На рис. 3.6 и 3.7 для аналогичных размеров рассматриваемой области показаны векторные линии стационарного магнитного поля между

намагниченными элементами (рис. 3.6), а также с учетом области, лежащей вне квадрата (рис. 3.7).

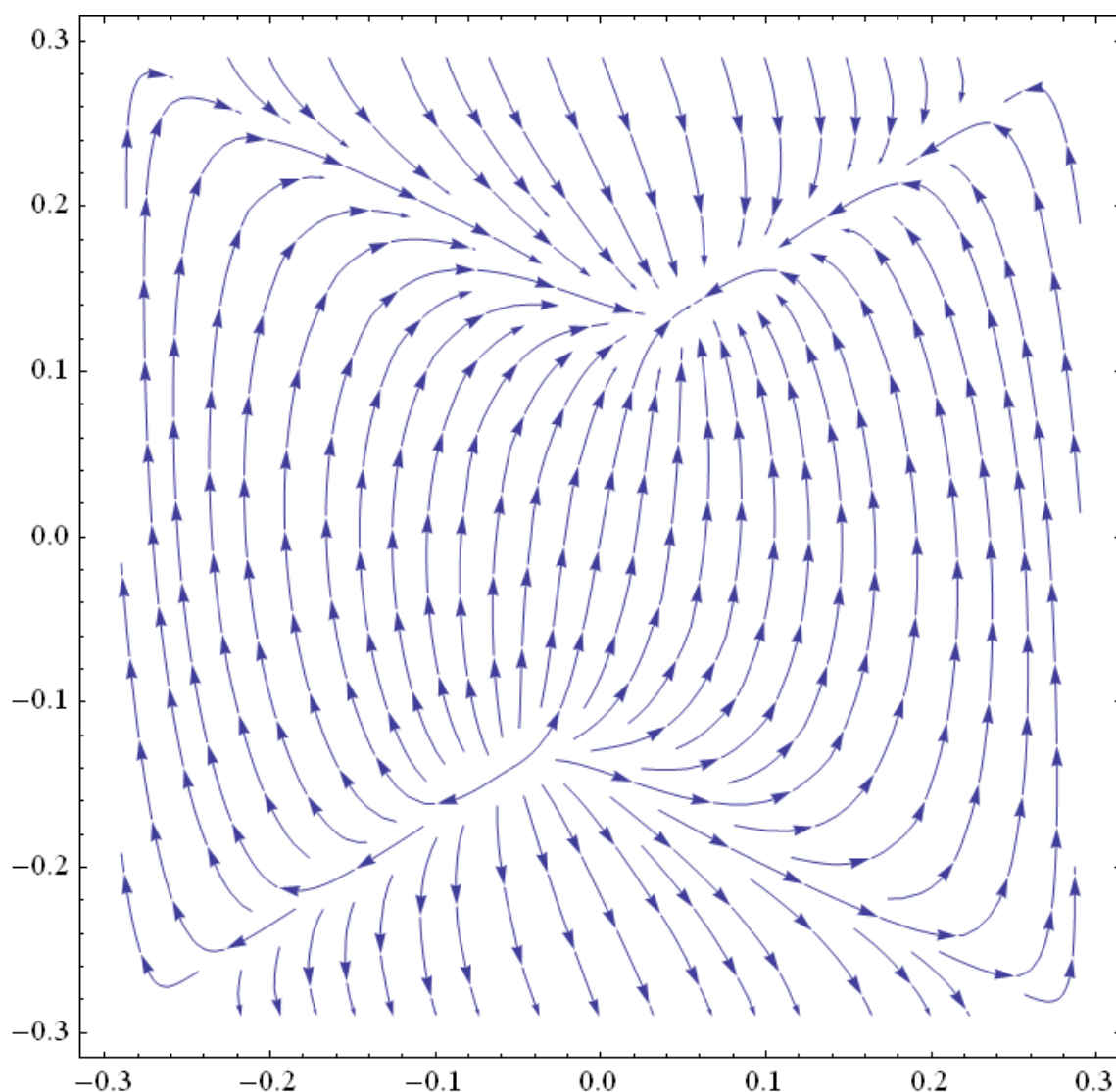


Рис. 3.6. Векторные линии статического магнитного поля $H^{(0)}(\vec{r})$ внутри квадрата с вершинами в точках расположения намагниченных сфер

Вид рис. 3.6 подтверждает вывод о практически неизменной ориентации векторов магнитного поля между порождающими их объектами. Следовательно, одинаковые магнитные характеристики сфер позволяют надеяться на одинаковый результат воздействия на корневую систему

растений, то есть экстраполировать результат внутри одиночного квадрата на систему аналогичных ячеек. Увеличение масштаба графика (рис. 3.7) подтверждает сделанный вывод, так как характер направления силовых линий практически не меняется.

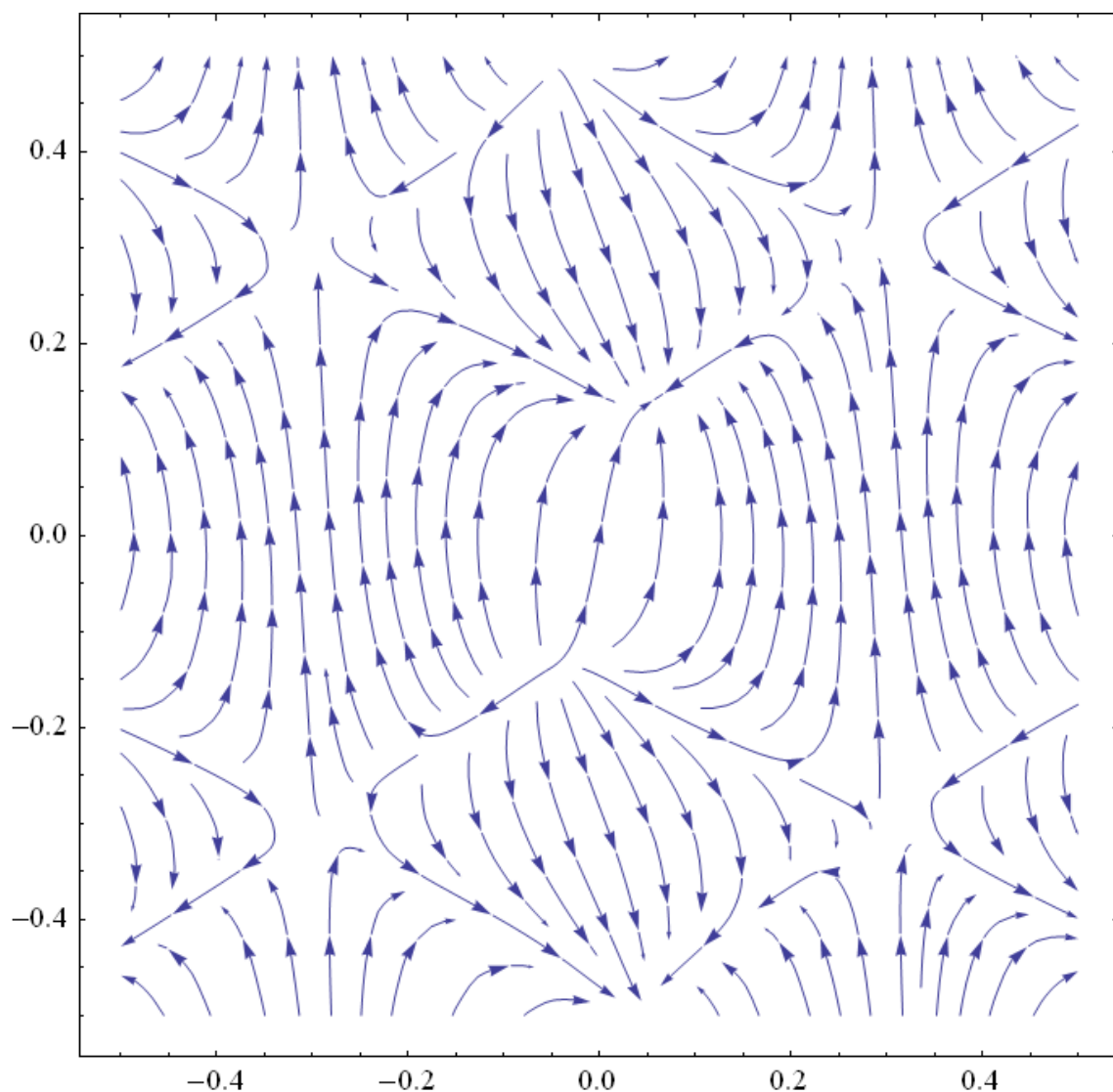


Рис. 3.7. Векторные линии статического магнитного поля $H^{(0)}(\vec{r})$ в почве с учетом областей между намагниченными сферами и вне квадрата

Характер поведения эквипотенциальных линий возбужденного стационарного магнитного поля представлен на рис. 3.8, 3.9.

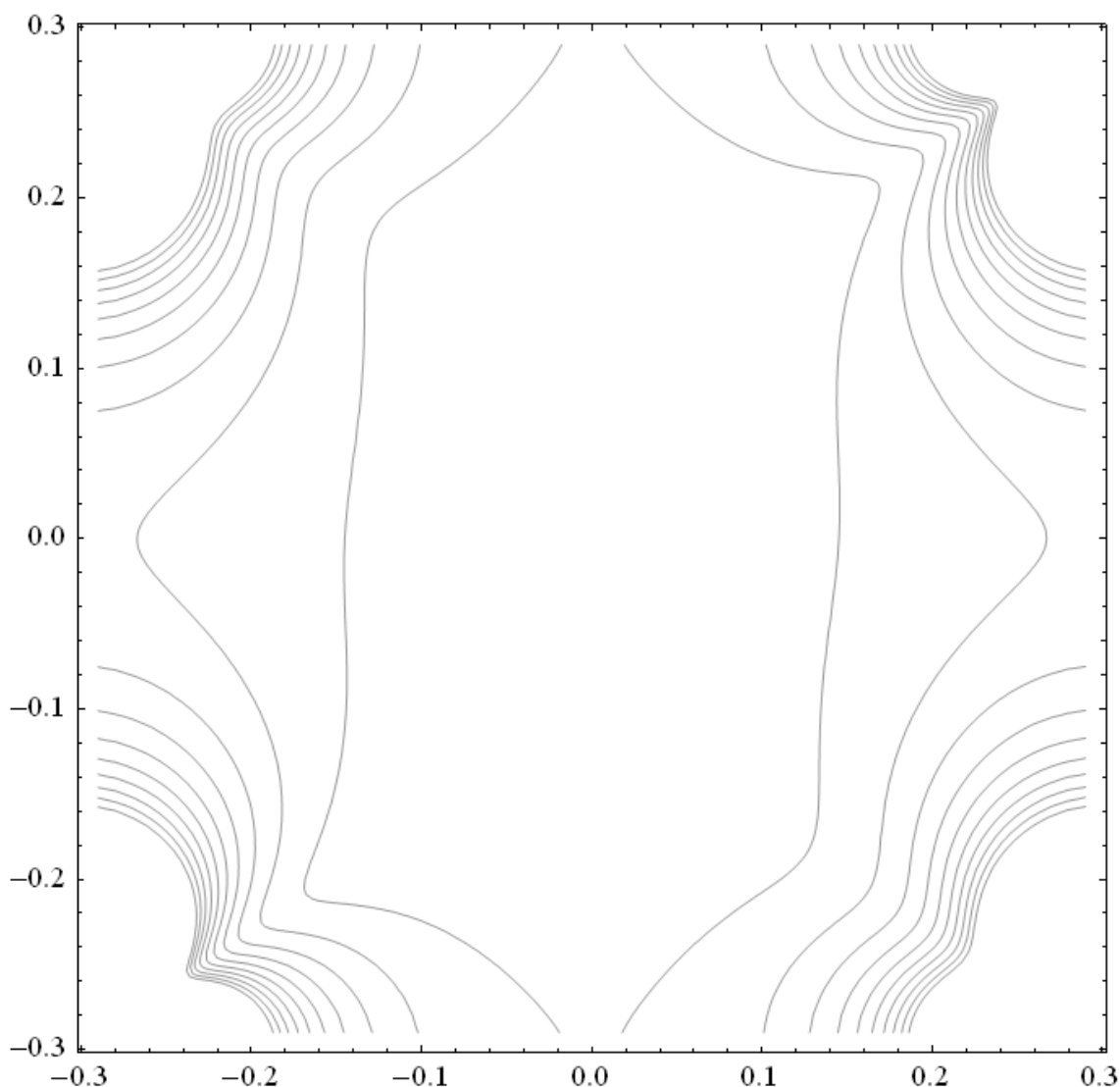


Рис. 3.8. Эквипотенциальные линии статического магнитного поля $H^{(0)}(\vec{r})$ внутри квадрата с вершинами в точках расположения намагниченных сфер

Густота расположения этих линий характеризует напряженность поля. Очевидно, что на удалении порядка 10 см от намагниченной сферы величина напряженности практически перестает меняться и воздействие на растения, расположенные в различных точках почвы, будут аналогичными, что позволяет прогнозировать ожидаемый результат. Рис. 3.8 демонстрирует практически полную идентичность формы эквипотенциальных линий

магнитного поля и геометрической фигуры, в вершинах которой расположены возбуждающие это магнитное поле элементы.

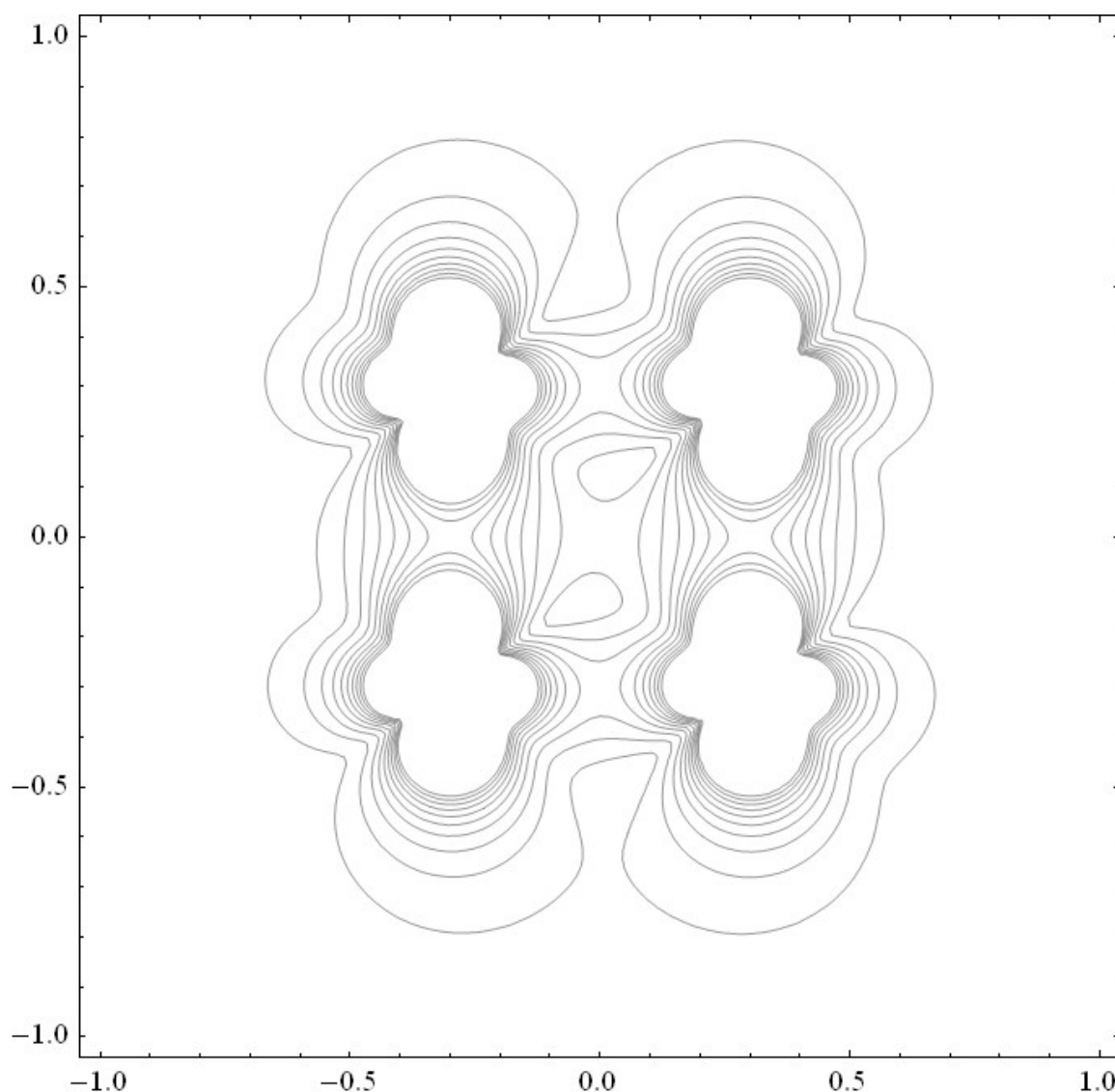


Рис. 3.9 Экипотенциальные линии статического магнитного поля $H^{(0)}(\vec{r})$ в почве с учетом областей между намагниченными сферами и вне квадрата

Что касается рис. 3.9, то он подтверждает необходимость расположения возбуждающих магнитное поле элементов на некотором удалении (до 10 см) от корневой системы обрабатываемых растений, так как

вблизи этих элементов амплитуда магнитного поля существенно возрастает, а это, в свою очередь, приведет к неравномерной обработке растений.

На рис. 3.10 представлен трехмерный график зависимости амплитуды стационарного магнитного поля от координат точек между источниками этого поля.

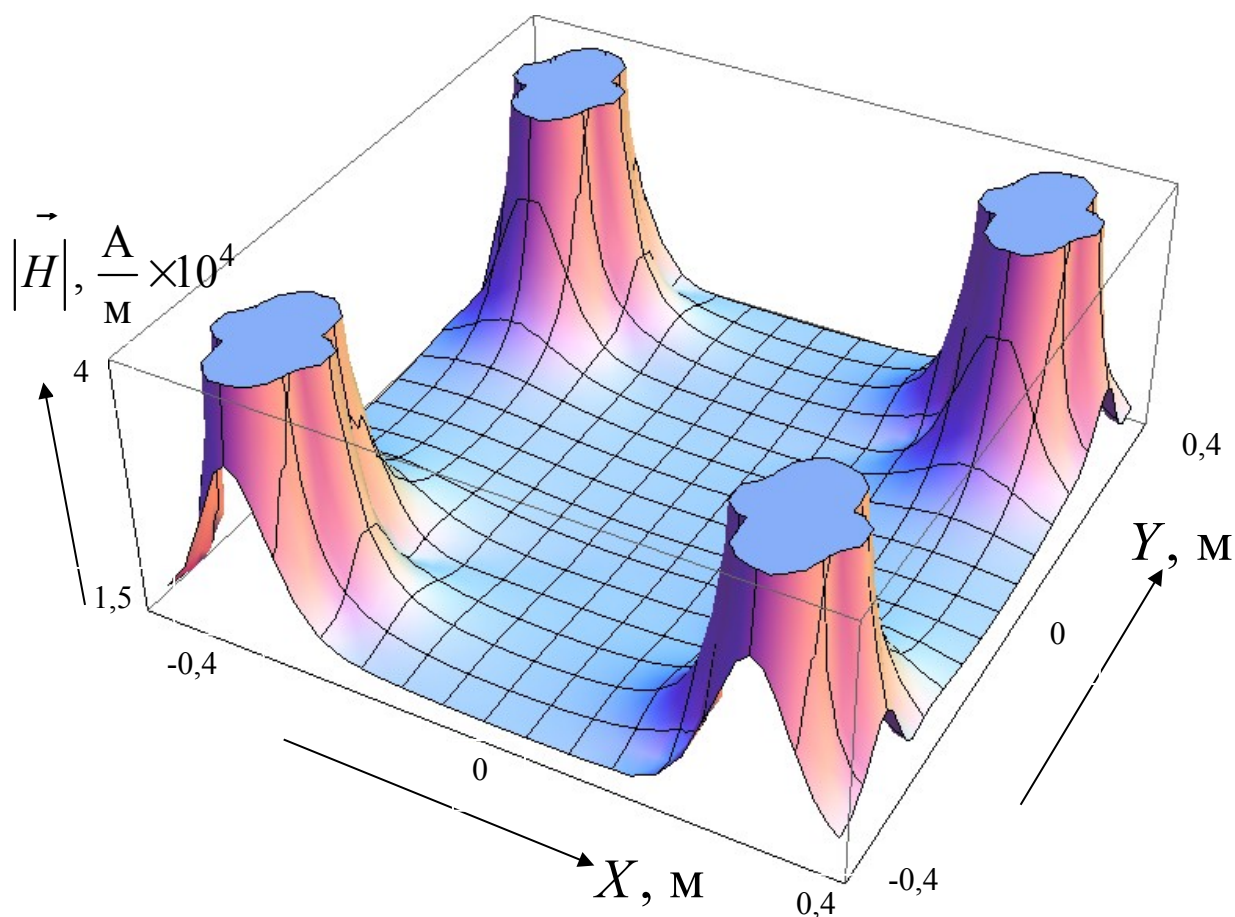


Рис. 3.10. Зависимость амплитуды статического магнитного поля $H^{(0)}(\vec{r})$ от координат точек, расположенных между источниками этого поля

Данный график наглядно демонстрирует гладкое поведение данной амплитуды кроме точек, в которых расположены сами источники. Величина

магнитного поля в почве изменяется от $1,5 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ до $4 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ вблизи намагниченных сфер.

В заключение, кроме двумерных и трехмерных графиков, рассчитана зависимость модуля амплитуды магнитного поля от координат линии, соединяющей центры намагниченных сфер. Как видно из графика, амплитуда быстро уменьшается при удалении от центра сферы, а затем становится практически неизменной. На линиях, не пересекающих центры сфер, резких подъемов в концах линии не наблюдается, однако минимальное значение амплитуды поля остается таким же.

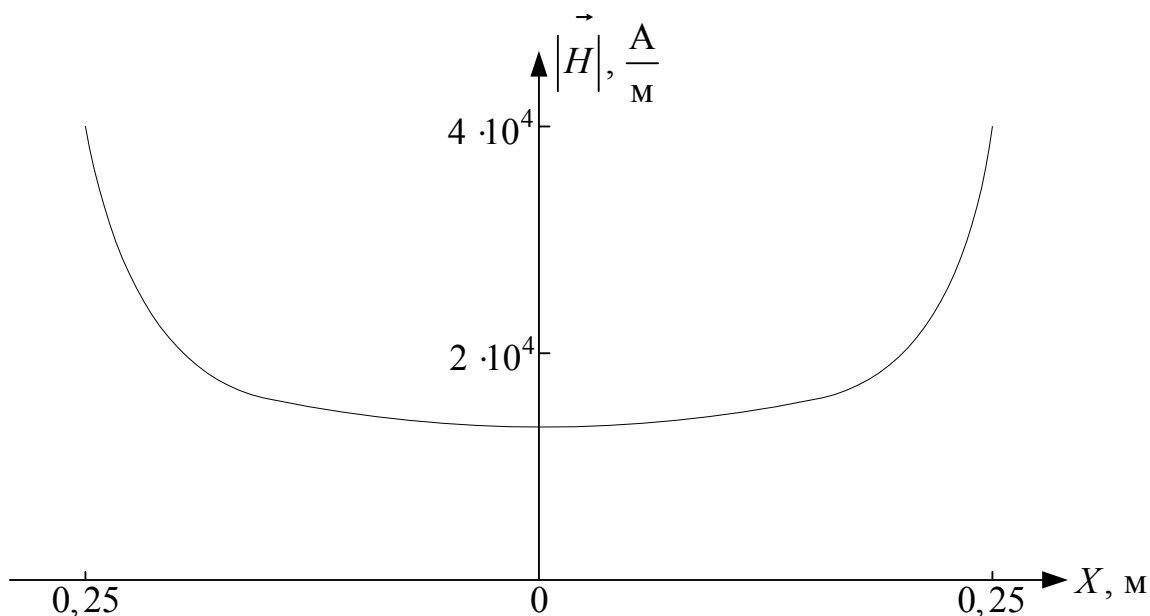


Рис. 3.11. Зависимость амплитуды статического магнитного поля $H^{(0)}(\vec{r})$ от координат точек, расположенных на прямой линии между источниками этого поля

Аналогичные расчеты были проведены и для других размеров намагниченных сфер, их расстояния друг от друга, напряженности магнитного поля, создаваемого ими. Полученные результаты имеют такой же характер, но следует отметить, что с увеличением расстояния между сферами

более 60 см напряженность магнитного поля в почве значительно уменьшается, что не позволяет эффективно использовать его в целях воздействия на корневую систему расположенных рядом с ними растений.

3.4 Анализ воздействия внешних статических магнитных полей на движение питательных веществ в корневой системе растений

Выше было рассмотрено распределение статических магнитных полей, создаваемых в почве погруженными в нее намагниченными объектами в форме шара. Известно, что искусственно созданные в почве дополнительные магнитные поля воздействуют на корневую систему растений и, следовательно, на развитие растений, их рост, содержание питательных веществ и т.д. Причиной того, что магнитное поле может воздействовать на растение, является наличие у молекул питательных веществ, движущихся по корневой системе, электрического заряда. Поэтому каналы с движущимися в них соками одновременно представляют собой систему, в которой течет меняющийся электрический ток с микроамплитудой. Воздействие магнитных полей на корневую систему вызывает появление сил, которые меняют характер движения в ней питательных веществ и тем самым меняют процесс развития растений в ту или иную сторону. Актуальность исследования влияния магнитных полей на корневую систему растений определяется тем, что при определенных параметрах воздействующих на растения полей в них могут произойти не только позитивные, но и негативные изменения, которые скажутся на процессах обмена и, в конечном счете, на биологическом состоянии растения.

Для исследования указанного воздействия рассмотрим структуру, аналогичную каналам, по которым в корне движутся питательные вещества. Пусть имеется цилиндр радиуса R , длины L , с жесткими стенками (рис. 3.12). По каналу двигаются питательные вещества. Вне канала действует статическое магнитное поле с амплитудой $H^{(0)}(\vec{r})$.

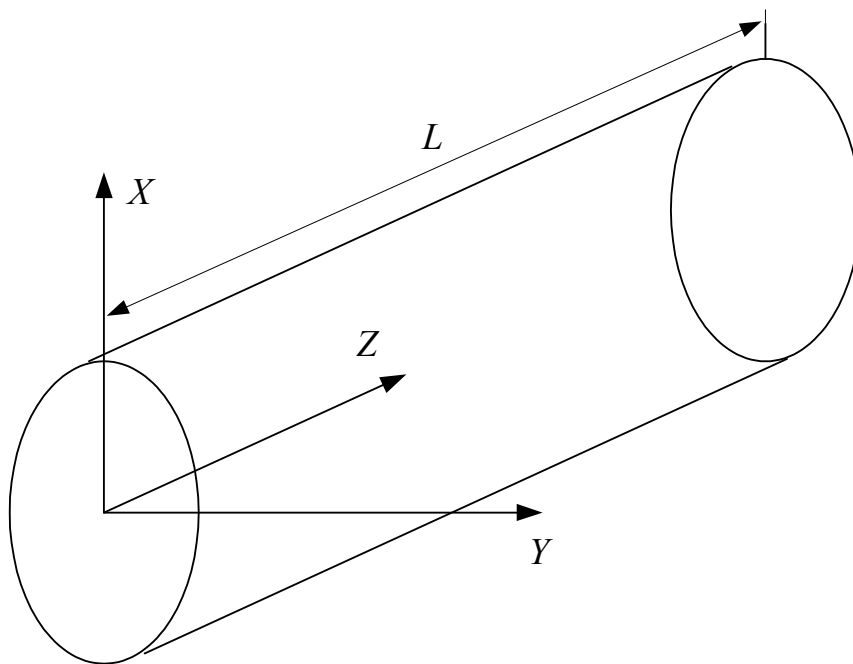


Рис. 3.12. Модель канала движения питательных веществ

Для решения данной задачи воспользуемся уравнением гидродинамики Навье-Стокса [121]

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \vec{f} + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v} + \frac{1}{\rho} \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \vec{v}, \quad (3.83)$$

где $\vec{v}$ - вектор скорости движения питательных веществ;

ρ - плотность жидкости;

P - перепад давления в канале;

η - вязкость жидкости;

ξ - второй коэффициент вязкости.

Сила $\vec{f}$ выражает действие магнитного поля на связанный со средой ток и равна

$$\vec{f} = \mu_0 \left[\vec{j}, H^{(0)}(\vec{r}) \right] \quad (3.84)$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума;

j - плотность тока;

$H^{(0)}(\vec{r})$ - напряженность магнитного поля, в котором находится канал

с питательными веществами.

Подставляя (3.84) в (3.83), получим

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu_0}{\rho} \left[\vec{j}, H^{(0)}(\vec{r}) \right] + \frac{\eta}{\rho} \Delta \vec{v} + \frac{1}{\rho} \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} \vec{v} \quad (3.85)$$

Считая поток питательных веществ несжимаемой жидкостью, а его течение ламинарным, получим, что $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = 0$ и $\operatorname{div} \vec{v} = 0$. Подстановка полученных условий в (3.85) дает

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} - \nu \Delta \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu_0}{\rho} \left[\vec{j}, H^{(0)}(\vec{r}) \right] \quad (3.86)$$

где $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ - кинематическая вязкость.

Уравнение (3.86) отличается от (3.83) слагаемым, конкретизирующим влияние внешнего магнитного поля на течение питательных веществ. Учитывая, что здесь также перепад давлений создается по оси сосуда, то есть вдоль оси OZ , обозначим

$$\frac{1}{\rho} \nabla P = \vec{e}_z^0 \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = -\vec{e}_z^0 \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}, \quad (3.87)$$

где ΔP - перепад давлений на длине канала, равной L .

Слагаемое $\frac{\mu_0}{\rho} \left[\vec{j}, H^{(0)}(\vec{r}) \right]$ содержит плотность тока j , которая равна

$$j = e N v_0. \quad (3.88)$$

Здесь e - заряд одиночного элемента питательных веществ; N - концентрация этих элементов; v_0 - скорость их движения без влияния внешнего поля.

Итак, уравнение (3.86) может быть представлено в виде трех скалярных уравнений. При этом учитываем, что v_0 имеет лишь продольную составляющую, то есть $v_0 = e_z^0 v_{0z}$, а $\frac{1}{\rho} \nabla P$, на основании (3.87), равно

$$- e_z^0 \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}. \text{ Тогда:}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} - v \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] &= \frac{e N \mu_0}{\rho} \left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) \right]_r, \\ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} - v \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} \right] &= \frac{e N \mu_0}{\rho} \left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) \right]_\varphi, \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} - v \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] &= \frac{e N \mu_0}{\rho} \left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) \right]_z + \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}. \end{aligned} \right. \quad (3.89)$$

Будем рассматривать однородное внешнее магнитное поле, не имеющее вариаций по z . Так как задача осесимметричная, то $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$.

Решение системы (3.89) будет проведено следующим образом. При отсутствии внешнего магнитного поля уравнения (3.89) должны дать исходное поле скоростей. Появление внешнего поля должно внести поправку

в эти скорости. Интерес представляет, очевидно, решение первого уравнения (3.89), которое дает скорость движения питательных веществ к стенкам каналов корневой системы, и третьего уравнения, которое даст измененное поле продольных скоростей. Решение второго уравнения (3.89) проводится абсолютно так же, как и первого. Кроме того, появление азимутальной скорости представляет меньший интерес, чем радиальной, ответственной за ослабление потока питающих жидкостей вдоль каналов. Таким образом, задача сводится к решению двух уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_r}{\partial t} - \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] = \frac{eN\mu_0}{\rho} \left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) \right]_r, \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} - \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] = \frac{eN\mu_0}{\rho} \left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times \vec{H}^{(0)}(\vec{r}) \right]_z + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta P}{L}. \end{cases} \quad (3.90)$$

Решая полученные уравнения, определим аналитические выражения для радиальной и продольной составляющей скоростей.

В рассмотренной выше модели распределения статического магнитного поля в почве вектор $\vec{H}^{(0)}(\vec{r})$ имеет только составляющие $H_x^{(0)}(\vec{r})$ и $H_y^{(0)}(\vec{r})$. Учитывая, что эти составляющие лежат в плоскости, параллельной поверхности грунта, а корневая система перпендикулярна этой поверхности, составляющих магнитного поля, направленных вдоль оси каналов корневой системы, нет.

Итак, рассмотрим случай наличия поперечного вектора $\vec{H}^{(0)}(\vec{r})$ магнитного поля. Это поле можно представить как

$$\vec{H}^{(0)}(\vec{r}) = \vec{e}_r^0 H_r^{(0)}(\vec{r}) + \vec{e}_\varphi^0 H_\varphi^{(0)}(\vec{r}), \quad (3.91)$$

где $H_r^{(0)}(\vec{r}) = (H_x^{(0)}(\vec{r}) \cos \varphi + H_y^{(0)}(\vec{r}) \sin \varphi)$;

$$H_\varphi^{(0)}(\vec{r}) = (H_y^{(0)}(\vec{r}) \cos \varphi - H_x^{(0)}(\vec{r}) \sin \varphi)$$

Тогда

$$\left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times H^{(0)}(\vec{r}) \right]_r = -e_r^0 v_{0z} H_\varphi^{(0)}(\vec{r}). \quad (3.92)$$

Таким образом,

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} - v \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] = - \frac{e N \mu_0 v_{0z} H_\varphi^{(0)}(r)}{\rho}. \quad (3.93)$$

Так как мы предположили однородность магнитного поля вдоль оси сосуда, то $\frac{\partial v_r}{\partial z} = 0$. Кроме того, очевидно, что скорость движения

питательных соков от времени зависит слабо, то есть $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$, и получаем

$$\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} = \frac{e N \mu_0 v_{0z} H_\varphi^{(0)}(r)}{v \rho}. \quad (3.94)$$

Выражение (3.94) дает возможность сделать вывод, что поперечное поле должно вызывать движение питательных веществ по направлению к стенкам канала их движения. В данном случае v_r уже не будет равно 0.

Уравнение (3.94) является дифференциальным уравнением второго порядка, допускающим понижение порядка. Обозначим $\frac{\partial v_r}{\partial r} = R(r)$, тогда

$$\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} = R'(r). \quad \text{Данная замена приводит (3.94) к линейному}$$

дифференциальному уравнению первого порядка

$$R'(r) + \frac{1}{r}R(r) = \frac{eN\mu_0 v_{0z} H_{\varphi}^{(0)}(r)}{\nu\rho}. \quad (3.95)$$

Здесь r - координата точки почвы, в которой находится корневая система, r - радиальная координата кругового сечения канала движения питательных веществ.

Для решения (3.95) сделаем замену $R(r) = u \cdot w$ [122]. Тогда уравнение приобретает вид

$$u' \cdot w + u \cdot w' + \frac{1}{r}u \cdot w = \frac{eN\mu_0 v_{0z} H_{\varphi}^{(0)}(r)}{\nu\rho}. \quad (3.96)$$

Используя стандартный метод решения таких уравнений [122], получим

$$R(r) = \frac{eN\mu_0 v_{0z} H_{\varphi}^{(0)}(r) r}{2\nu\rho} \quad (3.97)$$

В этом случае искомая радиальная составляющая скорости v_r определяется из выражения

$$v_r = \frac{eN\mu_0 v_{0z} H_{\varphi}^{(0)}(r) r^2}{4\nu\rho} \quad (3.98)$$

Как видно из выражения (3.98), радиальная скорость имеет параболический характер. Она прямо пропорционально зависит от величины

модуля вектора магнитного поля, концентрации питательных веществ и осевой скорости их движения. Зависимость от вязкости и плотности питательных жидкостей - обратно пропорциональная.

Рассмотрим теперь влияние поперечного вектора $H^{(0)}(\vec{r})$ магнитного поля на продольную скорость движения питательных веществ. Для этого решим второе уравнение из системы (3.90). Поскольку $H^{(0)}(\vec{r})$ определяется выражением (3.91), получаем

$$\left[\vec{e}_z^0 v_{0z} \times \left(\vec{e}_r^0 H_r^{(0)}(\vec{r}) + \vec{e}_\varphi^0 H_\varphi^{(0)}(\vec{r}) \right) \right]_z = 0 \quad (3.99)$$

В этом случае уравнение для продольной составляющей скорости движения питательных веществ по корневой системе имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} = - \frac{\Delta P}{\nu \rho L} \quad (3.100)$$

Решение дифференциального уравнения (3.100) проводится аналогично тому, как это было сделано выше для уравнения (3.94). Но при этом необходимо иметь в виду, что существуют v_r и v_φ отличные от нуля. Поэтому на основании уравнения неразрывности и того, что $\text{div } v = 0$ получаем [117]

$$\frac{1}{r} v_r + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (3.101)$$

Интегрируя (3.101), приходим к выражению

$$v_r = - \int_0^z \left(\frac{1}{r} v_r + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) dz = - \left(\frac{1}{r} v_r + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right) z \quad (3.102)$$

Подставляя в (3.102) выражение (3.98) и аналогичное выражение для v_φ , имеем

$$v_z = \frac{3 \cdot e \cdot N \cdot \mu_0 \cdot v_{0z} \cdot H_\varphi^{(0)}(r) \cdot z}{4 \cdot v \cdot \rho}. \quad (3.103)$$

Здесь v_z меняется в пределах длины L канала корневой системы. Таким образом, оказывается, что после приложения внешнего статического магнитного поля, вектор $H^{(0)}(\vec{r})$ которого направлен перпендикулярно оси канала, полная продольная скорость $v_{z\Sigma}$ определяется суммой

$$v_{z\Sigma} = v_{0z} + v_z = -\frac{\Delta P \cdot r^2}{4 \cdot v \cdot \rho \cdot L} + \frac{3 \cdot e \cdot N \cdot \mu_0 \cdot v_{0z} \cdot H_\varphi^{(0)}(r) \cdot z}{4 \cdot v \cdot \rho} \quad (3.104)$$

Характер изменения осевой скорости движения питательных веществ по поперечному сечению корневого канала также носит параболический характер, но у данной параболы ветви направлены вниз, а ее вершина может быть смещена от оси канала в зависимости от направления и величины вектора $H_\varphi^{(0)}(\vec{r})$.

Проведен численный расчет радиальной и осевой составляющей скорости v_r и $v_{z\Sigma}$ движения питательных веществ по корневому каналу, основанный на выражениях (3.98) и (3.104). Значения констант, входящих в эти выражения, взяты из справочной литературы, в частности из [123].

Результаты расчетов представлены в виде графиков (рис. 3.13, 3.14).

На рис. 3.13 представлена зависимость радиальной скорости движения питательных веществ по корневому каналу от напряженности статического магнитного поля $H_\varphi^{(0)}(\vec{r})$. Величина амплитуды данного поля получена из представленной в данном разделе модели по расчету индуцированных

магнитных полей и равнялась $1,5 \cdot 10^4 \frac{\text{А}}{\text{м}}$. Вертикальные штриховые линии обозначают стенки канала.

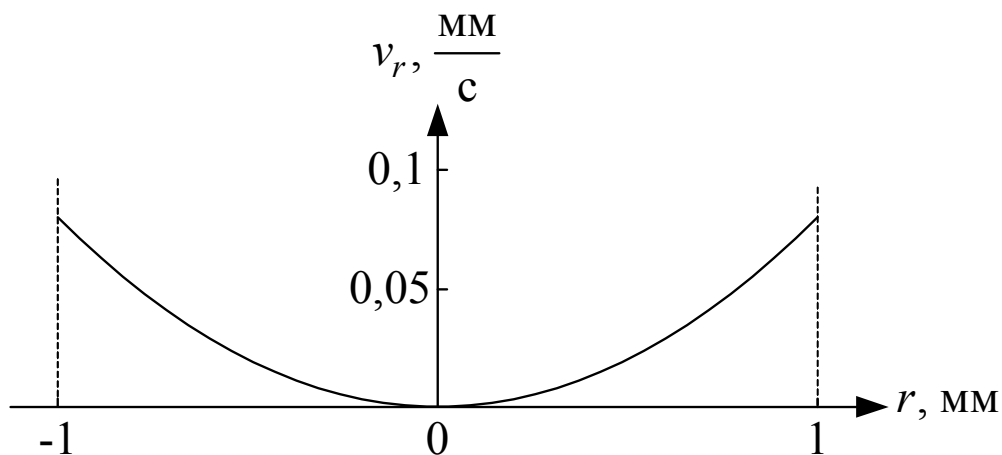


Рис. 3.13. Зависимость амплитуды радиальной скорости потока питательных веществ v_r от радиуса канала

Из графика видно, что появление внешнего статического поля вызывает появление радиальной скорости потока, которая возрастает от оси канала по направлению к его стенкам. Используемая величина напряженности магнитного поля соответствует его среднему значению между намагниченными элементами.

При приближении к данным элементам величина скорости может возрасти в два раза. Появление данной составляющей говорит о том, что наличие внешнего магнитного поля будет приводить к возможному выходу питательных веществ через стенки канала в почву и, следовательно, к обезвоживанию и угнетению растения, что нежелательно.

Таким образом, подбирая для конкретного типа растения расстояние между намагниченными элементами и величину их намагниченности можно добиваться в конкретных случаях стимуляции растений или замедления роста растений.

На рис. 3.14. представлена зависимость осевой скорости движения питательных веществ по корневому каналу. Напряженность магнитного поля взята такой же, как и выше.

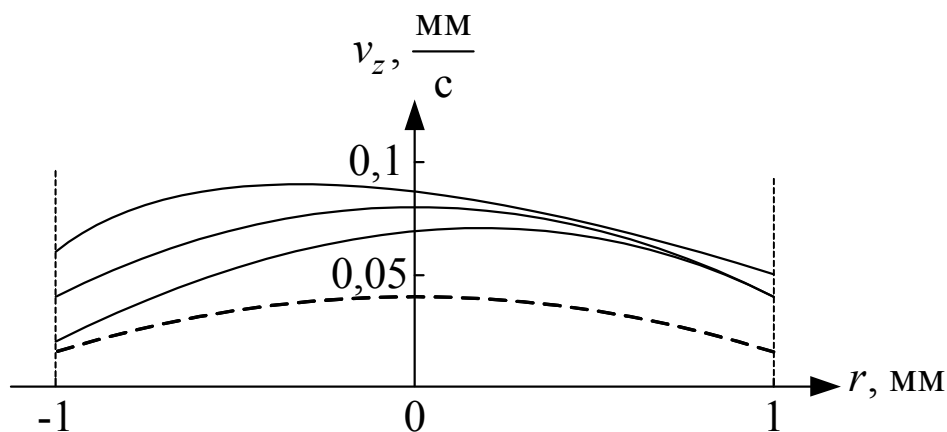


Рис. 3.14. Зависимость амплитуды осевой скорости потока питательных веществ $v_{z\Sigma}$ от радиуса канала

Видно, что характер распределения скоростей по поперечному сечению канала соответствует классическому параболическому распределению скоростей при движении жидкости по цилиндрическому каналу. Штриховой линией обозначена продольная скорость при отсутствии внешнего магнитного поля.

Появление поля приводит к увеличению продольной скорости и к смещению максимума от оси к стенке цилиндра. Верхняя кривая соответствует расположению корня вблизи намагниченной сферы. Вторая и третья кривая соответствуют расположению растения в средней зоне между источниками магнитного поля.

Таким образом, внешнее магнитное поле увеличивает скорость движения питательных веществ по корневой системе, которая обратно пропорциональна длине корня. Следовательно, для длинных корней в большей степени будет проявляться влияние на поперечную составляющую

скорости, для коротких – наоборот. В связи с этим следует, что подбирая для каждого типа растений величину намагниченности и расположение возбудителей магнитного поля можно добиваться необходимого эффекта их стимуляции или угнетения.

Выводы по разделу:

1. Для расчета распределения напряженности статического магнитного поля в почве с тепличными культурами следует использовать модель, в которой источники магнитного поля рассматриваются в форме сферы, цилиндра или диска.

2. Влияние статического магнитного поля на развитие и функционирование корневой системы тепличных культур будет оптимальным при расположении намагниченных частиц диаметром 0,3 см в вершинах квадрата со стороной 0,6 м.

3. Для увеличения продольной скорости питательных веществ корневой системе тепличных культур на 0,02...0,03 мм/с, по сравнению со скоростью питательных веществ без магнитного поля, необходимо создать величину напряженности магнитного поля в пределах $1,5 \cdot 10^4$ А/м... $4 \cdot 10^4$ А/м.

4. Создание однородного статического магнитного поля с напряженностью $4 \cdot 10^4$ А/м, в почве с корневой системой тепличных культур, возможно при расположении намагниченных частиц на расстоянии 0,15 м от растений.

РАЗДЕЛ 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКРЫТОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

4.1 Анализ существующих систем определения диэлектрической проницаемости среды

Интерес к открытым цилиндрическим диэлектрическим резонаторам (ОЦДР), возбуждаемых на колебаниях «шепчущей галереи», во многом определяется их прикладным значением, а именно, их использованием в качестве измерительных ячеек диэлектрометров для исследования электрических свойств как твердых тел, так и жидких и газообразных сред [124, 125]. Использование при изготовлении ОЦДР таких анизотропных диэлектрических материалов, как одноосные монокристаллы кварца, сапфира, рутила, обладающих в миллиметровом диапазоне длин волн, малыми значениями тангенса угла потерь $tg \delta \sim 5 \cdot 10^{-5}$, дало возможность существенно повысить собственную добротность колебаний ОЦДР. В частности, в резонаторах из сапфира была получена добротность $\sim 10^5$ при комнатной температуре [126]. Такая высокая добротность обусловлена возможностью существования в таких резонаторах колебаний "шепчущей галереи". Эти колебания формируются внутри резонатора волнами, характеризующихся большим значений азимутальных индексов $m \gg 1$ и падающих на боковую поверхность резонатора под углами полного внутреннего отражения. Наличие каустик и области с экспоненциальным законом затухания волн вне диэлектрического резонатора и обуславливает высокие значения радиационной добротности.

Колебания "шепчущей галереи" весьма чувствительны к изменению параметров внешней среды в окрестности границы резонатора. Поэтому, одной из главных задач теории открытых диэлектрических резонаторов

является исследование влияния на спектр собственных частот резонатора изменения электрофизических характеристик внешней среды. Решение этой задачи для различных типов диэлектрических резонаторов, может служить основой для решения соответствующей обратной задачи – определение диэлектрических характеристик внешней среды по спектру собственных частот резонатора.

Существуют различные подходы к решению задач о спектральных характеристиках открытых диэлектрических резонаторов. С формальной точки зрения их можно разделить на три группы. Первая группа – это прямые численные методы: метод конечных элементов, методы конечных разностей в частотной и временной областях, вариационные методы [127].

Несмотря на относительную простоту применения этих методов, в настоящее время не представляется возможным их использование для решения спектральных задач теории открытых диэлектрических резонаторов. Основная причина состоит в том, что собственные колебания резонатора должны рассматриваться в неограниченной области и на бесконечности удовлетворять условию излучения [128]. Существующие компьютерные программы, реализующие прямые численные методы, не учитывают этого условия или учитывают приближенно. Кроме того, поскольку спектральные задачи для диэлектрических резонаторов являются несамосопряженными (потери на излучение) с нелинейным вхождением спектрального параметра (частоты) в условие излучения, то практически невозможно применение существующих вариационных методов [129].

Вторая группа методов – методы интегральных уравнений [130]. Прежде всего это методы, которые используют интегральные формулы Стреттона – Чу [131]. В результате есть возможность учесть условие излучения и получить граничные интегральные уравнения относительно тангенциальных компонент электромагнитного поля собственных колебаний на поверхности резонатора [130, 131]. Главными ограничениями применения граничных интегральных уравнений являются наличие геометрических

сингулярностей (типа ребер, вершин) поверхности резонатора и предположения о независимости электрофизических параметров резонатора от пространственных переменных.

Другая группа методов интегральных уравнений – сингулярные объемные интегральные уравнения [132]. По-видимому, впервые такого типа уравнения были получены в [133]. Эти уравнения позволяют учесть не только условие излучения, но и наличие геометрических сингулярностей поверхности резонатора. Однако, следует отметить, что непосредственная дискретизация (сведение к системе линейных алгебраических уравнений) этих уравнений на основе соответствующих квадратурных формул для сингулярных интегралов приводит к системам линейных алгебраических уравнений большой размерности. Последнее обстоятельство, даже с учетом современных компьютеров, затрудняет использование сингулярных уравнений в ситуации, когда резонансная длина волны значительно меньше геометрических размеров резонатора, что характерно для диэлектрических резонаторов, возбуждаемых на колебаниях «шепчущей галереи» [134].

В этой связи возможной альтернативой рассмотренным выше методам, являются различные приближенные подходы, позволяющие с использованием современных компьютеров эффективно, с вычислительной точки зрения, рассчитывать спектральные характеристики (спектр собственных частот, собственные колебания и их добротности) диэлектрических резонаторов. Один из таких подходов основан на методе частичных областей (метод разделения переменных, метод сшивания) [127, 134]. Как показал анализ [134], построение точного решения соответствующей краевой задачи для цилиндрического диэлектрического резонатора с помощью этого метода невозможно. Однако, для колебаний "шепчущей галереи" использование такого метода в сочетании с приближенным представлением поля собственных колебаний вблизи границы резонатора позволяет достаточно точно, с практической точки зрения, рассчитать его характеристики. Ниже приводятся результаты

решения задачи о собственных колебаниях открытого цилиндрического резонатора, выполненного из анизотропной диэлектрической среды, полученные методом частичных областей.

4.2 Условия для представления поля собственных колебаний

Проблема электромагнитного анализа открытого цилиндрического диэлектрического резонатора (ОЦДР) сводится к математической модели, которая принадлежит классу краевых задач теории электромагнитного поля. С математической точки зрения резонатор моделируется некоторой ограниченной областью Q , граница которой – поверхность S . Эта область заполнена средой, характеризующейся тензором диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon}$ и магнитной проницаемостью μ . Вне резонатора среда предполагается однородной и изотропной с диэлектрической и магнитной проницаемостями, соответственно ϵ_0 и μ_0 [194]

Требуется определить электромагнитное поле, которое зависит от времени по закону $e^{-i\omega t}$. В такой постановке соответствующая задача о собственных частотах и колебаниях формулируется следующим образом: найти значения частоты ω , при которых существуют векторные функции E и H , удовлетворяющие всюду, за исключением граничной поверхности S резонатора, однородным уравнениям Максвелла:

$$\vec{\text{rot}} E = i \frac{\omega}{c} \begin{cases} \mu H, \text{ в } Q \\ \mu_0 H, \text{ вне } Q \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\vec{\text{rot}} H = -i \frac{\omega}{c} \begin{cases} \hat{\epsilon} E, \text{ в } Q \\ \epsilon_0 E, \text{ вне } Q \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\operatorname{div}(\hat{\epsilon} \vec{E}) = 0, \quad \operatorname{div}(\mu \vec{H}) = 0, \text{ в } Q, \quad (4.3)$$

$$\operatorname{div}(\epsilon_0 \vec{E}) = 0, \quad \operatorname{div}(\mu_0 \vec{H}) = 0, \text{ вне } Q, \quad (4.4)$$

Условию непрерывности тангенциальных компонент поля на S и условию излучения на бесконечности [134]. В дальнейшем будем рассматривать резонатор в виде круглого цилиндра конечной длины. Кроме того, предположим, во-первых, что резонатор изготовлен из одноосного кристалла, характеризующегося тензором диэлектрической проницаемости $\hat{\epsilon} = [\epsilon_{ij}]$ с отличными от нуля компонентами $\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}$ в направлениях параллельном и перпендикулярном к его оптической оси, и, во-вторых, оптическая ось резонатора совпадает с осью геометрической симметрии резонатора. Введем цилиндрическую систему координат таким образом, чтобы ось Z совпадала с оптической осью кристалла, а начало координат находилось в плоскости геометрической симметрии резонатора ($z = 0$) (рис. 4.1).

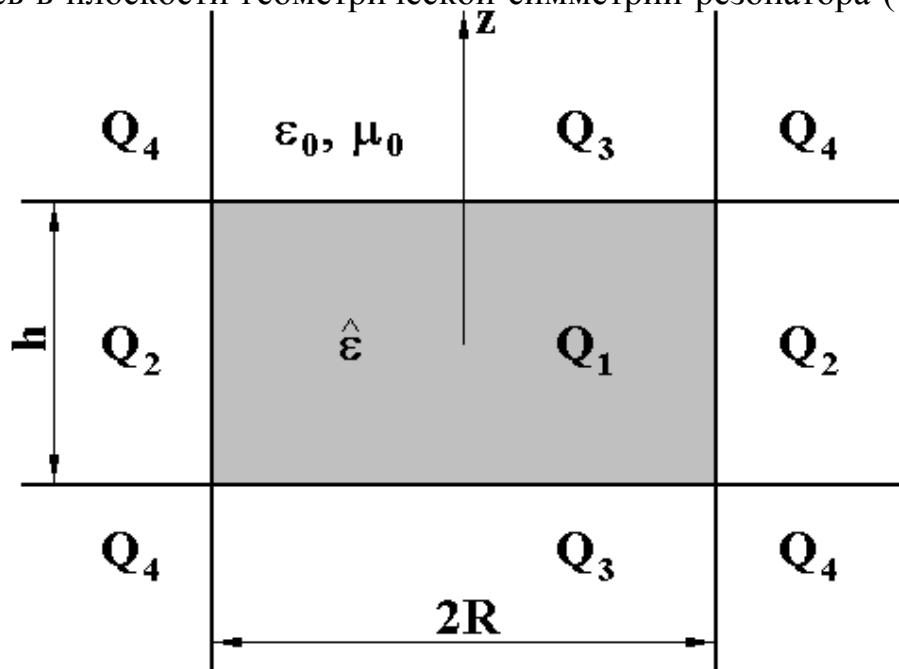


Рис.4.1. Модель резонатора

Тогда область пространства $\mathcal{Q}$, занятая резонатором совпадает с множеством

$$\mathcal{Q} = \left\{ (r, \varphi, z) : 0 \leq r \leq R, \quad |r| < \frac{h}{r}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\}, \quad (4.5)$$

где R - радиус резонатора;

h - высота резонатора.

Запишем уравнения (4.1) и (4.2) в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} = i k_0 \mu H_r, \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = i k_0 \mu H_\varphi, \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial (r E_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} \right] = i k_0 \mu H_z, \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = - i k_0 \varepsilon_\perp E_r, \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} = - i k_0 \varepsilon_\perp E_\varphi, \quad (4.10)$$

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial (r H_\varphi)}{\partial r} - \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \right] = - i k_0 \varepsilon_\parallel E_z, \quad (4.11)$$

Здесь $k_0 = \frac{\omega}{c}$, c - скорость света в вакууме. Уравнения (4.6) – (4.11) справедливы в области резонатора $\mathcal{Q}$, а вне области $\mathcal{Q}$ следует в (4.6) – (4.11) положить $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$, где ε_0 , μ_0 - материальные параметры внешней среды. Используя (4.6) – (4.11) выразим поперечные компоненты поля $E_{\varphi}, E_r, H_{\varphi}, H_r$ через продольные компоненты E_z, H_z . Для этого продифференцируем (4.6) по переменной z и подставим в полученное уравнение выражение для $\frac{\partial H_r}{\partial z}$, следующее из (4.10), получаем

$$\frac{\partial^2 E_{\varphi}}{\partial z^2} + k^2 E_{\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_z}{\partial z \partial \varphi} - i k_0 \mu \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \quad (4.12)$$

Аналогично предыдущим преобразованиям, дифференцируем (4.7) по переменной z и используя (4.9), имеем

$$\frac{\partial^2 E_r}{\partial z^2} + k^2 E_r = \frac{\partial^2 E_r}{\partial z \partial r} + \frac{i k_0 \mu}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi} \quad (4.13)$$

Наконец, дифференцируя по переменной z (4.9) и (4.10) и используя (4.6), (4.7) получаем уравнения для H_r и H_φ следующего вида:

$$\frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial z^2} + k^2 H_\varphi = i k_0 \varepsilon_\perp \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 H_z}{\partial z \partial \varphi} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial^2 H_r}{\partial z^2} + k^2 H_r = - \frac{i k_0 \varepsilon_\perp}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} + \frac{\partial H_z}{\partial z \partial r} \quad (4.15)$$

Причем, в (4.12) – (4.15) введено обозначение $k^2 = k_0^2 \varepsilon_\perp \mu$.

Таким образом, формулы (4.12) – (4.15), во-первых, являются прямым следствием уравнений Максвелла и, во-вторых, выражают поперечные компоненты собственных колебаний через продольные компоненты, параллельные оптической оси резонатора.

Покажем теперь, что продольные компоненты E_z и H_z , удовлетворяют следующим уравнениям Гельмгольца:

$$\Delta E_z + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} \left(\frac{\varepsilon_\parallel}{\varepsilon_\perp} - 1 \right) + k_0^2 \varepsilon_\parallel \mu E_z = 0, \quad (4.16)$$

$$\Delta H_z + k_0^2 \mu \varepsilon_\perp H_z = 0. \quad (4.17)$$

Здесь $\Delta = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа в цилиндрической системе координат. Уравнения (4.16), (4.17), как и уравнения (4.12) – (4.15) справедливы в области $\mathcal{Q}$ (внутри резонатора). Если в этих уравнениях положить $\varepsilon_\perp = \varepsilon_\parallel = \varepsilon_0$ и $\mu = \mu_0$, то получим уравнения для поля вне области занятой резонатором.

Вывод уравнений (4.16), (4.17) достаточно громоздок, поэтому ограничимся общими замечаниями. Выразим вектор напряженности магнитного поля H из (4.2) и подставим в (4.1) тогда имеем

$$\text{rot rot } E + k_0^2 \mu \hat{\varepsilon} E = 0 \quad (4.18)$$

Далее, используя определения для оператора Лапласа векторного поля, имеем

$$\text{grad} (\text{div } E) - \Delta E + k_0^2 \mu \hat{\varepsilon} E = 0 \quad (4.19)$$

Если теперь (4.19) расписать в цилиндрической системе координат и воспользоваться уравнением (4.3)

$$\operatorname{div}(\hat{\varepsilon} E) = 0,$$

То после ряда громоздких преобразований получим уравнения (4.16). По аналогичной схеме может быть получено уравнение (4.17).

И так, показано, что исходная векторная задача о собственных колебаниях эквивалентна двум скалярным задачам для уравнений Гельмгольца (4.16), (4.17) относительно продольных компонент E_z и H_z , через которые по формулам (4.12) - (4.15) выражаются остальные компоненты поля собственных колебаний.

Получим представления для продольных компонент E_z и H_z . С этой целью воспользуемся методом частичных областей [134] и разобьем все пространство на области, как показано на рис.4.1.:

$$\text{Область } Q_1 = \left\{ (r, \varphi, z) : 0 \leq r \leq R, \quad |r| \leq \frac{h}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\}$$

$$\text{Область } Q_2 = \left\{ (r, \varphi, z) : r \geq R, \quad |r| \leq \frac{h}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\}$$

$$\text{Область } Q_3 = \left\{ (r, \varphi, z) : 0 \leq r \leq R, \quad |r| \geq \frac{h}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\}$$

$$\text{Область } Q_4 = \left\{ (r, \varphi, z) : r \geq R, \quad |r| \geq \frac{h}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\}$$

Решение уравнений (4.16), (4.17) в каждой из областей Q_1, Q_2, Q_3 будем искать в виде произведения трех множителей, каждый из которых есть функция только одной переменной [134]:

$$\begin{aligned} E_z &= R_E(r) \Phi_E(\varphi) z_E(z) \\ H_z &= R_H(r) \Phi_H(\varphi) z_H(z) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Рассмотрим случай области Q_I . Поскольку тензор диэлектрической проницаемости ε является диагональным в цилиндрической системе координат (оптическая ось совпадает с осью Z) и резонатор имеет плоскость симметрии ($z=0$), то очевидно функции $z_H(z)$ и $z_E(z)$ могут быть либо четными, либо нечетными. Для определенности ограничимся случаем, когда функция $z_H(z)$ является четной, т.е. $z_H(-z)=z_H(z)$, а функция $z_E(z)$ - нечетная. Аналогично могут быть рассмотрены и другие случаи ($z_H(z)$ - нечетная, $z_E(z)$ - четная и т.п.). Кроме того, поскольку резонатор обладает круговой симметрией, то функции $\Phi_H(\varphi)$, $\Phi_E(\varphi)$ должны совпадать с функциями $e^{im\varphi}$, $\cos m\varphi$, $\sin m\varphi$, где m - целое число.

Теперь достаточно подставить выражения (4.19) для E_z , H_z в уравнения (4.16), (4.17) и воспользоваться выводами, приведенными в [134] и в результате для области Q_I имеем:

$$E_z^I = A I_m(k_E r) \cos m\varphi \sin \beta z, \quad (4.21)$$

$$H_z^I = B I_m(k_H r) \sin m\varphi \cos \beta z. \quad (4.22)$$

Здесь $k_H^2 = k_0^2 \varepsilon_{\perp} \mu - \beta^2$, $k_E^2 = \frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}} k_H^2$, β - постоянная распространения вдоль оси Z , A, B - константы, $I_m(\dots)$ - цилиндрическая функция Бесселя первого рода m - порядка.

Как следует из свойств функций Бесселя [12] при $|k_E R| (|k_H R|) \geq \sqrt{m(m+2)}$, поле вдоль координат r монотонно возрастает и максимально в окрестности границы резонатора ($r \cong R$). Такое распределение поля характерно для колебаний "шепчущей галереи", а поле вне резонатора (области Q_2, Q_3) в соответствии с теорией колебаний "шепчущей галереи" [136] может быть представлено в виде:

Область Q_2 :

$$E_z^2 = C K_m(\bar{k} r) \cos m\varphi \sin \beta z, \quad (4.23)$$

$$H_z^2 = D K_m(\bar{k} r) \sin m\varphi \cos \beta z. \quad (4.24)$$

Область Q_3 :

$$E_z^3 = E I_m(\bar{\bar{k}} r) \cos m\varphi e^{-\alpha|z|} \quad (4.25)$$

$$H_z^3 = F I_m(\bar{\bar{k}} r) \sin m\varphi e^{-\alpha|z|} \quad (4.26)$$

Здесь $\bar{k}^2 = \beta^2 - K_0^2 \varepsilon_0 \mu_0$, $\bar{\bar{k}}^2 = K_0^2 \varepsilon_0 \mu_0 + \alpha^2$, α - постоянная затухания вдоль оси z ; C, D, E, F - константы, $K_m(\dots)$ - модифицированная функция Бесселя третьего рода. При $Re(\bar{k} r) > 0$ и $r \rightarrow \infty$ функция $K_m(\bar{k} r)$ экспоненциально убывает [135]. Такое распределение поля в указанных выше областях (Q_2, Q_3), во-первых, удовлетворяет уравнениям Максвелла (4.16),

(4.17) и, во-вторых, находится в соответствии с тем фактом, что поле колебаний "шепчущей галереи" убывает вне резонатора.

Пока мы не накладывали никаких ограничений на постоянную затухания α и постоянную распространения β . Будем предполагать, что они удовлетворяют уравнению [134]

$$\alpha^2 + \beta^2 = k_0^2 (\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0). \quad (4.27)$$

Если предположить, что по радиусу резонатора укладывается достаточно большое число длин волн, то уравнения (4.27) будет выполняться достаточно хорошо для колебаний "шепчущей галереи" [134].

Получим теперь представление для поля в области $\mathcal{Q}_4$. Воспользуемся уравнениями (4.1), (4.2) и запишем их в следующей эквивалентной форме:

$$\text{rot } H = -i k_0 \varepsilon_0 E + j_E \quad (4.28)$$

$$\text{rot } E = i k_0 \mu_0 H - j_H \quad (4.29)$$

Здесь j_E - электрический ток поляризации, отличный от нуля только в области $\mathcal{Q}_1$, определяемый формулой,

$$\vec{j}_E = -i k_0 \left(\varepsilon - \hat{\varepsilon} \hat{I} \right) \vec{E}, \quad (4.30)$$

а j_H - магнитный ток поляризации

$$j_H = -i k_0 (\mu - \mu_0) H, \quad (4.31)$$

где $I = \|\delta_{mn}\|_{m,n=1}^3$, δ_{mn} - символ Кронекера.

Уравнения (4.28), (4.29) можно формально рассматривать как уравнения Максвелла в однородной среде с материальными параметрами ε_0, μ_0 , т.е. полагать, что искомое поле порождается токами j_E и j_H в свободном пространстве.

Решение уравнений (4.28), (4.29), удовлетворяющие условию излучения, можно представить с помощью векторных потенциалов A_E, A_H по известным формулам [137]:

$$A_E = \int_{Q_1} j_E G(\Gamma) dy \quad (4.32)$$

$$A_H = \int_{Q_1} j_H G(\Gamma) dy \quad (4.33)$$

$$\vec{E} = i \bar{k}_0 \vec{A}_E - \frac{I}{i \bar{k}_0} \text{grad}(\text{div} \vec{A}_E) - \text{rot} \vec{A}_H, \quad (4.34)$$

$$\vec{H} = i \bar{k}_0 \vec{A}_H - \frac{1}{i \bar{k}_0} \text{grad}(\text{div} \vec{A}_H) + \text{rot} \vec{A}_E, \quad (4.35)$$

где $\bar{k}_0 = k_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$.

В (4.32), (4.33) функция G - функция Грина для скалярного уравнения Гельмгольца:

$$\Delta G + \bar{k}_0^2 G = \delta(r),$$

$$G(r) = \frac{\exp(i \bar{k}_0 r)}{4\pi r},$$

где $r = |x - y|$ - расстояние между точками пространства $\mathcal{X}$ и $\mathcal{Y}$;

$\delta(\dots)$ - дельта - функции Дирака.

Из (4.32) – (4.35) легко получается представление для поля в области $\mathcal{Q}_4$ через поле в области $\mathcal{Q}_1$:

$$\begin{aligned} \vec{E}_4(x) = & k_0^2 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \int_{\mathcal{Q}_1} \left[\hat{\varepsilon} - \varepsilon_0 \hat{I} \right] \vec{E}_1(y) G(|x - y|) dy + \\ & + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \text{grad div} \int_{\mathcal{Q}_1} \left[\hat{\varepsilon} - \varepsilon_0 \hat{I} \right] \vec{E}_1(y) G(|x - y|) dy + \\ & + i k_0 \text{rot} \int_{\mathcal{Q}_1} [\mu - \mu_0] \vec{H}_1(y) G(|x - y|) dy, \end{aligned} \quad (4.36)$$

$$\begin{aligned}
H_4(x) = & k_0^2 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \int_{Q_1} [\mu - \mu_0] H_1(y) G(|x - y|) dy + \\
& + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \operatorname{grad} \operatorname{div} \int_{Q_1} [\mu - \mu_0] \vec{H}_1(y) G(|x - y|) dy + \\
& - i k_0 \operatorname{rot} \int_{Q_1} [\hat{\varepsilon} - \varepsilon_0 \hat{I}] \vec{E}_1(y) G(|x - y|) dy.
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Теперь получим представления для поперечных компонент электромагнитного поля $E_\varphi, E_r, H_\varphi, H_r$ в указанных выше областях Q_1, Q_2, Q_3 . Для этого достаточно воспользоваться формулами (4.12) – (4.15).

Область Q_1 : подставляя (4.21) и (4.22) в (4.12) – (4.15) имеем:

$$\begin{aligned}
k_H^2 E_\varphi^1 = & - \left[\frac{\beta m}{r} A I_m(k_E r) + i k_0 \mu k_H B I_m'(k_H r) \right] \sin m\varphi \cos \beta z \\
k_H^2 E_r^1 = & \left[k_E \beta A I_m'(k_E r) + \frac{i k_0 \mu m}{r} B I_m(k_H r) \right] \cos m\varphi \cos \beta z
\end{aligned} \tag{4.38}$$

$$k_{\text{H}}^2 H_{\varphi}^1 = \left[i k_0 \varepsilon_{\perp} k_{\text{E}} A I_m'(k_{\text{E}} r) - \frac{m \beta}{r} B I_m(k_{\text{H}} r) \right] \cos m \varphi \sin \beta z$$

$$k_{\text{H}}^2 H_r^1 = \left[\frac{i k_0 \varepsilon_{\perp} m}{r} A I_m(k_{\text{E}} r) - k_{\text{H}} \beta B I_m'(k_{\text{H}} r) \right] \sin m \varphi \sin \beta z$$

Область $\mathcal{Q}_2$: используя (4.23), (4.24) и (4.12) – (4.15), где следует положить $\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_0$ и $\mu = \mu_0$, получаем:

$$\bar{k}^2 E_{\varphi}^2 = \left[\frac{m \beta}{r} C K_m(\bar{k} r) + i k_0 \mu_0 \bar{k} D K_m'(\bar{k} r) \right] \sin m \varphi \cos \beta z \quad (4.39)$$

$$\bar{k}^2 E_r^2 = - \left[\beta \bar{k} C K_m'(\bar{k} r) + \frac{i k_0 \mu_0 m}{r} D K_m(\bar{k} r) \right] \cos m \varphi \cos \beta z$$

$$\bar{k}^2 H_{\varphi}^2 = \left[- i k_0 \varepsilon_0 \bar{k} C K_m'(\bar{k} r) + \frac{m \beta}{r} D K_m(\bar{k} r) \right] \cos m \varphi \sin \beta z$$

$$\bar{k}^2 H_r^2 = \left[- \frac{i k_0 \varepsilon_0 m}{r} C K_m(\bar{k} r) + \beta \bar{k} D K_m'(\bar{k} r) \right] \sin m \varphi \sin \beta z$$

Область $\mathcal{Q}_3$: подставляя (4.25) и (4.26) в (4.12) – (4.15) и заменяя $\varepsilon_{\perp}, \varepsilon_{\parallel}$ на ε_0 и μ на μ_0 , и учитывая уравнение (4.27), имеем:

$$\bar{\bar{k}}^2 E_{\varphi}^3 = \left[\frac{|z|}{z} \frac{m \alpha}{r} E I_m(\bar{\bar{k}} r) - i k_0 \bar{\bar{k}} \mu_0 F I_m'(\bar{\bar{k}} r) \right] \sin m \varphi e^{-\alpha|z|} \quad (4.40)$$

$$\bar{\bar{k}}^2 E_r^3 = \left[- \frac{|z|}{z} \bar{\bar{k}} \alpha E I_m'(\bar{\bar{k}} r) + \frac{i k_0 \mu_0 m}{r} F I_m(\bar{\bar{k}} r) \right] \cos m \varphi e^{-\alpha|z|}$$

$$\bar{k}^2 H_\varphi^3 = \left[i k_0 \varepsilon_0 \bar{k} E I'_m \left(\bar{k} r \right) - \frac{|z|}{z} \frac{\alpha m}{r} F I_m \left(\bar{k} r \right) \right] \cos m \varphi e^{-\alpha |z|}$$

$$\bar{k}^2 H_r^3 = \left[\frac{i k_0 \varepsilon_0 m}{r} E I_m \left(\bar{k} r \right) - \frac{|z|}{z} \alpha \bar{k} F I'_m \left(\bar{k} r \right) \right] \sin m \varphi e^{-\alpha |z|}$$

В формулах (4.38) – (4.40) штрих обозначает операцию дифференцирования функции по аргументу.

Таким образом, получено явное представление для поля собственных колебаний открытого цилиндрического диэлектрического резонатора. В дальнейшем оно будет использовано при построении характеристического уравнения для определения собственных частот резонатора.

4.3 Характеристическое уравнение для собственных частот

Для определения неизвестных амплитуд поля собственных колебаний констант A, B, C, D, E, F и соответствующих собственных частот резонатора достаточно удовлетворить условиям непрерывности тангенциальных компонент поля на граничной поверхности резонатора.

В результате получается однородная система линейных алгебраических уравнений. Условие существования нетривиальных решений этой системы приводит к соотношению между частотой колебаний, характеристическими параметрами $(\varepsilon_\perp, \varepsilon_\parallel, \mu, R, h)$ резонатора и параметрами (ε_0, μ_0) внешней среды. Далее получим это соотношение (характеристическое уравнение). Рассмотрим условие непрерывности тангенциальных компонент поля собственных колебаний на боковой поверхности резонатора - $r = R$, $|z| \leq \frac{h}{r}$:

$$E_z^I = E_z^2, H_z^I = H_z^2, \text{ при } r = R, |z| \leq \frac{h}{r} \quad (4.41)$$

$$E_{\varphi}^l = E_{\varphi}^2, \quad H_{\varphi}^l = H_{\varphi}^2, \quad \text{при } r = R, \quad |z| \leq \frac{h}{r} \quad (4.42)$$

Подставляя (4.21), (4.22) и (4.23), (4.24) в (4.41) и (4.38) и (4.39) в (4.42) имеем:

$$\begin{aligned} A I_m(k_E R) &= C K_m(\bar{k} R), \\ B I_m(k_H R) &= D K_m(\bar{k} R), \\ - A \frac{\beta m}{R k_H^2} I_m(k_E R) - B \frac{i k_0 \mu}{k_H} I_m'(k_H R) &= \\ &= C \frac{m \beta}{R \bar{k}^2} K_m(\bar{k} R) + D \frac{i k_0 \mu}{\bar{k}} K_m'(\bar{k} R), \\ A \frac{i k_0 \varepsilon_{\perp} k_E}{k_H^2} I_m'(k_E R) - B \frac{m \beta}{R k_H^2} I_m(k_H R) &= \\ = - C \frac{i k_0 \varepsilon_0}{\bar{k}} K_m'(\bar{k} R) + D \frac{m \beta}{R \bar{k}^2} K_m(\bar{k} R) \end{aligned} \quad (4.43)$$

Выражая из первых двух уравнений (4.43) амплитуды C и D через амплитуды A, B и подставляя эти выражения в два последних уравнения (4.43), получаем:

$$A \frac{m\beta}{R} \left(\frac{1}{\bar{k}^2} + \frac{1}{K_H^2} \right) I_m(k_E R) +$$

$$+ B i k_0 \mu \left(\frac{I'_m(k_H R)}{k_H} + \frac{K'_m(\bar{k} R)}{\bar{k} K_m(\bar{k} R)} I_m(k_H R) \right) = 0 \quad (4.44)$$

$$A i k_0 \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_{||} \varepsilon_{\perp}}}{k_H} I'_m(k_E R) + \frac{\varepsilon_0 K'_m(\bar{k} R)}{\bar{k} K_m(\bar{k} R)} I_m(k_E R) \right) -$$

$$- B \frac{m\beta}{R} \left(\frac{1}{\bar{k}^2} + \frac{1}{k_H^2} \right) I_m(k_H R) = 0$$

Уравнения (4.44) образуют линейную алгебраическую однородную систему уравнений относительно амплитуд A и B . Условием существования нетривиального решения этой системы является равенство нулю определителя матрицы этой системы уравнений. Вычисляя, определитель после ряда эквивалентных преобразований имеем:

$$\left[\frac{y \sqrt{\varepsilon_{||} \varepsilon_{\perp}}}{\varepsilon_0} I'_m \left(x \sqrt{\frac{\varepsilon_{||}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right] \times$$

$$\times \left[\frac{\mu y}{\mu_0} I'_m \left(x \sqrt{\frac{\varepsilon_{||}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right] -$$

(4.45)

$$- m^2 I_m^2(x) \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) \left(\frac{\varepsilon_{\perp} \mu}{\varepsilon_0 \mu_0} + \frac{x^2}{y^2} \right) = 0$$

Здесь $F_m(x, y) = x I_m(x) \frac{K'_m(y)}{K_m(y)}$, $x^2 = (k_0 R)^2 \varepsilon_{\perp} \mu - u^2$,

$$y^2 = u^2 - (k_0 R)^2 \varepsilon_0 \mu_0, \quad u = \beta R.$$

Как видно, уравнение (4.45) содержит две неизвестные величины – нормированное волновое число $k_0 R = \frac{\omega}{c} R$ и нормированную постоянную распространения βR вдоль оптической оси резонатора.

Для получения дополнительного уравнения относительно $k_0 R$ и βR достаточно воспользоваться условиями непрерывности тангенциальных компонент поля собственных колебаний на торцах резонатора:

$$|z| = \frac{h}{r}, \quad 0 \leq r \leq R.$$

$$E_{\varphi}^I = E_{\varphi}^3, \quad H_{\varphi}^I = H_{\varphi}^3, \quad E_r^I = E_r^3, \quad H_r^I = H_r^3. \quad (4.46)$$

Из представленной (4.38) и (4.40) поперечных компонент поля собственных колебаний в областях Q_1 и Q_3 , используя граничные условия (4.46) получаем:

$$\begin{aligned} & \left[A \frac{\beta m}{r k_H^2} I_m(k_E r) + B \frac{i k_0 \mu}{k_H} I_m'(k_H r) \right] \cos \frac{\beta h}{2} = \\ & = \left[- E \frac{m \alpha}{r \bar{k}^2} I_m(\bar{k} r) + F \frac{i k_0 \mu_0}{\bar{k}} I_m'(\bar{k} r) \right] e^{-\frac{\alpha h}{2}}, \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} & \left[A \frac{k_E \beta}{k_H^2} I_m'(k_E r) + B \frac{i k_0 \mu m}{r k_H^2} I_m(k_H r) \right] \cos \frac{\beta h}{2} = \\ & = \left[- E \frac{\alpha}{\bar{k}} I_m'(\bar{k} r) + F \frac{i k_0 \mu_0 m}{r \bar{k}^2} I_m(\bar{k} r) \right] e^{-\frac{\alpha h}{2}}, \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\left[A \frac{i k_0 \varepsilon_{\perp} k_E}{k_H^2} I_m'(k_E r) - B \frac{m \beta}{r k_H^2} I_m(k_H r) \right] \sin \frac{\beta h}{r} =$$

$$= \left[E \frac{i k_0 \varepsilon_0}{\bar{k}} I'_m(\bar{k} r) - F \frac{\alpha m}{r \bar{k}^2} I_m(\bar{k} r) \right] e^{-\frac{\alpha h}{r}}, \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} & \left[A \frac{i k_0 \varepsilon_{\perp} m}{r k_H^2} I_m(k_E r) - B \frac{\beta}{k_H} I'_m(k_H r) \right] \sin \frac{\beta h}{2} = \\ & = \left[E \frac{i k_0 \varepsilon_0 m}{r \bar{k}^2} I_m(\bar{k} r) - F \frac{\alpha}{\bar{k}} I'_m(\bar{k} r) \right] e^{-\frac{\alpha h}{2}}, \end{aligned} \quad (4.50)$$

Как следует из уравнения (4.27), $\bar{k} = k_H$, кроме того: $k_E = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} k_H$.

Учитывая эти соотношения и используя рекуррентные формулы для цилиндрических функций [135] получим

$$I'_m(z) + \frac{m}{z} I_m(z) = I_{m-1}(z), \quad \frac{m}{z} I_m(z) - I'_m(z) = I_{m+1}(z) \quad (4.51)$$

Далее преобразуем уравнения (4.47) – (4.50).

Складывая и вычитая уравнения (4.47) и (4.48) с учетом (4.51) имеем:

$$e^{\frac{\alpha h}{2}} \cos \frac{\beta h}{2} \left[-\beta \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \frac{I_{m+1}(k_E r)}{I_{m+1}(\bar{\bar{k}} r)} A + i k_0 \mu B \right] = \alpha E + i k_0 \mu_0 F \quad (4.52)$$

$$e^{\frac{\alpha h}{2}} \cos \frac{\beta h}{2} \left[\beta \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \frac{I_{m-1}(k_E r)}{I_{m-1}(\bar{\bar{k}} r)} A + i k_0 \mu B \right] = -\alpha E + i k_0 \mu_0 F$$

Аналогично, складывая и вычитая уравнения (4.49) и (4.50), получаем:

$$e^{\frac{\alpha h}{2}} \sin \frac{\beta h}{2} \left[i k_0 \sqrt{\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp}} \frac{I_{m-1}(k_E r)}{I_{m-1}(\bar{\bar{k}} r)} A - \beta B \right] = i k_0 \varepsilon_0 E - \alpha F \quad (4.53)$$

$$e^{\frac{\alpha h}{2}} \sin \frac{\beta h}{2} \left[i k_0 \sqrt{\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp}} \frac{I_{m+1}(k_E r)}{I_{m+1}(\bar{\bar{k}} r)} A + \beta B \right] = -i k_0 \varepsilon_0 E + \alpha F$$

Из (4.52), (4.53) окончательно имеем:

$$\begin{aligned} & A \beta \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \left(\frac{I_{m-1}(k_E r)}{I_{m-1}(\bar{\bar{k}} r)} - \frac{I_{m+1}(k_E r)}{I_{m+1}(\bar{\bar{k}} r)} \right) + 2 i k_0 \mu B - \\ & - 2 i k_0 \mu_0 e^{-\frac{\alpha h}{2}} \cos^{-1} \frac{\beta h}{2} F = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& A \beta \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \left(\frac{I_{m-1}(k_E r)}{I_{m-1}(\bar{k} r)} + \frac{I_{m+1}(k_E r)}{I_{m+1}(\bar{k} r)} \right) + \\
& + 2 \alpha e^{-\frac{\alpha h}{2}} \cos^{-1} \frac{\beta h}{2} E = 0 \\
& A i k_0 \sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}} \left(\frac{I_{m-1}(k_E r)}{I_{m-1}(\bar{k} r)} + \frac{I_{m+1}(k_E r)}{I_{m+1}(\bar{k} r)} \right) - \\
& - 2 \alpha e^{-\frac{\alpha h}{2}} \sin^{-1} \frac{\beta h}{2} i k_0 \varepsilon_0 E = 0 \\
& A i k_0 \sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}} \left(\frac{I_{m+1}(k_E r)}{I_{m+1}(\bar{k} r)} - \frac{I_{m-1}(k_E r)}{I_{m-1}(\bar{k} r)} \right) + 2 \beta B - \\
& - 2 \alpha e^{-\frac{\alpha h}{2}} \sin^{-1} \frac{\beta h}{2} F = 0
\end{aligned} \tag{4.54}$$

Приравнявая к нулю определитель матрицы системы уравнений (4.54) после ряда преобразований получаем

$$\frac{\varepsilon_{\perp} \mu}{\varepsilon_0 \mu_0} \alpha^2 + \alpha \beta \left(\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_0} \operatorname{tg} \frac{\beta h}{2} - \frac{\mu}{\mu_0} \operatorname{ctg} \frac{\beta h}{2} \right) - \beta^2 = 0 \tag{4.55}$$

При выполнении соотношения (4.55) система уравнений (4.54) имеет нетривиальное решение, решая (4.55) относительно постоянной затухания α поля собственных колебаний вдоль оси Z имеем:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\mu_0}{\mu} \beta \operatorname{tg} \frac{\beta h}{2} \\ - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\perp}} \beta \operatorname{ctg} \frac{\beta h}{2} \end{cases} \quad (4.56)$$

Воспользуемся теперь уравнением (4.27)

$$\alpha^2 + \beta^2 = k_0^2 (\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0)$$

И подставив в него (4.56), тогда получим:

$$k_0^2 = \beta^2 (\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0)^{-1} \begin{cases} 1 + \frac{\mu_0^2}{\mu^2} \operatorname{tg}^2 \frac{\beta h}{2} \\ 1 + \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{\perp}^2} \operatorname{ctg}^2 \frac{\beta h}{2} \end{cases} \quad (4.57)$$

Далее запишем (4.57) в нормированных величинах $u = \beta R$ и $k_0 R$:

$$(k_0 R)^2 = u^2 (\epsilon_{\perp} \mu - \epsilon_0 \mu_0)^{-1} \begin{cases} 1 + \frac{\mu_0^2}{\mu^2} \operatorname{tg}^2 \left(u \frac{h}{2R} \right) \\ 1 + \frac{\epsilon_0^2}{\epsilon_{\perp}^2} \operatorname{ctg}^2 \left(u \frac{h}{2R} \right) \end{cases} \quad (4.58)$$

Подставляя (4.58) в уравнение (4.45) получаем уравнение относительно нормированной постоянной распространения $u = \beta R$ вдоль оптической оси резонатора:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{y \sqrt{\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}}}{\epsilon_0} I'_m \left(x \sqrt{\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right] \left[\frac{\mu y}{\mu_0} I'_m \left(x \sqrt{\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right] - \\ & - m^2 I_m^2(x) \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) \left(\frac{\epsilon_{\perp} \mu}{\epsilon_0 \mu_0} + \frac{x^2}{y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.59)$$

где $F_m(x, y) = x I_m(x) \frac{K'_m(y)}{K_m(y)}$,

$$x^2 = \frac{u^2 \varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0} \begin{cases} 1 + \frac{\varepsilon_{\perp} \mu_0}{\varepsilon_0 \mu} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right), \\ 1 + \frac{\varepsilon_0 \mu}{\varepsilon_{\perp} \mu_0} c \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right), \end{cases} \quad (4.60)$$

$$y^2 = \frac{u^2 \varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0} \begin{cases} \frac{\varepsilon_{\perp} \mu_0}{\varepsilon_0 \mu_0} - 2 - \frac{\mu_0^2}{\mu^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right), \\ \frac{\varepsilon_{\perp} \mu_0}{\varepsilon_0 \mu_0} - 2 - \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{\perp}^2} c \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right). \end{cases} \quad (4.61)$$

Определив из (4.59) – (4.61) нормированные постоянные распространения $u = \beta R$, с помощью формулы (4.58), получаем нормированные собственные волновые числа $k_0 R = \frac{\omega R}{c}$ и, следовательно, собственные частоты резонатора

$$\omega = \frac{c}{R} \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0}}, \quad (4.62)$$

где C - скорость света в вакууме.

До сих пор рассматривался случай собственных колебаний, для которых продольные компоненты E_z и H_z внутри резонатора являлись соответственно нечетными и четными функциями относительно переменной z . Возможны [134] колебания, когда эти компоненты поля в отличие от (4.21), (4.22) представимы в виде:

$$E_z^1 = A I_m(k_E r) \cos m\varphi \cos \beta z, \quad (4.63)$$

$$H_z^1 = B I_m(k_H r) \sin m\varphi \sin \beta z. \quad (4.64)$$

В этом случае, как видно, уравнение, следующее из уравнения непрерывности тангенциальных компонент поля собственных колебаний на боковой поверхности резонатора, будет иметь такой же вид, как и уравнение (4.45). Однако, уравнение для постоянной затухания α и постоянной распространения β , в отличие от (4.56), изменится следующим образом:

$$\alpha = \beta \begin{cases} \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\perp}} \operatorname{tg} \left(\frac{\beta h}{2} \right) \\ - \frac{\mu_0}{\mu} \operatorname{ctg} \left(\frac{\beta h}{2} \right) \end{cases} \quad (4.65)$$

Уравнение (4.65) получается из условия непрерывности тангенциальных компонент поля на торцах резонатора по изложенной выше методике.

Итак, в случае колебаний (4.63), (4.64) уравнение для определения нормированной постоянной распространения $u = \beta R$ имеет вид (4.59), в котором следует вычислить параметры x и y по формулам:

$$x^2 = \frac{u^2 \varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0} \begin{cases} 1 + \frac{\varepsilon_0 \mu}{\varepsilon_{\perp} \mu_0} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right), \\ 1 + \frac{\mu_0 \varepsilon_{\perp}}{\mu \varepsilon_0} c \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right), \end{cases} \quad (4.66)$$

$$y^2 = \frac{u^2 \varepsilon_0 \mu_0}{\varepsilon_{\perp} \mu - \varepsilon_0 \mu_0} \begin{cases} \frac{\varepsilon_{\perp} \mu}{\varepsilon_0 \mu_0} - 2 - \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{\perp}^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right), \\ \frac{\varepsilon_{\perp} \mu}{\varepsilon_0 \mu_0} - 2 - \frac{\mu_0^2}{\mu^2} c \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right). \end{cases} \quad (4.67)$$

После того, как найдены нормированные постоянные распространения, собственные частоты могут быть определены по формуле (4.62).

В соответствии с классификацией, предложенной в [138], будем называть колебания $H E_{mnp}$ типа, если постоянная затухания α и постоянная распространения β удовлетворяют уравнению:

$$\alpha = \frac{\mu_0}{\mu} \beta \begin{cases} \operatorname{tg} \frac{\beta h}{2}, \\ - \operatorname{ctg} \frac{\beta h}{2}, \end{cases}$$

и колебание $E H_{mnp}$ типа, если:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\perp}} \beta \begin{cases} \operatorname{tg} \frac{\beta h}{2}, \\ - \operatorname{ctg} \frac{\beta h}{2}. \end{cases}$$

Первая буква в этой классификации определяет тип поля, Z - компонента которого является преобладающей внутри резонатора. Индекс m - целое число, характеризующее количество осцилляций поля по

азимутальной координате φ , индексы n и p целые числа, соответственно отвечающие количеству осцилляций поля вдоль координат r и z внутри резонатора. В случае выполнения условия [139]:

$$\left| \frac{\frac{y I'_m(x)}{I_m(x)} + \frac{x K'_m(y)}{K_m(y)}}{\frac{y \sqrt{\epsilon_{\perp} \epsilon_{\parallel}} I'_m\left(x \sqrt{\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}}}\right)}{I_m\left(x \sqrt{\frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}}}\right)} + \frac{x K'_m(y)}{K_m(y)}} \right|^{1/2} \gg 1$$

собственные колебания резонатора будут иметь $H E_{mnp}$ - типа, в противном случае - $E H_{mnp}$ - тип. Здесь величины x, y , вычисляются по формулам (4.60), (4.61), (4.66), (4.67).

Таким образом, получено характеристическое уравнение для определения собственных частот колебаний "шепчущей галереи" открытого резонатора цилиндрической формы, выполненного из анизотропной диэлектрической среды характеризуемой тензором диэлектрической проницаемости, который в цилиндрической системе координат (оптическая ось анизотропного диэлектрика совпадает с осью Z) имеет вид:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}$$

и магнитной проницаемостью μ .

Среда, окружающая резонатор предполагалась однородной и изотропной с диэлектрической проницаемостью ε_0 и магнитной проницаемостью μ_0 . Задавая геометрические параметры (R - радиус, h - высота) резонатора и его электрофизические параметры ($\varepsilon_{\parallel}, \varepsilon_{\perp}, \mu$) можно с помощью известных численных методов [140] решать уравнения (4.59), (4.60), (4.61), (4.66), (4.67) и, тем самым, определить влияние диэлектрической и магнитной проницаемостей внешней среды на спектр собственных частот резонатора.

4.4 Основные расчетные формулы для определения электрофизических параметров внешней среды

Алгоритм определения электрофизических параметров среды окружающей диэлектрический резонатор основан на уравнениях (4.59) - (4.61) и (4.66), (4.67). Эти уравнения устанавливают связь между резонансными частотами, геометрическими и материальными параметрами резонатора и диэлектрической и магнитной проницаемостями внешней среды. В общем случае, уравнения следует решать численными методами (например, методом Ньютона и т.п.). Однако, для практических применений такой подход сопряжен с определенными трудностями. Так, необходимо иметь достаточно хорошие начальные приближения для собственных частот резонатора. Кроме того, имеется возможность появления неоднозначной связи между резонансными частотами и параметрами внешней среды.

Поэтому, сделаем ряд предположений. Будем считать, что среда окружающая диэлектрический резонатор является изотропной, однородной и

характеризуется диэлектрической проницаемостью ε_0 близкой к единице, т.е. $|\varepsilon_0 - 1| \ll 1$. Потери малы настолько, что ими можно пренебречь (тангенс

угла потерь $\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{Im} \varepsilon_0}{\operatorname{Re} \varepsilon_0} \ll 1$, где $\operatorname{Re} \varepsilon_0$ и $\operatorname{Im} \varepsilon_0$ соответственно реальная и

мнимая части диэлектрической проницаемости). Кроме того, среда является немагнитной, т.е. магнитная проницаемость $\mu_0 = 1$. Относительно резонатора будем предполагать следующее. Материал, из которого изготовлен цилиндрический резонатор, моделируется анизотропной диэлектрической средой с тензором диэлектрической проницаемости

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix}$$

и магнитной проницаемостью $\mu = 1$. Компоненты тензора $\varepsilon_{\parallel}, \varepsilon_{\perp}$ не обладают частотной дисперсией. В этих предположениях, как следует из уравнений (4.59) – (4.61), (4.66), (4.67) собственные колебания $H E_{mnp}$ типа слабо реагируют на малые изменения диэлектрической проницаемости ε_0 внешней среды. Поэтому, в дальнейшем ограничимся, случаем колебаний $E H_{mnp}$ типа, для которых E_z компонента напряженности электрического поля является доминирующей внутри резонатора. Для этих типов колебаний постоянная затухания α поля вне резонатора и постоянная распространения β внутри резонатора удовлетворяют уравнениям:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\perp}} \beta \operatorname{tg} \frac{\beta h}{2} \quad (4.68)$$

$$\alpha = - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\perp}} \beta \operatorname{ctg} \frac{\beta h}{2} \quad (4.69)$$

Уравнение (4.68) отвечает случаю, когда E_z является четной функцией переменной z , а уравнение (4.69), когда нечетной. Для определенности, далее будем рассматривать уравнение (4.68). Тогда, из (4.27) легко получить соотношение между резонансным волновым числом $k_0 = \frac{\omega}{c}$ и постоянной распространения β , которое в безразмерной форме имеет вид

$$\hat{k}_0 = u \sqrt{\frac{1 + \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{\perp}^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right)}{\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_0}}, \quad (4.70)$$

где $\hat{k}_0 = k_0 R$, $u = \beta R$, h - высота, м; R - радиус резонатора, м.

Теперь, учитывая, что диэлектрическая проницаемость внешней среды близка к единице, представим (4.59) в следующей форме

$$F_1(x, y) + \delta F_2(x, y) = 0 \quad (4.71)$$

Здесь $\delta = \varepsilon_0 - 1$,

$$F_1(x, y) = \left(y \sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}} I'_m \left(x \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right) \times$$

$$\times \left(y I'_m \left(x \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right) - m^2 I_m^2(x) \left(1 + \frac{y^2}{x^2} \right) \left(\varepsilon_{\perp} + \frac{x^2}{y^2} \right), \quad (4.72)$$

$$F_2(x, y) = F_m(x, y) \left(y I'_m \left(x \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x, y) \right) -$$

$$- m^2 I_m^2(x) \left(1 + \frac{x^2}{y^2} \right), \quad (4.73)$$

где $F_m(x, y) = x I_m(x) \frac{K'_m(y)}{K_m(y)}$,

$$x = u \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{\perp}} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right) \right)}{\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_0}} \quad (4.74)$$

$$y = u \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \left(\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_0} - 2 - \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_{\perp}^2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u h}{2 R} \right) \right)}{\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_0}} \quad (4.75)$$

Как видно, уравнение (4.71) является уравнением относительно нормированной постоянной распространения u . Определив u из (4.71), по формуле (4.70) получаем нормированные резонансные волновые числа, а следовательно и резонансные частоты. Из (4.71) и (4.74), (4.75) следует, что u зависит от параметра $\delta = \varepsilon_0 - 1$, т.е. диэлектрической проницаемости внешней среды. Наша цель состоит в нахождении этой зависимости при выполнении условия $\delta \ll 1$.

Будем предполагать, что высота резонатора меньше резонансной длины волны и значительно меньше его диаметра, т.е. $\frac{h}{2R} \ll 1$. Такого типа диэлектрические резонаторы обладают высокой радиационной добротностью на колебаниях "шепчущей галереи" [126].

Пусть u_0 - решение уравнения (4.70) при $\delta = 0$ (внешняя среда вакуум) и $\hat{k}_0(\theta)$ - соответствующее нормированное резонансное волновое число. Тогда, разлагая (4.70) в ряд по малому параметру δ и учитывая условие, $\frac{h}{2R} \ll 1$, имеем следующее выражение для $\hat{k}_0(\delta)$ при наличии внешней среды

$$\hat{k}_0(\delta) = \hat{k}_0(0) + \delta \left[\frac{\hat{k}_0(0)}{u_0} + \frac{u_0^2}{2 \hat{k}_0(0) (\varepsilon_{\perp} - 1)} \right] \quad (4.76)$$

В (4.76) через $\dot{u}_0$ обозначено значение производной по параметру δ , постоянной распространения u при $\delta = 0$. Определим теперь величину $\dot{u}_0$. Для этого рассмотрим уравнение (4.71). Очевидно, что решение этого уравнения зависит от параметра δ . Продифференцируем (4.71) по этому параметру и положим $\delta = 0$. Тогда имеем

$$\dot{u}_0 = - \frac{F_2(x, y) + \frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \delta} + \frac{\partial F_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \delta}}{\frac{\partial F_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial u} + \frac{\partial F_1}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u}} \quad (4.77)$$

Теперь, используя (4.74) и (4.75), найдем выражения для $\frac{\partial x}{\partial u}$, $\frac{\partial y}{\partial u}$, $\frac{\partial x}{\partial \delta}$ и $\frac{\partial y}{\partial \delta}$ при $\delta = 0$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial u} = & \sqrt{\frac{1 + \varepsilon_{\perp}^{-1} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}{\varepsilon_{\perp} - 1}} + \\ & + \frac{h u_0 \operatorname{tg} \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}{2R \varepsilon_{\perp} \sqrt{\varepsilon_{\perp} - 1} \sqrt{1 + \varepsilon_{\perp}^{-1} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)} \cos^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}, \end{aligned} \quad (4.78)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial y}{\partial u} = & \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp} - 2 - \varepsilon_{\perp}^{-2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}{\varepsilon_{\perp} - 1}} - \\
& - \frac{h u_0 \operatorname{tg} \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}{2R \varepsilon_{\perp}^2 \sqrt{\varepsilon_{\perp} - 1} \sqrt{\varepsilon_{\perp} - 2 - \varepsilon_{\perp}^{-2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)} \cos^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}
\end{aligned} \tag{4.79}$$

$$\frac{\partial x}{\partial \delta} = \frac{u_0 \left(\varepsilon_{\perp} + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right) \right)}{2(\varepsilon_{\perp} - 1)^{3/2} \sqrt{1 + \varepsilon_{\perp}^{-1} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}} \tag{4.80}$$

$$\frac{\partial y}{\partial \delta} = - \frac{u_0 \left[\varepsilon_{\perp} + \varepsilon_{\perp}^{-2} (3\varepsilon_{\perp} - 2) \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right) \right]}{2(\varepsilon_{\perp} - 1)^{3/2} \sqrt{\varepsilon_{\perp} - 2 - \varepsilon_{\perp}^{-2} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{u_0 h}{2R} \right)}} \tag{4.81}$$

Ограничиваясь в (4.78) – (4.81) главными членами по параметру $\frac{h}{2R}$

имеем:

$$\frac{\partial x}{\partial u} = \frac{I}{\sqrt{\varepsilon_{\perp} - I}}, \quad \frac{\partial y}{\partial u} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\perp} - 2}{\varepsilon_{\perp} - I}}, \quad (4.82)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \delta} = \frac{u_0 \varepsilon_{\perp}}{2(\varepsilon_{\perp} - I)^{3/2}}, \quad \frac{\partial y}{\partial \delta} = - \frac{u_0 \varepsilon_{\perp}}{2(\varepsilon_{\perp} - I)^{3/2} \sqrt{\varepsilon_{\perp} - 2}}. \quad (4.83)$$

Далее, используя (4.72), вычислим частные производные функции $F_I(x, y)$, получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_I}{\partial x} = & \left[y_0 \varepsilon_{\parallel} I_m'' \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m^x(x_0, y_0) \right] \left[y_0 I_m' \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x_0, y_0) \right] + \\ & + \left[y_0 \sqrt{\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp}} I_m' \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x_0, y_0) \right] \left[y_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} I_m'' \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m^x(x_0, y_0) \right] - \quad (4.84) \\ & - 2m^2 I_m^2(x_0) \left[\frac{x_0}{y_0^2} - \varepsilon_{\perp} \frac{y_0}{x_0^3} + \frac{I_m'(x_0)}{I_m(x_0)} \left(I + \frac{y_0^2}{x_0^2} \right) \left(\varepsilon_{\perp} + \frac{x_0^2}{y_0^2} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_l}{\partial y} = & \left[\sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}} I'_m \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m^y(x_0, y_0) \right] \left[y_0 I'_m \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x_0, y_0) \right] + \\
& + \left[y_0 \sqrt{\varepsilon_{\perp} \varepsilon_{\parallel}} I'_m \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m(x_0, y_0) \right] \left[I'_m \left(x_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\parallel}}{\varepsilon_{\perp}}} \right) + F_m^y(x_0, y_0) \right] - \\
& - 2 m^2 I_m^2(x_0) \left(\varepsilon_{\perp} \frac{y_0}{x_0^2} - \frac{x_0^2}{y_0^3} \right)
\end{aligned} \quad (4.85)$$

Здесь введены обозначения:

$$\begin{aligned}
F_m^x(x_0, y_0) &= \frac{K'_m(y_0)}{K_m(y_0)} (I_m(x_0) + x_0 I'_m(x_0)), \\
F_m^y(x_0, y_0) &= x_0 I_m(x_0) \frac{K'_m(y_0)(K''_m(y_0) - K'_m(y_0))}{K_m^2(y_0)},
\end{aligned}$$

а величины x_0 и y_0 вычисляются по формулам (4.74), (4.75) при $\varepsilon_0 = l$ и $u = u_0$. Далее, подставляя (4.82), (4.83) в (4.77) из (4.76) окончательно имеем

$$\Delta \dot{k}_i = (\varepsilon_i \cdot l) \left[\frac{u_i}{2 \dot{k}_i(0)(\varepsilon_i \cdot l)} + \dot{u}_i \frac{\dot{k}_i(0)}{u_i} \right], \quad (4.86)$$

где

$$\dot{u}_0 = - \frac{\sqrt{\varepsilon_{\perp} - l} F_2(x_0, y_0) + \frac{u_0 \varepsilon_{\perp}}{2(\varepsilon_{\perp} - l)} \left[\frac{\partial F_l}{\partial x} - (\varepsilon_{\perp} - 2)^{-4/2} \frac{\partial F_l}{\partial y} \right]}{\frac{\partial F_l}{\partial x} + \sqrt{\varepsilon_{\perp} - 2} \frac{\partial F_l}{\partial y}}.$$

Здесь $\Delta k_0 = k_0(\delta) - k_0(0)$ - изменение резонансного волнового числа, а

величины $\frac{\partial F_1}{\partial x}$, $\frac{\partial F_1}{\partial y}$ вычисляются согласно формулам (4.84), (4.85).

Таким образом, получена связь между изменением резонансной характеристики резонатора и диэлектрической проницаемостью среды окружающей резонатор. Тем самым решена задача об определении диэлектрической проницаемости среды внешней по отношению к резонатору по изменению резонансной частоты колебания "шепчущей галереи".

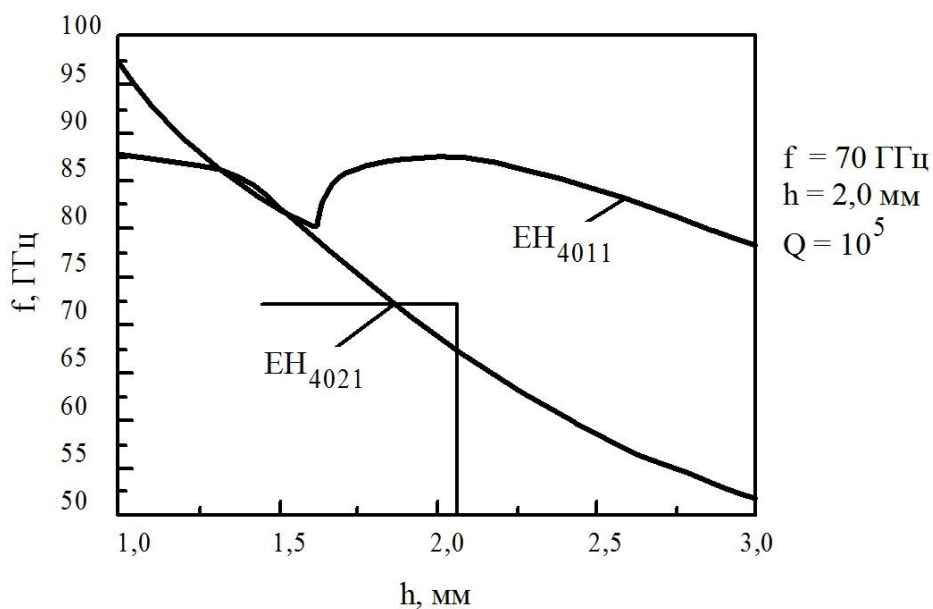
Следует отметить, что полученная формула (4.8) является весьма громоздкой и ее использование требует численного решения характеристического уравнения (4.71).

Возможен альтернативный подход, который позволяет упростить расчетные формулы. Он основан на численных результатах, полученных с помощью уравнения (4.71). Анализ этих результатов позволил установить следующую закономерность.

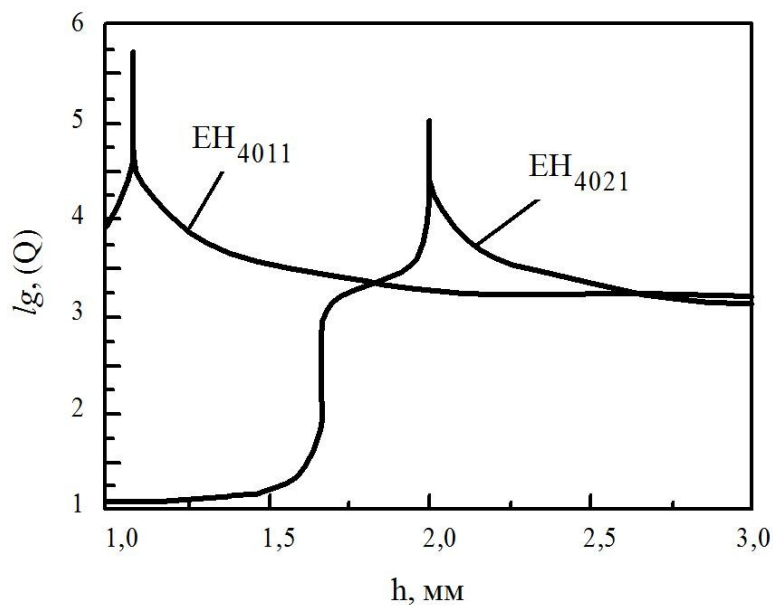
На рис. 4.2 представлены результаты численных экспериментов. Рассматривался открытый цилиндрический диэлектрический резонатор фиксированного радиуса. В качестве материала резонатора был выбран лейкосапфир с диэлектрическими проницаемостями $\varepsilon_{||} = 11,54$, $\varepsilon_{\perp} = 9,4$ [18,99]. Исследовалось колебание "шепчущей галереи" EH_{mnp} типа с азимутальным индексом $m = 40$, аксиальным индексом $p = 1$ и радиальным индексом $n = 1, 2$. Основное внимание было уделено изучению зависимости резонансных частот и добротностей колебаний от изменения высоты h резонатора, радиус резонатора составляет 19 мм.

Как видно из рис. 4.2, изменение добротности колебаний при вариации высоты резонатора имеет ярко выраженный резонансный характер. Было установлено, что значениям высоты резонатора, при которых наблюдается максимальная радиационная добротность, отвечают резонансные частоты, при которых тангенциальные компоненты электрического поля практически

близки к нулю на боковой поверхности резонатора. Основное внимание было уделено изучению зависимости резонансных частот и добротностей колебаний от изменения высоты h резонатора, радиус резонатора составляет 19 мм.



а)



б)

Рис. 4.2. Графики зависимости резонансных частот $f(h)$ и добротностей $Q = f(h)$ колебаний "шепчущей галереи" EH_{mnp} типа от высоты резонатора

Как следует из формул (4.21), (4.38), это возможно, если резонансное волновое число k_o и постоянная распространения β вдоль оси резонатора удовлетворяют уравнению

$$I_m \left(R \sqrt{k_o^2 \varepsilon_{\perp} - \beta^2} \right) \cong 0 \quad (4.87)$$

Следовательно, $k_o^2 \varepsilon_{\perp} - \beta^2 = \frac{V_{mp}^2}{R^2}$, где V_{mp} - P - корень функции Бесселя m - го порядка. Теперь, если воспользоваться формулой (4.70) дающей связь волнового числа k_o и постоянной распространения β , то можно получить следующую приближенную формулу для случая $\frac{h}{2R} \ll 1$

$$k_o = \frac{V_{mp}}{R \sqrt{\varepsilon_{\parallel}}} \sqrt{1 + \frac{2(\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_o)}{\varepsilon_o \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{h V_{mp}}{R} \right)^2} \right) \frac{2(\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_o)}{\varepsilon_{\parallel}}}} \quad (4.88)$$

Поэтому, выбирая геометрические параметры резонатора таким образом, чтобы выполнялось условие резонанса добротности колебаний (4.87) можно по формуле (4.88) получить информацию об изменении диэлектрической проницаемости внешней среды по изменению резонансной частоты. Для этого достаточно перейти в (4.88) к резонансной частоте f , тогда вместо (4.88) имеем

$$f = \frac{c V_{mp}}{2\pi R \sqrt{\epsilon_{\parallel}}} \sqrt{1 + \frac{2(\epsilon_{\perp} - \epsilon_0)}{\epsilon_0 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{(\epsilon_{\perp} - \epsilon_0)}{\epsilon_{\parallel}} \left(\frac{h V_{mp}}{R} \right)^2} \right)}}, \quad (4.89)$$

где C - скорость света в вакууме.

На рис. 4.3 показана зависимость резонансной частоты f колебания $E H_{4011}$ от диэлектрической проницаемости $\epsilon_0 - 1$ для резонатора с параметрами $R = 19$ мм, $h = 0,53$ мм, $\epsilon_{\parallel} = 11,54$, $\epsilon_{\perp} = 9,4$.

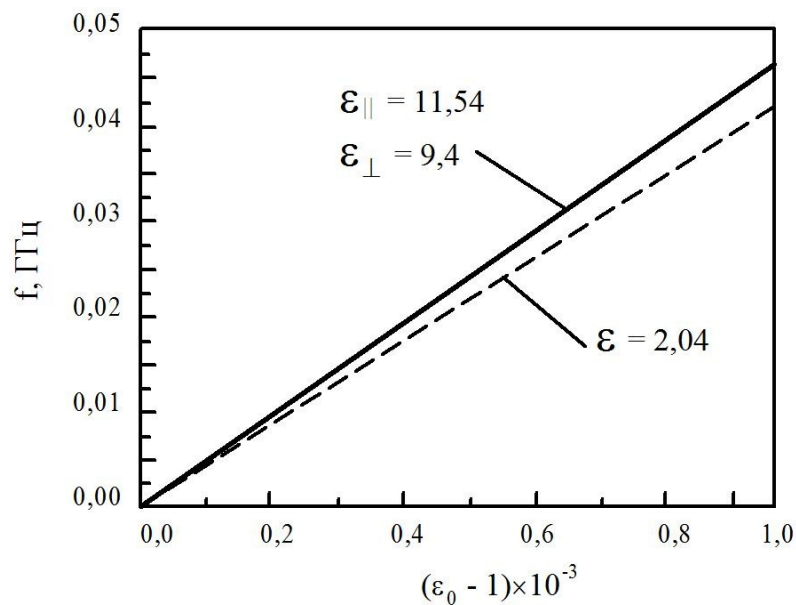


Рис. 4.3. Графики зависимости смещения резонансных частот $\Delta f = f(1) - f(\epsilon_0)$ от диэлектрической проницаемости внешней среды для анизотропного и изотропного диэлектрических резонаторов

Как видно, увеличение диэлектрической проницаемости внешней среды приводит к уменьшению резонансной частоты. Кроме того, при $|\epsilon_0 - 1| \ll 1$ эта зависимость практически является линейной. Рис.4.3 иллюстрирует зависимость сдвига резонансной частоты $\Delta f = f_0 - f$ (f_0 -

резонансная частота при $\varepsilon_0 = 1$) от параметра $\varepsilon_0 - 1$. На этом же рисунке пунктирной линией показан график зависимости Δf для случая, когда материалом резонатора является изотропный диэлектрик, а именно тефлон с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2,04$. Анализ численных результатов позволяет утверждать, что анизотропный диэлектрический резонатор более предпочтителен, чем изотропный. Поскольку, наблюдается более существенное изменение резонансной частоты.

Таким образом, полученные выражения для резонансных частот колебаний "шепчущей галереи" могут служить для определения диэлектрической проницаемости газовой среды растений при использовании открытых диэлектрических резонаторов в качестве измерительной ячейки.

Выводы по разделу:

1. Для выполнения требований по чувствительности измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений в пределах $\varepsilon - 1 \approx 10^{-6}$ необходимо применять открытые цилиндрические анизотропные диэлектрические резонатора, возбуждаемые на колебаниях "шепчущей галереи" с добротностью в пределах $10^4 \dots 10^5$.

2. Для измерения газообмена растений следует использовать анизотропные диэлектрические резонаторы с параметрами $\varepsilon_{II} = 9,4$; $\varepsilon_I = 11,54$; $R = 19$ мм; $h = 2$ мм; $f_p = 70$ ГГц; $\text{tg} \delta = 5 \cdot 10^5$; тип волны EH_{4021} .

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГАЗООБМЕНА РАСТЕНИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

5.1 Разработка функциональной схемы для измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений

Метод измерения диэлектрической проницаемости (ДП) газовой среды при дыхании растений позволяет выделить общие технические устройства, входящие в электронную систему по функциональному признаку. К ним относятся: устройство отбора и передачи информации, преобразования частоты генератора, регистрации и отображения информации. Обобщенная структурная схема ДП газовой среды растений приведена на рис. 5.1.

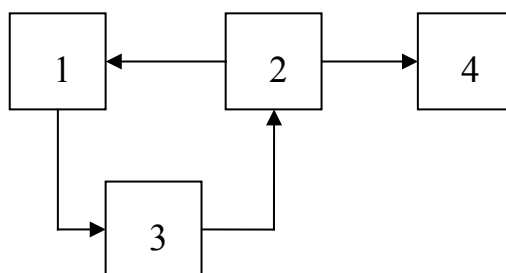


Рис. 5.1. Структурная схема измерений ДП газовой среды растений:

- 1 - устройство отбора информации (диэлектрический резонатор);
- 2 - стабильный по частоте генератор миллиметрового диапазона;

3 - система преобразования частоты; 4 - устройство регистрации и отображения информации

Метод измерения ДП газовой среды растений, основанный на измерении изменений резонансной частоты измерительного резонатора, предусматривает использование резонаторного устройства в качестве частотного дискриминатора. Применение резонаторного устройства в качестве частотного дискриминатора определяет принцип построения системы преобразования частоты. В таких системах преобразование частоты осуществляется на основе частотной автоподстройки стабилизированного по частоте генератора к частоте измерительного резонатора [142, 143]. К достоинству таких систем следует отнести: простоту схемного и аппаратного решений, устойчивость по отношению к низкочастотным возмущениям, возможность поиска по нескольким переменным [144].

Для того, чтобы создать эффективный частотный дискриминатор, сигнал, подаваемый на вход резонатора, модулируется по фазе сигналом низкой частоты. Модуляция осуществляется на выходе генератора миллиметрового диапазона. Выходной сигнал на выходе имеет вид

$$U(t) = U_m \sin(\omega_0 t + x_0 \sin \Omega t), \quad (5.1)$$

где U_m – амплитуда сигнала на входе резонатора;

ω_0 – частота генератора;

x_0 – обобщенная амплитуда девиации частоты;

Ω – частота модуляции.

На рис 5.2 рассмотрен процесс образования информационного сигнала системой ЧАП при измерениях ДП газовой среды растений. При измерениях

изменений ДП газообмена растений форма резонансной характеристики резонатора смещается по частоте, занимая положение 2 или 3, в результате чего на выходе детектора резонатора появляется сигнал Ω_M с искаженной формой. С помощью узкополосного избирательного усилителя, настроенного на частоту Ω_M , усиливается первая гармоника модуляционного сигнала и поступает на один вход фазового детектора, на второй вход подается опорный сигнал модуляции этой же частоты Ω_M от генератора, осуществляющего частотную модуляцию сигнала возбуждения. С выхода фазового детектора снимается положительное или отрицательное напряжение, величина которого пропорциональна изменению ДП газовой среды растения.

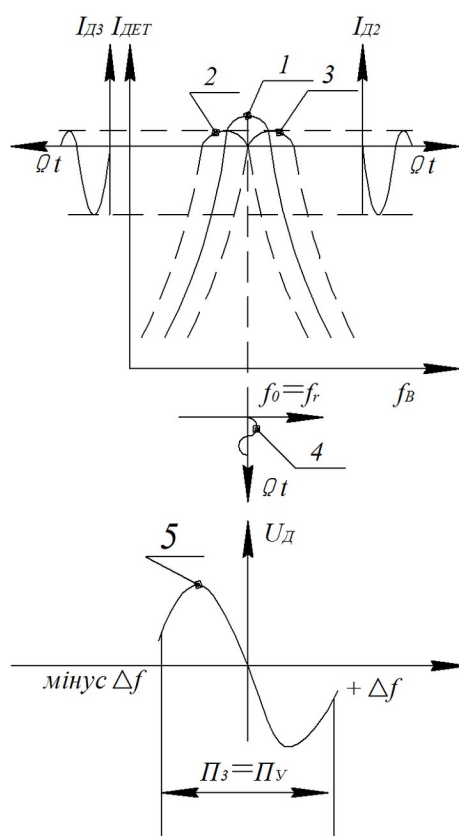


Рис.5.2. Картина образования информационного сигнала системой ЧАП: 1 – форма резонансной характеристики вакуумированного резонатора; 2, 3 – смещение формы резонансных характеристик

резонатора при изменении газовой среды растений при дыхании; $I_{д2}$ и $I_{д3}$ – кривые изменения переменной составляющей тока на выходе детектора резонатора; 4 – форма модуляционного сигнала; 5 – статическая характеристика частотного дискриминатора.

Анализ работы частотных дискриминантов показывает, что на практике широкое применение при частотной модуляции генератора находят резонаторы, включенные по проходной схеме [142].

Если сигнал с генератора поступает на высокочастотный резонатор, то на имеющем квадратичную вольтамперную характеристику детектора, включенном на выходе резонатора, возникает периодически изменяющееся с модуляционной частотой Ω напряжение

$$U_A(t) = \frac{\alpha P_0}{1 + (x_0 \sin \Omega_M t)^2}, \quad (5.2)$$

где $x_0 = 2Q_0 \frac{\omega_D}{\omega_P}$ – обобщенная амплитуда девиации частоты;

Ω_M – частота модуляции;

α – коэффициент характеризующий чувствительность и коэффициент передачи детектора;

P_0 – мощность, подводимая к детектору при резонансе;

Q_0 – добротность резонатора;

ω_D – амплитуда частотного отклонения;

ω_P – частота резонатора.

Частотный спектр этих колебаний состоит из гармонических составляющих, амплитуды которых можно определить с помощью

коэффициентов разложения в ряд Фурье [145]. Используя соотношения для функции с периодом $T = \frac{\pi}{\Omega}$, запишем

$$U_n = \frac{4\alpha P_0}{T} \int_0^{T/2} \frac{\cos n 2\Omega_M t}{1 + (x_0 \sin \Omega t)^2} dt, \quad (5.3)$$

где n – номер гармонической составляющей.

Поскольку нас интересует первая гармоника, то был вычислен интеграл вида

$$U_n = \frac{4}{\pi} \alpha P_0 \int_0^{\pi/2} \frac{\cos 2x}{1 + (x_0 \sin x)^2} dx, \quad (5.4)$$

где $\Omega_M t = x$; $T\Omega = \pi$.

После вычислений было получено выражение для первой гармоники

$$U_n = 4\alpha P_0 \left(-\frac{1}{x_0^2} + \frac{2 + x_0^2}{2x_0^2 \sqrt{1 + x_0^2}} \right). \quad (5.5)$$

Результаты численных расчетов для первой гармоники приведены на рис. 5.3.

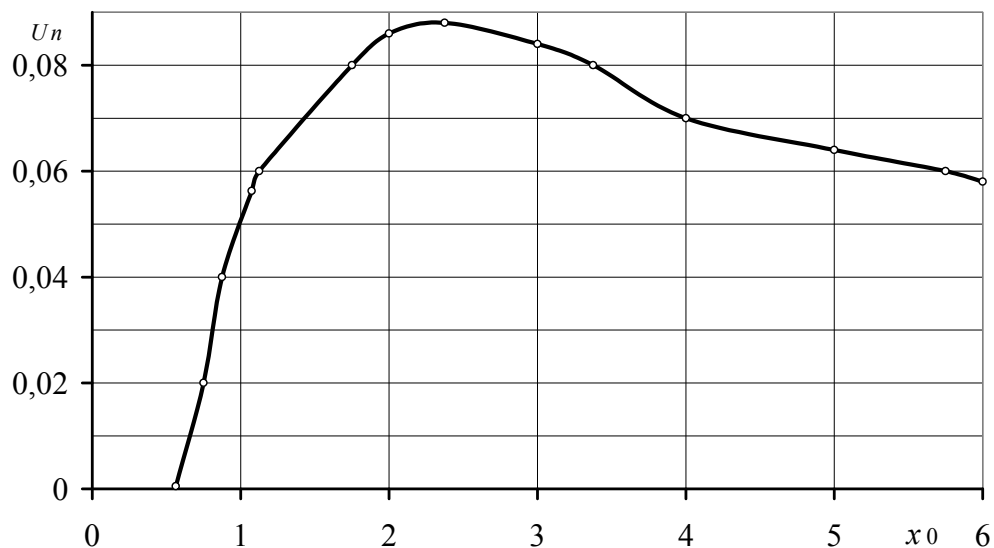


Рис. 5.3. Зависимость нормированного значения амплитуды первой гармоники от параметра x_0

Из рис. 5.3 видно, что наибольшая крутизна дискриминатора наблюдается при значениях $x_0 = 2,2$. На графике величина $U_0 = \alpha \cdot P_0$ – напряжение на детекторе при резонансе. После усиления и фазового детектирования на выходе радиотехнической части схемы вырабатывается управляющее напряжение

$$U_{уп} = 4U_0 K \left(-\frac{1}{x_0^2} + \frac{2 + x_0^2}{2x_0^2 \sqrt{1 + x_0^2}} \right), \quad (5.6)$$

где K – коэффициент передачи усилителя и преобразователя.

В свою очередь, напряжение $U_{упр}$ приводит к изменению частоты генератора на величину

$$\Delta\omega_{упр} = S \cdot U_{упр}, \quad (5.7)$$

где S – крутизна электронной перестройки.

Численные расчеты показывают, что для резонатора с добротностью 10^5 амплитуда частотного отклонения будет составлять $f_d \approx 900 \dots 950$ кГц, а величина управляющего напряжения $U_{упр} \approx 2$ В для параметров:

$$\alpha = 1 \frac{\text{В}}{\text{ВТ}}; P_0 = 65 \text{ мВт}; K = 10^2.$$

Для крутизны электронной перестройки $S = 10^8 \frac{\text{Гц}}{\text{В}}$ величина изменения частоты генератора будет в пределах $\Delta f = 0,03 \dots 0,04$ ГГц, что соответствует теоретическому расчету.

На рис. 5.4 приведена функциональная схема измерения дыхания растений по изменению ДП.

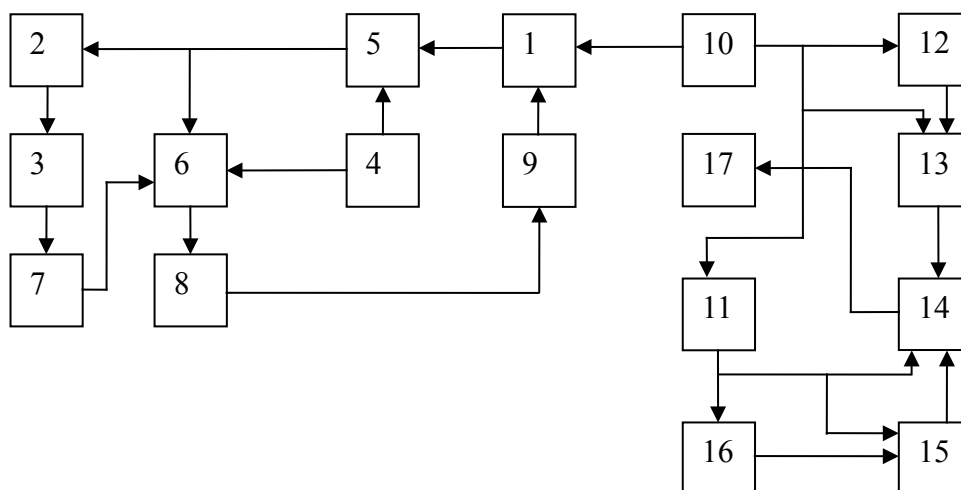


Рис. 5.4. Функциональная схема измерений ДП дыхания растений

Устройство для измерения изменений ДП веществ работает следующим образом: сигнал с ГЛПД 1 поступает на высокочастотный измерительный резонатор 2. Изменение сигнала на выходе СВЧ детектора 3 от изменения частотной расстройки при этом имеет вид резонансной кривой. Для получения информации об изменении ДП газовой среды растений, помещенной в измерительный резонатор 2, сигнал, подаваемый на вход измерительного резонатора 2, модулируется по фазе Ω_m низкой частоты. Модуляция осуществляется генератором модуляционной частоты 4, сигнал которого подается на модулятор 5 и амплитудно-фазовый детектор 6. Сигнал с детектора 3 усиливается избирательным усилителем 7 и поступает на амплитудно-фазовый детектор 6. При отклонении частоты ГЛПД 1 от резонансной частоты измерительного резонатора на выходе амплитудно-фазового детектора 6 появляется сигнал первой гармоники, фаза которого зависит от знака рассогласования. Этот сигнал поступает на вход селективного усилителя 8.

Постоянное напряжение поступает на орган управления 9 и на варакторный диод генератора ЛПД 1.

Формирование сигнала пропорционального изменению действительной составляющей диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon'$, осуществляется следующим образом. Сигнал с выхода генератора 1 через формирователь 10 поступает для синхронизации на генератор опорной частоты 11, делитель частоты 12 и один из входов триггера 13. На второй вход триггера 13 сигнал поступает с выхода формирователя 10. Сигнал с выхода триггера 13 поступает на один из входов ключа 14. На второй вход ключа 14 сигнал с триггера 15, на выходы которого поступают сигналы от генератора 11 и делителя частоты 16. Формирователь импульсов 16, формируемых из напряжения генератора 1, делитель частоты 12 и триггер 13 формируют импульс длительности

$$T_1 = K_1 T_{ген} = \frac{K_1}{f_{ген}}, \quad (5.8)$$

где K_1 – коэффициент деления делителя 12;

$f_{ген}$ – частота генератора 1.

Генератор 11, делитель 16 и триггер 15 формируют импульс напряжения длительностью

$$T_2 = K_2 T_0 = \frac{K_2}{f_0}, \quad (5.9)$$

где K_2 – коэффициент деления делителя 16 частоты;

$f_0 = \frac{1}{T_0}$ – частота следования импульсов генератора 11.

Оба импульса напряжения подаются на соответствующие входы ключа 14, который открыт только в течение времени $\Delta T = T_2 - T_1$. В течение времени ΔT через ключ 14 к регистратору 17 проходят импульсы от генератора 11 с периодом повторения T_0 . При $K_1 = f_{ген} K_2 T_0$ имеем

$$N = \frac{K_2 T_0 - f_{ген.ном} K_2 T_0 T_{ген}}{T_0} = K_2 \frac{\Delta f_{ген}}{f_{ген}}, \quad (5.10)$$

где $f_{ген.ном}$ – частота генератора 1 до изменения диэлектрической проницаемости внешней среды растений.

5.2 Анализ качества работы электронной системы контроля дыхания растений

Как уже было рассмотрено (рис.5.1), в электронных системах измерения изменений ДП газовой среды растений системы преобразования частоты строятся на основе систем ЧАП. При анализе динамики таких систем следует учитывать следующие обстоятельства: чувствительность измерений до 10^{-6} для величины $\Delta \varepsilon'$ предъявляет повышенные требования как к кратковременной нестабильности частоты генератора до $10^{-7} - 10^{-8}$, так и к величине коэффициента подстройки $k_{ЧАП}$ системы ЧАП, который должен быть достаточно большим ($10^5 - 10^6$) [192].

Для электронной статической системы ЧАП (рис.5.4) требуемая величина $k_{ЧАП}$ определяется из соотношения

$$k_{\text{ЧАП}} \geq \frac{\Delta f}{\Delta f_{\text{МАКС}}}, \quad (5.11)$$

где Δf – начальная расстройка измерительного преобразователя (ее максимальная величина равна полуширине полосы пропускания резонаторной системы);

$\Delta f_{\text{МАКС}}$ – максимально допустимое абсолютное отклонение частоты генератора. В ряде случаев с помощью простейшей линейной статической системы ЧАП требуемое значение коэффициента $k_{\text{ЧАП}}$ реализовывать не удастся, так как не выполняется условие устойчивости.

Поэтому возникает необходимость применения астатических систем ЧАП. Для увеличения устойчивого коэффициента ЧАП при запаздывании необходимо, чтобы постоянная времени фильтра амплитудно-фазового детектора была значительно больше времени запаздывания, однако ее увеличение ограничивается заданным быстродействием системы [146].

Для полной и всесторонней оценки системы ЧАП необходимо исследовать такие показатели, как степень устойчивости системы, характер переходного процесса, продолжительность переходного процесса, перерегулирование, статистическую и динамическую ошибки [144, 147]. Оценить указанные показатели системы можно в результате решения дифференциального уравнения, описывающего переходные процессы. Непосредственное решение уравнений связано с большими трудностями [148]:

- уравнения, точно описывающие поведение реальных систем, являются нелинейными высокого порядка и точного решения не имеют;
- для обеспечения нужного качества регулирования приходится выбирать параметры проектируемой системы, а не исследовать уже готовую систему.

Указанные обстоятельства заставляют пользоваться упрощенной моделью и прибегать к приближенным методам, которые влекут за собой снижение точности, а иногда и глубокое искажение получаемых оценок.

Для анализа структурно-динамических систем ЧАП используем имитационную модель на основе математического описания исследуемой системы, которая позволяет прогнозировать ход исследуемых процессов в проектируемом объекте при заданных условиях функционирования, повысить точность и надежность решения задачи, документированность полученных результатов [149]. Для анализа применяется пакет моделирования непрерывных процессов (ПМНП) (общее описание ПРО.309.006Д), который содержит набор вычислительных программ, ориентированных на анализ движения систем, описываемых дифференциальными уравнениями. При помощи пакета ПМНП можно моделировать процессы, описываемые структурно-динамическими схемами или системой дифференциальных уравнений. Для решения указанных задач в пакете имеется базовый набор вычислительных средств, позволяющих моделировать процессы в элементарных динамических звеньях, типовых нелинейностях, логических устройствах [150]. Применяемый метод позволяет исследовать линейные, нелинейные, дискретные и нестационарные системы с детерминированными сигналами. Построение модели начинают с разбиения исследуемой системы на элементы и выделения связей между ними. При этом существенное значение имеют лишь те свойства элемента, которые отражаются на его взаимодействии с другими элементами системы.

В качестве исходной информации, необходимой для составления соответствующего фрагмента программы, рассмотрим структурно-динамическую схему на рис.5.5.

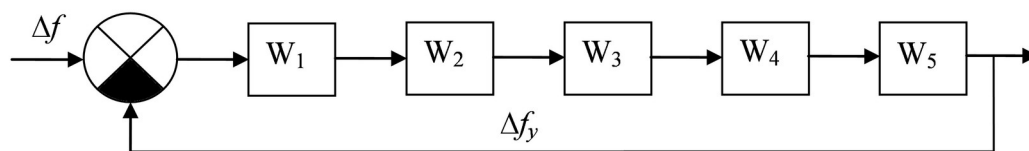


Рис. 5.5. Структурно-динамическая схема линейной системы ЧАП

Анализ будем проводить в предположении, что отклонения частоты, вызванные исследуемым газом, лежат в пределах линейной области характеристик управляющего элемента и дискриминатора. На рис.5.5 резонатор представлен сумматором, на входы которого поступают сигналы Δf_y и Δf . Сигнал Δf определяет изменения резонансной частоты резонатора при изменениях действительной составляющей ДП газа, а Δf_y – изменение частоты генератора. Остальную цепь регулирования системы ЧАП можно представить из соединений ряда апериодических и безынерционных звеньев. Передаточная функция измерительного резонатора (ИР), исполняющего роль дискриминатора как элемента цепи регулирования, в операционной форме запишется в виде апериодического звена

$$W_1(P) = \frac{k_{ИР}}{1 + T_{ИР}P}, \quad (5.12)$$

где k_{IP} – крутизна характеристики ИП, величина которой определяется добротностью применяемого резонатора;

T_{IP} – постоянная времени, определяемая соотношением

$$T_{IP} = \frac{Q_0}{\omega_p} \sim 2 \cdot 10^{-7};$$

Q_0 – добротность нагруженного резонатора;

ω_p – собственная частота резонатора.

Избирательный усилитель можно рассматривать в виде апериодического звена для ИП на основе открытых резонаторов, передаточная функция которого имеет вид

$$W_2(P) = \frac{k_y}{1 + T_y P}, \quad (5.13)$$

где k_y – коэффициент усиления усилителя;

T_y – постоянная времени усилителя.

Инерционность усилителя обусловлена выбранной частотой модуляции и требованиям к избирательности по второй гармонике. Частота модуляции Ω_m не должна превышать половины ширины полосы пропускания резонатора, а избирательность должна быть не менее 40 дБ [146].

Учитывая выше изложенное, постоянную времени избирательного усилителя можно определить из выражения [144]

$$T_y = n \frac{\alpha_\Delta}{\pi} \frac{1}{P}, \quad (5.14)$$

где n – число каскадов;

α_{Δ} – функция, зависящая от типа каскадов усилителя;

Π – полоса пропускания усилителя.

Передаточная функция амплитудно-фазового детектора зависит от параметров фильтра на выходе детектора и имеет вид

$$W_3(P) = \frac{k_{\phi\Delta}}{1 + T_{\phi\Delta}P}, \quad (5.15)$$

где $T_{\phi\Delta}$ – постоянная времени фильтра;

$k_{\phi\Delta}$ – коэффициент передачи, в лучшем случае равный 1.

Усилитель постоянного тока является безынерционным элементом с передаточной функцией вида

$$W_4(P) = k_{УПТ}, \quad (5.16)$$

$$W_5(P) = k_{УЭ}, \quad (5.17)$$

Устройство электронной подстройки частоты генератора в линейной системе ЧАП следует рассматривать безынерционным звеном с

передаточной функцией. Программное описание системы при помощи средств языка ПМНП является адекватным отражением структурно-динамической схемы (рис. 5.5). На рис. 5.6 показана приведенная структурно-динамическая схема.

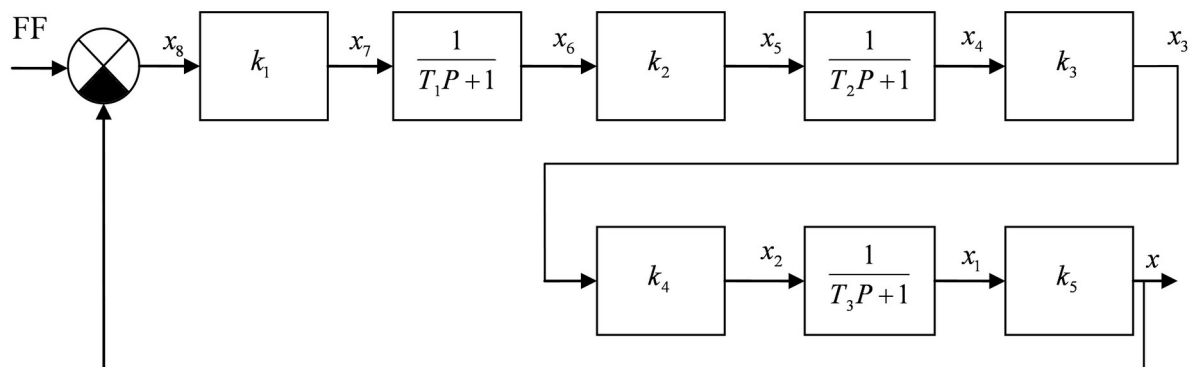


Рис. 5.6. Приведенная структурно-динамическая схема линейной системы

Располагая приведенной структурно-динамической схемой, был исследован переходной процесс системы ЧАП. Параметры системы ЧАП определяли по показателям качества переходного процесса: колебательность $n = 1 \dots 2$; величина перерегулирования $10 \dots 20\%$, время установления переходного процесса $t_y = (0,5 \dots 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ с}$. Анализ переходных процессов показал, что поставленным требованиям отвечает система с параметрами, переходной процесс, который показан на рис. 5.7.

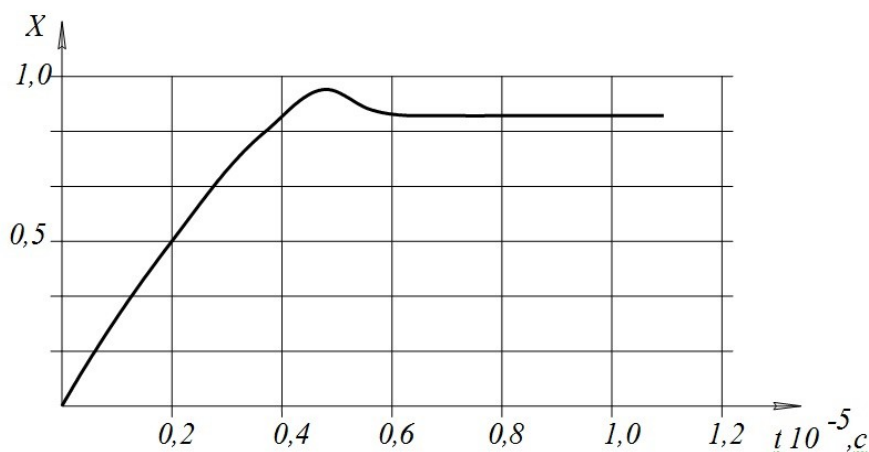


Рис. 5.7. Кривая переходного процесса

Система с параметрами: $k_1 = 10^{-7} \text{ В/Гц}$; $k_2 = 10^2$; $k_3 = 1$; $k_4 = 10^2$; $k_5 = 10^8 \text{ Гц/В}$; $T_1 = 10^{-7} \text{ с}$; $T_2 = 10^{-6} \text{ с}$; $T_3 = 0,1 \text{ с}$, обеспечивает время установления переходного процесса $t_y = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, величину перерегулирования менее 10%, а коэффициент передачи системы удовлетворяет условию (5.11).

5.3 Анализ влияния внутренних импульсов системы частотно-амплитудного преобразователя на точность измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений

Целью анализа является такой выбор параметров системы АПЧ, при котором минимизируется ошибка слежения частоты генератора за изменением частоты ИР.

В электронной системе ЧАП в установившемся режиме следует учитывать ошибку воспроизведения заданного воздействия и ошибку создаваемую внутренними возмущениями.

При коэффициенте передачи системы ЧАП в пределах $10^5 \dots 10^6$ ошибкой воспроизведения можно пренебречь, а степень точности измерения ДП газовой среды растений будет определяться действием внутренних шумов системы [142].

Однако, повышение точности измерения ДП газа электронной системой ЧАП путем увеличения передаточного коэффициента потребует дополнительных мер для обеспечения достаточного запаса устойчивости. Это вызывает необходимость компромиссного решения при определении параметров ЧАП.

Методы анализа детерминированных и случайных процессов позволяют решать задачи по снижению влияния внутренних шумов системы АПЧ на точность измерения ДП газа [146, 151, 152].

Мерой точности системы может быть среднеквадратическое отклонение частоты кварцевого генератора [153]. Среднее значение ошибки может быть определено по известной функции $R(\tau)$ или спектральной плотности $S(\Omega)$, соответствующей случайному возмущающему воздействию с нормальным законом распределения

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\Omega) d\Omega, \quad (5.18)$$

где $S(\Omega)$ – спектральная плотность, соответствующая случайному процессу.

В следящей линейной системе спектральная плотность ошибки зависит от спектральной помехи $S_{\xi}(\Omega)$ и передаточной функции системы по отношению к возмущающему действию [146, 148]

$$S(\Omega) = |W(j\Omega)|^2 S_{\xi}(\Omega), \quad (5.19)$$

Точность рассматриваемой системы ЧАП (см. рис. 5.5) ограничена шумом детектора ИП и шумами первого каскада избирательного усиления. Дисперсия ошибки от помехи на входе избирательного усилителя должна удовлетворять требованию

$$\sigma^2 \ll \sigma_{\text{дон}}^2 = 0,02 \text{ рад}^2.$$

Как видно из структурно-динамической схемы (см. рис. 5.5), передаточная функция замкнутой системы для помехи, действующей на входе усилителя, определяется выражением

$$\begin{aligned}
W_{\xi}(P) &= \frac{W_2(P)W_3(P)W_4(P)W_5(P)}{1 + W_1(P)W_2(P)W_3(P)W_4(P)W_5(P)} = \\
&= \frac{(\dot{O}_{\dot{E}D}D+1)k_y k_{\dot{o}\dot{A}} k_{\dot{O}\dot{I}} k_{\dot{O}\dot{Y}}}{(\dot{O}_{\dot{E}D}D+1)(\dot{O}_{\dot{o}D}D+1)(\dot{O}_{\dot{o}\dot{A}}D+1) + k_{\dot{E}} k_y k_{\dot{o}\dot{A}} k_{\dot{O}\dot{I}} k_{\dot{O}\dot{Y}}}
\end{aligned} \tag{5.20}$$

Учитывая, что ширина спектра помехи значительно больше эквивалентной полосы пропускания системы ЧАП, спектральную плотность помехи можно считать величиной постоянной

$$S_{\xi}(0) = 4kTR_{\Pi}, \tag{5.21}$$

где k – постоянная Больцмана;

T – температура в градусах Кельвина;

R_{Π} – эквивалентное шумовое сопротивление.

Тогда дисперсия ошибки системы ЧАП будет определяться выражением

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{(T_{\Pi\Pi}j\Omega + 1)k_y k_{\phi D} k_{yMH} k_{yЭ}}{(T_{\Pi\Pi}j\Omega + 1)(T_y j\Omega + 1)(T_{\phi D}j\Omega + 1) + k_0} \right|^2 S_{\xi}(0) d\Omega, \tag{5.22}$$

где $k_0 = k_{\text{ИР}} k_y k_{\text{фД}} k_{\text{УЭ}}$

Используя равенство Парсеваля [152]

$$\overline{Y}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty Y^2(j\Omega) d\Omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-j\infty}^{j\infty} Y(P) Y(-P) dP, \quad (5.23)$$

и учитывая, что

$$Y(P) = \frac{C_m P^m + C_{m-1} P^{m-1} + \dots + C_0}{d_n P^n + d_{n-1} P^{n-1} + \dots + d_0}, \quad (5.24)$$

решение для дисперсии ошибки при $m \leq n - 1$ запишем в виде

$$\sigma^2 = \left[\frac{C_2^2 d_0 d_1 + (C_1^2 - 2C_0 C_2) d_0 d_3 + C_0^2 d_2 d_3}{2d_0 d_3 (d_1 d_2 - d_0 d_3)} \right] S_\xi(0), \quad (5.25)$$

где $C_2 = 0$;

$$C_1 = k_y \cdot k_{\text{фД}} \cdot k_{\text{УПТ}} \cdot k_{\text{УЭ}} \cdot T_{\text{ИР}};$$

$$\begin{aligned}
C_0 &= k_y \cdot k_{\phi Д} \cdot k_{УПТ} \cdot k_{УЭ}; \\
d_2 &= T_{ИР} T_{\phi Д} + T_y T_{ИР} + T_y T_{\phi Д}; \\
d_3 &= T_{ИР} \cdot T_y \cdot T_{\phi Д}; \\
d_1 &= T_{ИР} + T_y + T_{\phi Д}; \\
d_0 &= 1 + k_{ИР} \cdot k_y \cdot k_{\phi Д} \cdot k_{УПТ} \cdot k_{УЭ} \approx k_0.
\end{aligned}$$

С учетом $C_2 = 0$, окончательно запишем

$$\sigma^2 = \frac{C_1^2 d_0 + C_0^2 d_2}{2d_0(d_1 d_2 - d_0 d_3)} S_{\xi}(0). \quad (5.26)$$

Для нахождения оптимального значения для k_0 , продифференцируем полученное выражение (5.26) по k_0 и приравняем производную нулю

$$\frac{\partial \sigma^2}{\partial k_0} = T_{ИР}^2 d_3 k_0^2 + 2d_2 d_3 k_0 - d_2^2 d_1 = 0. \quad (5.27)$$

Из уравнений (5.27) и (5.26) следует, что оптимальный коэффициент передачи линейной системы ЧАП составляет $5 \cdot 10^5$, а ошибка от действия внутренних шумов находится в пределах $0,018 \text{ рад}^2$.

5.4 Разработка генератора миллиметрового диапазона на лавинно-пролетном диоде с электронной перестройкой частоты

Как показано в данном разделе, одним из основных узлов электронной системы измерения ДП газовой среды растений является высокостабильный по частоте КВЧ источник.

КВЧ источник должен обеспечить электронную перестройку частоты в широком диапазоне частот и выходную мощность, достаточную для компенсации потерь в волноводном тракте.

К одному из перспективных источников 4-мм диапазона волн могут быть отнесены ГЛПД с варакторной перестройкой частоты, управляемые напряжением.

Рассмотрим конструкцию ГЛПД с последовательным включением варактора, представляющую собой волновод сечением $3,6 \times 1,8$ мм с двумя диододержателями 1разных диаметров, расположенных на одной оси широкой стенки волновода (рис. 5.8) [195].

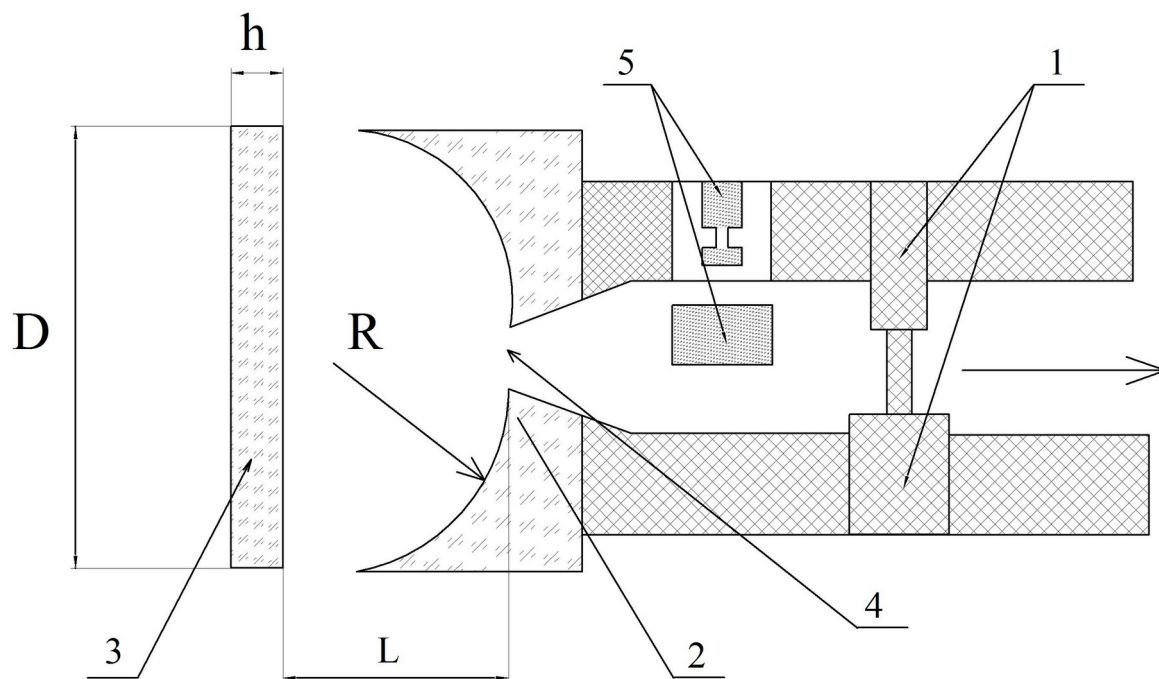


Рис. 5.8. Конструкция электрически перестраиваемого генератора

На одном держателе находится варактор типа АА631, на другом – ЛПД. Питание на диоды подается с помощью токопроводящих

микрополосковых линий 2. Чтобы полосковые линии не замыкались друг на друга, они покрыты полиамидной пленкой с диэлектрической проницаемостью $\epsilon=4$. В цепь питания включены фильтры нижних частот.

Варактор имеет коэффициент перекрытия 2,2 и емкость при напряжении $U = 6,0$ В, равную 0,1 пФ. В мм диапазоне длин волн емкость корпуса варактора $C_{KB} = 0,1$ пФ, индуктивность корпуса $L_{KB} = 0,1$ нГн, сопротивление потерь $R_s = 10$ мм. Предельное напряжение для указанного типа варактора 40 В.

Стабилизация частоты генератора осуществляется открытым резонатором, состоящим из двух зеркал 2 и 3. Связь между резонаторами выполняется в виде плавно сужающегося волновода сечением $3,6 \times 1,8$ мм. Регулировка связи между резонаторами изменяется при помощи «Е-Н» трансформатора 5.

С учетом технологических факторов переменная емкость варактора вычисляется по формуле [146, 159]

$$C(U) = \sqrt{\frac{0,25839}{10,4165 + U}} \cdot \hat{O}. \quad (5.28)$$

Для анализа частотной характеристики ГЛПД с последовательным включением варактора необходимо получить уравнение связывающее частоту с геометрическими размерами колебательной системы, технологическими и электрическими параметрами диодов. Указанное уравнение можно получить, приравняв к нулю общее реактивное сопротивление эквивалентной схемы (рис. 5.9).

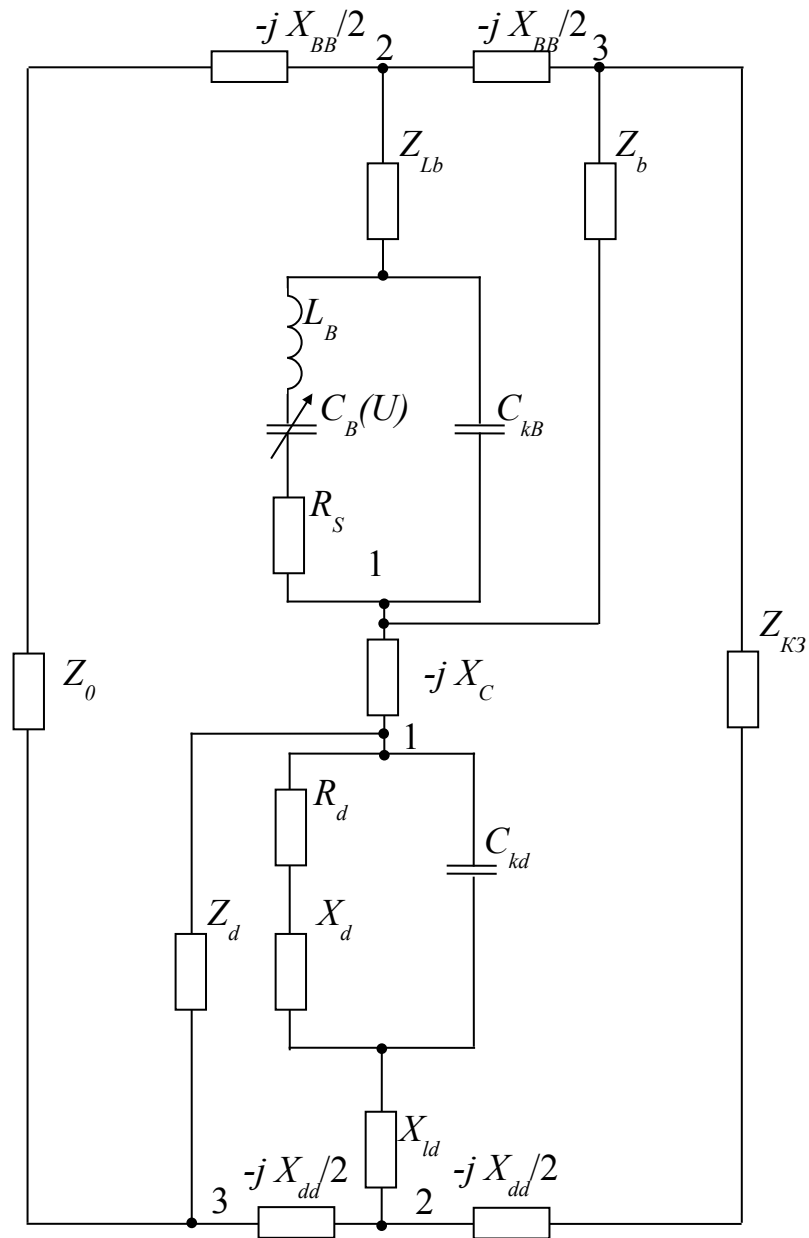


Рис. 5.9. Эквивалентная схема ГЛПД с электронной перестройкой частоты

На эквивалентной схеме L_{KB} , C_{KB} , R_s – индуктивность и емкость корпуса варактора, R_s – сопротивление потерь, $C(U)$ – переменная емкость, создаваемая изменением напряжения на варакторе, X_{LB} , X_{BB} , X_{LD} , X_{dd} – эквивалентные параметры стержневых диододержателей, на которых располагаются варактор и ЛПД соответственно, Z_b , X_d – реактивные

сопротивления полосковых линий в цепи питания варактора и ЛПД, R_d , X_d – активное и реактивное сопротивление ЛПД, которое определяется экспериментально в зависимости от частоты, C_{kd} – емкость корпуса ЛПД.

Слева на эквивалентной схеме генератор нагружен на волновое сопротивление волновода, справа – короткозамкнутым отрезком с сопротивлением $Z_0 \tan \beta l_k$, где l_k – длина короткозамкнутого отрезка (расстояние от стенки короткозамыкателя до центра диододержателя), $\beta = 2\pi / \lambda_b$ (λ_b – длина волны в волноводе).

Варактор и ЛПД по высокой частоте связаны емкостью C_s , которая образуется в результате перекрытия токопроводящих полосок. Она может быть определена как емкость плоскопараллельного конденсатора

$$C_s = \epsilon_0 \epsilon \frac{lW}{d}, \quad (5.29)$$

где d – расстояние между пластинами;

l – длина перекрывающихся участков;

W – наименьшая ширина полосок.

Эквивалентная схема (рис.5.8) посредством преобразования треугольника (точки 1, 2, 3) в звезду может быть сведена вначале в схему на рис.5.9, затем к схеме на рис.5.10.

Параметры обобщенной эквивалентной схемы на рис.5.10 имеют следующие обозначения

$$Z'_0 = Z_0 - j \frac{X_{\text{вв}}}{2}; \quad (5.30)$$

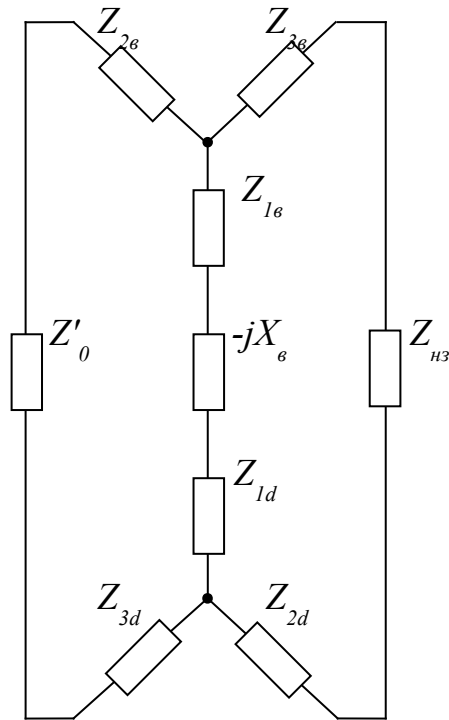


Рис. 5.10. Обобщенная схема ГЛПД с электронной перестройкой частоты

$$Z_{K3} = j \left(Z_0 \tan \beta l - \frac{X_{gg}}{2} \right); \quad (5.31)$$

$$Z_{1g} = \frac{Z_g}{V_g} \left\{ R_g X_{zg} + j \left[R_g^2 + Z_{xg} (X_g + X_{Lg}) \right] \right\}, \quad (5.32)$$

где $X_{z\theta} = Z_{\theta} - \frac{X_{\theta\theta}}{2};$

$$Z_{x\theta} = X_{\theta} + X_{L\theta} - \frac{X_{\theta\theta}}{2}; \quad (5.33)$$

$$R_{\theta} = \frac{R_S}{S_H}; \quad (5.34)$$

$$X_{\theta} = - \left[R_S^2 \omega C_L + \omega L_{\theta} - \frac{1}{\omega C(U)} \right] \left[\omega^2 C_L L_{\theta} - 1 - \frac{C_L}{C(U)} \right] / S_H; \quad (5.35)$$

$$S_H = (\omega C_L R_S)^2 + \left[\omega^2 C_k L_{\theta} - \left(1 + \frac{C_k}{C(U)} \right) \right]^2; \quad (5.36)$$

$$V_{\theta} = R_{\theta}^2 + Z_{x\theta}^2; \quad (5.37)$$

$$Z_{2\epsilon} = -\frac{Z_{1\epsilon} X_{\epsilon\epsilon}}{2Z_{\epsilon}}; \quad Z_{3\epsilon} = -\frac{Z_{\epsilon} X_{\epsilon\epsilon}}{2V_{\epsilon}}(R_{\epsilon} - jZ_{x\epsilon}); \quad (5.38)$$

$$Z_{\epsilon} = Z_{0\epsilon} \tan kl_s. \quad (5.39)$$

Волновое сопротивление $Z_{0\epsilon}$ токопроводящей полосковой линии зависит от высоты линии h (расстояние от пластины до широкой стенки волновода) и ее ширины W и определяется соответствующим выражением

$$Z_{0\epsilon} = 120\pi \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,997 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right]. \quad (5.40)$$

Выражение для вычисления параметров Z_{1d} , Z_{2d} , Z_{3d} получаются заменой индекса ϵ на d в (1-2), например,

$$Z_{1d} = \frac{Z_d}{V_d} \left[R_d X_{zd} + j \left[R_d^2 + Z_{xd} (X_d + X_{Ld}) \right] \right], \quad (5.41)$$

$$X_{zd} = Z_d - \frac{X_{dd}}{2} Z_{xd} = X_d + X_{Ld} + Z_d - \frac{X_{dd}}{2}, \quad (5.42)$$

где R_d , X_d – параметры эквивалентной схемы на рис. 5.10.

В явном виде общее реактивное сопротивление эквивалентной схемы имеет громоздкий вид, поэтому здесь не приводится.

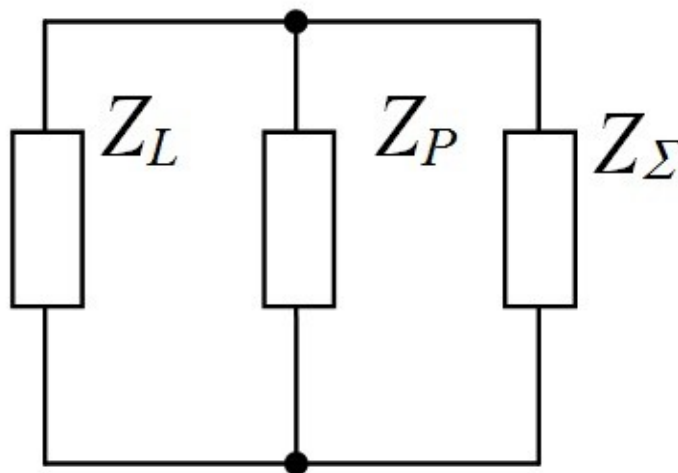


Рис.5.11. Эквивалентная схема для частоты генератора на ЛПД

Для расчетов, после несложных преобразований схемы на рис.5.10, были получены уравнения для эквивалентной схемы на рис.5.11:

$$Z_L = Z_0 + R_{2\theta} + R_{3d} + j \left(X_{2\theta} + X_{3d} - \frac{X_{dd}}{2} \right); \quad (5.43)$$

$$Z_\Sigma = R_{1\theta} + R_{1d} + j \left(X_{1\theta} + X_{1d} - \frac{1}{\omega C_s} \right); \quad (5.44)$$

$$Z_p = R_{3e} + R_{2d} + j \left(X_{3e} + X_{2d} - \frac{X_{ee}}{2} \right); \quad (5.45)$$

При расчете сопротивления стержневых диододержателей использовались соотношения для стержня круглого поперечного сечения, установленного параллельно вектору электрического поля в центре поперечного сечения волновода, в котором распространяется H_{10} – волна:

$$X_{ee(dd)} = Z_0 \frac{d}{\lambda_e} \frac{\left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \left(S_2 + \frac{3}{4} \right)}; \quad (5.46)$$

$$X_{Le} = \frac{X_{ee}}{2} + \frac{aZ_0}{2\lambda_e} \left[S_0 - \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^2 - \frac{5}{8} \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 - 2 \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 \left(S_2 - 2S_0 \frac{\lambda^2}{\lambda_e^2} \right) \right]; \quad (5.47)$$

$$S_2 = \ln \frac{4a}{\pi d} - \frac{5}{2} + \frac{11}{3} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \sum_{n=3.5}^{\infty} \left[\sqrt{h^2 - \left(\frac{2a}{\lambda} \right)^2 - n + \frac{2}{n} \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2} \right], \quad (5.48)$$

где a – ширина волновода;

d – диаметр стержня.

Указанные соотношения справедливы для стержня, полностью замыкающего волновод по узкой стенке. Держатели не имеют конкретной высоты. Поэтому $X_{\text{вс}(dd)}$, $X_{L\sigma}$ определялись с учетом прямо пропорциональности сопротивления высоте стержня.

Исследования показали, что такое приближение при расчете реактивных сопротивлений стержневых держателей не вносит существенных расхождений между теоретическими и экспериментальными результатами.

Анализ эквивалентной схемы (рис.5.10) показывает, что реактивное сопротивление может быть равно нулю только во второй и третьей ветвях. Равенство нулю Z_p обусловлено резонансом в области, ограниченной короткозамыкающей стенкой и стержневыми диододержателями, а Z_Σ – резонансом в реактивной цепи, созданной стержнями варактора и ЛПД, непосредственно самими диодами, а также емкостью связи.

На рис.5.12 приведены расчетные зависимости частоты генератора от напряжения питания на варакторе для различных значений диаметра держателя варактора и ширины токопроводящей полоски.

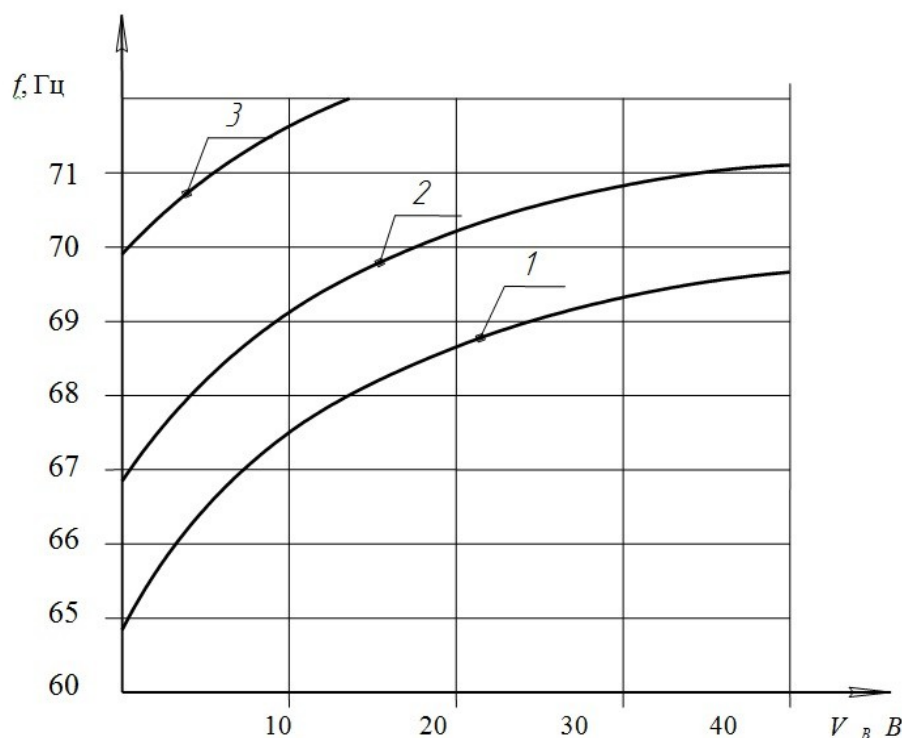


Рис.5.12. Зависимость частоты генератора от напряжения питания

1 – диаметр держателя варактора $d_B = 1$ мм, ширина токопроводящей полоски $W = 2,1$ мм;

2 – $d_B = 1,5$ мм, $W = 2,1$ мм;

3 – $d_B = 2,2$ мм, $W = 2,1$ мм;

Из результатов графического материала видно, что с увеличением диаметра держателя варактора можно сдвинуть границу диапазона перестройки частоты генератора вверх по диапазону, уменьшить величину напряжения на варакторе, практически с постоянной крутизной перестройки частоты генератора.

5.5 Анализ флуктуационных характеристик генератора на лавинно-пролетном диоде миллиметрового диапазона на точность измерения диэлектрической проницаемости газовой среды при дыхании растений

Исследованию флуктуационных характеристик в ГЛПД посвящено значительное число работ [15-17].

Анализ этих работ показывает, что основными источниками нестабильности амплитуды и частоты колебаний выходного сигнала являются естественные и технические флуктуации.

К естественным флуктуациям относится шум лавины (дробовой шум), обусловленный флуктуациями тока в слое умножения за счет лавинного процесса, а также тепловой шум, генерируемый в дрейфовой области и на омических сопротивлениях диода и контура. К техническим – фликкер шум, обусловленный неоднородностью пробоя по площади $p-n$ перехода и условий на его границе, а также модуляционный шум, обусловленный флуктуациями параметров ЛПД, тока смещения и резонансной системы.

Однако, результаты этих работ не могут быть использованы для систем измерения ДП дыхания растений. В связи с чем возникает необходимость проведения исследований по минимизации частотных (фазовых) флуктуационных процессов генератора на ЛПД.

Влияние частотных флуктуаций ГЛПД на точность измерения ДП дыхания растений определим по критерию минимума дисперсии частоты колебаний на выходе ГЛПД, которая определяется выражением [15]

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\dot{\varphi}}(\Omega) \frac{1}{1 + (0,5\Omega\tau)^2} d\Omega, \quad (5.49)$$

где $S_{\dot{\varphi}}(\Omega)$ – энергетический спектр частотных флуктуаций на выходе ГЛПД;

τ – интервал измерения.

Энергетический спектр частотных флуктуаций на выходе системы измерения ДП дыхания растений может быть представлена выражением [159]

$$S_{\dot{\varphi}}(\Omega) = S_{\dot{\varphi}_G}(\Omega) \left| \frac{1}{1 + W(j\Omega)} \right|^2, \quad (5.50)$$

где $S_{\dot{\varphi}_G}(\Omega)$ – энергетический спектр флуктуаций частоты ГЛПД;

$W(j\Omega)$ – передаточная функция разомкнутой системы ЧАП.

Оценку шумов системы, обусловленных флуктуациями параметров ПД (дифференциальная проводимость и емкость диода), производится при условии, что флуктуации параметров носят фликкерный характер.

Кроме того предполагается, что флуктуации параметров малы по сравнению со средними значениями проводимости диода.

Сделанные предположения позволяют использовать метод, который заключается в том, что нелинейный активный элемент представляется в виде двухполюсника с активной и реактивной составляющей проводимости

$$Y_d(j\omega) = G_d + jB_d(\omega) = |Y_d(j\omega)| e^{j\varphi_{d1}}, \quad (5.51)$$

где φ_{d1} – сдвиг фаз между первой гармоникой тока и напряжением на диоде.

Отклонение частоты автоколебаний $\Delta\omega$ от исходного значения ω_0 при изменении активной и реактивной проводимости можно описать через фазовый угол средней проводимости диода

$$\varphi_{d1} = - \arctan \frac{Bd_1(\omega)}{Gd_1(\omega)}. \quad (5.52)$$

Флуктуации фазового угла φ_{d1} в линейном приближении равны

$$\Delta\varphi_{d1} \approx G_1 \frac{\partial\varphi_{d1}}{\partial G_1} \delta G_1 + B_1 \frac{\partial\varphi_{d1}}{\partial B_1} \delta B_1, \quad (5.53)$$

где $\delta G_1 = \Delta G_1 / G_1$; $\delta B_1 = \Delta B_1 / B_1$.

Учитывая, что крутизна фазо-частотной характеристики колебательной системы $(-\omega \partial\varphi_k / \partial\omega)$ вблизи резонансной частоты равна $2Q_H$, получим выражение для спектральной плотности относительных флуктуации частоты генерируемых колебаний

$$S_{\varphi}(\Omega) = \left(\frac{\omega_o}{2Q_H} \right)^2 \begin{bmatrix} A_1^2 S_{\delta G_1}(\Omega) + D_1^2 S_{\delta B_1}(\Omega) + 2A_1 D_1 \cdot P_{G_1 B_1}(\Omega) - \\ - S_{\delta G_1}(\Omega) \cdot S_{\delta B_1}(\Omega) \end{bmatrix}, \quad (5.54)$$

где $A_1 = G_1 \frac{\partial \varphi_{d1}}{\partial G_1}$, $D_1 = B_1 \frac{\partial \varphi_{d1}}{\partial B_1}$, $S_{\delta G_1}(\Omega)$, $S_{\delta B_1}(\Omega)$ – спектральные плотности относительных флуктуации проводимости и емкости ЛПД; $P_{\delta G_1 B_1}(\Omega)$ – коэффициент взаимной корреляции между флуктуациями G_1 и B_1 .

Поскольку флуктуации проводимости и емкости ЛПД вызваны одной и той же причиной $\delta G_1 \approx \delta B_1$, то $S_{\delta G_1}(\Omega) \approx S_{\delta B_1}(\Omega)$ и $P_{\delta G_1 B_1}(\Omega)$. Тогда (5.54) с учетом того, что $G_v(\Omega)$ носит фликкерный характер, принимает вид

$$S_{\dot{\varphi}_G}(\Omega) = \omega_0^2 A_v(\Omega) \cdot \Omega^{-\alpha}, \quad (5.55)$$

где

$$A_v(\Omega) = \left[(A_1 + D_1) / 2Q_H \right]^2. \quad (5.56)$$

Численную оценку коэффициентов A_1 и D_1 , обусловленных флуктуациями параметров ЛПД, найдем воспользовавшись эквивалентной схемой ГЛПД.

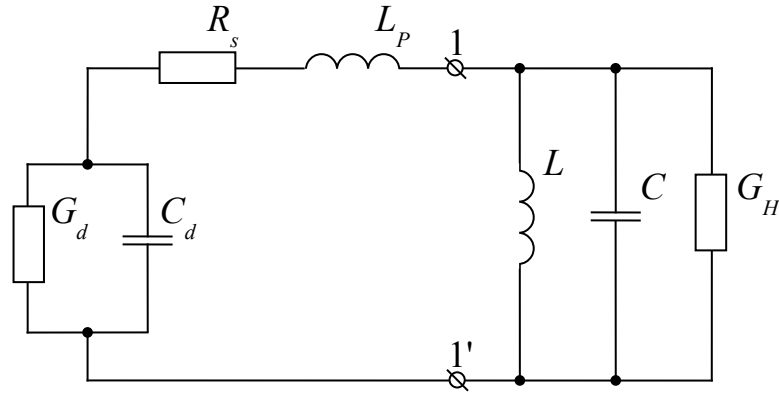


Рис. 5.13. Упрощенная эквивалентная схема ГЛПД

В эквивалентной схеме емкость корпуса диода включена в емкость эквивалентного контура генератора C . Как видно из эквивалентной схемы, проводимость ЛПД с учетом реактивных параметров характеризуется комплексной величиной, являющейся функцией частоты

$$Y_d(j\omega) = G_d(\omega) + jB_d(\omega). \quad (5.57)$$

Выражая $Y_d(j\omega)$ через параметры эквивалентной схемы, уравнение (5.57) запишем в виде

$$Y_d(j\omega) = \frac{-G_d(1 - R_s G_d - R_s C^2 \omega^2 / C_d) + j\omega C \left(1 - C_d^2 \frac{L_p}{C} - L_p C \omega^2\right)}{\left(\frac{C\omega}{G_d}\right)^2 \left(-R_s G_d + \frac{L_p C_d^2}{C}\right) + (1 + R_s G_d - L_p C \omega^2)}, \quad (5.58)$$

где G_d – проводимость диода;

R_s – сопротивление потерь;

C_d – емкость диода;

L_p – индуктивность контактной проволоки.

Для анализа флуктуационных свойств ЛПД при наличии нелинейных элементов C_d , C колебаний большой амплитуды необходимо заменить параметры этих элементов их средними значениями по первой гармонике G_{d1} и C_1 . Это позволит заменить нелинейную проводимость ЛПД в точках 1 – 1' эквивалентной схемы (рис.5.13) линеаризированной проводимостью (средней по первой гармонике):

$$Y_{d1}(j\omega) = G_{d1}(\omega) + jB_{d1}(\omega) = |Y_{d1}(j\omega)| e^{jY_{d1}}, \quad (5.59)$$

$$G_{d1}(\omega) = \frac{G_1(1 - R_s G_1 - R_s C_1^2 \omega^2 / G_1)}{\left(\frac{C_1 \omega}{G_1}\right)^2 \left(-R_s G_1 + \frac{L_p G_1^2}{C_1}\right) + (1 - R_s G_1 - L_p C_1 \omega^2)^2}, \quad (5.60)$$

$$B_{d1}(\omega) = \frac{\omega C_1 \left(1 - G_1^2 \frac{L_p}{C_1} - L_p C_1 \omega^2\right)}{\left(\frac{C_1 \omega}{G_1}\right)^2 \left(-R_s G_1 + \frac{L_p G_1^2}{C_1}\right) + (1 - R_s G_1 - L_p C_1 \omega^2)^2}, \quad (5.61)$$

Из выражений (5.60, 5.61) величины $G_{d1}(\omega)$ и $B_{d1}(\omega)$ зависят от амплитуды первой гармоники на контуре U_1 в точках 1 – 1' эквивалентной схемы, поскольку G_d и C зависят от U_1 . Для ГЛПД в стационарном режиме уравнение баланса фаз записывается в виде

$$\varphi_{d1} + \varphi_k = 0, \quad (5.62)$$

где φ_{d1} , φ_k – сдвиг фаз между первой гармоникой СВЧ тока I_1 и напряжением на диоде и контуре.

Фазовый угол средней проводимости определяется как

$$\varphi_{d1} = -\arctan \frac{\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p G_1^2}{G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2}, \quad (5.63)$$

Флуктуации фазового угла находим как

$$\Delta \varphi_{d1} \approx A_1 \delta G_1 + B_1 \delta C_1, \quad (5.64)$$

где
$$A_1 = G_1 \frac{\omega L_p (C_1^2 - \omega^2 C_1) + \omega C_1 (1 - 2R_s G_1)}{(G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2)^2 + (\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2)^2}, \quad (5.65)$$

$$B_1 = C_1 \frac{\omega (G_1 - R_s G_1^2) - \omega^3 C_1^2 L_p^3 \left(2G_1 - \frac{C_1}{L_p} R_s \right)}{(G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2)^2 + (\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2)^2}, \quad (5.66)$$

Для расчетов дисперсии и нестабильности частоты ГЛПД были использованы следующие параметры: $f_0 = 70 \cdot 10^9$ Гц; $P_0 = 0,1$ Вт; $Q_n = 10^3$; $R_d = 3$ Ом; $R_s = 0,5$ Ом; $L_p = 0,1 \cdot 10^{-9}$ Гн; $C_1 = 0,2 \cdot 10^{-12}$ Ф; $U_0 = 15$ В; $I_0 = 0,1$ А; $K_l = 10^{-7}$ В/Гц; $K_2 = 10^2$; $K_3 = 1$; $K_4 = 10^2$; $K_5 = 10^8$ Гц/В; $T_l = 10^{-7}$ с; $T_2 = 10^{-6}$ с; $T_3 = 0,1$ с.

На рис.5.14 приведена зависимость спектральной плотности частотных флуктуаций ГЛПД от частоты анализа. Расчетные результаты нестабильности частоты ГЛПД от времени измерений в системе контроля ДП дыхания растений представлены на рис.5.15.

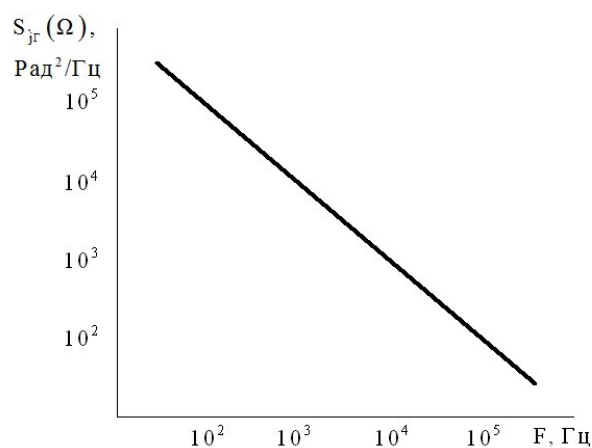


Рис.5.14. Зависимость спектральной плотности частотных флуктуаций ГЛПД от частоты анализа

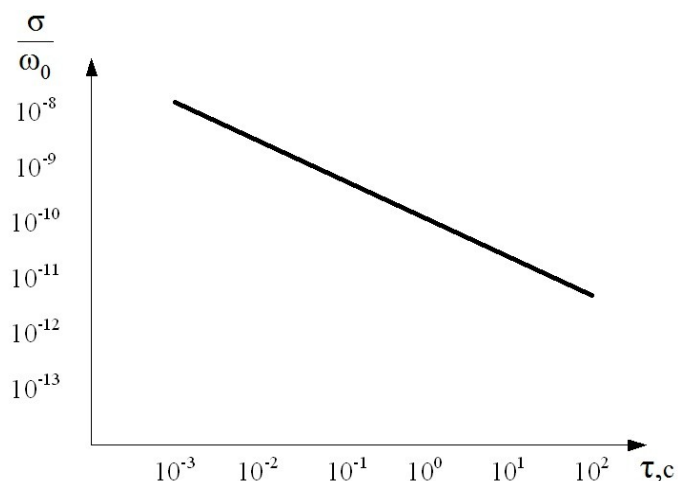


Рис.5.15. Нестабильность частоты генератора на ЛПД от времени измерения

Приведенные результаты теоретических исследований показывают, что ЛПД имеют высокий уровень фликкерных шумов. В то же время увеличение добротности внешнего контура и выбор оптимальных режимов работы позволяют существенно снизить уровень частотных шумов и эффективно подавить быстрые флуктуации частоты, что обеспечивает малые значения кратковременной нестабильности частоты ГЛПД в пределах $10^{-7} \dots 10^{-8}$ степени.

Выводы по разделу:

1. Для измерения ДП газовой среды при дыхании растений с чувствительностью 10^{-6} следует применять диэлектрические резонаторы добротностью 10^5 в качестве частотного дискриминатора в системе частотной подстройки частоты генератора, работающего на частоте 70 ГГц.

2. Применение в системе измерения ДП газовой среды растений устройства преобразования частоты с параметрами: $K_1 = 10^{-7}$ В/Гц; $K_2 = 10^2$; $K_3 = 1$; $K_4 = 10^2$; $K_5 = 10^8$ Гц/В; $T_1 = 10^{-7}$ с; $T_2 = 10^{-6}$ с; $T_3 = 0,1$ с

позволит обеспечить величину перерегулирования менее 10%, время установления переходного процесса $0,8 \cdot 10^{-5}$ с и дисперсию ошибки в пределах 10^{-2} .

3. В качестве генератора мм диапазона в системе измерения ДП газовой среды растений следует использовать лавинно-пролетный диод с крутизной электронной перестройки частоты 10^8 Гц/В и относительной нестабильностью частоты в пределах $10^{-7} \dots 10^{-8}$.

РАЗДЕЛ 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТРУКТУРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВЕ

6.1 Исследование механизма намагничивания структур

Для измерения механизма намагничивания структур в зависимости от количества α -фазы, формы частиц и плотности установок было разработано двадцать шесть модельных систем, которые приведены на рис. 6.1, 6.3, 6.4, 6.6, 6.8 [160-165].

Модели – это смеси α -частиц и частиц пластмассы, которые смешивались с крепителем АСТ-Т для пластмасс и заливались в специальную форму. Полученные образцы имели размеры 50x8x6 мм. Концентрация магнитной фазы находилась в диапазоне от 10 до 90% с шагом 10% [162, 163].

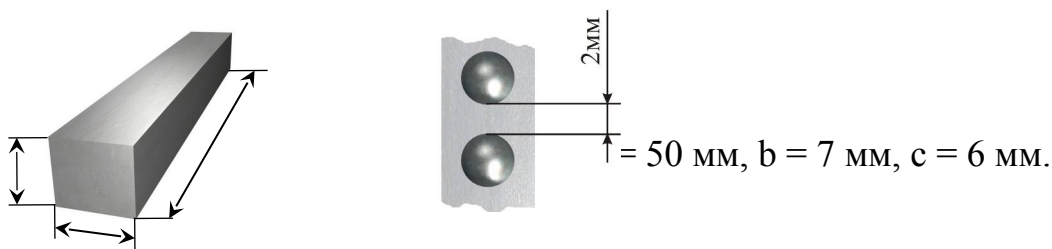
В зависимости от конфигурации и размера ферромагнитных частиц были приготовлены образцы 1-18, изготовленные из шарикоподшипниковой

стали ШХ-15 и армированные в полимерную матрицу с разными вариантами расположения. Химический состав стали ШХ-15: С - 0,95...1,05 %; Cr - 1,3...1,65%; Mn - 0,20-0,40 %, Si - 0,17-0,37 %.

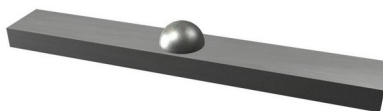
В моделях 19-26 ферромагнитные частицы изготовлены сплошными из стали марки 08ПС и армированы в полимерную матрицу прослойками. Химический состав стали: С - 0,08 %, Mn - 0,39 %, S - 0,030 %, P - 0,009 %, Si - 0,10 %, Ni - 0,05 %, Cr - 0,06 %, Cu - 0,12 %.

Характерной особенностью моделей 1...8 (рис. 6.1) является очень маленькая намагниченность и значительное уменьшение магнитной восприимчивости и проницаемости.

При этом коэрцитивная сила значительно возрастает при увеличении количества α -фазы.



а)



$$1. V_{\alpha} = 96 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 2004 \text{ мм}^3.$$

Шар 1 шт. , $\varnothing = 6 \text{ мм}$.

б)



$$2. V_{\alpha} = 148 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 1952 \text{ мм}^3.$$

Шар 2 шт. , $\varnothing = 5,5 \text{ мм}$.

в)



$$3. V_{\alpha} = 84 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 2016 \text{ мм}^3.$$

Шар 3 шт. , $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

г)



$$4. V_{\alpha} = 112 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 1988 \text{ мм}^3.$$

Шар 4 шт. , $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

д)



$$5. V_{\alpha} = 140 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 1960 \text{ мм}^3.$$

Шар 5 шт. , $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

е)



$$6. V_{\alpha} = 168 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 1932 \text{ мм}^3.$$

Шар 6 шт. , $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

ж)



$$7. V_{\alpha} = 196 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 1904 \text{ мм}^3.$$

Шар 7 шт. , $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

к)



$$8. V_{\alpha} = 224 \text{ мм}^3, V_{\gamma} = 1876 \text{ мм}^3.$$

Шар 8 шт. – $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

л)

Рис. 6.1. Общий вид моделей имеющих малую намагниченность

Таким образом, модели образцов с разной плотностью упаковки ферромагнитных частиц (шариков) и разных расстояний между ними изменяются соответственно и по магнитным свойствам.

Магнитные свойства моделированных систем приведено в табл. 6.1

Таблица 6.1 -

Магнитные свойства моделированных систем

Номер	Количество	$H = 4,8 \cdot 10^4 \text{ А/м}$	χ ,	μ ,	$H_c \cdot 10^2$,
-------	------------	----------------------------------	----------	---------	--------------------

р образ ца	ство α -фазы , %	$B_m \cdot 10^{-4}$, Тл	$B_r \cdot 10^{-4}$, Тл	$I \cdot 10^{-3}$, А/м	мах.	мах.	А/м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	4	35	982	19	9	0,72	1,32
2	4,6	37	991	21	11	0,86	2,03
3	5,3	41	1601	274	12,3	0,98	2,14
4	6,7	64	1716	305	11,2	1,68	2,86
5	7,0	68	1821	386	10,8	1,75	3,12
6	8	73	1940	426	11,3	1,86	4,86
7	9,3	86	2060	483	12,6	1,99	5,02

Продолжение табл. 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8
8	10,7	92	2142	521	14,2	2,01	5,13
9	2,3	38	1021	24	132	1,84	2,46
10	2,6	39	1096	28	141	1,92	2,61
11	8	47	1485	58	7,4	0,59	6,83
12	19	90	2040	453	13,6	1,08	5,44
13	25	72	1810	473	9,1	0,72	6,00
14	33	209	3520	174	33,3	2,66	6,72
15	44	295	4610	309	26,0	2,05	22,40
16	47	502	7180	697	52,6	4,18	33,60
17	10	63	1690	165	65,2	5,18	9,84
18	4	29	1260	32	13,9	1,11	6,32
19	98	1430	18820	4700	5000	398	3,20
20	86	1070	14350	3780	4680	374	3,52
21	17	199	3400	206	158	12,6	3,12
22	34	372	5570	265	188	15,0	3,04
23	51	568	8040	309	195	15,6	3,12
24	29	261	4180	165	167	12,3	3,76
25	44	414	6100	268	220	17,5	3,60
26	49	470	6800	288	269	21,4	3,20

На рис. 6.2 представлена зависимость магнитострикции от напряженности внешнего магнитного поля для моделей образцов 1...8.

Наблюдается прямо пропорциональная зависимость магнитострикции от количества α -фазы. Значение магнитострикции небольшое, в пределах $0,1 \dots 0,3 \cdot 10^{-6}$.

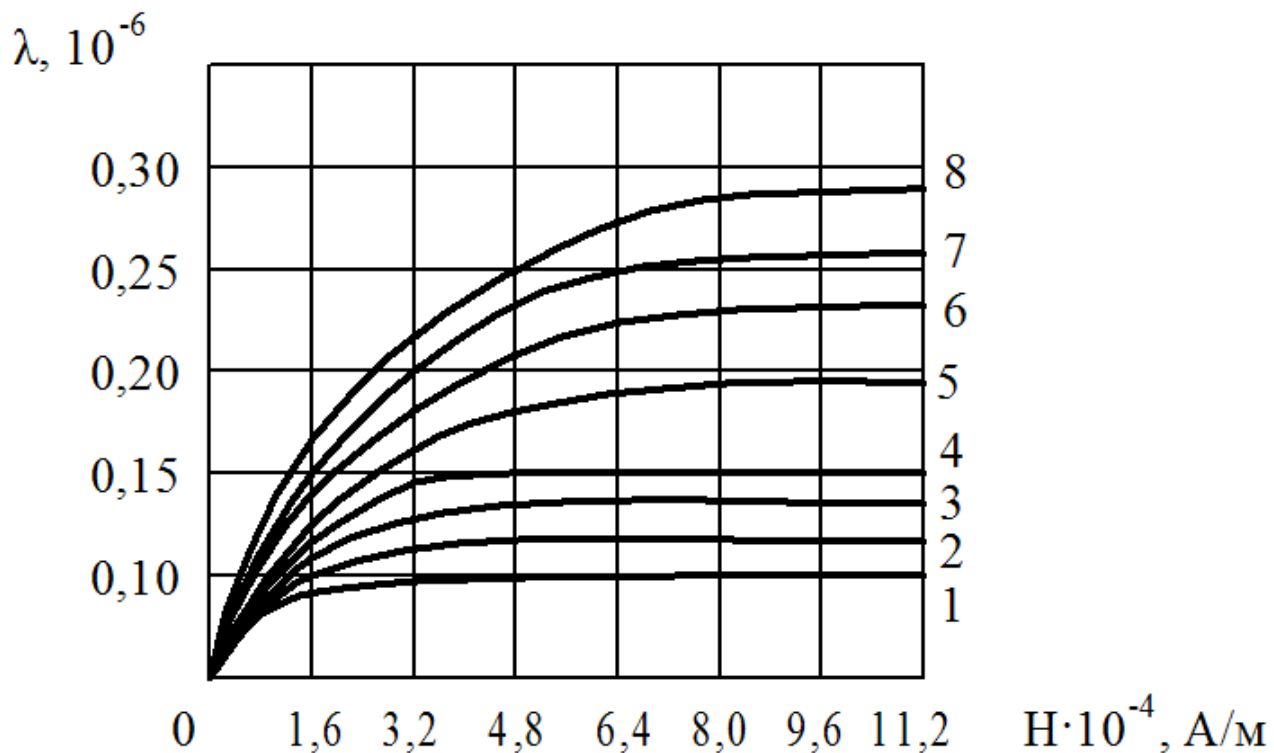


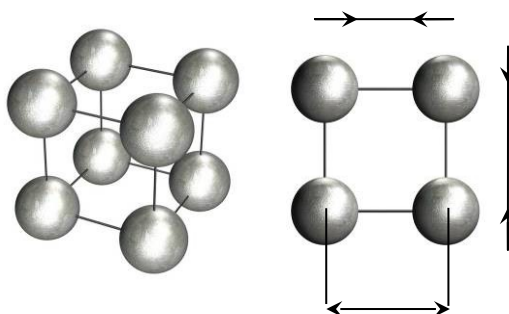
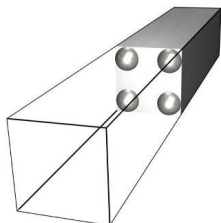
Рис. 6.2. Зависимость магнитострикции от напряженности поля $\lambda=f(H)$ образцов 1...8

Изменения магнитострикции от поля можно объяснить небольшим содержанием количества α -фазы от 4 до 11 %. Рост магнитострикции наблюдается в пределах полей $1,6 \dots 6,4 \cdot 10^4$ А/м. При этом происходит взаимодействие между частицами и изменение топографии магнитного поля.

При увеличении α -фазы наступает магнитострикционное насыщение связанное с магнитоупругим взаимодействием поля с частицами. Экспериментальные кривые зависимости магнитострикции от поля моделированных систем подтверждают результаты теоретического анализа механизма магнитострикции [161].

На рис. 6.3 представлены модели образцов 9...11. Образец 9 армирован шариками, расположенными в виде кубической решетки, а

образец 10 в виде объемно-центрированного куба. Наблюдается увеличение магнитных параметров в образце 10 в сравнении с образцом 9, увеличение намагниченности, индукции, магнитной восприимчивости и проницаемости и значительное возрастание коэрцитивной силы.



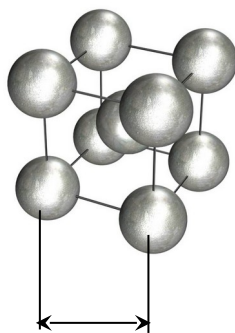
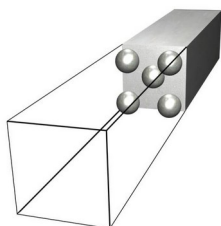
$$9. V_{\alpha} = 56 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 2394 \text{ мм}^3.$$

Шар 8 шт.

$$\varnothing = 2,5 \text{ мм.}$$

а)



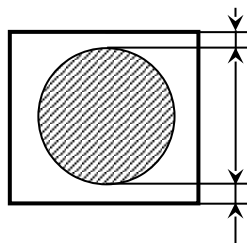
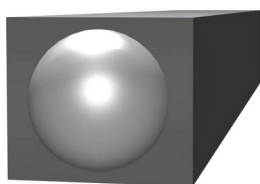
$$10. V_{\alpha} = 63 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 2387 \text{ мм}^3.$$

Шар 9 шт.

$$\varnothing = 2,5 \text{ мм.}$$

б)

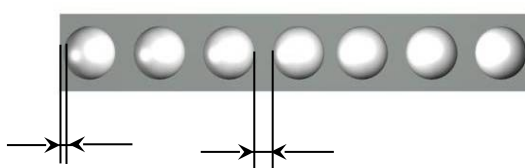


$$11. V_{\alpha} = 520 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 2280 \text{ мм}^3.$$

Шар 7 шт.

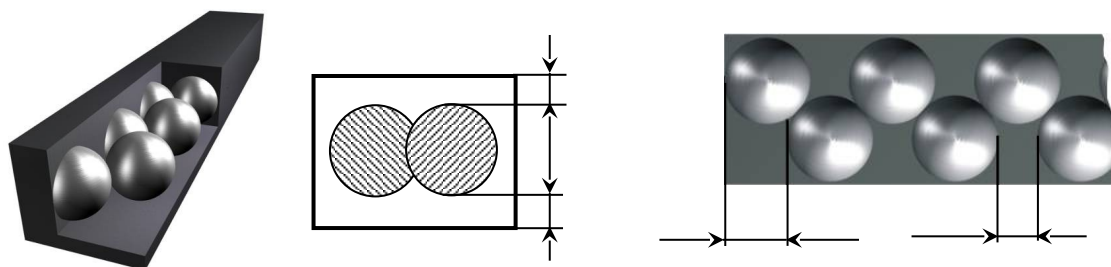
$$\varnothing = 5,5 \text{ мм}$$



в)

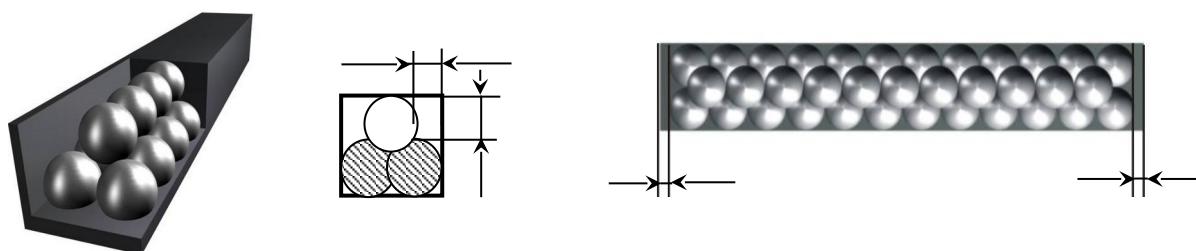
Рис. 6.3. Структура моделей с разной формой кубической решетки

Образец 11 армирован однорядным расположением шариков, такое расположение приводит к увеличению α -фазы и увеличению магнитных параметров, в особенности коэрцитивной силы. На рис. 6.4 представлены модели образцов 12-14 отличающихся друг от друга расположением ферромагнитных частиц и содержанием количества α -фазы. В этих образцах наблюдается рост магнитных параметров и увеличение коэрцитивной силы (5,44...6,72 А/м).



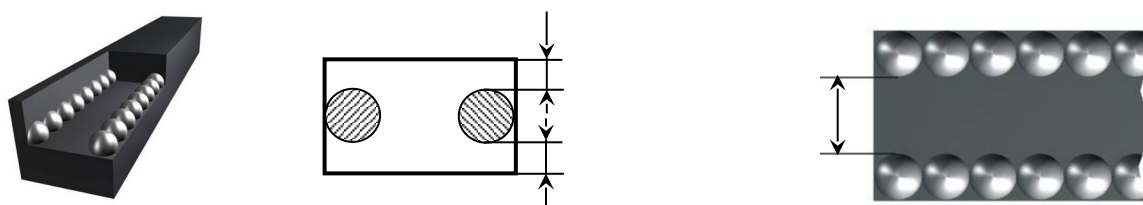
12. $V_\alpha = 691 \text{ мм}^3$, $V_\gamma = 2109 \text{ мм}^3$, шар Fe – 14 шт., $\varnothing = 4,8 \text{ мм}$.

а)



13. $V_\alpha = 914 \text{ мм}^3$, $V_\gamma = 1886 \text{ мм}^3$, шар Fe – 32 шт., $\varnothing = 4 \text{ мм}$.

б)



14. $V_\alpha = 219 \text{ мм}^3$, $V_\gamma = 2581 \text{ мм}^3$, шар Fe – 2 ряда по 23 шт., $\varnothing = 2,2 \text{ мм}$.

в)

Рис. 6.4. Моделированные системы с различным количеством α -фазы

Подтверждением данного анализа являются кривые зависимости магнитострикции от поля, представленные на рис. 6.5 для образцов моделей 9...13.

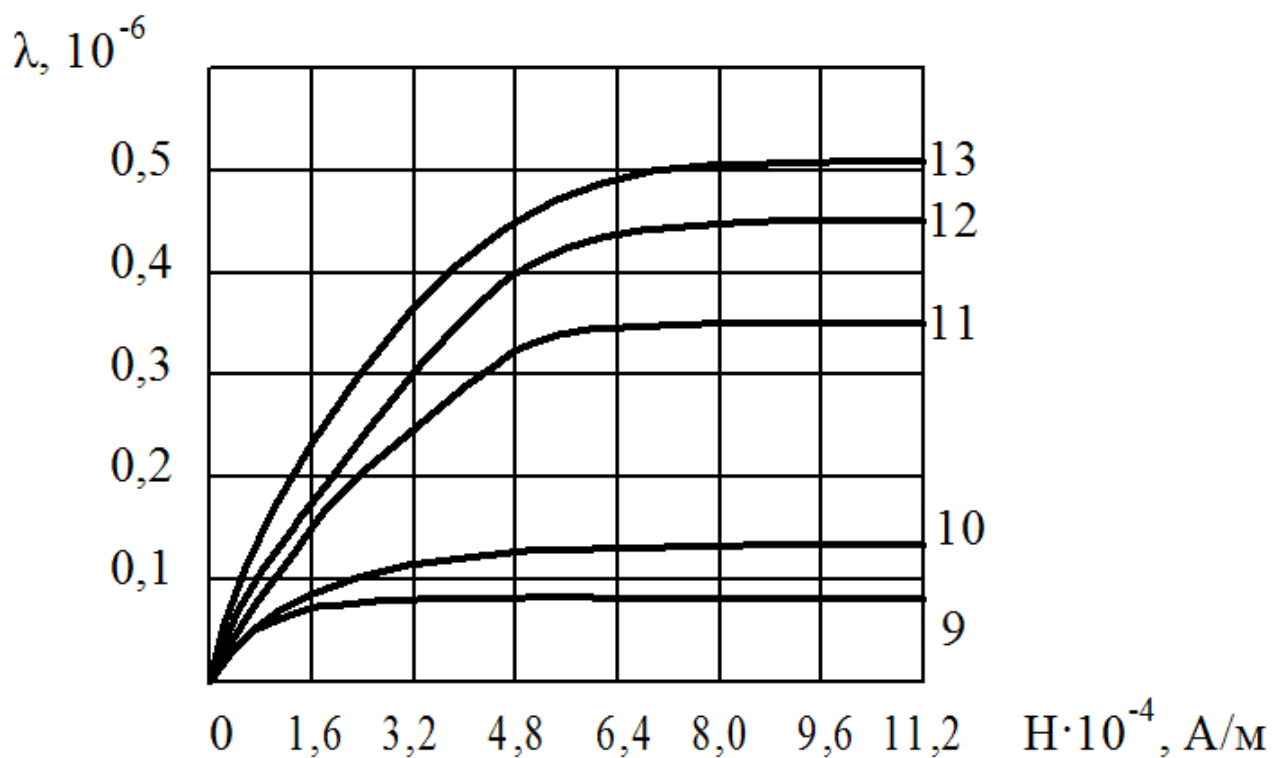


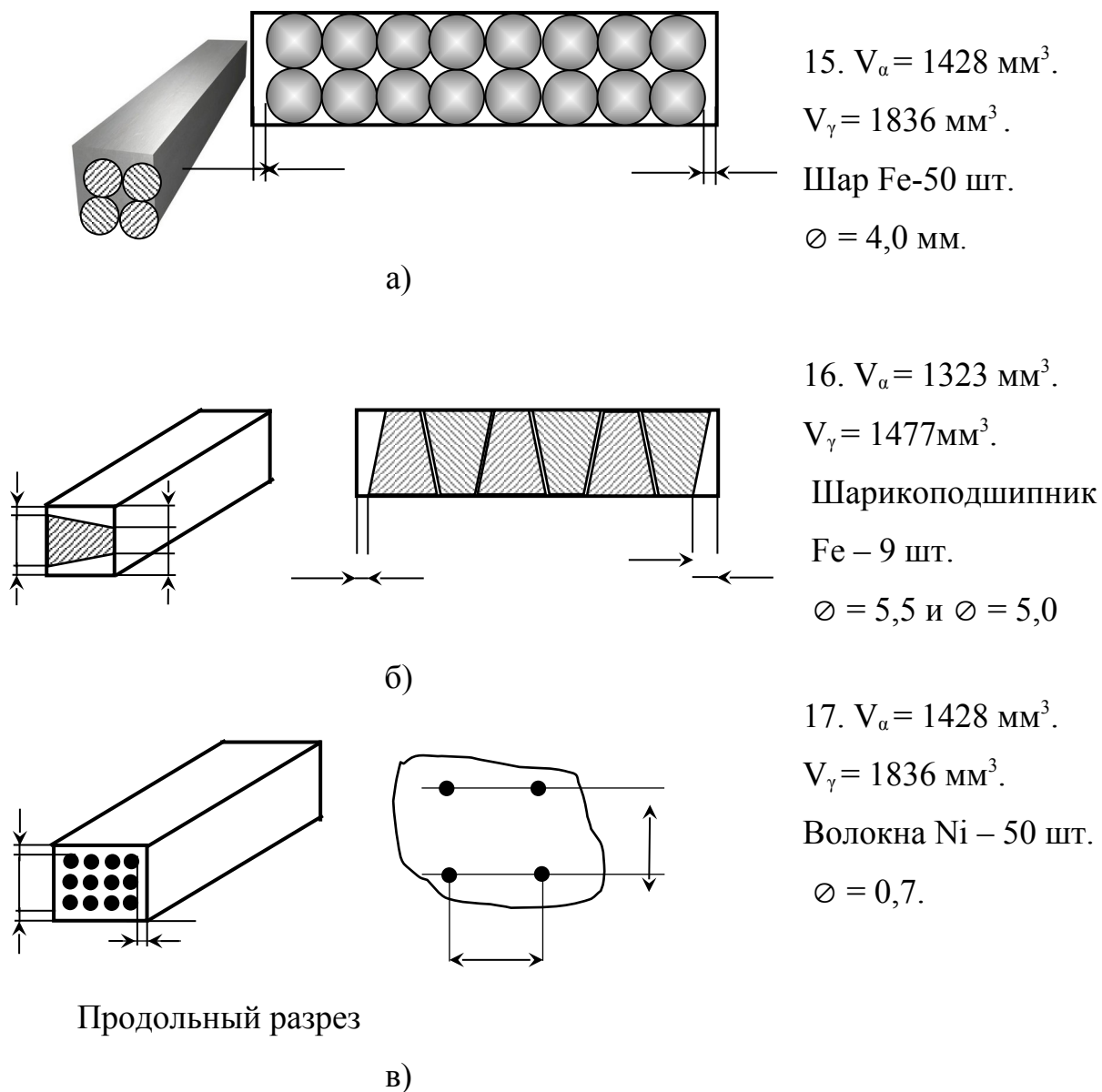
Рис. 6.5. Зависимость магнитострикции от напряженности поля $\lambda=f(H)$ для образцов 9...13

Каждая модель имеет свою характерную особенность. Например, модель 9 отличается от модели 10 не только количеством α -фазы (9 ... 2,3 %, 10 ... 2,6 %), но и геометрическим расположением частиц, армированных в немагнитную матрицу. Магнитострикция модели 9 достигает насыщения в полях $3,2 \cdot 10^4$ А/м, а для модели 10 в полях $4,8 \cdot 10^4$ А/м.

Возрастание значения магнитострикции от поля объясняется не только увеличением количества α -фазы, но также и геометрическим расположением частиц и их размерами. Если значение поля выше $1,6...6,4 \cdot 10^4$ А/м

происходит магнитострикционное насыщение и на экспериментальных кривых наблюдаются прямолинейные участки при изменении содержания α -фазы в образцах от 2,3 до 25 %.

Образцы 15 и 16 (рис.6.6) резко отличаются друг от друга конфигурацией частиц и плотностью их упаковки. Образец 15 армирован частицами (шариками), а образец 16 частицами в виде роликов имеющих форму усеченного конуса, что приводит к разным магнитным параметрам и существенному различию коэрцитивной силы (образец 15 - 22,40 А/м, образец 16 - 33,60 А/м) при незначительном различии в содержании α -фазы (образец 15 - 44 % α -фазы, а образец 16 - 47 % α -фазы).





г)

$$18. V_{\alpha} = 102 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 2698 \text{ мм}^3.$$

Волокна Ni – 33 шт.

$$\varnothing = 0,7.$$

Рис. 6.6. Образцы моделей 14...18 армированные частицами разной формы

На рис. 6.7 приведены зависимости $\lambda=f(H)$ для моделей-образцов 14-18.

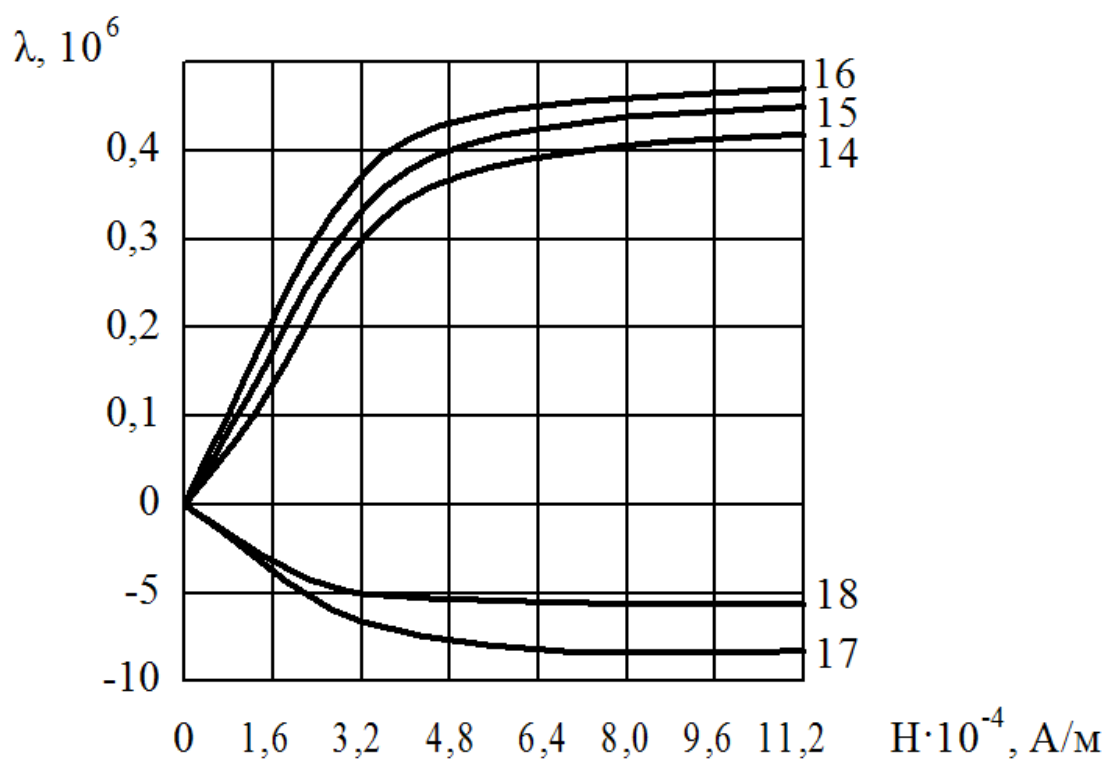


Рис. 6.7. Зависимость $\lambda=f(H)$ для моделей 14-18

В моделях образцов 14-16 (рис. 6.7) наблюдается увеличение магнитострикции в полях $1,6 \dots 4,8 \cdot 10^4$ А/м, и не значительное в пределах полей $4,8 \dots 8,0 \cdot 10^4$ А/м при содержании α -фазы от 33 до 47 %. Увеличение

значения магнитострикции можно пояснить различным содержанием количества α -фазы, различным геометрическим расположением частиц и их конфигурацией. В полях свыше $8,0 \cdot 10^4$ А/м наступает магнитострикционное насыщение и на экспериментальных кривых также наблюдаются прямолинейные участки.

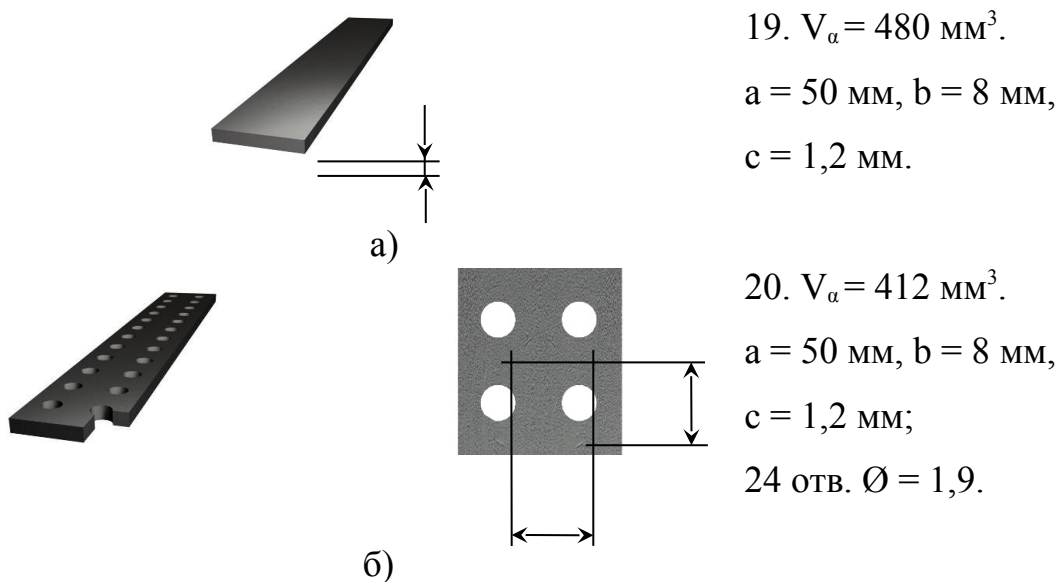
Для моделей-образцов 17, 18 (рис.6.7) кривые магнитострикции находятся в отрицательной области, а магнитострикция Ni отрицательная [160]. Магнитострикция образца 17 в полях от $3,2 \cdot 10^4$ до $11,2 \cdot 10^4$ А/м изменяется прямолинейно в диапазоне $7 \dots 9,8 \cdot 10^{-6}$ в отрицательной области, а в образце от $5 \cdot 10^{-6}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Такое поведение кривой магнитострикции от поля можно объяснить не только меньшим количеством содержания магнитной фазы, но и анизотропией, что подтверждается экспериментально [161].

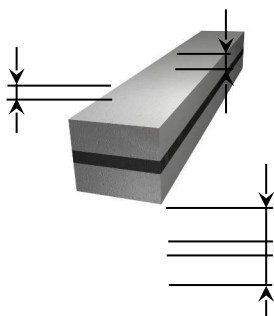
Модели 17, 18 представляют собой волокнистые ферромагнитные материалы с анизотропией, с расположением ферромагнитной фазы (Ni) в неферромагнитной матрице (рис. 6.7). Коэрцитивная сила образца 17 с продольным расположением ферромагнитной фазы больше, чем в поперечного образца 18, что обусловлено анизотропией магнитных свойств при перемагничивании. Намагниченность образца 17 по сравнению со сплошным никелем (Ni) уменьшается на 86 %, максимальная индукция на 75 %, остаточная – на 89 %. Магнитная восприимчивость и проницаемость уменьшается на 89 %, а коэрцитивная сила уменьшается на 48 % при содержании α -фазы (10 %) и γ -фазы (90 %) в моделированном образце.

При содержании α -фазы (4 %) и γ -фазы (96 %) в образце 18 (с поперечным расположением ферромагнитной фазы) намагниченность уменьшается на 94 % по сравнению со сплошным никелем (Ni), максимальная индукция на 81 %, остаточная – на 98 %, а магнитная восприимчивость и проницаемость на 98 %, коэрцитивная сила увеличивается на 20 %. Если сравнить экспери-

ментальные данные образца 18 с образцом 17, то в образце 17 намагниченность уменьшается на 8 %, максимальная индукция на 6 %, остаточная – на 8 %, магнитная восприимчивость и проницаемость на 9 %, а коэрцитивная сила уменьшается на 28 %. Анизотропия в расположении ферромагнитных фаз приводит к изменению основных магнитных параметров.

Имеет практическую заинтересованность изучение процессов намагничивания сплошных (образец 19) и сетчатых (образец 20) ферромагнетиков (рис. 6.8). В образце 20 магнитные свойства гораздо ниже по сравнению с образцом 19. Это можно объяснить тем, что образец 20 состоит из α -фазы самого материала и сеток (отверстий-пустот). Эти пустоты можно представить как неферроматериалы или неферромагнитные включения в ферромагнитной матрице, что связано с уменьшением магнитных параметров в образце 20 и увеличением коэрцитивной силы. В образце 20 по сравнению с образцом 19 намагниченность уменьшается на 25 %, максимальная индукция на 24 %, а остаточная – на 20 %. Магнитная восприимчивость изменяется незначительно (около 6 %). Коэрцитивная сила увеличивается на 9 %. Такое значение магнитных параметров можно объяснить тем, что в образце 20 в отличие от образца 19 изменяется топография магнитных силовых линий при намагничивании.





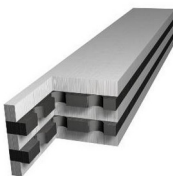
В)



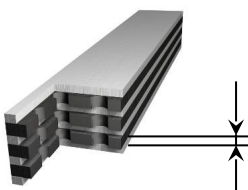
Г)



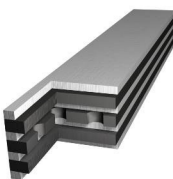
Д)



е)



Ж)



К)

$$21. V_{\alpha} = 480 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 2320 \text{ мм}^3.$$

$$a = 50 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм},$$

$$c = 7 \text{ мм}.$$

$$22. V_{\alpha} = 960 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 1840 \text{ мм}^3.$$

$$a = 50 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм},$$

$$c = 7 \text{ мм}.$$

$$23. V_{\alpha} = 1440 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 1360 \text{ мм}^3.$$

$$a = 50 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм},$$

$$c = 7 \text{ мм}.$$

$$24. V_{\alpha} = 824 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 1976 \text{ мм}^3.$$

$$a = 50 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм},$$

$$c = 7 \text{ мм}.$$

$$25. V_{\alpha} = 1236 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 1564 \text{ мм}^3.$$

$$a = 50 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм},$$

$$c = 7 \text{ мм}.$$

$$26. V_{\alpha} = 1372 \text{ мм}^3.$$

$$V_{\gamma} = 1428 \text{ мм}^3.$$

$$a = 50 \text{ мм}, b = 8 \text{ мм},$$

$$c = 7 \text{ мм}.$$

Рис. 6.8. Модели 19...26 состоящие из сплошной и сетчатой структуры

В моделированном однослойном образце 21 (слой сплошной ферромагнитной фазы) по сравнению с образцом 19 намагниченность уменьшается на 86 %, максимальная индукция - на 82 %, а остаточная – на 96 %, магнитная восприимчивость и проницаемость на 97 %. Коэрцитивная сила уменьшается на 2,5 %. Уменьшение магнитных параметров за счет уменьшения объемного количества α -фазы (17 %) и увеличения объемного содержания γ -фазы (83 %).

По сравнению с образцом 19 в двухслойном образце 22 (рис. 6.8) намагниченность уменьшается на 74 %, максимальная индукция - на 70 % и остаточная – на 94 %, магнитная восприимчивость и проницаемость на 96 %. Коэрцитивная сила уменьшается незначительно (около 5 %). С изменением α -фазы (34 %) и γ -фазы (66 %) изменяются и магнитные параметры.

В трехслойном образце 23 по сравнению с образцом 19 намагниченность уменьшается на 60 %, максимальная индукция на 57 % и остаточная – на 93 %, магнитная восприимчивость и проницаемость на 96 %. Коэрцитивная сила уменьшается на 2,5 % при содержании α -фазы (51 %) и γ -фазы (49 %).

Таким образом в моделированных образцах 21-23 с полимерной матрицей происходит уменьшение магнитных параметров с изменением количества α и γ -фазы.

Характерной особенностью для этих образцов является уменьшение намагниченности и гораздо меньшее уменьшение максимальной индукции (по сравнению с намагниченностью). Это связано с тем, что в данном случае, намагниченность характеризуется средней плотностью магнитного момента среды, а индукция средней напряженностью магнитного поля. Намагничивание происходит в основном за счет смещения границ доменов

[160].

Остаточная индукция, магнитная восприимчивость и проницаемость уменьшаются значительно, т.е. под действием магнитного поля изменяется магнитная индукция и магнитный момент образца. Коэрцитивная сила уменьшается незначительно по сравнению с образцом 19.

Иной характер при намагничивании представляют образцы 24-26 (рис.6.8) с сетчатым ферромагнетиком.

В образце 24 с двумя слоями сетчатого ферромагнетика намагниченность уменьшается на 82 %, максимальная индукция на 78 % и остаточная – на 96 %, а магнитная восприимчивость и проницаемость на 97 %. Коэрцитивная сила по сравнению с образцом 19 увеличивается на 15 % при содержании α -фазы (29 %) и γ -фазы (71 %).

В образце 25 С, состоящем из трех слоев сетчатого ферромагнетика, по сравнению с образцом 19 намагниченность уменьшается на 71 %, максимальная индукция - на 68 % и остаточная – на 94 %, а магнитная восприимчивость и проницаемость на 96 %. При содержании α -фазы (44 %) и γ -фазы (56 %) в образце коэрцитивная сила увеличивается на 11 %. Образец 26 - трехслойный, в котором средний слой является сетчатым, а верхний и нижний – сплошным ферромагнетиком. В этом образце по сравнению с образцом 19 намагниченность уменьшается на 67 %, максимальная индукция на 64 % и остаточная – на 94 %, а магнитная восприимчивость и проницаемость на 95 %. Коэрцитивная сила при содержании α -фазы (49 %) и γ -фазы (51 %) в образце не изменяется, а равна значению сравниваемого образца 19.

В зависимости от количества α -фазы в образцах 24-26 характер изменения магнитных параметров такой же как и в образцах 21-23, за исключени

ем изменения коэрцитивной силы. Известно, что природа коэрцитивной силы определяется необратимым характером процессов перемангничивания

ферромагнетиков и связана со структурой, магнитоупругой анизотропией и внутренними напряжениями.

Таким образом, можно сделать вывод, что коэрцитивная сила является весьма чувствительна к изменениям внутренней структуры ферромагнитных материалов.

Зависимость магнитострикции от напряженности магнитного поля приведена на рис. 6.9. для моделей-образцов 19-26.

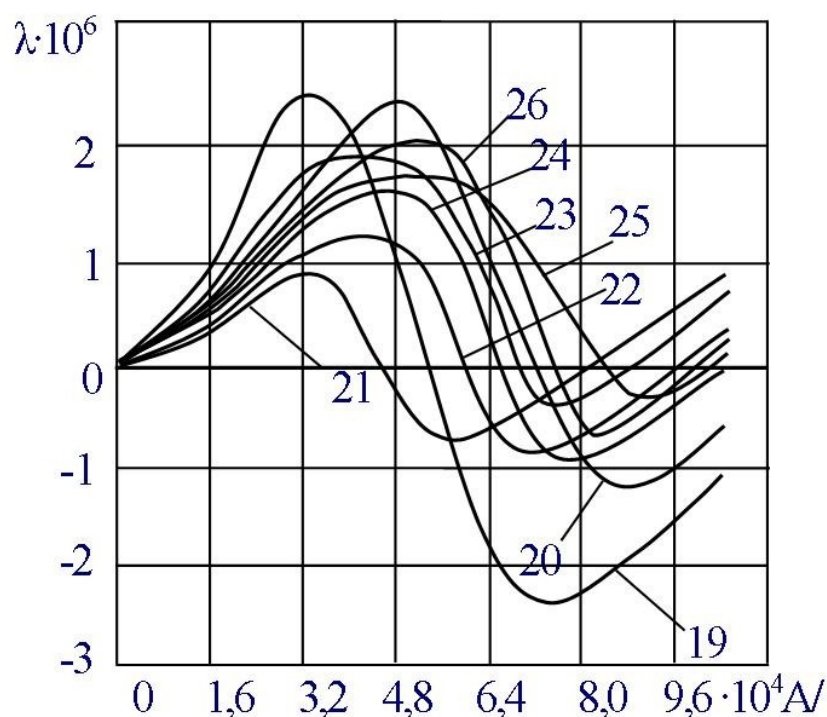


Рис. 6.9 Зависимость $\lambda=f(H)$ для моделей-образцов 19-26

Магнитострикция модели 19 достигает максимального значения в положительной области $2,6 \cdot 10^{-6}$ в полях $3,2 \cdot 10^4 \text{ А/м}$. Кривая зависимости магнитострикции от поля образца 20 достигает максимального значения в положительной области $2,6 \cdot 10^{-6}$ в полях $4,8 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ и минимального значения в отрицательной области $1,5 \cdot 10^{-6}$ в полях $8,5 \cdot 10^4 \text{ А/м}$.

Для образца 21 максимальное значение магнитострикции в положительной области $1,0 \cdot 10^{-6}$ в полях $3,4 \cdot 10^4 \text{ А/м}$ и минимальное

значение $0,8 \cdot 10^{-6}$ в полях $5 \cdot 10^4$ А/м. Образец 22 имеет максимальное значение магнитострикции $1,4 \cdot 10^{-6}$ в полях $4,8 \cdot 10^4$ А/м и минимальное значение $0,7 \cdot 10^{-6}$ в полях $7 \cdot 10^4$ А/м. Образец 23 имеет максимальное значение $1,8 \cdot 10^{-6}$ в полях $4,8 \cdot 10^4$ А/м и минимальное значение магнитострикции $1,2 \cdot 10^{-6}$ в полях $7,8 \cdot 10^4$ А/м. Зависимость магнитострикции от поля для образца 24 имеет максимальное значение магнитострикции $2,2 \cdot 10^{-6}$ в полях $4,1 \cdot 10^4$ А/м и минимальное значение $0,4 \cdot 10^{-6}$ в полях $7,2 \cdot 10^4$ А/м, а для образца 25 максимальное значение магнитострикции $1,9 \cdot 10^{-6}$ в полях $5,6 \cdot 10^4$ А/м и минимальное $1,5 \cdot 10^{-6}$ в полях $8,5 \cdot 10^4$ А/м. Соответственно для образца 26 максимальное значение магнитострикции $2,4 \cdot 10^{-6}$ в полях $4,8 \cdot 10^4$ А/м и минимальное значение $6,2 \cdot 10^{-6}$ в полях $8 \cdot 10^4$ А/м.

Такой разброс максимальных и минимальных наблюдаемых значений магнитострикции и их смещение относительно величины магнитного поля можно объяснить различным содержанием α -фазы и механизмом магнитоупругого взаимодействия между частицами при наложении внешнего магнитного поля [161].

6.2 Исследование структурных свойств электродов для создания постоянного магнитного поля в почве

Действие энергии магнитного поля на растительные объекты на современном этапе развития новейших электротехнологий представляет собой экологически чистый и достаточно эффективный способ воздействия с целью стимуляции развития растений. Применение магнитных материалов в современных электротехнологических установках постоянно возрастает. Учитывая, что магнитные материалы чрезвычайно структурно чувствительны, исследования по данному направлению остаются актуальными и требуют дальнейшего изучения структурных свойств образцов стали из которых изготавливаются рабочие электроды [166-168].

После приготовления продольных микрошлифов образцов сталей 3ПС и Ст.45 были протравлены в 4% спиртовом растворе HNO_3 , образец стали 14X17H2 – в реактиве Мураками (10 г. Красной кровяной соли, 10 едкого калия, 100 мл. воды) подогретого до температуры 60...80 °С. В результате травления определены следующие структуры, представленные на рис. 6.10.

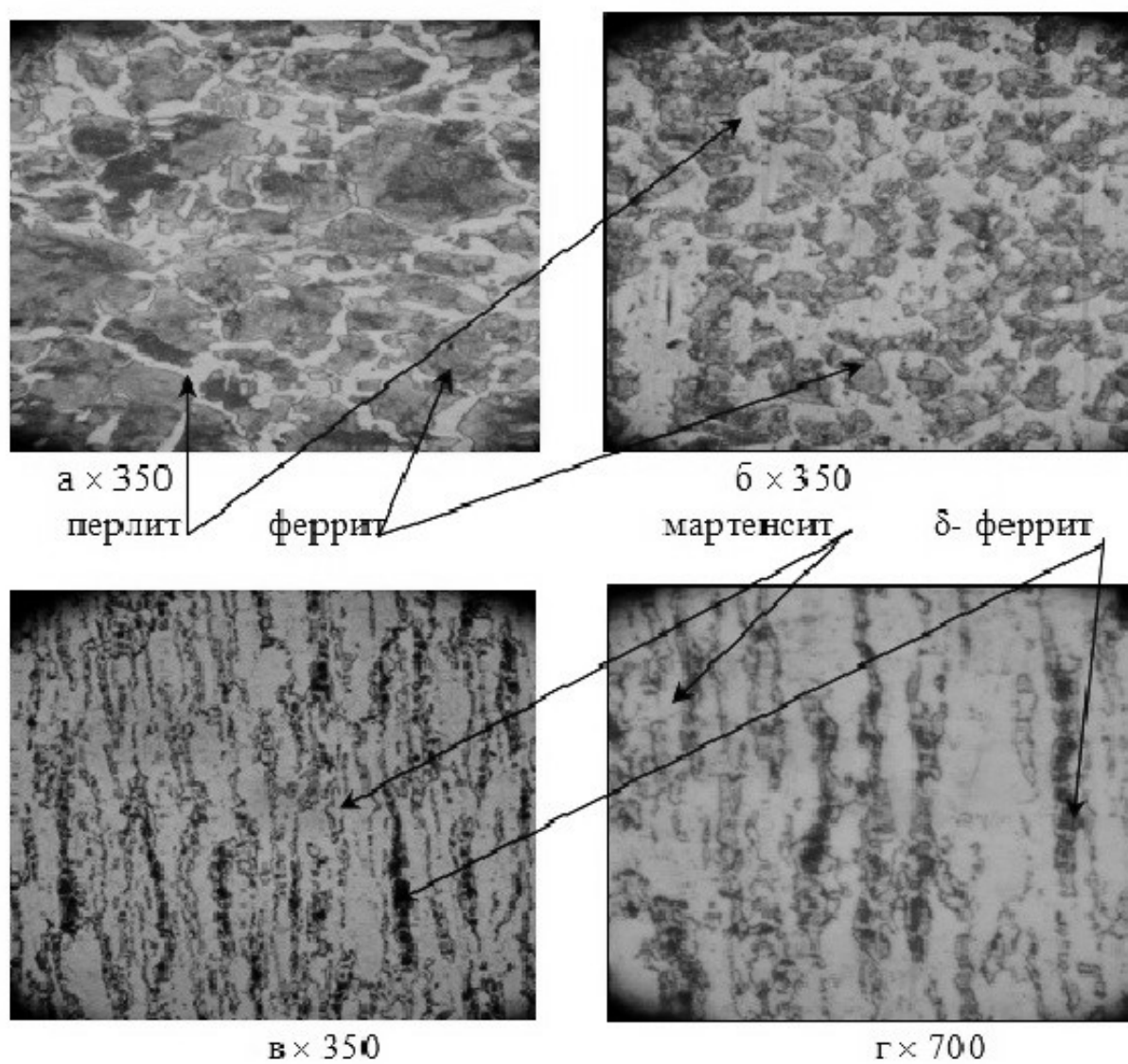


Рис. 6.10. Микроструктура образцов стали 3 ПС (а), ст. 45 (б), 14Х17Н2 (в, г)

Структура образцов стали 3ПС (рис.6.10, а) и Ст. 45 (рис. 6.10, б) состоят из феррита (светлые участки) и перлита (темные участки). В стали Ст.45 больше углерода (0,45%), чем в Ст. 3ПС (0,14...0,22%), образец Ст. 45 имеет в своей структуре большее количество перлита.

По количеству феррита и перлита образцы сталей Ст.3 и Ст.45 можно оценить по ГОСТ 8233 – шкала 7. В стали 3ПС соотношение феррит/перлит =50/50, а в Ст.45 = 25/75. Структура образца Ст. 14X17H2 (рис. 6.10, в,г) состоит из δ -феррита (вытянутые участки) и продуктов отпуска (отжига) мартенсита в виде светлых участков с феррита и дисперсных карбидов. Вытянутость структуры обусловлена тем, что δ -феррит вытягивается вдоль оси слитка при обработке давлением. Измерена твердость по Бринеллю на 3-х образцах: Ст. 3ПС – 134НВ; Ст.45 – 212НВ; Ст. 14X17H2 – 235 НВ.

В таблице 6.2 представлены результаты исследования количества элементов рабочих органов на основе сертификатов качества.

Таблица 6.2-

Химический состав сталей

Массовая доля элементов, %	Марка стали		
	3ПС	Ст. 45	14X17H2
Углерод	0,16	0,45	0,14
Кремний	0,11	0,27	0,74
Марганец	0,58	0,59	0,64
Сера	0,045	0,017	-
Фосфор	0,024	0,022	-
Хром	0,09	0,14	16,4
Никель	0,06	0,09	1,52
Медь	0,007	0,15	-
Мышьяк	-	0,010	-
Молибден	-	-	0,82

После проведения физико-механических и химических исследований из образцов вышеназванных сталей были изготовлены рабочие электроды. Рабочие электроды имели следующие геометрические размеры: сталь - 3ПС и Ст. 45 – 12x1500 мм; Ст.14X17H2 – 18x1000 мм. В процессе полевых

исследований сталь марки ЗПС достаточно быстро ржавела. После проведения серии опытов электроды, выполненные из стали ЗПС, были изъяты из дальнейшей работы.

Для воздействия на растительные объекты мы также применяли кольца Гельмгольца, как рабочий орган экспериментальной установки, что создает магнитное поле [166]. По магнитными свойствами кольца Гельмгольца: медь - диамагнетик, алюминий - парамагнетик; стали Ст. 45 и 14X17H2 относятся к ферромагнетикам. Сталь 14X17H2 за счет наличия хрома 16,4% и никеля 1,52% обладает достаточно высокими магнитными свойствами по отношению к стали Ст. 45.

Определение индукции магнитного поля электродов выполнялось с использованием магнитометра, структурная схема устройства приведена на рис. 6.11, а общий вид на рис. 6.12 [170].

Устройство предназначено для измерения индукции магнитного поля оборудования, содержащего магнитные элементы, а также для научных исследований в стационарных, лабораторных и полевых условиях. Устройство соответствует условиям группы 2 ГОСТ 22261-82 воздействия климатических факторов внешней среды, а также обеспечивает степень защиты IP20 ГОСТ 14254-96.

Диапазон измерения:

- $(0 \dots 2000) \cdot 10^{-4}$ Тл с основной погрешностью $\Delta B = \pm(3+0,03 B_x)$;
- $(0 \dots 20000) \cdot 10^{-4}$ Тл с основной погрешностью $\Delta B = \pm(30+0,03 B_x)$.

Режим работы – наблюдающий автоматический.

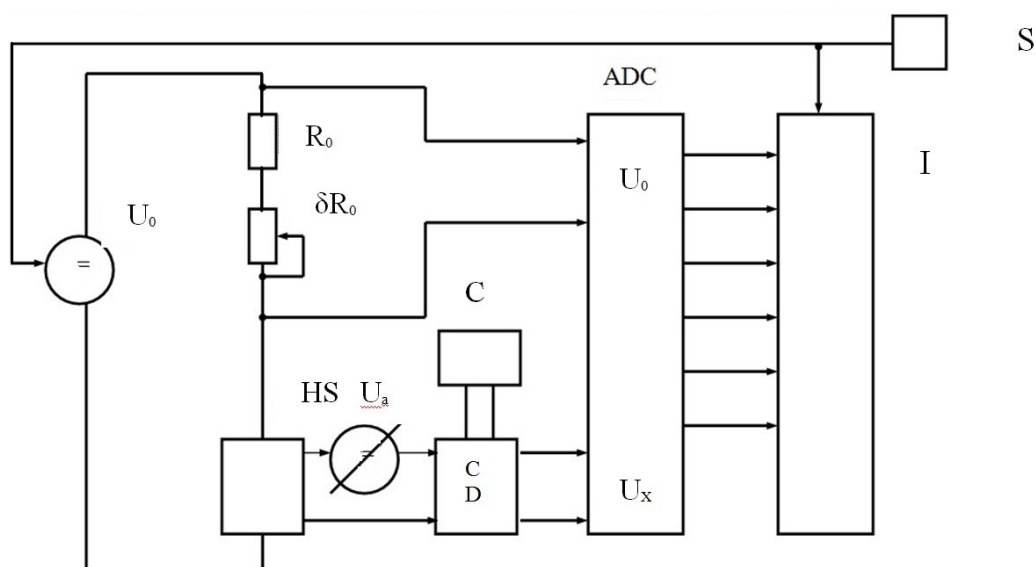


Рис. 6.11. Структурная схема устройства: U_0 – источник опорного напряжения; R_0 – эталонный резистор; HS – датчик Холла, HW300; ADS – аналогово-цифровой преобразователь, MAX 7135; CD – управляющий счетчик напряжения.

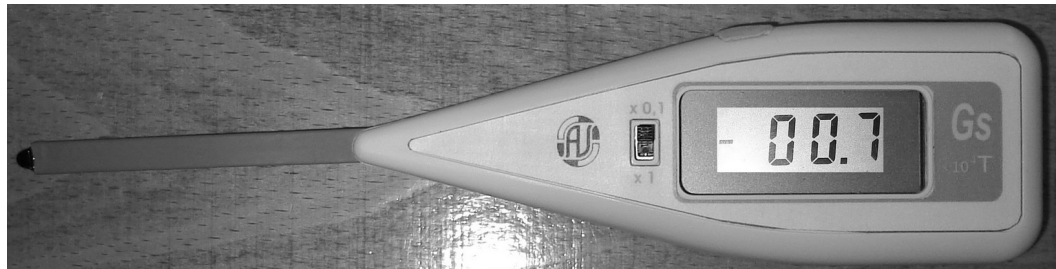


Рис. 6.12. Общий вид магнитометра

Экспериментальные измерения полного вектора магнитного поля системы «электрод- гетерогенная структура-растение» выполнялись с использованием модифицированного высокоточного магнитометра-градиентометра КМ-8 (рис. 6.13). Точность модифицированного прибора определяется диапазоном измерения и при диапазоне 1 на одно измерение составляет 0,01 нТл для частотомера, не учитывая схему компаратора и оставленные без изменений блок датчиков и преобразователя.



Рис. 6.13. Внешний вид аппаратной части магнитометра-градиентометра КМ-8

Проведенные методические работы специалистами кафедры геофизики Киевского национального университета имени Тараса Шевченко показали устойчивость во времени, начиная с 15-20 минут после включения прибора, погрешность абсолютных измерений при этом достигала значения порядка 0,1 нТл, градиент 0,01 нТл при диапазоне 1 измерение за 1 с [167,175].

Изменения индукции магнитного поля приведены на рис. 6.14. Результаты исследований показали, что системы электродов без электрического тока создают намагниченность гетерогенной структуры. Причем величина поля (максимальная) образована электродами без тока из стали Ст. 14Х17Н2 равна 50645,611 нТл (точка 63); Ст. 45 - 50567,197 (точка 92) нТл; кольца Гельмгольца -50555,794 нТл. (точка 38); естественный фон - 50561,108 (точка 37).

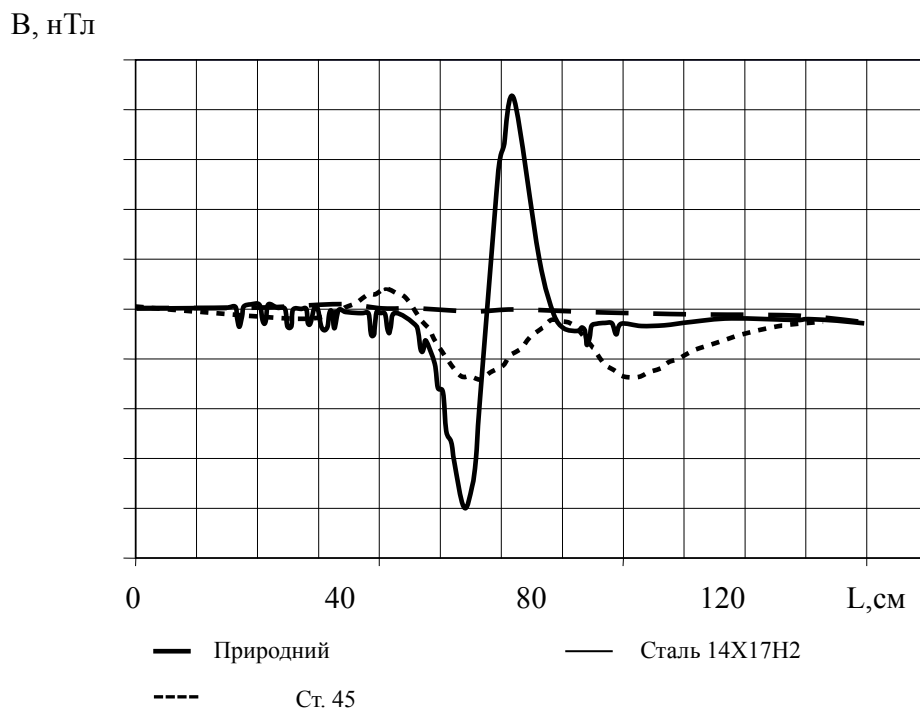


Рис. 6.14. Результаты экспериментальных исследований определения индукции магнитного поля

6.3 Анализ модели магнитной системы электродов

Для построения магнитной модели была использована прямая задача магниторазведки, расчет значений магнитного поля $\Delta T(\Delta Z)$ от заданного тела с определенной формой, размерами и положением в пространстве [168]. На основании обобщенной гетерогенной системы была разработана магнитная модель, представленная на рис. 6.15.

В качестве магнитовозмущающих объектов были использованы электроды, которые представлены в виде цилиндров, наполненных шарами [168].

Аналитическое определение результирующего значения векторов намагниченности выполнялось по формулам [168,175]:

$$X_a = \left(\frac{M}{r^5} \right) \cdot \left[(2x^2 - y^2 - h^2) \cdot \cos i \cdot \cos A + 3x \cdot (y \cos i \cdot \sin A - h \cdot \sin i) \right] \quad (6.1)$$

$$Y_a = \left(\frac{M}{r^5} \right) \cdot \left[(2y^2 - x^2 - h^2) \cdot \cos i \cdot \sin A + 3y \cdot (x \cos i \cdot \cos A - h \cdot \sin i) \right] \quad (6.2)$$

$$Z_a = \left(\frac{M}{r^5} \right) \cdot \left[(2h^2 - x^2 - y^2) \cdot \sin i - 3h \cdot \cos i (x \cdot \cos A + y \cdot \sin A) \right] \quad (6.3)$$

$$M = J \cdot V \quad (6.4)$$

где V – объем шара, м^3 ;

J – плотность тока, А/м

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + h^2} \quad (6.5)$$

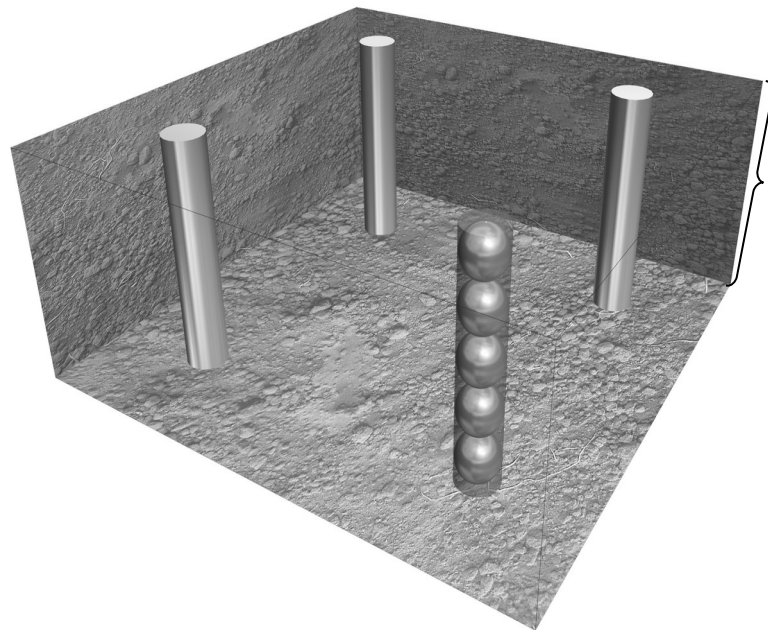


Рис. 6.15. Модель гетерогенной системы: $x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ – расположение электродов; $A_x, A_y, B_x, B_y, C_x, C_y, D_x, D_y$ – координаты точек опытной плоскости; D – delta, шаг сканирования по горизонтали и по вертикали; H_1, H_2 – верхняя и нижняя кромки соответственно; $d_{\text{цпл}}$

– диаметр электрода; $h_{\text{сет.}}$ – максимальная высота расположения датчика от поверхности земли.

На основании проведенного анализа теоретических положений была разработана программа моделирования полного вектора магнитного поля системы «растение – почва». Исходными данными для моделирования являются: расположение электродов (рис. 6.15), высота, длина, диаметр электродов электротехнологической установки, плотность тока стекания из электродов; координаты точек опытной плоскости.

Современный уровень интерпретации геомагнитных данных предусматривает использование ЭВМ, разрешающих реализацию введения данных в цифровом виде, контроль входной информации, разработку моделей, расчеты значений магнитного поля, а также накопление полученных результатов в памяти ЭВМ и выдача результатов в виде графиков, таблиц, карт и т.д.

6.4 Анализ процессов влияния магнитного поля на микроэлементы в почве

Анализ экспериментальных исследований показывает, что между параметрами магнитного поля и микроэлементами в почве (фосфор, калий и др.) существуют непосредственная связь [171-174].

Научные источники указывают на то, что в почве существуют разные фосфоросодержащие и калийные минералы, и другие фосфорные и калийные соединения: твердые, жидкие и газообразные, образующиеся в результате сорбции фосфатов и оксидов калия почвенными коллоидами. В разных типах почв преобладают различные фосфоро- и калийно содержащие минералы. Почвы обладают свойствами переводить растворенные фосфаты в тяжело растворимые. Доступный для растений калий в почве содержится в ионной форме.

Коллоиды и ионы макроэлементов в почве, как частицы, имеющие электрические заряды, могут принимать участие в процессах взаимодействия с внешними электрическими и магнитными полями. Это свойство может быть полезным при определении качественного и количественного содержания фосфора и калия в почве электротехнологическими методами, а также воздействия на эти элементы в почве с целью повышения его плодородия.

Экспериментальные исследования воздействия энергии электромагнитного поля на грунт выполнялись с целью рассмотрения воздействия электрического и магнитного поля на изменение количественного содержания фосфора и калия в почве (рис. 6.16).

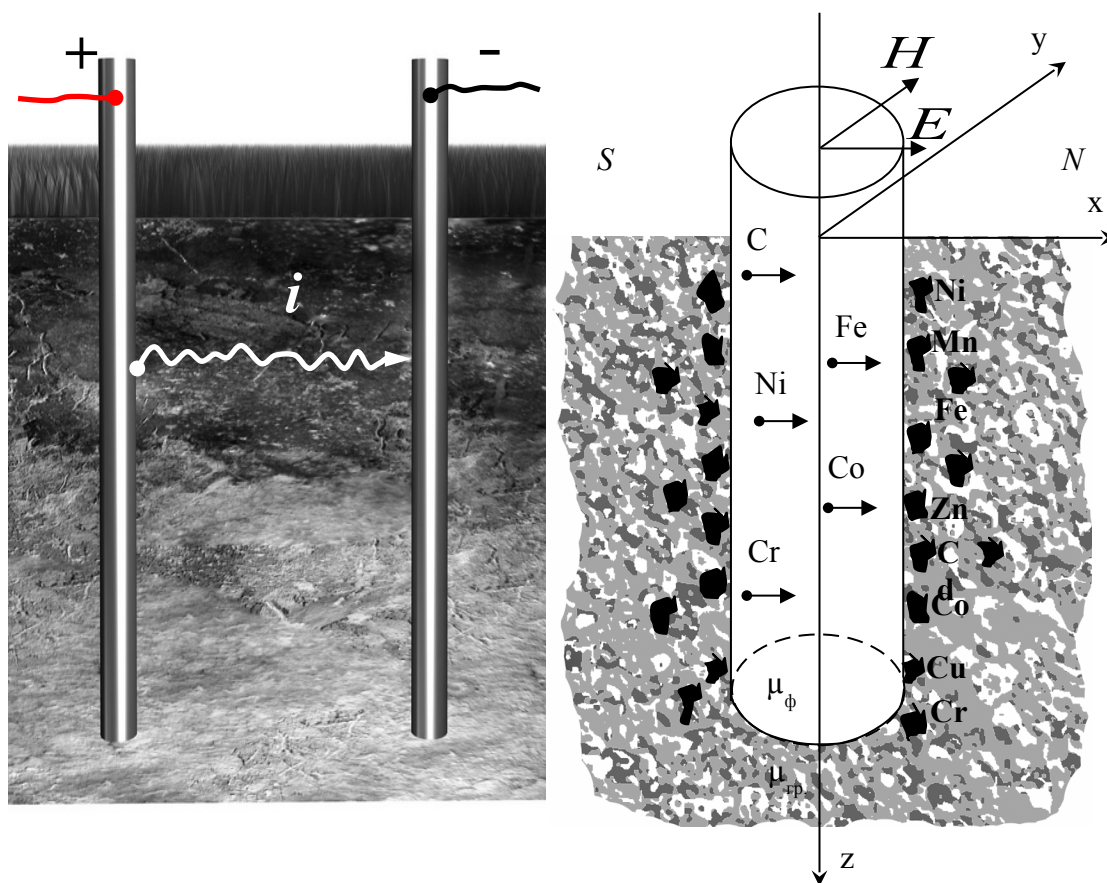


Рис. 6.16. Общий вид расположения электродов и микроэлементов в почве

В первом приближении был проведен эксперимент с использованием поля, созданного системой электродов (схема с четырьмя электродами).

Электрофизические параметры почвы зависят от свойств основных породообразующих минералов, которые характеризуются видом кристаллической решетки и связями между атомами.

Стальные электроды (марка стали Ст. 45, Ø 12, $l=500$ мм), располагались по направлению силовых линий магнитных полей Земли по вершинам квадрата со стороной 600 мм, использовались в качестве элементов воздействия. Использовалось соединение электродов попарно, с включением на разную полярность. Температура почвы поддерживалась в пределах 18...20 °С. Обеспечение участков почвы влагой выполнялось одинаковым количеством воды с постоянной регулярностью 4 л воды на 1 м³ каждые три дня.

Для освещения экспериментальных участков использовались светильниками с газоразрядными лампами высокого давления типа ДРЛ-250, кривая светораспределения источников обеспечивала уровень освещенности на рабочей поверхности 2000 лк. Время работы ламп соответствовало длительности светового дня весеннего периода и регулировалось автоматически. Внесение органических и минеральных удобрений не производилось. После проведения эксперимента выполнен агрохимический анализ образцов почвы с экспериментальных и контрольных участков. Результаты анализов представлены в табл. 6.3

Таблица 6.3 -

**Воздействие электрического и магнитного полей
на агрохимические показатели почвы в полевых условиях**

Место отбора пробы	Индекс рН	Гумус, %	N-NO ₃ , мг/кг почвы	P ₂ O ₅ , мг/100 г почвы	K ₂ O, мг/100 г почвы
Почва в естественных	7,15	3,44	129,5	25,5	179,1

условиях					
Контрольный участок	7,75	3,55	77,1	28,3	201,3
Экспериментальный участок	7,65	3,33	77,7	29,3	203,4

Также одновременно проводился эксперимент, в лаборатории и в теплице, воздействия электрического и магнитного поля на грунт. Результаты указывают на изменение доступной формы фосфора и калия в большую сторону в сравнении с контрольными участками. Результаты представлены в табл. 6.4

Таблица 6.4 -

**Воздействие электрического и магнитного полей
на агрохимические показатели почвы в производственных условиях**

Вид образца	Место эксперимента	Индекс рН	Гумус, %	N-NO ₃ , мг/кг почвы	P ₂ O ₅ , мг/100 г почвы	K ₂ O, мг/100 г почвы
Базовый	Теплица	7,15	3,02	6,40	11,9	30,90
Контрольный	Теплица	7,17	3,05	10,5	12,5	50,50
Экспериментальный	Теплица	7,20	3,00	25,5	15,7	100,0
Контрольный	Лаборатория	7,55	3,45	23,1	17,3	154,5
Экспериментальный	Лаборатория	7,40	3,56	54,2	17,9	187,8

* Гумус – специфический почвенный раствор, гетерогенная полидисперсная система высокомолекулярных азотосодержащих ароматических соединений кислотной природы.

pH – индекс, который указывает на кислотность любого раствора, отрицательный логарифм концентрации ионов водорода.

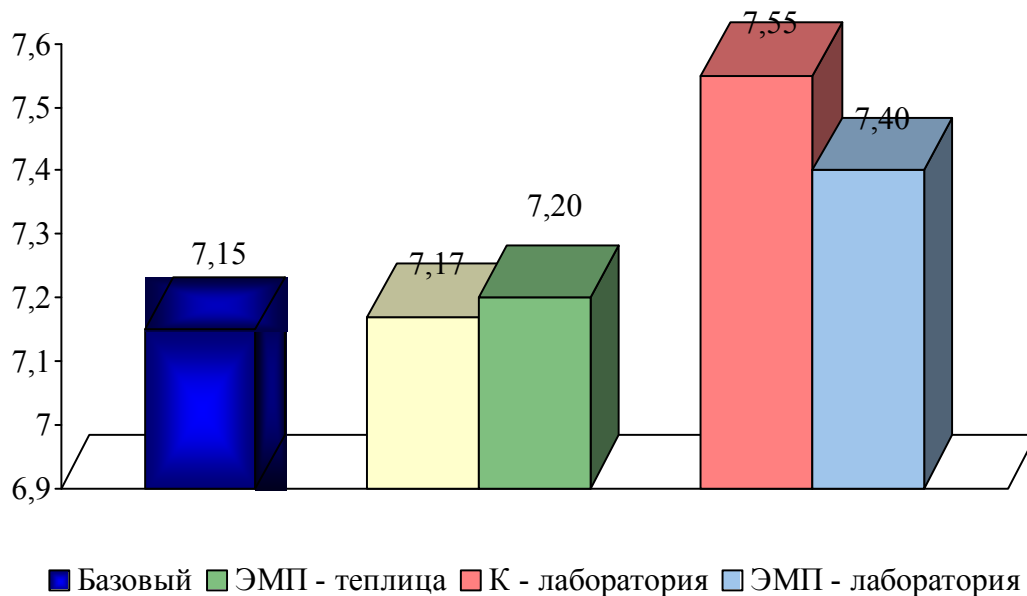


Рис. 6.17. Величина индекса pH

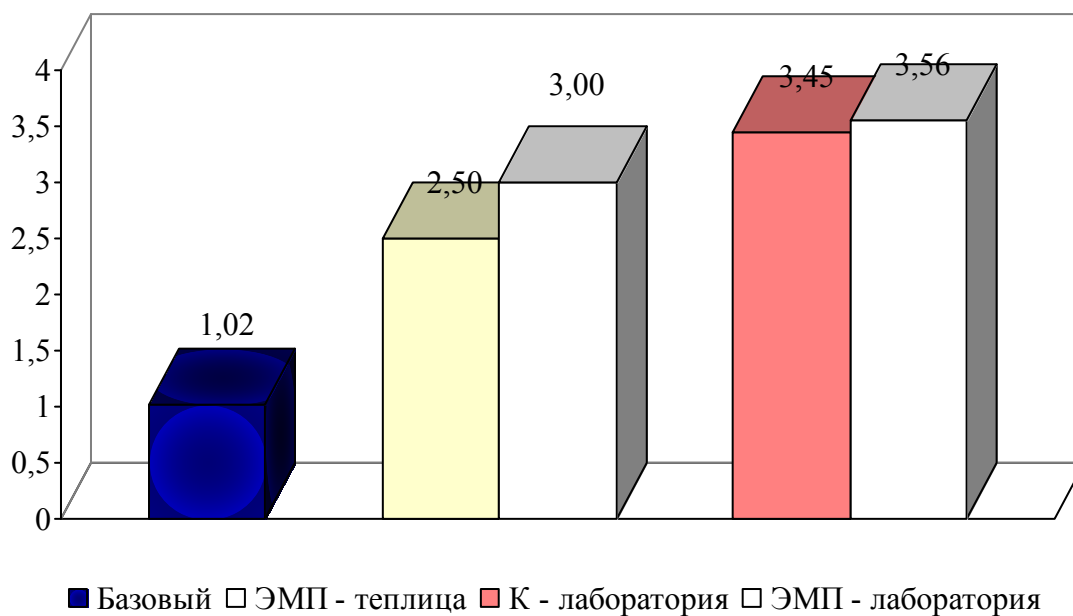


Рис. 6.18. Содержание гумуса

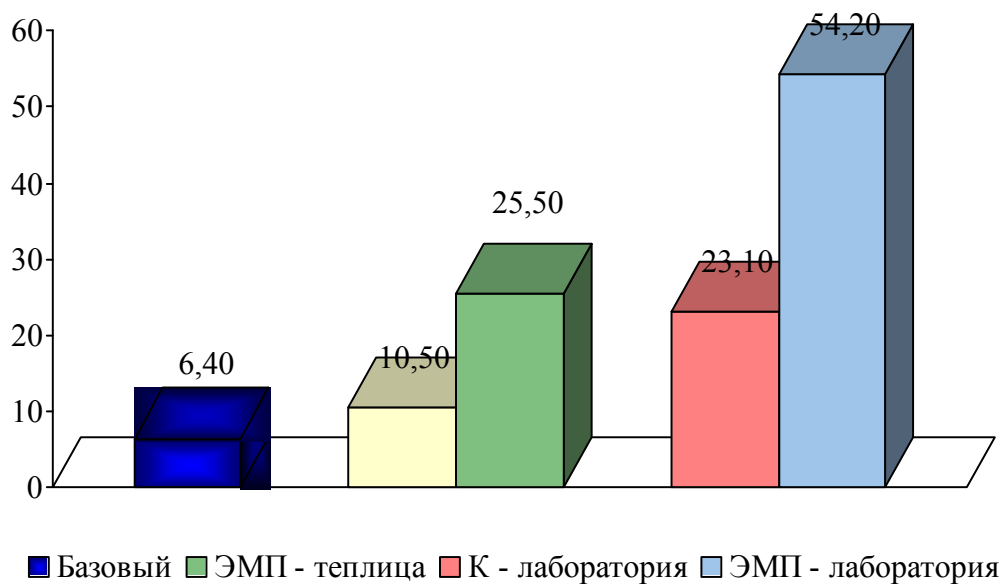


Рис. 6.19. Содержание азота

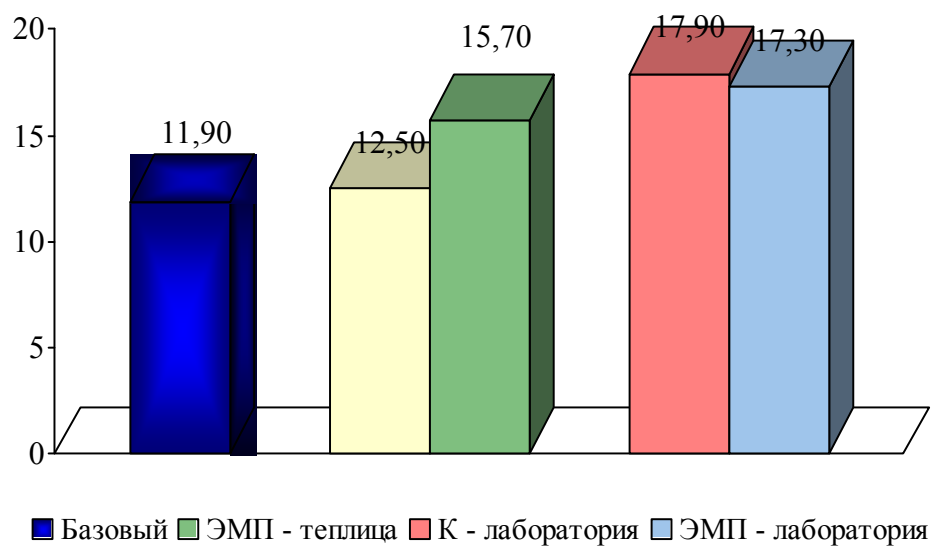


Рис. 6.20. Содержание доступного фосфора

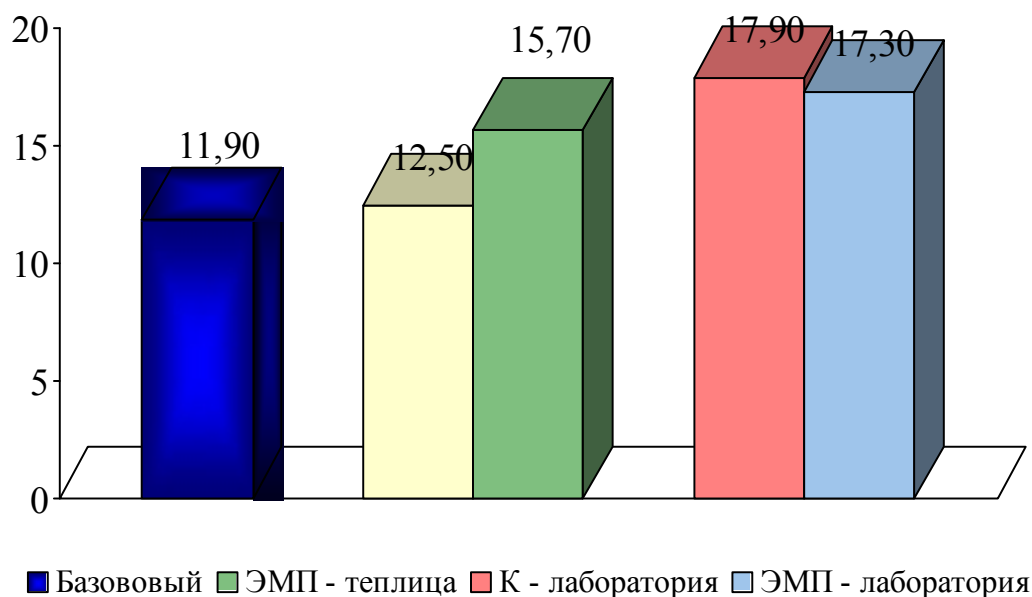


Рис. 6.21. Содержание калия

Выводы по разделу:

1. Для создания стационарного электрического поля в почве необходимо использовать электроды из стали Ст.45 или Ст. 14X17H2 с параметрами: для Ст.45 – 12×150 мм, Ст.14X17H2 – 18×100 мм, которые без тока будут создавать магнитное поле в почве с величиной индукции для Ст. 45 – 50567 нТл, а для Ст. 14X17H2 – 50645 нТл.

2. Установлено, что при напряжении 60 В на электродах из Ст.45 в грунте теплиц увеличится содержание: N-NO₃ на 15 мг/кг грунта; P₂O₅ на 3,2 мг/100 г грунта; K₂O на 50 мг/100 г грунта.

РАЗДЕЛ 7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ СТАЦИОНАРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАЗВИТИЕ ТЕПЛИЧНЫХ КУЛЬТУР

7.1 Цель и задачи экспериментальных исследований

Повышение урожайности и качества тепличных культур вызвало необходимость определить параметры стационарного электрического и статического магнитного полей, которые стимулируют развитие растений, а также подтверждения возможности реализации системы контроля газообмена растений по изменению диэлектрической проницаемости газовой среды.

В соответствии с целью экспериментальных исследований были определены задачи эксперимента и пути их решения:

- разработка и проведение измерений характеристик открытого анизотропного диэлектрического резонатора для измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений в миллиметровом диапазоне длин волн;
- разработка, макетирование и исследования характеристик высокостабильного по частоте генератора миллиметрового диапазона длин волн;
- разработка электротехнической установки;
- проведение лабораторных исследований с тепличными культурами (томаты, огурцы) по определению параметров электрического и магнитного полей, вызывающих повышение их урожайности и качества;
- проведение производственных испытаний с тепличными культурами, обрабатываемых электрическим и магнитным полем.

7.2 Анализ параметров и характеристик полудискового

лейкосапфирового резонатора

Для определения параметров и характеристик диэлектрического резонатора было решено провести экспериментальные исследования. Исследования проводились на ДР из лейкосапфира с параметрами: радиус $R = 19$ мм, толщина $h = 2$ мм. Диэлектрические проницаемости и тангенс угла потерь составили: $\varepsilon_1 = 9,4$; $\varepsilon_{II} = 11,54$; $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-5}$. Отклонение геометрической оси от оптической составило пять угловых минут.

На рис. 7.1 приведена конструкция генератора с двумя полудисковыми диэлектрическими резонаторами.

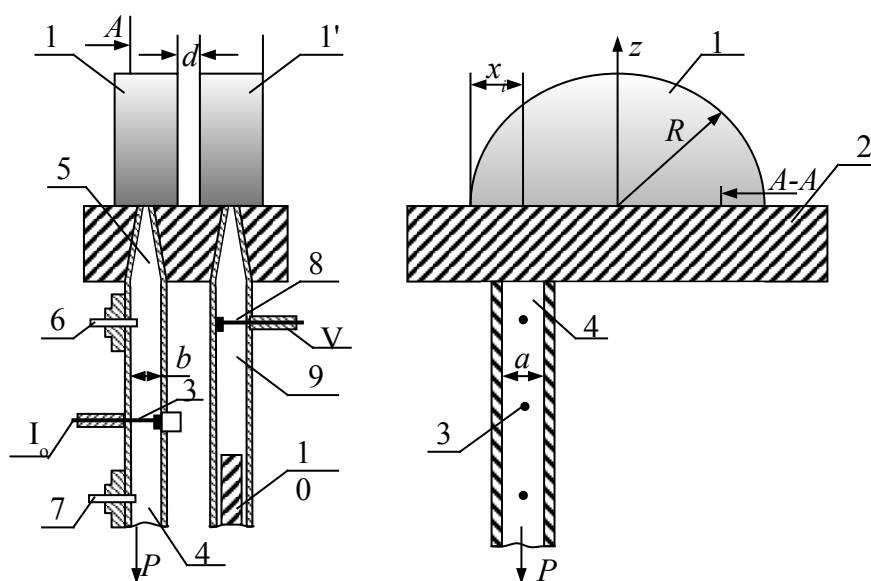


Рис. 7.1. Перестраиваемый генератор с двумя полудисковыми резонаторами

Диэлектрические резонаторы 1-1' установлены на металлическом зеркале 2. Полупроводниковый диод 3 размещается в области падения волны «шепчущая галерея» на зеркалах зеркала 2, которое является теплоуодом для генераторного диода. В исследуемом генераторе корпусированный ЛПД 3 типа 2A757A помещался в центре широкой стенки прямоугольного волновода 4, сечением 3,6x1,8 мм, открытый конец, которого на металлическом зеркале резонатора образовывал суженую щель связи 5 с размерами 3,6x0,1 мм.

Механическая перестройка частоты и изменение добротности резонатора осуществлялась изменением расстояния d между

полудисковыми резонаторами. Электрическая длина линии между щелью связи и лавинно-пролетным диодом регулировалась стержнями из сапфира 6 и 7.

Электрическая перестройка частоты генератора осуществлялась варисторным диодом 8 типа 3A639B. Вактор 8 размещен в центре широкой стенки волновода 9. Для настройки частоты генератора в конце волновода 9 размещен короткозамыкающий поршень 10.

На рис. 7.2 приведена функциональная схема экспериментальной установки для измерения добротности ДР, качества спектра и коэффициентов связи.

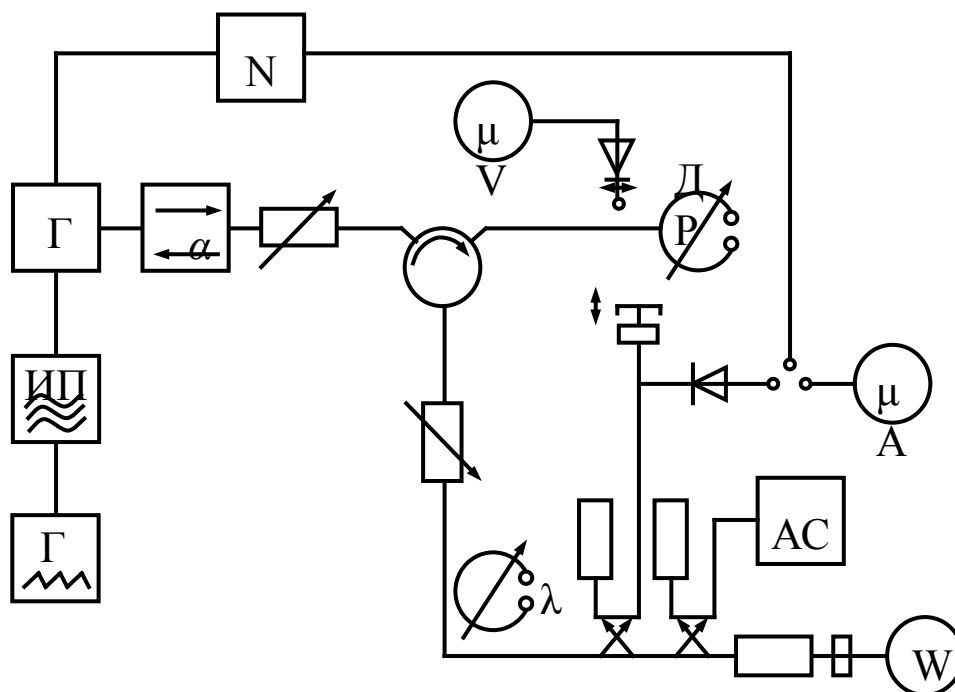


Рис. 7.2. Функциональная схема установки для исследования характеристик лейкосапфирового резонатора

Источником колебаний служит клистронный генератор, согласованный с СВЧ трактом при помощи вентилей аттенюатора. Сигнал с генератора пилообразного напряжения одновременно поступает на отражатель клистрона и осциллограф (ИП) С1-54. Модулированные по частоте радиоимпульсы через ферритовые вентили, аттенюатор, циркулятор,

измерительную линию в диэлектрический резонатор (ДР). Отраженный от ДР сигнал через измерительную линию и циркулятор проходит в схему, состоящую из анализатора спектра (АС) С4-27, детектора и измерительного моста. Если резонатор настроен в резонанс, то на экране осциллографа возникает всплеск, повторяющий форму резонансной кривой ДР. Определяя частоту сигнала с помощью волномера и ширину резонансной кривой на уровне половинной мощности, вычисляем величину добротности СР как отношение

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (7.1)$$

Абсолютная погрешность измерения добротности не превышает 5-10%. Коэффициент связи определяется по измеренной величине КСВН и по резонансной кривой на осциллографе.

Эффективность связи резонатора с линией передачи характеризуется коэффициентом связи β , определяемым через собственную добротность Q_0 резонатора и нагруженную добротность Q_l соотношением

$$Q_0 = Q_l(1 + \beta) \quad (7.2)$$

СР возбуждался посредством щели связи 5. Щелью связи в полудисковом ДР возбуждались HE_{mnl} колебания в полосе частот 60-80 ГГц.

На рис. 7.3.а приведен спектр вынужденных колебаний полудискового лейкосапфирового ДР, а на рис. 7.3.б резонансная кривая ДР.

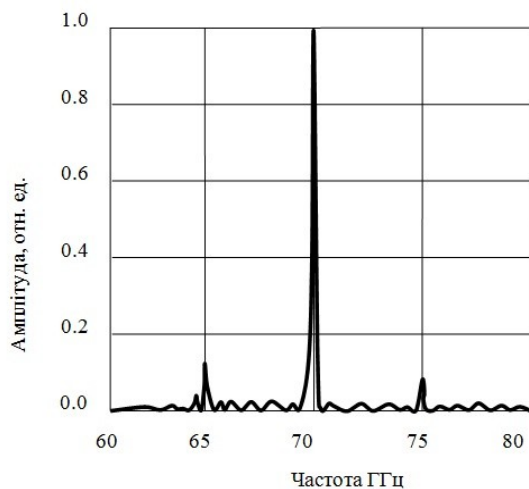


Рис. 7.3.а Спектр вынужденных

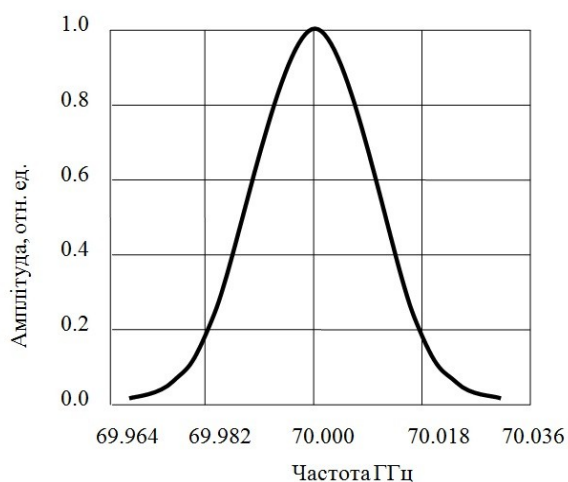


Рис. 7.3.б Резонансная кривая

колебаний полудискового
лейкосапфирового резонатора

ЕН₄₀₂₁ типа колебания штиря

Для точного определения добротности использовались калибрационные мешки анализатора спектра.

Экспериментально измеренная максимальная величина нагруженной добротности ДР составила 7800 на частоте 70 ГГц.

На рис. 7.4.а и 7.4.б представлены результаты экспериментальных исследований зависимостей резонансной частоты f (рис.7.4.а) и коэффициента связи β щели (рис. 7.4.б) с колебаниями в ДР от коэффициента X_i щели связи.

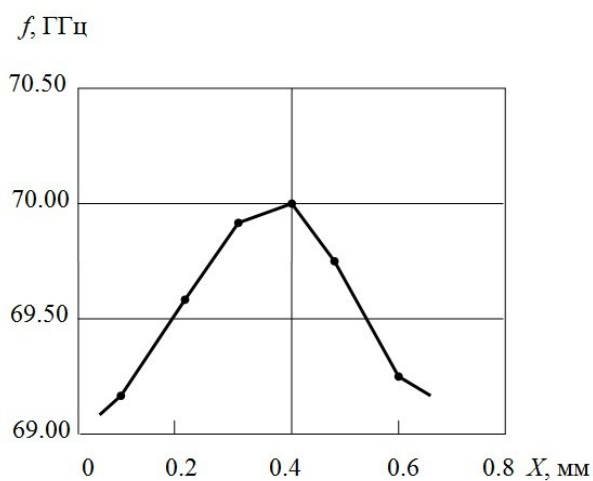


Рис. 7.4.а Зависимость резонансной частоты от координаты щели связи

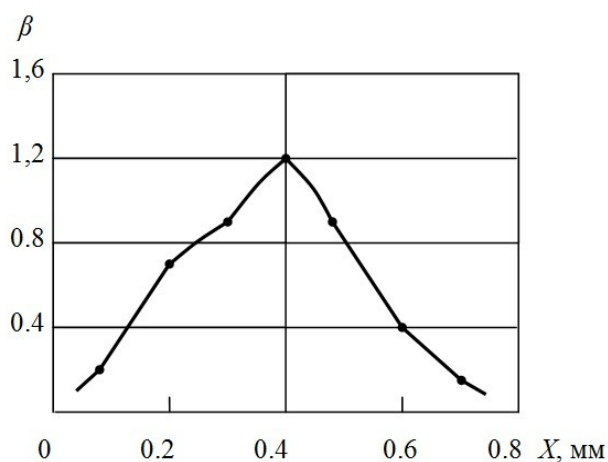


Рис. 7.4.б Зависимость коэффициента связи от координаты щели связи

На рис. 7.4.а и 7.4.б видна четкая зависимость вынужденных колебаний и их возбуждения щелью связи в ДР от ее положения по радиальной координате.

7.3 Разработка и анализ технических параметров генератора на лавинно-пролетном диоде в системе измерения газообмена растений

На основании теоретических и экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец генератора на лавинно-пролетном диоде, стабилизированный по частоте внешним резонатором.

Для стабилизации частоты генератора был использован открытый резонатор, включенный по схеме на отражение (рис. 7.6). На рис. 7.6 приведена схема конструкции генератора, а на рис. 7.5 его внешний вид.

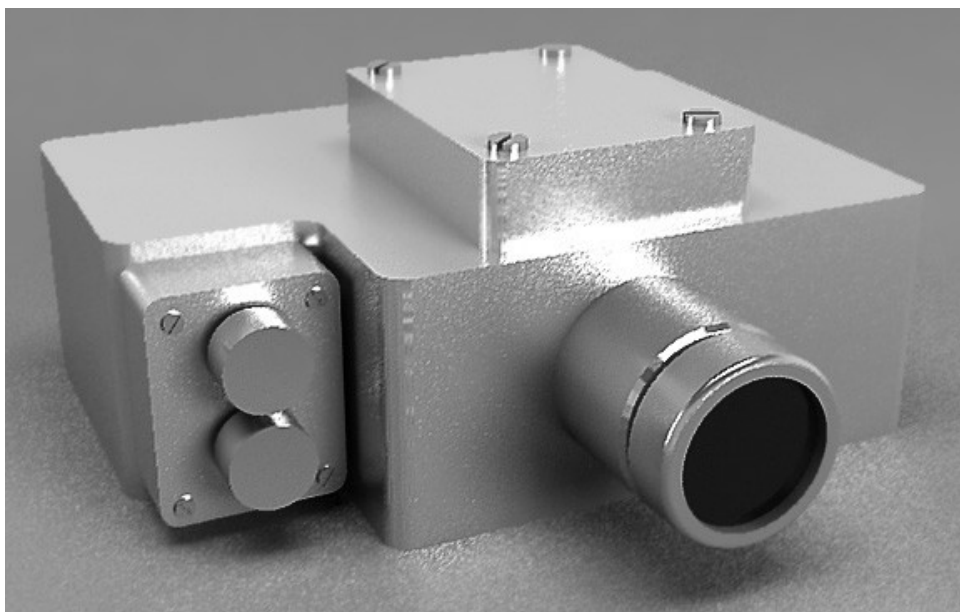


Рис.7.5 Внешний вид опытного образца генератора на лавинно-пролетном диоде на частоту 70 ГГц

Стабилизирующий частоту генератора резонатор состоит из двух зеркал 2 и 3 с аппаратурой: $D = 38\text{ мм}$; $R = 39\text{ мм}$ (рис. 7.1). Элемент связи 4, представляющий плавный переход с пониженного сечения $3,6 \times 0,16\text{ мм}$ на основное сечение $3,6 \times 1,8\text{ мм}$, расположен по центру сферического зеркала 2. Размеры щели связи определяют добротность ОР и связь между волноводным резонатором и ОР. Связь между резонаторами изменяется в небольших пределах при помощи «Е-Н» трансформатора 5.

На рис. 7.6 приведена функциональная схема экспериментальной установки для определения добротности и коэффициента связи SOP , полосы частотной перестройки и качества спектра. Исследуемый ОР укреплен на катетометре КМ-8. Одно зеркало жестко укреплено, а другое плавно

перемещается с точностью до 0,01 мм параллельно другому. Источником колебаний служит клисторный генератор К 43-А, согласованный с КВЧ трактом при помощи ферритовых вентиляй и аттенюатора.

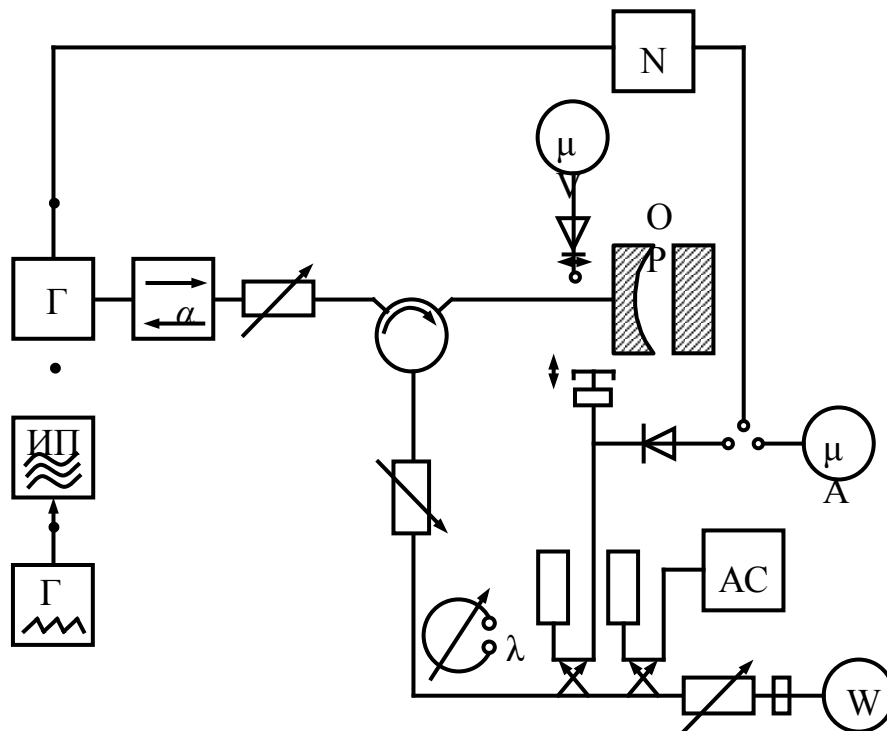


Рис. 7.6. Функциональная схема установки для определения добротности и коэффициента связи ГЛПД с ОР

Сигнал с генератора пилообразного напряжения одновременно поступает на отражатель клистрона и электронный осциллограф. Модулированные по частоте радиоимпульсы поступают в ОР. Отраженный от ОР сигнал через измерительную линию, циркулятор проходит в схему, состоящую из анализатора спектра С4-27, детектора, термистора и измерительного моста. Определяя частоту сигнала с помощью волнометра и ширину резонансной кривой на анализаторе спектра на уровне половинной мощности, вычисляем величину добротности ОР как отношение $f/\Delta f$. Абсолютная погрешность измерения добротности не превышает 10%. Коэффициент связи определяется по измеренной величине КСВН и по виду резонансной кривой на осциллографе.

На рис. 7.7.а приведены кривые изменения нагруженной добротности Q_n и коэффициента связи β между ОР и волновым резонатором от расстояния между зеркалами, приведенного к радиусу кривизны зеркала L/R .

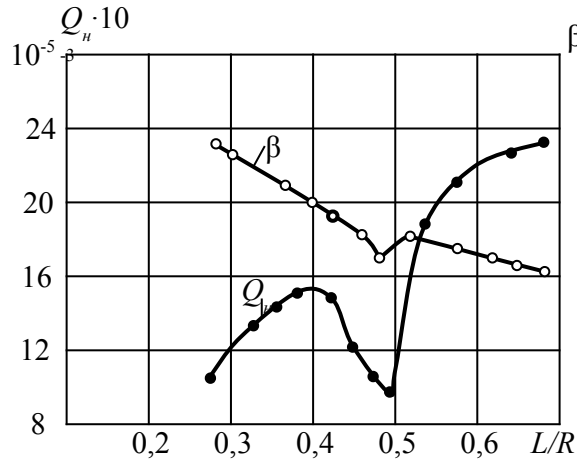


Рис. 7.7. а Зависимость добротности и коэффициента связи от расстояния между зеркалами

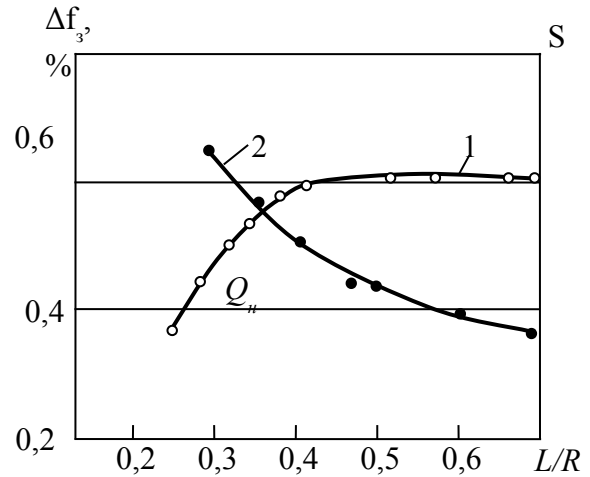


Рис. 7.7.б Зависимость коэффициента стабилизации и относительной полосы затягивания (кривая 2) от расстояния между зеркалами

Как видно из приведенных результатов, нагруженная добротность ОР с увеличением расстояния между зеркалами изменяется в пределах от 10^4 до $23 \cdot 10^3$, при этом коэффициент связи изменяется в пределах от 0,5 до 0,25.

На рис. 7.7.б показаны зависимости коэффициента стабилизации и относительной полосы затягивания от расстояния между зеркалами L/R .

Как и следовало ожидать, с увеличением расстояния между зеркалами уменьшается связь между резонаторами, а следовательно, уменьшается полоса затягивания и увеличивается коэффициент стабилизации. Предельный коэффициент стабилизации составляет $S=200$ и достигает максимального значения при $L/R=0,4$ ($Q_n=15 \cdot 10^3$).

Структурная схема стенда для измерения нестабильности частоты, полосы затягивания и изменения мощности генератора от частоты ОР представлена на рис. 7.8. В данной схеме в качестве опорного генератора использовался ГЧ-82 стабилизированный по частоте ФАПЧ по эталону частоты. Гармоники опорного генератора смешиваются с выходной частотой ГЛПД. Разностная частота после усиления поступает на прибор Ч7-42, на второй вход которого сигнал поступает от синтезатора 46-31.

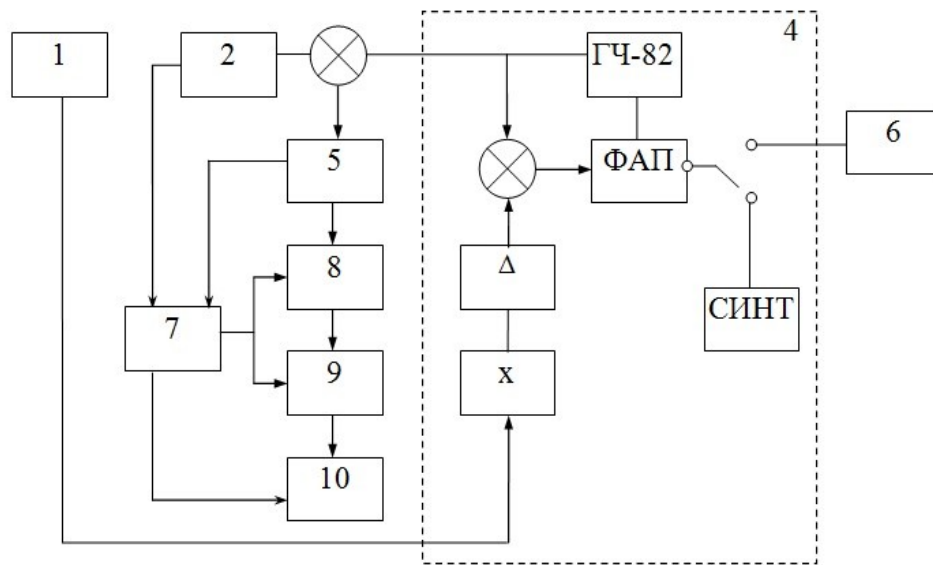


Рис. 7.8. Структурная схема стенда для исследования ГЛПД с синтезатором на основе ОВР: 1 – высокостабильный генератор 10 МГц (эталон); 2 – исследуемый генератор; 3 – смеситель-умножитель; 4 – опорный генератор; 5 – УПЧ; 6 – синтезатор 46-31; 7 – компаратор фазовый Ч7-42; 8, 9 – анализаторы спектра СЧ-48 и СЧ-29; 10 – ЭСЧ с ПЭВМ

При равенстве исследуемых частот производится измерение нестабильности частоты. Измерение мощности на выходе ГЛПД осуществляется ваттметром.

Результаты измерений нестабильности частоты, ГЛПД представлены на рис. 7.9.а из которых следует, что кратковременная нестабильность частоты составляет 10^{-7} , а долговременная 10^{-10} . На рис. 7.9.б приведены

зависимости изменения частоты f_r (кривая 1) и выходной мощности (2) от механической перестройки частоты ОР. Частота ОР изменяется путем изменения расстояния L между зеркалами.

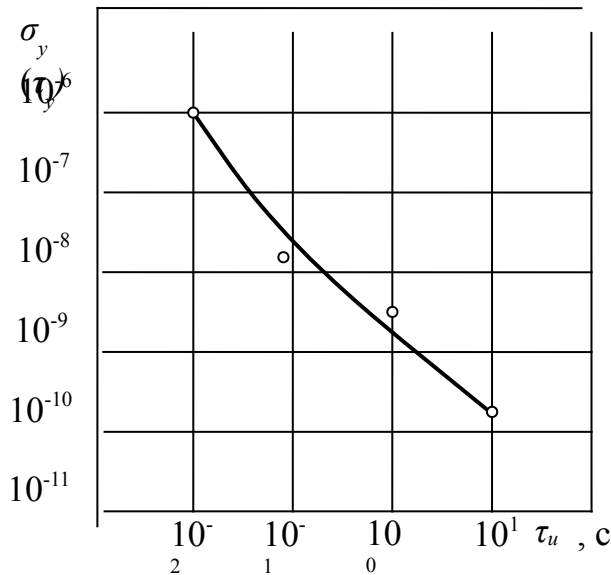


Рис. 7.9.а Нестабильность частоты ГЛПД

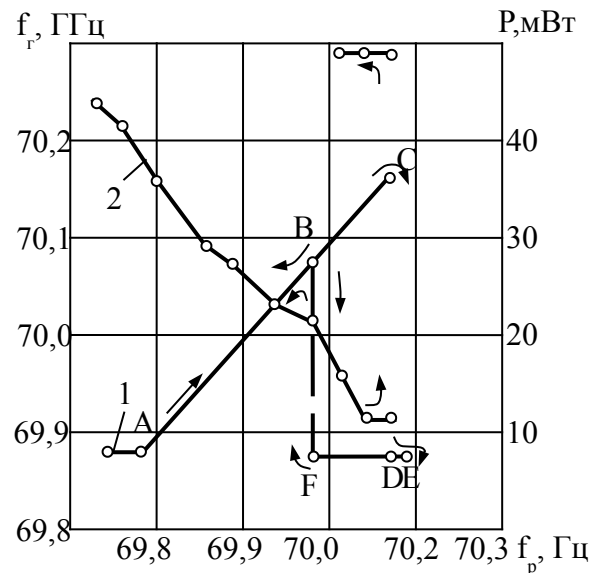


Рис. 7.9.б Изменения частоты (кривая 1) и выходной мощности (кривая 2) от частоты ОР

Частота генерации перестраивалась варактором. Устойчивая область генерации заключена между точками А и В и составляет 200 МГц, область неустойчивой генерации составляет 90 мГц, а выходная мощность во всей полосе затягивания изменяется от 23 мВт до 15 мВт.

7.4 Разработка установки для контроля газообмена растений

В результате теоретических и экспериментальных исследований для измерения газообмена растений по величине диэлектрической проницаемости была разработана установка, структурная схема, которой приведена на рис. 7.10, а на рис. 7.11 ее общий вид.

Листовая камера (1) представляет собой стеклянную колбу, в которую помещаются листья неотделенные от растения. После листовой камеры

анализируемый воздух освобождается от водяных паров (2), где он пропускается через сосудик объемом 10 мл, охлаждаемый устройством на эффекте Пельтье.

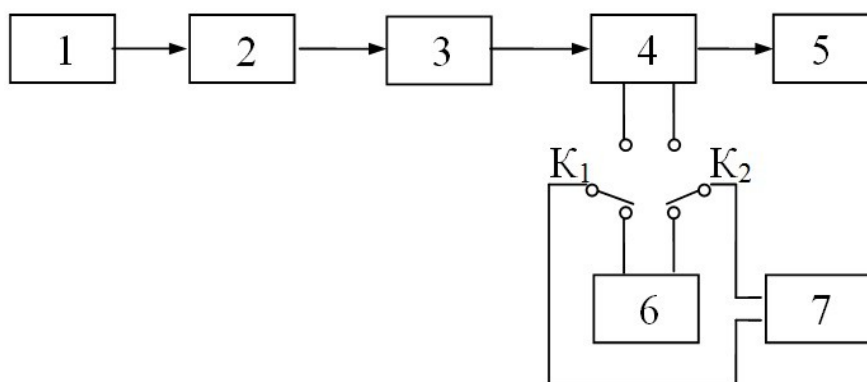


Рис. 7.10. Структурная схема измерения диэлектрической проницаемости газовой среды тепличных культур: 1 – листовая камера; 2 – камера для конденсации водяных паров; 3 – камера для поглощения остатков водяных паров; 4 – измерительный лейкосапфировый резонатор; 5 – микрокомпрессор для прокачки воздуха; 6 – вакумированный лейкосапфировый резонатор; 7 – регистрирующее устройство.

Далее воздух проходит через трубку (3) диаметром 2 см и высотой 5 см, наполненной силикагелем. Затем воздух очищается матерчатым фильтром от пылеобразных частиц и поступает в реометр – измерительный прибор, показывающий объемную скорость воздуха.

Потом поток воздуха проходит через измерительный лейкосапфировый резонатор (4), что приводит к изменению частоты резонатора, которая пропорциональна диэлектрической проницаемости газообмена листьев растения.

Вакумированный резонатор (6) служит для калибровки измерительной установки. Микрокомпрессор (5) создает ток воздуха по всей измерительной системе. Все соединения частей системы шлангами из полимерных

материалов, не реагирующих, не сорбирующих и не пропускающих через себя CO_2 . Регистрирующее устройство (7) представляет собой электронную систему, которая показана на рис. 7.11.



Рис. 7.11. Общий вид измерительной установки

Результаты измерений диэлектрической проницаемости воздуха, азота и CO_2 при температуре 20°C и давлении 760 мм рт. ст. приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1 -

Результаты измерений ДП

Наименование вещества	$(\epsilon'-1) \cdot 10^{-6}$ (измеренные)	$(\epsilon'-1) \cdot 10^{-6}$ (литературные)	$(\epsilon'-1) \cdot 10^{-4}$ (литературные)
Воздух без CO_2	$575,58 \pm 0,07$	$575,7 \pm 0,4(4)$	$5,754 \pm 0,021(5)$
Азот	$588,89 \pm 0,07$	$587,0 \pm 2,0(4)$	$5,870 \pm 0,20(5)$
Углекислый газ	$989,87 \pm 0,1$	$988,0 \pm 2,0(4)$	$9,875 \pm 0,041(5)$

7.5 Разработка установки для обработки в электрических и магнитных полях семян и корневой системы тепличных культур

В разработанной и представленной в диссертационной работе способ обработки семян и корневой системы растений тепличных культур применение стационарных электрических и статических магнитных полей отличается от общепринятых в электрон-ионных технологиях. Поэтому важным вопросом становится обеспечение режимов обработки соответствующими техническими средствами.

Установка для обработки семян и корневой системы растений в электрических и магнитных полях должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать стабилизированное регулирование напряженности электрического поля в пределах от 60 100 В/см;
- обеспечивать статическую напряженность магнитного поля в пределах от 1,5....4,0 А/м²;
- обеспечение безопасности труда обслуживающего персонала.

В соответствии с требованиями, которые предъявляются к техническим средствам для работы в электрическом и магнитном полях, разработана данная установка [5,7,11,15,72].

Предложенная электротехническая установка по влиянию стационарных электрических и статических магнитных полей отличается своей универсальностью. С помощью однотипной установки можно выполнять обработку целого ряда семян и корневой системы тепличных культур без изменения конструктивных параметров, изменяя только расположение системы электродов рабочих органов. Универсальность этой установки заключается также и в том, что возможен контроль процесса развития тепличных культур по величине диэлектрической проницаемости газовой среды дыхания растений.

В состав установки входят: источник стабилизированного питания, блок постоянных магнитов, блок электродов; устройство для измерения ДП ГС растений, магнитометр.

Разработанная установка выгодно отличается от существующих электротехнических установок тем, что: требует незначительных

технических средств и финансовых ресурсов для изготовления; имеет малые габариты и материалоемкость; режимы обработки, которые обеспечивает установка, потребляют незначительное количество электроэнергии; выращенная продукция с использованием установки является экологически чистой продукцией овощеводства; не требует высококвалифицированного обслуживающего персонала.

Функциональная схема электротехнической установки для воздействия на семена и корневую систему растений в электрических и магнитных полях приведена на рис. 7.12.

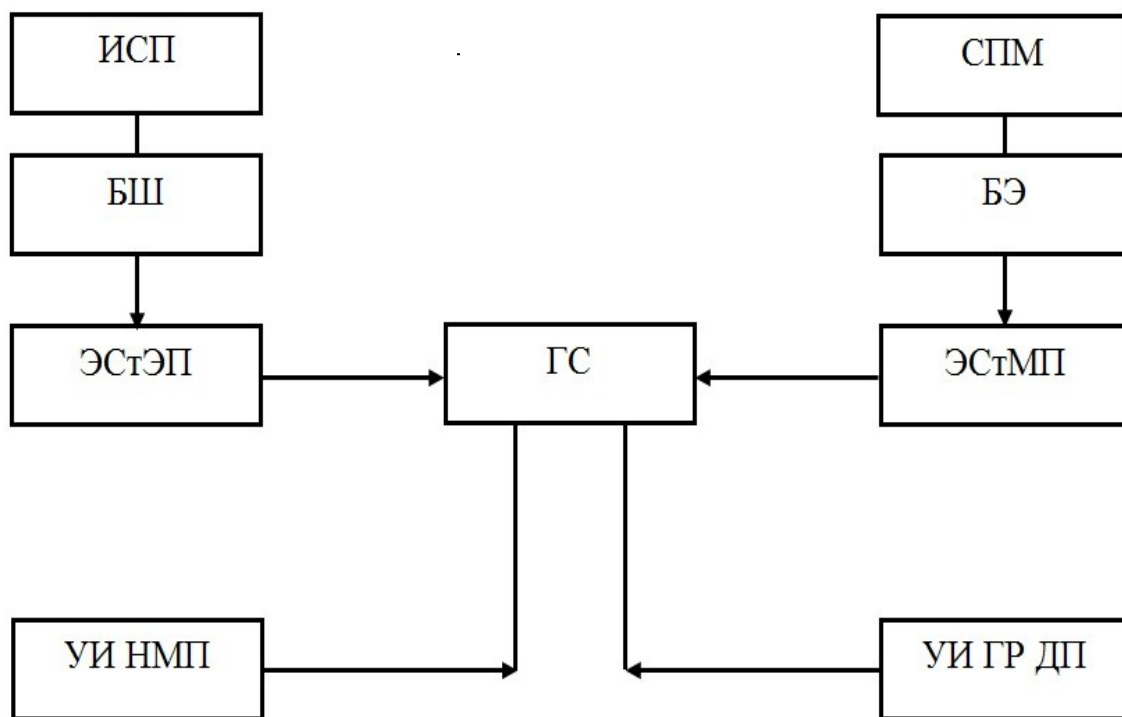


Рис. 7.12. Функциональная схема установки для обработки семян и корневой системы растений в электрическом и магнитном полях: ИСП – источник стабилизированного питания; БШ – блок штырей; ЭСтЭП – энергия стационарного электрического поля; СПМ – система постоянных магнитов; БЭ – блок электродов; ЭСтМП - энергия статического магнитного поля; ГС – гетерогенная структура; УИ НМП - устройство для измерения

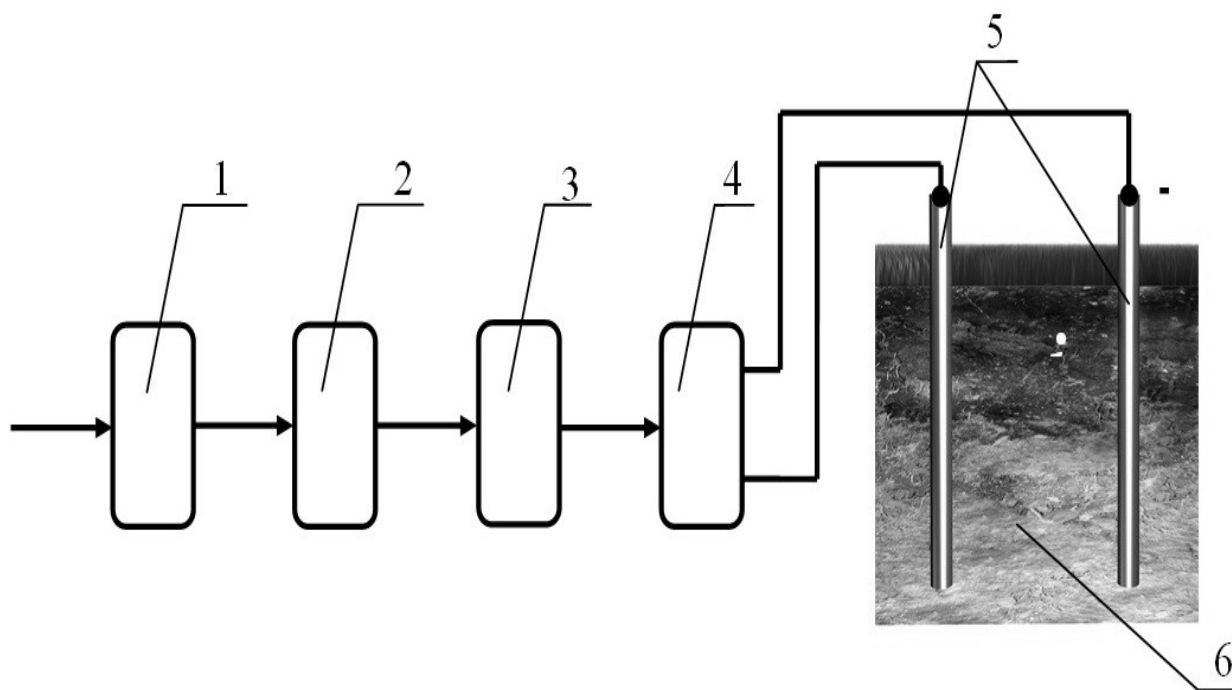
напряженности магнитного поля; УИ ГР ДП – установка для измерения газообмена растений по величине диэлектрической проницаемости

Электрическая схема установки объединяет ряд цепей выполняющих управление и питание установки, а также создает напряженность электрического поля в гетерогенной структуре, где и происходит обработка в электрическом поле.

Магнитная схема установки объединяет ряд постоянных магнитов, а также создает напряженность магнитного поля в гетерогенной структуре, где и происходит обработка в магнитном поле.

Рабочая конструкция для воздействия электрическим полем представляет собой систему параллельных электродов, на которые подводится напряжение. В межэлектродном пространстве на семена и корневую систему растений действует стационарное электрическое поле. Геометрия рабочей конструкции может изменяться в зависимости от вида почвы и посадочного материала.

Схема установки для обработки семян и корневой системы растений электрическим полем с разрезом в гетерогенной структуре (ГС) обработки показана на рис. 7.13.



а) блок-схема установки



б) блок штырей

Рис. 7.13. Схема установки для обработки семян и корневой системы растений в стационарном электрическом поле: 1 - преобразователь, 2 – генератор импульсов; 3 – трансформатор; 4 преобразователь в постоянное напряжение; 5 – блок штырей; 6 – гетерогенная структура

Рабочая конструкция для воздействия магнитным полем представляет собой систему блока магнитов. В межэлектродном пространстве на семена и корневую систему растений действует статическое магнитное поле. Геометрия рабочей конструкции может изменяться в зависимости от вида

почвы и посадочного материала. Блок постоянных магнитов (электродов) в почве для обработки семян и корневой системы растений магнитным полем показан на рис. 7.14.

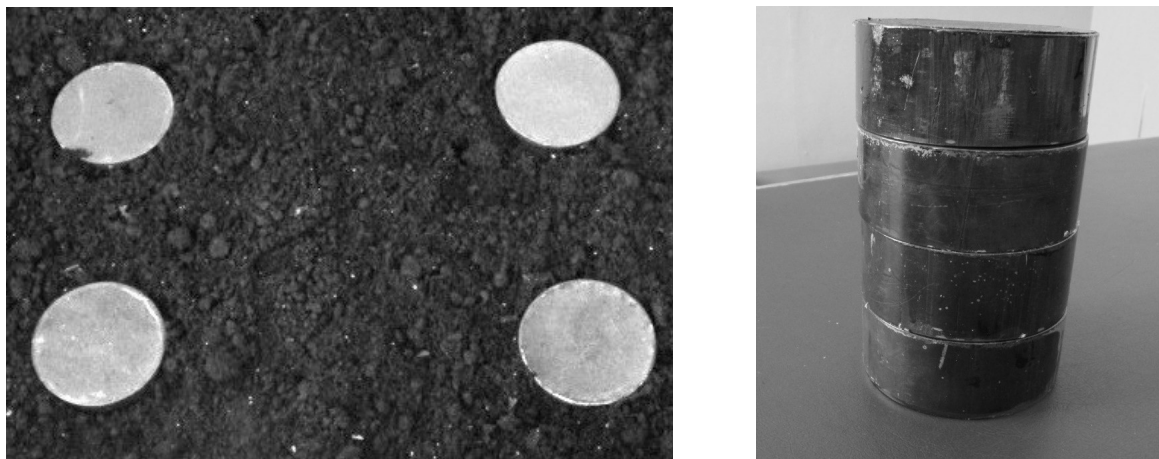


Рис. 7.14. Блок постоянных магнитов

Монтаж электротехнической установки необходимо выполнять с заглубления штырей на глубину 0,2 м по вершинам квадрата (рис. 7.15), расстояние между штырями 1 м. Постоянные магниты устанавливаются на глубину 0,2 м с расположением по вершинам квадрата с расстоянием 0,6 м. Выполняется монтаж соединительных проводов с соблюдением полярности подключения. После выполнения монтажных работ выполняется проверка работоспособности установки подачей напряжения на блок питания с установкой заданной величины напряженности электрического поля. Магнитометром измеряется величина напряженности магнитного поля в контрольных точках А, В, С, D, С. Установка отключается от сети и выполняется посадка семян овощных культур.

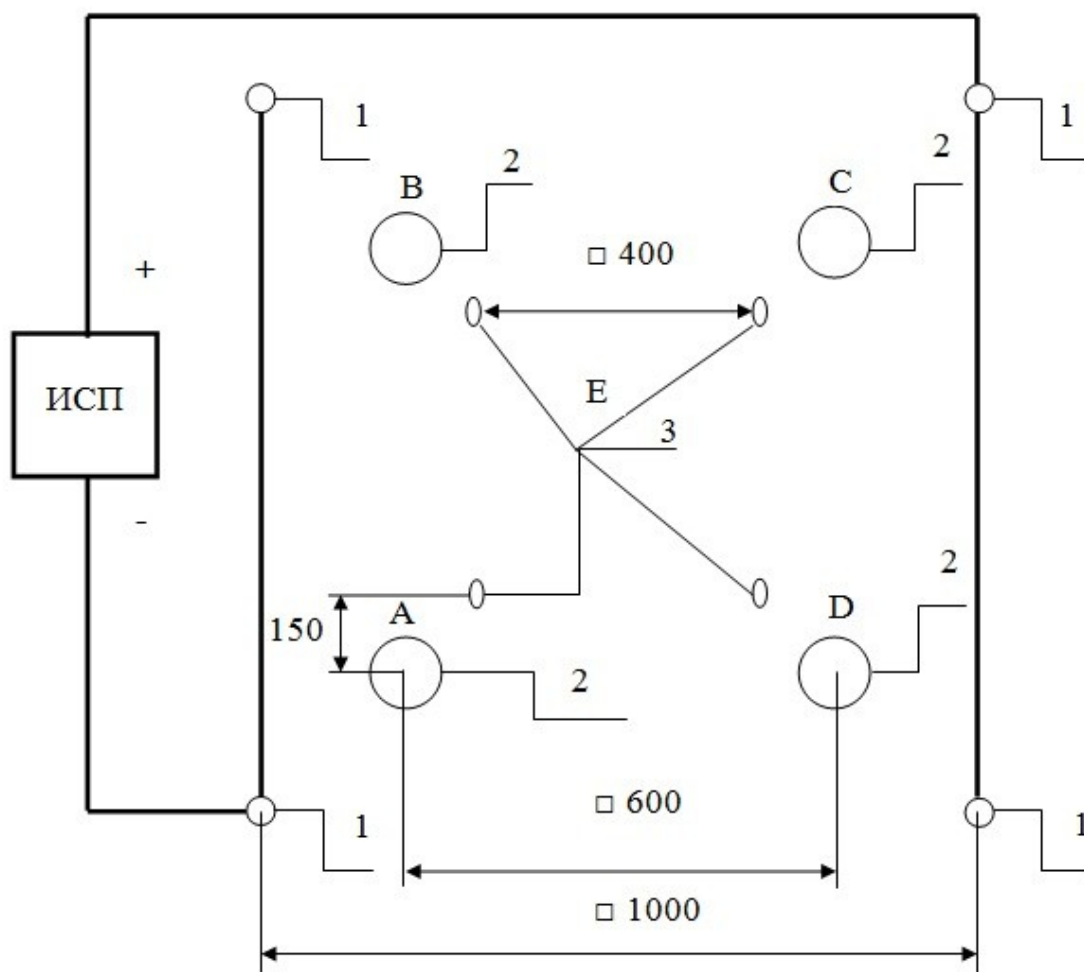


Рис. 7.15. Схема расположения элементов конструкции электротехнической установки: 1- блок штырей; 2- блок электродов (постоянных магнитов); 3 – семена овощных культур.

Установка работает следующим образом. На источник стабилизированного питания подается напряжение, получает питание преобразователь далее генератор импульсов, трансформатор, после трансформатора напряжение преобразовывается в постоянное. Стабилизированное напряжение подается на электроды. Уровень напряжения регулируется с помощью импульсного регулятора напряжения. При соответствующем уровне напряженности электрического поля по всему объему ГС происходит воздействие электрического поля на семена и корневую систему тепличных культур.

Предложенная установка и способ обработки выгодно отличаются от существующих тем, воздействие стационарным электрическим и

статическим магнитным полем осуществляется непосредственно в среде развития (почве) семян и корневой системы растений, чем обеспечивается равномерность воздействия по всему объему. Для осуществления воздействия отпадает необходимость в предварительной обработке семян электрическими и магнитными полями, кроме того, предложенный способ и установка для его осуществления позволяет обрабатывать семена и корневую систему растений непосредственно в процессе развития.

Обслуживание электроустановок не связано с опасностью поражения электрическим током. В предлагаемой установке величина напряженности электрического и индукции магнитного поля не превышает предела допустимого значения для нахождения человека в соответствии с требованиями «Державних санітарних норм та правил при роботі з джерелами електромагнітних полів» №476 от 18.12.2002 г.

В качестве стабилизированного источника питания использовано устройство RTF4221. Напряжение питающей сети и его частота - 220 ± 10 В, $50(60) \pm 2$ Гц. Выходное напряжение RTF4221 от 0 до 600 В. Номинальный ток RTF4221 - 2 А. Рабочий диапазон температур окружающей среды от плюс один до плюс 60°C . Блок электродов изготовлен из стали марки 14X17H2. Исследования физико-химических свойств материала были выполнены в Украинском государственном научно-исследовательском институте специальных сталей, сплавов и ферросплавов (приложение Б).

Постоянные магниты изготовлены из материала - ферритстронция FeSr. Исследования и испытания магнитных свойств были выполнены в научно-производственном предприятии ООО «Полимагнит» г. Киев. Основные характеристики магнитов: магнитная индукция, B/B_r - 380 мТл; коэрцитивная сила по индукции, H_{cb} - 285 кА/м; коэрцитивная сила по намагниченности, H_{cj} - 380 кА/м; максимальное энергетическое произведение (мощность магнита), B_{Hmax} - 27 кДж/м³; максимальная рабочая температура, T_{max} - до 200°C .

Разработаны технические условия для заказа магнитных систем для воздействия на семена и корневую систему тепличных культур в статических магнитных полях (приложение В).

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана электротехническая установка, в состав которой входят: источник стабилизированного питания, блок электродов, блок постоянных магнитов, устройство измерения напряженности магнитного поля, установка для измерения газообмена растений по измерению диэлектрической проницаемости (рис. 7.16).

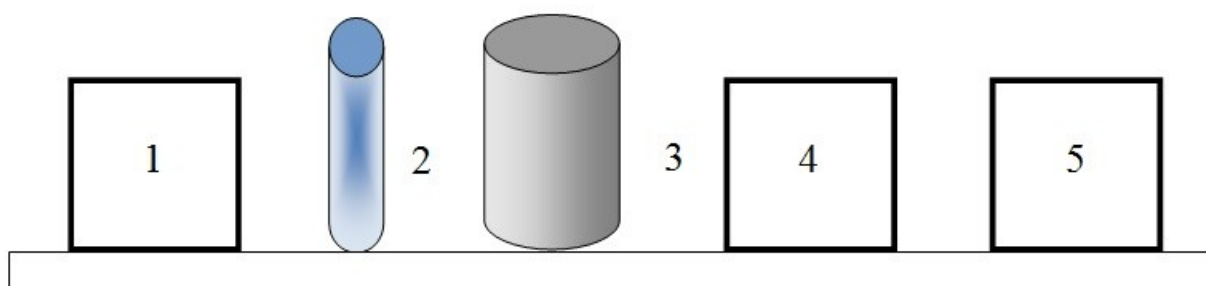


Рис 7.16. Принципиальная схема установки для воздействия на семена и корневую систему тепличных культур в стационарном электрическом и статическом магнитном полях: 1 – источник стабилизированного питания, 2 – блок штырей, 3 – блок электродов (постоянных магнитов), 4 – устройство измерения напряженности магнитного поля, 5 – установка для измерения газообмена растений по диэлектрической проницаемости газовой среды.

Источник стабилизированного питания выполнен в виде шкафа, на передней панели находятся пускорегулирующая аппаратура и измерительные приборы. На боковой стороне шкафа расположены ручки для переноса блока. Питание источника осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Регулировка осуществляется изменением напряжения на первичной обмотке трансформатора регулятором напряжения.

Система электродов размещается в почве, расстояние между электродами образует объем гетерогенной структуры для воздействия. Количество электродов - 4 шт. Высота электродов – 100 мм, диаметр – 18 мм.

Система постоянных магнитов размещается в почве, расстояние между электродами образует объем гетерогенной структуры для воздействия. Количество электродов - 4 шт. Высота электродов – 200 мм, диаметр – 100 мм.

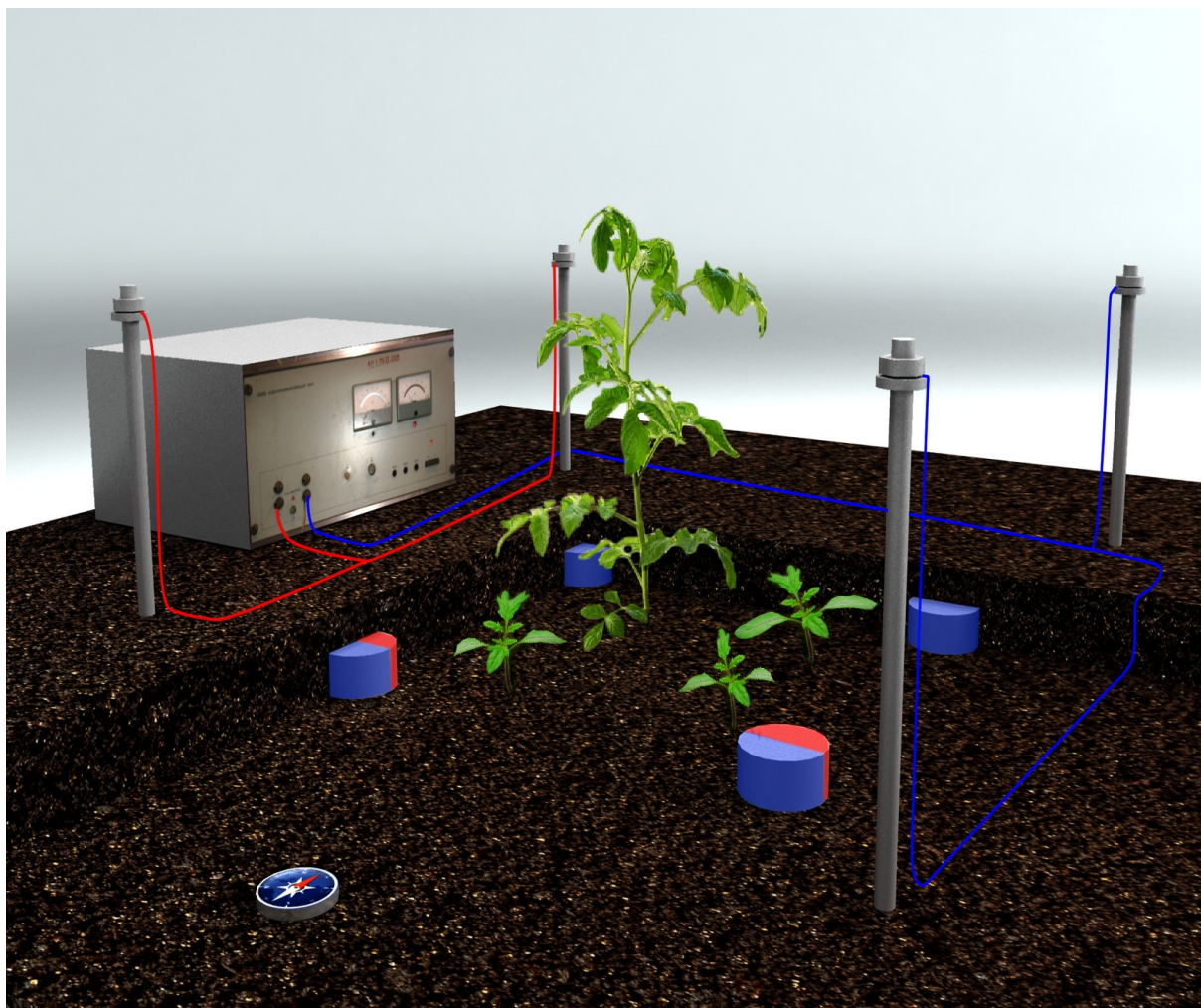
Параметры установки:

- напряжение питания, В – 0...600
- номинальная мощность трансформатора, кВт · А - 1,2
- номинальный ток, А – 2,0
- межэлектродное расстояние (регулируемое), мм - 600 ... 1000
- напряженность электрического поля, В/м - 60 ... 100
- габариты электродов, мм:
- длина - 100
- диаметр - 18
- количество электродов, шт. - 4
- межэлектродное расстояние блока магнитов, мм – 300...600
- напряженность магнитного поля, А/м – $(1,5 \dots 4,0) \cdot 10^4$
- габариты магнитов, мм:
- длина - 200
- диаметр - 100
- количество магнитов, шт. - 4
- продолжительность воздействия (в зависимости от электрофизических свойств семян и почвы), час. - до ... 720
- площадь обработки, м² – 1,0...10
- количество обслуживающего персонала, чел. – 1.

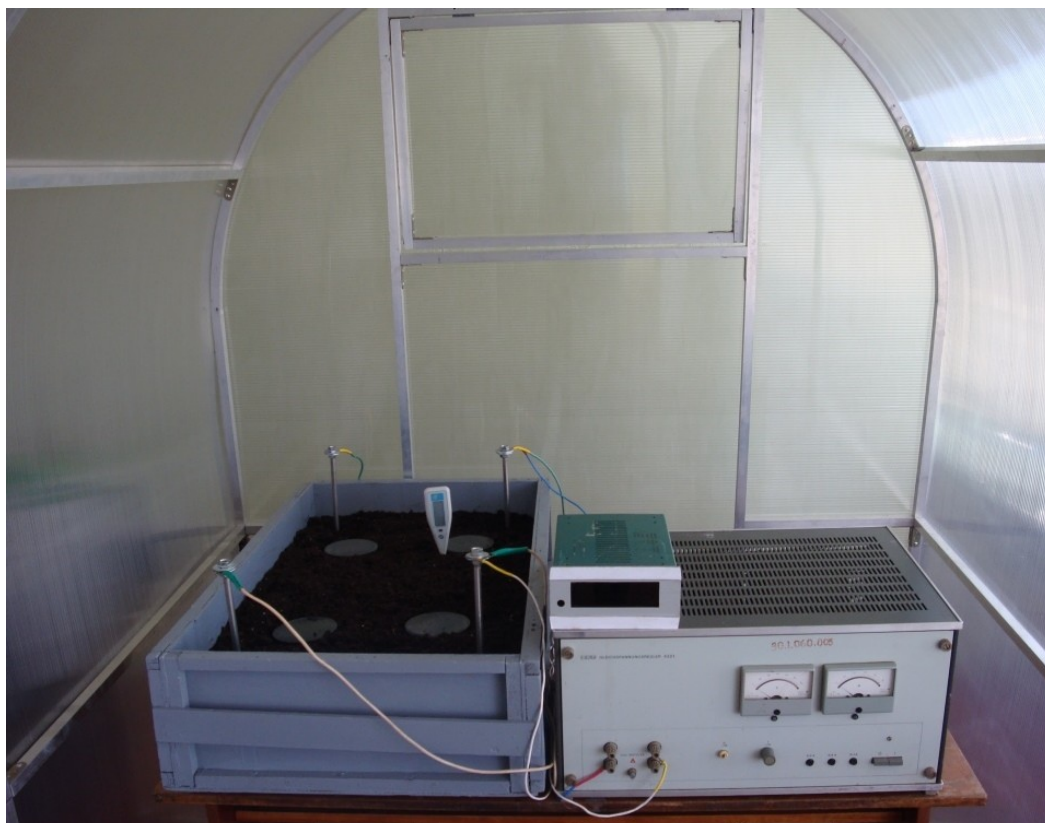
Условия эксплуатации. Установка эксплуатируется в помещениях с температурой плюс 10 ... плюс 32 °С, влажностью до 95%. Количество обслуживающего персонала - 1 чел.

Специальные условия. Электрооборудование, входящее в состав установки должно быть выполнено во влагозащищенном исполнении, степень защиты IP54, категория размещения - 2, климатическое исполнение УХЛ.

Внешний вид (3D модель и фото) установки приведен на рис. 7.17.а и 7.17.б



а) макет экспериментальной установки



б) внешний вид установки

Рис. 7.17. Внешний вид электротехнической установки

7.6 Определение параметров магнитного и электрического полей для повышения урожайности и качества тепличных культур

Как показывает анализ научно-технической литературы [183,184,185] для нормальной жизнедеятельности и плодоношения растений постоянно должен быть обмен воздуха, т.к. в процессе дыхания выделяется энергия, используемая для всех физиологических процессов в растениях. Поэтому изучение фотосинтеза и дыхания необходимо для направленного воздействия на растения различных факторов физической природы с целью увеличения их продуктивности. Необходимость развития исследований в области фотосинтеза связана еще и с тем, что интенсивность газообмена может служить показателем стойкости растений по отношению к тем или иным факторам внешней среды.

Одним из основных условий жизнедеятельности растительного организма является содержание углекислого газа в воздухе. Углекислый газ (CO_2) с помощью хлорофилла под действием световой энергии превращается в растениях на углеводы.

Поэтому изменение концентрации CO_2 при дыхании листьев овощных культур в замкнутом объёме будет приводить к изменению диэлектрической проницаемости. Контроль функции дыхания растений по изменению величины ДП позволит определить оптимальные параметры физических факторов электромагнитной природы для воздействия на корневую систему растений. В эксперименте параметры статического магнитного и стационарного электрического полей определялись по изменению значения ДП газообмена листьев томатов сорта «Лилос» отнесенного к величине диэлектрической проницаемости воздуха в теплице.

Исходные параметры в атмосфере теплицы составили: содержание углекислоты 0,13 %; температуры 22 °С; интенсивность 60 тыс. лк. Для проведения эксперимента были использованы делянки площадью 1 м², на которых были высажены семена томатов сорта «Лилос» в количестве 6 шт. По углам квадрата были забиты в почву электроды диаметром 18 мм, изготовленные из стали 14Х17Н2. В середине указанного квадрата дополнительно помещался квадрат со стороной 60 см в вершинах, которого в почву были помещены магнитные частицы, создающие величину магнитного поля в пределах от $2 \cdot 10^4$ А/м до $4 \cdot 10^4$ А/м.

После того, как была сформирована крона листьев томатов, были проведены измерения величины ДП газообмена растений. Для этих целей были использованы листья средней массой 8,0 г, которые помещались в листовую камеру установки. Скорость прокачки воздуха по каналам измерительной установки поддерживалась на уровне 0,2 м/с.

Для получения зависимости, связывающей нормированное значение ДП газообмена растений с параметрами статического магнитного и стационарного электрического полей было применено полнофакторное планирование

второго порядка. Значение факторов и их интервалы варьирования приведены в табл. 7.2, 7.3.

При использовании стандартной методики построения планов второго порядка составлены матрицы: планирования экспериментов, расчета коэффициентов регрессии, определения адекватности и результатов обработки данных, которые приведены в приложении А.

Таблица 7.2 -

Значение факторов в эксперименте

Интервал и уровень факторов	Статическое магнитное поле, А/м	Стационарное электрическое поле, В
Нулевой уровень - $x_i = 0$	$3 \cdot 10^4$	70
Интервал варьирования – λ_i	$1 \cdot 10^4$	10
Верхний уровень - $x_i = +1$	$4 \cdot 10^4$	80
Нижний уровень - $x_i = -1$	$2 \cdot 10^4$	60

Таблица 7.3 -

Выходные данные для построения плана второго порядка

Число факторов, К	Число точек ядра	Число звездных точек, N_a	Число нулевых точек, N_0	Звездные точки, а	Число опытов, N
2	4	4	5	1,414	13

После проведения измерений и расчетов было получено уравнение регрессии, связанное с параметрами магнитного и электрического полей.

$$Y = 0,74 + 0,04X_1 + 0,05X_2 + 0,08X_1X_2 + 0,02X_1^2 + 0,065X_2^2 \quad (7.3)$$

где Y – нормированное значение ДП газообмена растений;

X_1 – величина статического магнитного поля;

X_2 – величина стационарного электрического поля.

Проверка значимости коэффициентов регрессии проводилась при уровне значимости $\alpha = 0,01$ по критерию Стьюдента [188]. Все коэффициенты в уравнении (7.1) оказались значимыми.

На основании проверки данного уравнения на адекватность по критерию Фишера [188] сделан вывод, что уравнения описывает реальный процесс и следовательно, позволяют оценить характер влияния каждого из 2 факторов на функцию отклика. Кроме того, стало возможным практическое использование полученной модели для прогнозирования значения выходного сигнала области варьирования параметров x_i .

Для нахождения оптимальных параметров процесса решена система уравнений, полученных приравниванием к нулю значений градиентов компонентов, вычисленных по выражению

$$\frac{\partial Y}{\partial x_i} = b_i + 2b_{ii} + \sum_{j=1}^n b_{ij}x_j = 0, \quad (7.4)$$

где x_i, x_j - кодированное значение фактора, по которому берется производная;

b_i, b_{ii}, b_{ij} - коэффициенты уравнения регрессии.

Для выражения (7.4) получена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial x_1} &= 0,04 + 0,08x_2 + 0,04x_1 = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial x_2} &= 0,05 + 0,08x_1 + 0,065x_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

Решение системы уравнений (7.5) дает следующие значения факторов в оптимальной точке: $x_1=1$; $x_2=-1$, что соответствует таким значениям

натуральных параметров: величина статического магнитного поля $4 \cdot 10^4 \pm 0,05$ А/м, а величина стационарного электрического поля $60 \pm 0,1$ В/м.

7.7 Влияние магнитного и электрического полей на развитие и урожайность тепличных культур

Лабораторные и полевые исследования с тепличными культурами проводили на предприятии «Енергодарський ВП КСП «Тепличний комбінат».

В условиях полевых исследований с целью проверки биометрических характеристик растений фиксировались влажность почвы при помощи динамического рефлектометра, температура почвы, диаметр стебля, вес плодов, водный поток растений, вес корневой системы растений, полевая всхожесть семян.

Обработка почвы, с внесенными семенами тепличных культур томатов и огурцов производилась статическим магнитным полем величиной $4 \cdot 10^4 \pm 0,05$ А/м и стационарным электрическим полем величиной $60 \pm 0,1$ В/м, вызывает индуцированный мутагенез растений, который связан с изменением биохимических процессов в них.

Изменения, происходящие в семенах тепличных культур в свою очередь, приводят к активации их полевой всхожести. Так, в экспериментальных исследованиях контролем служили необработанные магнитным и электрическим полем семена томатов и огурцов в почве. Полученные результаты всхожести семян обрабатывались по Доспехову [189].

На рис.7.18 приводятся результаты действия статического магнитного поля и стационарного электрического поля на всхожесть огурца сорта «Кураж» и томатов сорта «Лилос». В опыте всхожесть семян томата составила 97 %, а в контроле всего 65 %. Таким образом, разность по всхожести между опытом и контролем семян томата составила 32 %.

В опыте с семенами огурцов, всхожесть составила 92 %, а в контрольной группе – 67 %, соответственно разница составила 25 %.

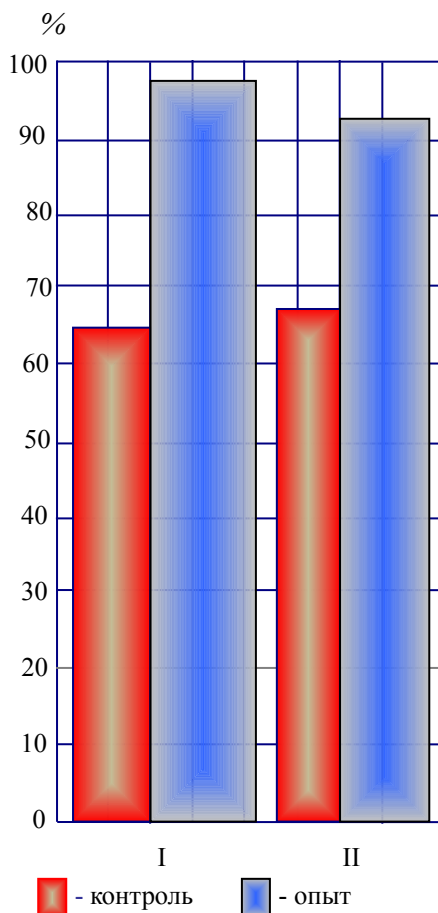
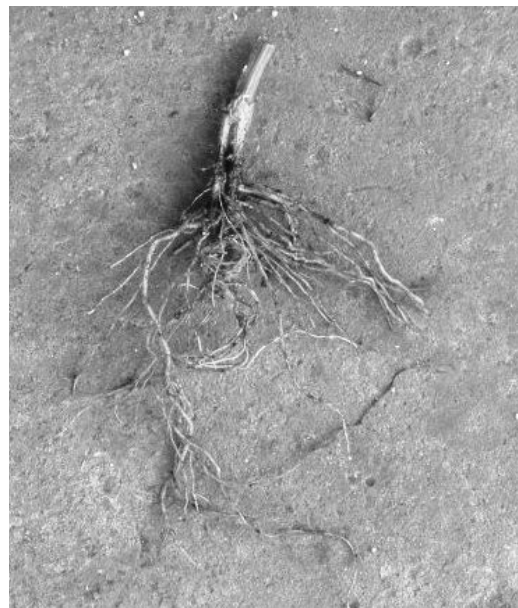


Рис. 7.18. Всхожесть семян томата и огурца, обработанных в почве статическим магнитным полем и стационарным электрическим полем

В результате полученных данных было определено, что у опытных растений диаметр стебля и плодов был больше на 15 % в сравнении с контролем. Кроме того, водопоглощающая способность при одинаковых параметрах почвы (химический состав, влажность, температура) оказалась выше на 19 %, а вес корневой системы был больше на 30 % (рис.7.19; рис.7.20).



а) эксперимент



б) контроль

Рис. 7.19 Корневая система огурцов сорта «Кураж»



а) эксперимент



б) контроль

Рис. 7.20. Определение параметров корневой системы томатов сорта «Лилос»

В таблицах 7.4 - 7.6 приведены данные о структуре урожайности томатов сорта «Лилос» и огурцов сорта «Кураж».

Таблица 7.4 –

Структура пестичных цветков огурцов и томатов

Вид тепличной культуры		Число тепличных цветков, шт.			% к контролю
		на главном побеге	на боковых побегах	Всего на растение	
Огурцы сорта «Кураж»	3,1 ±0,4	4,2 ±0,4	3,1 ±0,4	7,3 ±0,7	349
	13,9 ±1,2	18,9 ±0,4	3,1 ±1,1	32,8 ±2,3	
Томаты сорта «Лилос»	6,2 ±0,5	3,1 ±0,4	7,1 ±0,4	13,3 ±0,9	332
	21,7 ±1,0	3,1 ±0,4	24,8 ±1,2	46,5 ±2,2	

Из результатов (табл.7.4) следует, что воздействие магнитного и электрического полей на корневую систему тепличных культур (огурцов и томатов) приводит к увеличению пестичных цветов по отношению к контролю на 300-400 %.

Влияние статического магнитного и стационарного электрического полей на урожайность томатов сорта «Лилос» приведена в табл. 7.5 (рис.7.21), а огурцов сорта «Кураж» в табл.7.6 (рис. 7.22).

Таблица 7.5 -

Результаты урожайности томатов сорта «Лилос»

Варианты		Апрель	Май	Июнь	Июль	Выход продукции
Опыт	кг/м ²	9,6	12,5	12,3	8,5	42,9 ±1,0
	кг	7680	1000	9840	6800	34320
Контроль	кг/м ²	3,4	4,3	4,2	2,9	14,8 ±1,1
	кг	2720	3440	3360	2320	11840
% контроля		182,3	190,7	192,8	193,1	189,8



а) эксперимент



б) контроль

Рис. 7.21 Плоды томатов сорта «Лилос»

Таблица 7.6 -

Результаты урожайности огурцов сорта «Кураж»

Варианты		Апрель	Май	Июнь	Июль	Выход продукции
Опыт	кг/м ²	11,7	20,6	8,1	0,55	40,9 ± 1,0
	кг	9360	16480	6480	440	32760
Контроль	кг/м ²	4,1	7,4	2,9	0,2	14,6 ± 1,1
	кг	3280	5928	2240	160	11608
% контроля		185,3	178,4	179,3	175,0	182,2



а) эксперимент



б) контроль

Рис. 7.22. Определение параметров плодов огурцов сорта «Кураж»

Результаты урожайности томатов сорта «Лилос» показали, что влияние магнитного и электрического полей на корневую систему растений приводит к увеличению урожайности томатов по отношению к контролю в среднем на 180-190 %. На рис. 7.23 приведен общий вид теплицы площадью 800 м².



а) общий вид теплицы (томаты)



а) общий вид теплицы (огурцы)

Рис.7.23. Условия проведения натуральных экспериментов

Воздействие статического магнитного поля величиной $4 \cdot 10^4$ А/м и стационарного электрического поля величиной 60 В/м на корневую систему огурцов повышает их урожайность до 175-185 % и сокращает сроки созревания на 4 дня по сравнению с контролем.

Результаты лабораторных и полевых испытаний показали, что указанные воздействия на корневую систему тепличных культур влияют на внутриклеточные процессы в растительных системах: на окислительные и ферментативные реакции, а также на процессы, протекающие на молекулярном уровне.

Таким образом, суммарный эффект от обработки выражается в улучшении посевных качеств семян в почве, их всхожести, энергии роста, а обработанные растения томата и огурцов характеризовались улучшением количественных показателей её урожайности. Сокращения сроков

созревания за счет максимальной мобилизации потенциальной продуктивности растений подтвердили эффективность применения новых электротехнических и магнитных систем активации семян тепличных культур.

Выводы по разделу:

1. Для измерения газообмена растений тепличных культур по изменению диэлектрической проницаемости следует использовать резонаторную электронную систему с параметрами:

- частота генератора 70 ГГц;
- относительная нестабильность частоты 10^{-7} ;
- добротность измерительного лейкосапфирового резонатора 7800 для параметров: радиус $R = 19$ мм; толщина $h = 2$ мм; $\varepsilon_{\perp} = 9,4$; $\varepsilon_{\parallel} = 11,54$; $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-5}$.

2. Для воздействия на семена и корневую систему растений возможно использование установки с характеристиками постоянных магнитов: магнитная индукция, B/B_r - 380 мТл; коэрцитивная сила по индукции, H_{cb} - 285 кА/м; коэрцитивная сила по намагниченности, H_{cj} - 380 кА/м; максимальное энергетическое произведение, B_{Hmax} - 27 кДж/м³; максимальная рабочая температура, T_{max} - до 200 °С.

3. Увеличение урожайности томатов и огурцов в тепличных условиях до 175-190 % по сравнению с контролем, возможно с применением для обработки семян в почве и корневой системы статического магнитного поля напряженностью $4 \cdot 10^4$ А/м и стационарного электрического поля величиной 60 В/м.

4. В результате экспериментальных исследований определено, что повышаются показатели экономической эффективности производства продукции, в частности прибыль от выращивания томатов в расчете на 1 м² составляет 34,4 грн, огурцов - 31,4 грн. Уровень рентабельности

производства продукции составит соответственно 110,3 % и 107,0 %, срок окупаемости дополнительных инвестиций – 1,53 года и 1,55 года.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена научно-прикладная проблема создания научно-технических предпосылок повышения эффективности производства овощных тепличных культур, которая заключается в теоретическом обосновании и экспериментальных исследованиях по созданию электротехнических и магнитных систем в сооружениях защищенного грунта. Это позволило сформулировать следующие выводы:

1. Анализ информационных источников свидетельствует, что урожайность огурцов и томатов защищенного грунта имеет низкие показатели и в среднем составляет 12 ... 15 кг/м². Большая часть продукции не соответствует требованиям качества государственных стандартов, поэтому необходимо внедрение новейших технических решений и технологий. В связи с этим, нужно обеспечить оптимальные условия для развития растений, в частности газообмен как один из основных показателей жизнедеятельности растительных объектов.

Одним из перспективных путей существенного повышения урожайности овощных культур и получения экологически чистой продукции является внедрение электротехнических и магнитных систем с контролем развития растений по величине диэлектрической проницаемости газовой среды. Такие системы построены на основе влияния энергии электрического и магнитного полей на семена и корневую систему тепличных культур, что активизирует внутриклеточные процессы в растительных системах и приводит к повышению качества продукции и урожайности.

2. Для активации развития растительных систем в гетерогенных структурах аналитически обоснована целесообразность использования электротехнической и магнитной систем, которые характеризуются следующими параметрами: штыри располагаются в вершинах квадрата со стороной 1 м, оптимальное расположение электродов постоянных магнитов,

изготовленных из намагниченных частиц диаметром 3 мм, в вершинах квадрата со стороной 0,6 м, при котором напряжение между металлическими штырями в почве должно быть не более 70 В, а смещение растений от оси между электродами – не менее 0,2 м.

3. Установлено, что создание однородного статического магнитного поля напряженностью $4 \cdot 10^4$ А / м в почве обеспечит увеличение продольной скорости питательных веществ в корневой системе тепличных культур на 0,02 ... 0,03 мм / с, что дополнительно обеспечивает увеличение массы корневой системы огурцов и томатов до 30%, увеличение количества лепестковых цветков огурцов – до 349%, томатов – до 332% относительно контрольной группы.

4. Исследованиями условий работы открытых цилиндрических диэлектрических резонаторов доказано, что для контроля процессов развития растений по величине диэлектрической проницаемости газовой среды необходимо применять резонаторы, возбуждаемые на колебаниях «шепчущей галереи» с добротностью в пределах $10^4 \dots 10^5$, что обеспечивает точность измерения в пределах $\varepsilon - 1 \approx 10^{-6}$, допустимых для данного класса растительных систем.

5. Доказано, что применение преобразователей частоты в системе измерения диэлектрической проницаемости газовой среды с коэффициентами усиления: $K_1 = 10^{-7}$ В / Гц ; $K_2 = 10^2$; $K_3 = 1$; $K_4 = 10^2$; $K_5 = 10^8$ Гц / В; постоянными времени усилителей $T_1 = 10^{-7}$ с ; $T_2 = 10^{-6}$ с ; $T_3 = 0,1$ с позволит обеспечить величину перерегулирования менее 10 %, время установления переходного процесса $0,8 \cdot 10^{-5}$ с и дисперсию погрешности в пределах 10^{-2} , что дает возможность автоматизировать процессы измерения.

6. Предложено использовать диэлектрическую проницаемость газовой среды растений в миллиметровом диапазоне волн как один из основных комплексных параметров оценки процессов развития, установлено, что для измерения с чувствительностью 10^{-6} необходимо применять диэлектрические резонаторы добротностью 10^5 , что позволило разработать электронную систему для измерения газообмена растений.

7. Установлено, что в системе измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений для электронной перестройки частоты в пределах 1,5...2 % следует использовать варакторный диод с крутизной перестройки 10^8 Гц / В, что обеспечивает малые значения кратковременной нестабильности частоты генератора на лавинно-пролетном диоде в пределах 10^{-7} ... 10^{-8} и позволяет выбирать оптимальные режимы его работы.

8. Обосновано, что для измерения газового обмена растений тепличных культур по изменению диэлектрической проницаемости следует использовать резонаторную электронную систему с параметрами: частота генератора – 70 ГГц, относительная нестабильность частоты -10^{-7} , радиус и толщина резонатора $R = 19$ мм; $h = 2$ мм; диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{\perp} = 9,4$; $\varepsilon_{\parallel} = 11,54$, и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-5}$, что дает возможность контролировать процессы развития растений в период вегетации.

9. Доказано, что влияние стационарного электрического и статического магнитного полей с рациональными параметрами приводит к увеличению доступной формы микро - элементов питания растений в почве теплиц: азота N – на 15 мг / кг (9,4...50 %); фосфора P_2O_5 – на 3,2 мг/100 г почвы (3...20 %); калия K_2O – на 50 мг/100 г почвы (17... 50 %) , и повышает выход продукции для огурцов до 40,9 кг/м², томатов – до 42,9 кг/м².

10. Установлены оптимальные параметры статического магнитного поля величиной $4 \cdot 10^4$ А / м и стационарного электрического поля величиной 60 В / м, влияние которых на корневую систему растений увеличивает урожайность томатов и огурцов в тепличных условиях по сравнению с существующей, при этом обеспечиваются нормированные значения газообмена растений как одного из комплексных критериев повышения урожайности овощей.

11. Обосновано, что за счет использования электротехнической и магнитной систем значительно повышаются показатели экономической эффективности производства продукции, в частности прибыль от выращивания томатов в расчете на 1 м² составляет 34,4 грн, огурцов – 31,4 грн. Уровень рентабельности производства продукции составит

соответственно 110,3 % и 107,0 %, срок окупаемости дополнительных инвестиций – 1,53 года и 1,55 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярошенко П. Е. Электрическое и магнитное воздействие при переработке с.-х. продукции / П. Е. Ярошенко, Б. С. Монахов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №4. – С. 27 – 28.
2. Разделение семян огурца на электростатическом триере / В. В. Шмигель, Т. Н. Стерхова, А. В. Григорьев, Н. Ф. Кондратьев // Картофель и овощи. – 2003. – №1. – С. 9 – 12.
3. Тарушкин В. М. Изменение преобразования электрического поля в процессе диэлектрической сепарации семян сои / В. М. Тарушкин // Аграрная наука. – 2000. – №1. – С. 29 – 32.
4. Лубников С. И. Эффективность диэлектрического сепарирования при переработке семян овса / С. И. Лубников // Аграрная наука. – 2000. – №11. – С. 23 – 24.
5. Тарушкин В. И. Новые электросепараторы семян / В. И. Тарушкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – №4. – С. 32 – 33.
6. Тарушкин В. И. Определение характеристик рабочих органов диэлектрических сепараторов семени / В. И. Тарушкин, К. А. Трофимов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – №6. – С. 28 – 30.
7. Казимирчук Д. А. Совершенствование диэлектрических сепараторов / Д. А. Казимирчук // Техника в сельском хозяйстве. – 1996. – №3. – С. 27 – 28.
8. Тарушкин В. И. Воздействие пондеромоторных сил на семена при сепарировании / В. И. Тарушкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – №12. – С. 35 – 39.

9. Леонов В. С. Признаки делимости семян при электрической сепарации / В. С. Леонов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – №4. – С. 47 – 49.
10. Хацуков С. М. Исследование свойств электроактивированной воды / С. М. Хацуков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №3. – С. 14 – 15.
11. Магнитная обработка питьевой воды в овощеводстве / З. И. Грязнова, В. Н. Шмигель, Т. Н. Стерхова, Д. В. Селиверстов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. - №7. – С. 9 – 10.
12. Ибрагимов М. И. Импульсная магнитная обработка питьевой воды / М. И. Ибрагимов, А. С. Бердишев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – №2,3. – С. 19 - 20.
13. Никитенко Г. В. Математическое моделирование аппаратов магнитной обработки воды / Г. В. Никитенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2003. - №6. - С. 14 - 16.
14. Кисла Л. Направлена дія магнітів / Л. Кисла, В. Попова, С. Попова // Харчова і переробна промисловість. – 2003. – №1. - С. 26 - 28.
15. Зуев В. С. Магнитный сепаратор для сухих сыпучих материалов / В. С. Зуев, В.И. Чарыков // Техника в сельском хозяйстве. - 1992. - №1. - С. 27 - 28.
16. Стародубцева Г. П. Воздействие электромагнитной обработки семян зернового сорго на формирование урожайности / Г. П. Стародубцев, М.Г. Федорищенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №11. – С. 12 – 14.
17. Таранов М. А. Расчет установок для предпосевной электромагнитной обработки семян сорго / М. А. Таранов, М. Г. Федорищенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №11. – С. 23 – 26.
18. Попова В. Промислова магнітна установка / В. Попова, Л. Кисла, П. Кислий [и др.] // Харчова і переробна промисловість. – 2003. – №5. – С. 24 – 25.

19. Павленко С. И. Исследование биоэлектрических явлений в растительных организмах / С. И. Павленко, Г. П. Селезнёв, Ю. Н. Куценко [и др.] // Научно–технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Международной научно–практической конференции. - Минск: НАН Беларуси «Научно–практический центр», 2010. - Т.1. - С. 62 - 66.

20. Умарова Г. Я. Солнечная фруктосушилка с автоматической системой управления / Г. Я. Умарова, Ю. Г. Тюрин [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – №1. – С. 9 – 10.

21. Абидов Т. З. Гелиофруктосушильная установка / Т. З. Абидов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – №9. – С. 53.

22. Камилов О. С. Гелиоустановка для сушки сельхозпродуктов / О. С. Камилов, М. Р. Назаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – №9. – С. 54 – 55.

23. Скитенко М. А. Гелиосушилки для растениеводческой продукции / М. А. Скитенко, Л. П. Данилевская // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1990. – №7. – С. 24 – 25.

24. Мамедов М. А. Применение солнечного коллектора для досушивания сена / М. А. Мамедов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – №9. – С. 59 – 60.

25. Потапов К. Б. Исследование ИК-источников излучения / К. Б. Потапов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – №5. – С.15 – 17.

26. Бароев Т. Р. Станок для ИК и УФ облучения поросят с локальной аэроионизацией / Т. Р. Бароев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №9. – С. 8 – 9.

27. Бароев Т. Р. Автоматическое управление облучением молодняка животных / Т. Р. Бароев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №1. – С. 14 – 15.

28. Куценко Ю. М. Магнітогідродинамічне сортування сільськогосподарської продукції з використанням енергії ЕМП [Електронний

ресурс] / Ю.М. Куценко, М. І. Лукашенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету - Мелітополь: Електронне наукове фахове видання ТДАТУ. - 2011. - Вип. 1, т.2. – С. 132 - 141. - Режим доступу:

<http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/nvtdau/index.html>.

29. Винницкий С. Повышение эффективности ИК-обогрева порослят / С. Винницкий // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №7. – С. 18 – 19.

30. Кирсанов В. В. Повышение эффективности рабочих пастеризационно–охладительных установок / В. В. Кирсанов, В. И. Кравченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №2. – С. 18 – 19.

31. Переробка сільськогосподарської продукції на основі технології інфрачервоного сушіння // Пропозиція. – 1996. – №10. – С. 62 – 63.

32. Клямкін М. За ІЧ-сушінням – майбутнє / М. Клямкін // Пропозиція. – 2000. – №1. – С. 88 – 89.

33. Ничик О. Вплив УЗК та УФО на мікробіотичну забрудненість цукрових розчинів / О. Ничик, Н. Штангеева, В. Носенко // Харчова і переробна промисловість. – 2002. – №4/5. – С. 24 – 25.

34. Кондратьева Н. П. Влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы на урожайность / Н. П. Кондратьева // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №12. – С. 17.

35. Скрипник М. Електротехнологія опромінювання рослин-донорів та рослин-регенерантів / М. Скрипник // Харчова і переробна промисловість. – 2002. – №10. – С. 18 – 20.

36. Ляпин В. Г. Поглощение электромагнитной энергии в растительной ткани / В. Г. Ляпин, А. И. Инкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – №11. – С. 6 – 8.

37. Щербаков К. Н. Стимуляция ростовых процессов растений низкоэнергетическим магнитным полем / К. Н. Щербаков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. – №7. – С. 26 – 29.
38. Пахомов В. И. Тепловая обработка фуражного зерна СВЧ-энергиями / В. И. Пахомов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №5. – С. 14 – 16.
39. Зубец М. В. Применение волн микроволнового диапазона в сельском хозяйстве / М. В. Зубец. – К.: Аграрная наука, 1996. – 162 с.
40. Филонова Г. Л. Влияние СВЧ-обработки на микрофлору концентратов из растительного сырья / Г. Л. Филонова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1996. – №2. – С. 37 – 38.
41. Косолапова Л. Мікрохвильова обробка екстрактів / Л. Косолапова // Харчова і переробна промисловість. – 1997. – №3. – С. 26 – 27.
42. Губиев Ю. К. Микроволновые процессы и техника в пищевой теплотехнологии / Ю. К. Губиев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 1995. – №3. – С. 39 – 44.
43. Бельский А. И. Магнитно-лазерная технология в растениеводстве / А. И. Бельский, А. Н. Плавинская // Зерновое хозяйство. – 2003. – №1. – С. 10 – 12.
44. Гордеев А. С. Обработка яблок растворами солей и лазерным излучением перед хранением / А.С. Гордеев // Техника в сельском хозяйстве. – 1999. – №3. – С. 17 – 19.
45. Дмитриев И. И. Предпосадочное гамма-облучение семенных клубней и влияние на урожай, товарное качество и пищевую ценность картофеля / И. И. Дмитриев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – №8. – С. 26 – 28.
46. Гольцова Л. М. ЭГЭ – новое в сельском хозяйстве / Л. М. Гольцова. – М.: Агропромиздат, 1987. – 111 с.
47. Воротников И. Л. Экономические аспекты электротехнологий в перерабатывающих отраслях / И. Л. Воротников, Ю. Н. Глубокий, Б. С.

Монахов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №4. – С. 16 – 17.

48. Баев В. И. Энергетическая оценка электротехнологий в растениеводстве / В. И. Баев, И. Ф. Бородин, Е. Н. Живописцев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – №4. – С. 8 – 11.

49. Бородин Н. Ф. Механизация и автоматизация сельскохозяйственного производства / Н. Ф. Бородин, В. П. Горячкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – №5. – С. 13 – 17.

50. Тарасенко В. В. Гидродинамическое сортирование плодов томата по степени зрелости / В. В. Тарасенко, В. П. Медведев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1986. – №11. – С. 29 – 30.

51. Куценко Ю. М. Застосування енергії ЕМП в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції [Електронний ресурс] / Ю. М. Куценко, М. І. Лукашенко// Наукові доповіді НАУ. – К., – 2006. – Вип.1. – С. 1 – 15. - Режим доступу :

<http://www.nbuv.gov.ua/e-journals/nd/2006-1/06kumpap.html>.

52. Каменир Э. А. Активирование прорастания семян физическими воздействиями / Э. А. Каменир // Вестник Челябинского агроинженерного университета. – Челябинск, 1994. – Т.6. – С. 1 – 108.

53. Либберт Э. Физиология растений / Э. Либберт; пер. с нем. – М.:Мир, 1976. – 564 с.

54. Куварин В. В. Воздействие физических факторов на семена и урожай / В. В. Куварин // Селекция и семеноводство. – 1985. – №2. – С. 45 – 52.

55. Каменир Э. А. Использование электронно-ионной технологии в некоторых процессах сельскохозяйственного производства / Э. А. Каменир // Применение аппаратов и средств ЭИТ в семеноводстве и птицеводстве: науч.тр. ЧИМЭСХ – Челябинск, 1989. – С. 67 – 69.

56. Басов А. М. Вопросы дозирования при стимуляции семян физическими воздействиями / А. М. Басов, Э. А. Каменир, В. Б. Файн // Вестник с.х. науки. – 1981. – №6. – С. 109 – 116.

57. Девятков Н. Д. Исследование лазерного излучения – как фактора, изменяющего электрическое состояние растений / Н. Д. Девятков // Проблемы фотоэнергетики растений. – Кишинев, 1975. – С. 142 – 158.

58. Бессонов Л. А. Поглощение рентгеновского излучения оболочками семян пшеницы / Л. А. Бессонов, Э. А. Каменир // Физиология и биохимия культурных растений. – 1991. – Т. 23 - С. 87 – 89.

59. Гуцин В. А. Рентгеновский микроскоп-анализатор «Мир-3» / В. А. Гуцин // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – №2 – С. 193 – 196.

60. Биофизика / Б. Н. Тарусов, В. Ф. Антонов, Е. В. Бурлакова [и др.] – М.: Высш. шк. – 1968. – 467 с.

61. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М., Стройиздат, 1973. – 375 с.

62. Оприлов В. А. К обоснованию участия биоэлектрических потенциалов в передвижении веществ у высших растений / В. А. Оприлов, С. В. Мичурин // Физиология растений. – 1973. – № 3(20). – С. 451 – 461.

63. Мартыненко А. И. Идентификация растительных биосистем с использованием информации от растений: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 / А. И. Мартыненко. – К., 1993. – 26 с.

64. Шогенов Ю. Х. Малоэнергоёмкие режимы работы электромагнитной стимуляции растений / Ю. Х. Шогенов: автореф. дис... канд. техн. наук / Ю. Х. Шогенов; ВИЭСХ. – М., 1989. – 18 с.

65. Shabala S. N. Leaf temperature kinetics measure plant adaptation to extreme high temperatures / S. N. Shabala // Aus. Y. Plant Physiol. – Vol. 23. – P. 442 – 452.

66. Біофізика: підручник / П. Г. Костюк, В. Л. Зима, І. С. Магура [та ін.]; за ред. П. Г. Костюка. – К.: Обереги, 2001. – 544 с.

67. Куценко Ю. М. Біоелектричні явища у рослинних організмах / Ю.М. Куценко, Г. П. Селезньов, Г.І. Олійник // Науковий вісник НАУ. – К., 2005. – Вип. 91. – С. 25 – 30.
68. Куценко Ю. Н. Распределение потенциалов в корнеобитаемой среде / Ю. Н. Куценко // Питання електрифікації сільського господарства: збірник наукових праць ХДТУСГ. – Харків, 1998. – С. 131 – 136.
69. Коган А. Б. Электрофизиология / А. Б. Коган. – М.: Высшая школа, 1969. – 368 с.
70. Вонсовский С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1031 с.
71. Куценко Ю. М. Визначення опору намагніченості в гетерогенних структурах / Ю. М. Куценко, В. Г. Каніболоцький, Г. П. Селезньов // Праці ТДАТА. - Мелітополь, 2006. – Вип. 40. - С.157 - 162.
72. Юдаев И. В. Электроимпульсный пропольщик: обоснование проектного конструкторского решения: монография/И.В. Юдаев. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – 224 с.
73. Бриллиант В. А. Методы изучения фотосинтеза / В. А.Бриллиант // Тр.Бот. ин-та АН СССР. Сер.VI. Эксперим. бот.– М., 1950. – Вып.7. – С. 358 – 385.
74. Санадые Г. А. Применение титрометрического газоанализатора для определения фотосинтеза и дыхания / Г. А. Санадые // Ботанический журнал. - 1963. – Т.48, №12. – С. 1796 – 1799.
75. Вознесенский В. Л. Методы исследования фотосинтеза и дыхания растений / В. Л. Вознесенский, О. В. Заленский, О. А. Семихатова. – М.: Наука, 1965. – 306 с.
76. Вознесенский В. Л. Измерение интенсивности фотосинтеза кондуктометрическим методом / В. Л.Вознесенский // Биофизика. - 1996. – Т.V, №6. – С. 755 – 757.

77. Силева М. Н. Колориметрический метод определения фотосинтеза и дыхания растений / М. Н. Силева // Бюл. Гл. бот. сада.— 1955. - Вып. 20. — С. 101 — 106.
78. Зеленский О. В. О взаимоотношениях между фотосинтезом и дыханием / О. В. Зеленский // Бот. журнал. - 1957.- Т.42, №11. - С. 1674 — 1690.
79. Зеленский О. В. Обзор методов изучения фотосинтеза наземных растений / О. В. Зеленский // Полевая геоботаника; АН СССР. — М. — Л., 1959- Т.1. - С. 245 — 311.
80. Беликов П. С Опыт применения инфракрасного газоанализатора (ГИП–5) для определения интенсивности фотосинтеза / П. С Беликов, М. В. Моторина, Е. Б. Кураков // Известия ТСХА. — М., 1960. -Вып. 3 (34). - С. 30 — 39.
81. А.с. 482652 СССР, МКИ G01N7/00; A01C1.00. Респирометр для изучения дыхания биологических объектов / Н. С.Пушкарь, В. А.Иткин, Э. Л.Обозный [и др.]. — №1975685; заявл. 12.12.73; опубл.1975, Бюл. №32.
82. Коган Н. А. Сложные волноводные системы / Н. А. Коган, Б. М. Машковцев, К. Н. Нибизов. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 356 с.
83. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах / А. А.Брандт. — М.: Физматгиз, 1964. — 404 с.
84. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот / А. Ф. Харвей. — М.: Сов. радио, 1965. — 783 с.
85. Арбер С. Л. Об условиях, необходимых для наблюдения биологических эффектов микроволн / С. Л. Арбер // Электронная обработка материалов. - 1979. — №1. — С. 70 — 72.
86. Абрамова Н. В. Изучения действия электрофизических факторов на биологические объекты / Н. В. Абрамова // Электронная обработка материалов. - 1980. — №5. — С. 57 — 60.

87. Адаменко В. Я. Диэлектрические свойства водных растворов желатина / В. Я. Адаменко, В. Ф. Проценко, И. А. Рогов // Электронная обработка материалов. - 1980. - №3. - С. 87 – 89.

88. Влияние электромагнитных полей сверхвысокочастотного диапазона на бактериальную клетку / В. В. Игнатов, В. И. Панасенко, А. П. Пиденко [и др.]. – Саратов: СГУ, 1978. – 80 с.

89. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности / М. А. Берлинер. – М.: – Л.: Энергия, 1965. – 488с.

90. Шахпаронов М. И. Методы исследования теплового движения молекул и строение жидкости / М. И. Шахпаронов. – М.: МГУ, 1963. – 323 с.

91. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей / Я. Ю. Ахадов. – М.: Изд. стандартов, 1972. – 412 с.

92. Бензарь В. К. Техника СВЧ влагометрии / В. К. Бензарь. – Минск: Высш школа, 1974. – 349 с.

93. Петров Г. Д. Электрические характеристики почвы и корней сахарной свеклы / Г. Д. Петров, В. Я. Воробейчик // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1984. – №7. – С. 26 – 29.

94. Шахбазов В. Г. Методика изучения дыхания семян / В. Г. Шахбазов. – М.: Колос, 1964. – 16 с.

95. К анализу динамических свойств нелинейных систем с помощью рядов Вольтера / Г. П. Балан, В. А. Ванькевич, М. А. Иванов [и др.] // – Харьков, 1984. – №3. - С. 326 – 384.

96. Сиротин Ю. И. Основы кристаллофизики / Ю.И. Сиротин, М. П. Шаскольская. – М. Наука, 1975. – 680 с.

97. Акивис М. А. Тензорное исчисление / М. А. Акивис, В. В. Гольдберг. – М.: Наука, 1969. – 351 с.

98. Кочин Н. Е. Векторное исчисление и начало тензорного исчисления / Н. Е. Кочин. – М.: Наука, 1965. – 426 с.

99. Куценко Ю. М. Условия определения диэлектрической проницаемости газовой среды растений / Ю. М. Куценко // Вісник

Харківського національного технічного університету сільського господарства. Технічні науки. - Харків, 2010. - Вип. 102. - С. 112 - 116.

100. Сретенский Л. Н. Теория ньютоновского потенциала / Л. Н. Сретенский. – М.–Л.: Гостехиздат, 1946. – 216 с.

101. Ильин В. А. Линейная алгебра / В. А. Ильин, Э. Г. Позняк. – М.: Наука, 1978. – 302 с.

102. Ильинский А. С. Математические модели электродинамики: учебное пособие для вузов / А. С. Ильинский, В. В. Кравцов, А. Г. Свешников. – М.: Высшая школа, 1991. – 224 с.

103. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов: учебное пособие для вузов / Н. С. Пискунов. – М.: Наука, 1985. – Т.2. – 560 с.

104. Кальницкий Л. А. Специальный курс высшей математики для вузов / Д. А. Добротин, В. Ф. Жевержеев. – М.: Высшая школа, 1976. – 390 с.

105. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1999. – 799 с.

106. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М.: Наука, 1978. – 544 с.

107. Юдаев И. В. Основы электротермии: учеб. пособие / И. В. Юдаев, Е. Н. Живописцев, А. М. Глушков. – Волгоград: ВГСХА, 2011. – 160 с.

108. Куценко Ю. Н. Моделирование стационарного электрического поля, взаимодействующего с семенами и корневой системой сельскохозяйственных культур в грунте / Ю. Н. Куценко, А. Е. Пиротти, Е. Л. Пиротти // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит: общегосударственный научно–производственный журнал. – 2011. – №5. – С. 66 – 69.

109. Новицкий Ю. И. Реакция растений на магнитные поля / Ю. И. Новицкий // Реакция биологических систем на магнитные поля. - М.: Наука, 1978. - С. 117–130.

110. Крутецкая З. И. Биофизика мембран: учеб. пособие / З. И. Крутецкая, А.В. Лонский. – СПб: СПбГУ, 1994. – 287 с.

111. Вопросы математического моделирования образования и движения макро– и микроэлементов в системе «почва–растение» / Ю. Н. Куценко, В. Ф. Яковлев, Д. В. Ильин [и др.] // Сборник научных трудов по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности.- СПб: ВИТУ, 2008. - С. 704 - 709.
112. Плонси Р. Биоэлектричество (Количественный подход) / Р. Плонси, Р. Барр. – М.: Мир, 1992. – 366 с.
113. Аккерман Ю. Биофизика / Ю. Аккерман; пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 684 с.
114. Куценко Ю. М. Модель взаємодії феромагнітних частинок в магнітному полі / Ю. М. Куценко // Технічна електродинаміка: науково–прикладний журнал. – К: Інститут електродинаміки НАНУ. - 2004. -Ч. 3. - С.8 - 11.
115. Куценко Ю. Н. Явления намагничивания в гетерогенных структурах / Ю. Н. Куценко, В. Г. Каниболоцкий // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. – Луганськ: СЛУ. - 2005. - Вип.№1(10). – С. 126 – 130.
- 116 Куценко Ю. М. Застосування енергії електромагнітного поля для знешкодження бур'янів / Ю. М. Куценко, Н. А. Саріджа // Механізація та електрифікація сільського господарства. - 2004. - Вип.88. - С. 115 - 119.
117. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 543 с.
118. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стрэттон. – М. – Л.: Гостехиздат, 1948. – 539 с.
- 119 Куценко Ю. М. Залежність магнітострикції від направленості намагнічування гетерогенної системи / Ю. М. Куценко, В. Г. Каніболоцький, Г. П. Селезньов // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України // Вісник. ХДТУСГ. - Харків, 2004. – Вип. 27, Т. 2. – С. 25 - 34.

120. Куценко Ю. М. Дослідження процесів намагнічування модельованих систем / Ю. М. Куценко // Праці ТДАТА. - Мелітополь, 2005. – Вип. 31. - С. 142 – 150.
121. Бай Ши–И. Магнитная газодинамика и динамика плазмы / Ши–И. Бай. – М.: Мир, 1964. – 172 с.
122. Бибилов Ю. Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений: учеб. пособие для ун–тов / Ю. Н. Бибилов. – М.: Высшая школа, 1991. – 306 с.
123. Лапач С. Н. Статистика в науке и бизнесе / С. Н. Лапач, А. В. Чубенко, П. Н. Бабич. – К.: МОРИОН, 2002. – 640 с.
124. А.с. 991828 СССР, МКИ G 01 R 27/ 26. Устройство для измерения параметров диэлектрических материалов / В.Ф. Взятых, Б.И. Рябов, Г.Д. Якухин [и др.] -№3000185; заявл. 03.11.1980; опубл. 07.01.1985.
125. Пат. № 20863 Україна, МПК G01R27/26. Квaziоптичний діелектрометр / О. І. Губін, О. А. Лавринович, М. Т. Черпак. - №u200609294; заявл. 23.08.2006; опубл. 15.02.2007, Бюл. №2.
126. Брагинский В. Б. / В. Б. Брагинский, В. С. Ильченко // Свойства оптического диэлектрического резонатора. Письма в ЖТФ. – 1985. – Т. 11, вып. 7. – С. 247 – 251.
127. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. М.Митры. – М.: Мир, 1977. – 485 с.
128. Шестопалов В. П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур / В. П. Шестопалов. – К.: Наук. думка, 1987. – 283 с.
129. Конторович Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Конторович, В. И. Крылов. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 708 с.
130. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения / Е. Н. Васильев. – М.: Радио и Связь, 1987. – 272 с.
131. Колтон Д. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния / Д. Колтон, Р. Кресс. – М.: Мир, 1987. – 311 с.
132. Самохин А.Б. Интегральные уравнения и интегральные методы в электромагнитном рассеянии / А. Б. Самохин. – М.: Радио и Связь, 1998. – 160с.

133. Хижняк Н. А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики / Н. А. Хижняк. – К.: Наукова думка, 1986. – 280 с.
134. Ильченко М. Е. Теория диэлектрических резонаторов / М. Е. Ильченко, А. А. Трубин. – К.: Либідь, 1993. – 214 с.
135. Абрамович М. Справочник по специальным функциям / М. Абрамович, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
136. Бабич В. М. Асимптотические методы в задачах дифракции коротких волн / В. М. Бабич, В. С. Булдырев. – М.: Наука, 1972. – 456 с.
137. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М.: Наука, 1957. – 581 с.
138. Айзенберг В. С. Антенны УКВ / В. С. Айзенберг, В. Г. Ямпольский, Д. Н. Терешин. – М.: Радио и связь, 1977. – Ч.1. – 381 с.
139. Прокопенко Ю. В. Анизотропный дисковый диэлектрический резонатор с проводящими торцевыми стенками / Ю. В. Прокопенко, Ю. Ф. Филиппов // Техническая физика. - 2002. – Т. 72, вып. 6. – С. 79 – 84.
140. Крылов В. И. Вычислительные методы / В. И. Крылов, В. В. Бобков, П. И. Монастырный. – М.: Наука, 1976. – Т. 1. – 302 с.
141. Егоров В. Н. Метод металлодиэлектрического резонатора в измерениях параметров радиоматериалов / В. Н. Егоров, Е. Ю. Токарева // Измерительная техника. – 2005. – №9. – С. 65–70.
142. Бычков С. И. Стабилизация частоты генераторов СВЧ / С. И. Бычков, Н. И. Буренин, Р. Т. Сафаров. – М.: Сов. радио, 1962. – 376 с.
143. Первачев С. В. Радиоавтоматика / С. В. Первачев. – М.: Радио и связь, 1982. – 295 с.
144. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем / Н. Н.Иващенко. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
145. Капланов М. Р. Автоматическая перестройка частоты / М. Р. Капланов, В. А. Левин. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 320 с.

146. Кварцевые и квантовые меры частоты / И. И. Акулов, В. Я. Барнин, Е. Н. Базаров [и др.]; под ред. Б.И. Макаренко. – М.: МОСССР, 1976. – 412 с.
147. Бескерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бескерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1972. – 767 с.
148. Руководство по проектированию систем автоматического управления / под ред. В. А. Бескерского. – М.: Высш. шк., 1980. – 310 с.
149. Жаблон К. Применение ЭВМ для численного моделирования в физике / К. Жаблон, Ж. К. Симон. – М.: Наука, 1983. – 234 с.
150. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование устройств и систем / И. П. Норенков. – М.: Высш. шк., 1980. – 310 с.
151. Иванов М. А. Оптимизация нелинейных инерционных систем при случайных воздействиях / М. А. Иванов, А.М. Султанов, А. Д. Черенков. – Харьков, 1984. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ 23.05.1984, №3525–84.
152. Статистический анализ и оптимизация следящих систем / ред. А. В. Поцелуев. – М.: Машиностроение, 1977. – 360 с.
153. Пихтелев А. И. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов / А. И. Пихтелев, А. А. Ульянов, Б. П. Фатеев. – М.: Сов. Радио, 1978. – 304 с.
154. Конструирование и расчет полосковых устройств / В. И. Голубев, И. С. Ковалев, Е. Г. Кузнецов [и др.]; под ред. И.С. Ковалева. – М.: Сов. радио, 1974. – 295 с.
155. Коваленко В. Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот / В. Ф. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1974. – 295 с.
156. Prabhu V. Noise performance of abrupt – junction varactor frequency multipliers / V. Prabhu // Proc. IEEE. – 1966. – V.54, № 2. – P. 285.
157. Вальд–Перлов В. М. О минимальном уровне амплитудного шума генераторов на ЛПД / В. М. Вальд–Перлов, Л. С. Сибирцев, А. С. Тигер // Радиотехника и электротехника. – 1977. – Т. 22, № 10. – С. 2186 – 2189.

158. Бугаев А. В. Частотная зависимость модуляционных шумов ГЛД / А. В. Бугаев // Электронная техника. Сер. 1. – 1977. – № 2. – С. 103 – 105.
159. Коновалов Г. Ф. Радиоавтоматика: учебник для вузов / Г. Ф. Коновалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
160. Меськин В. С. Ферромагнитные сплавы / В. С. Меськин. – М – Л.: ОНТИ, 1937. – 139 с.
161. Яновский В. М. Земной магнетизм / В. М. Яновский. – М. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. – 585 с.
162. Куценко Ю. М. Дослідження електрофізичних властивостей моделей / Ю. М. Куценко, В. Г. Каниболоцький // Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки. – Одеса, 2005. - Вип. 28. - С. 159 - 164.
163. Куценко Ю. Н. Магнитострикция гетерогенных структур: монография / Ю. Н. Куценко, В. Г. Каниболоцкий, И. В. Золотаревский. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. - 200 с.
164. Куценко Ю. М. Деякі особливості при намагнічуванні неоднорідних систем / Ю. М. Куценко // Електротехніка і електроенергетика. - 2005. - № 1. - С. 9 - 12.
165. Куценко Ю. М. Магнітні властивості гетерогенних структур / Ю. М. Куценко, В. Г. Каниболоцький // Проблеми сучасної електротехніки. Технічна електродинаміка: науково–прикладний журнал. - К.: Інститут електродинаміки НАН України. - 2006. - Ч. 3. - С. 109 - 113.
166. Куценко Ю. М. Дослідження електрофізичних властивостей робочих органів експериментальної електротехнологічної установки / Ю. М. Куценко, Г. П. Селезньов // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ. - Харків, 2006. - Вип. 43, т. 2. - С. 218 - 223.
167. Куценко Ю. М. Експериментальні вимірювання повного вектору магнітного поля на ділянці досліджень впливу ЕМ поля на гетерогенні структури / Ю. М. Куценко // Проблеми енергозабезпечення та

енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ. - Харків, 2007. - Вип. 57, т. 2. - С. 241 - 246.

168. Куценко Ю. М. Моделювання повного вектору магнітного поля гетерогенної системи / Ю. М. Куценко // Технічна електродинаміка – 2008. - Ч.3. - С. 101 - 105.

169 Куценко Ю. М. Дослідження електротехнологічних параметрів намагнічування робочої моделі електродів для боротьби з бур'янистою рослинністю / Ю. М. Куценко, В. Г. Каніболоцький, Н. А. Саріджа // Праці ТДАТА. - Мелітополь, 2003. - Вип. 15. - С. 50 – 54.

170 Куценко Ю. М. Пристрій для вимірювання магнітних властивостей гетерогенних структур / Ю. М. Куценко // Праці ТДАТА. - Мелітополь, 2006. - Вип. 36. - С. 187 - 193.

171. Куценко Ю.М. Аналіз існуючих методів визначення фосфору і калію у ґрунтах / Ю. М. Куценко, Д. В. Ільїн, Д. М. Коваль // Праці ТДАТА. - Мелітополь, 2006. - Вип. 42. - С. 20 - 26.

172. Куценко Ю. М. Магнітодипольна взаємодія феромагнітних частинок у магнітодіелектрику / Ю. М. Куценко, В. Г. Каніболоцький // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. - 2003. - №1. - С. 24 - 27.

173. Куценко Ю. М. Теоретичне обґрунтування взаємодії електромагнітного поля з макроелементами в ґрунті / Ю. М. Куценко, В. Ф. Яковлев, Д. В. Ільїн [та інш.] // Технічна електродинаміка. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2008. - Ч.4. - С. 7 - 11.

174. Яковлев В. Ф. Исследование воздействия электромагнитного поля на систему «растение–почва» / В. Ф. Яковлев, Ю. Н. Куценко // Известия международной академии аграрного образования. – СПб: МААО, 2009. – С. 11 – 16.

175. Куценко Ю. М. Особливості впливу ЕМП на життєдіяльність гетерогенних структур/ Ю. М. Куценко, А. В. Сухорада // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища:

матеріали VI Міжнародної наукової конференції / КНУ. – К., 2005. – С. 179 – 181.

176. Пиротти Е.Л. Внутренние электромагнитные поля в биообъектах, имеющих n–слойную структуру / Е. Л. Пиротти // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – Харьков: ХГТУРЭ, 1997. – Вып. 106. – С. 154 – 159.

177. Піротті Є. Л. Розсіяння електромагнітних хвиль на тілах правильної форми, розміщених у НВЧ–тракті / Є .Л. Піротті, М. А. Хижняк, В. П. Кравченко // ДАН УРСР. Сер. А: Фізико–технічні та математичні науки. – 1970. – № 5. – С. 464 – 467.

178. Створення раціональної методики вимірювання магнітних властивостей ґрунтового покриву, осадового чохла та кристалічного фундаменту нафтогазоперспективних районів ДДЗ для оптимізації їх комплексних геофізичних досліджень: звіт про НДР / НАК “НАДРА УКРАЇНИ.” – Балаклія, 2006 . – 248 с.

179. Толстой М. И Основы геофизических методов разведки / М. И. Толстой, Ю. В. Тимошин, А. В. Сухорада [и др.]. – К.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

180. Основы научных исследований в агрономии/В.Ф. Моисейченко, М.Ф. Трифонова, А.Х. Заверюха, В.Е. Ещенко. – М.: Колос, 1996. – 336 с.

181. Кальницкий Л. А. Специальный курс высшей математики / Л. А. Кальницкий, Д А. Добротин, В. Ф. Жевержеев. – М.: Высшая школа, 1976. – 389 с.

182. Хижняк Н. А. Применение интегральных уравнений электродинамики к решению дифракционных задач / Н. А. Хижняк // Ученые записки ХГУ. Труды радиофизического факультета. – Харьков, 1957. – Т.2. – С. 13 – 32.

183. Карманов В. Г. Исследование взаимосвязи фотосинтеза и дыхания корней у *Perilla osymoides Labiatae* / В. Г. Карманов, Е. В. Соловьев, Г. А. Османова–Дунаева // Ботанический журнал. – 1982. – Т. 67, №6. – С. 761 – 770.

184. Olszyk D. M. Joint action of O_3 and SO_2 in modifyind plant gas exchange / D. M. Olszyk, D. T. Tinqey // Plant physiol. – 1986. – Vol. 82. – P.401 – 405.

185. Лайск А. Х. Кинетика фотосинтеза и фотодыхания C_3 -растений / А. Х. Лайск. – М.: Наука, 1977. – 195 с.

186. А.с. 654886 СССР, МПК G01N23/24. Сверхвысокочастотный резонансный влагомер // Ю. А. Скрипник, А. И. Лавриненко, Р. Т. Франко [и др.] – №2487435; заявл. 19.05.1977; опубл. 30.03.1979.

187. А.с. 983581 СССР, МПК G01R27/26. Автоматический измеритель изменений составляющих комплексной диэлектрической проницаемости и времени релаксации / А. А. Потапов, С. Н. Войтов. №3318702; заявл. 17.07.1981; опубл. 23.12.1982; Бюл. №47.

188. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.

189. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Колос, 1968. – 335 с.

190. Аграрна економіка: підручник / Д. К. Семенда, О. І. Здоровцов [та інш.]; за ред. Д. К. Семенди та О. І. Здоровцова. – Умань: УДАУ, 2005. – 318с.

191. Куценко Ю. М. Обґрунтування параметрів функціональної схеми пристрою для вимірювання діелектричної проникності газового середовища рослин / Ю. М. Куценко // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. - Дніпропетровськ, 2010.– Вип. №1 (2010). - С. 92 - 95.

192. Куценко Ю. М. Аналіз якості роботи електронної системи контролю дихання рослин / Ю. М. Куценко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / КНТУ.- Кіровоград, 2010. - Вип. 23. - С. 194 - 199.

193. Куценко Ю. М. Аналіз методів і пристроїв для вимірювання функції газообміну біологічних об'єктів / Ю. М. Куценко // Праці ТДАТУ. - Мелітополь, 2010. - Вип. 10, т.4. - С. 143 - 147.

194. Куценко Ю. Н. Исследование открытого цилиндрического резонатора для контроля изменения диэлектрических параметров внешней среды / Ю. М. Куценко, М. Л. Лисиченко, О. Д. Черенков // Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. - Харків, 2010. - Вип. 101. - С. 63 - 66.

195. Куценко Ю. М. Моделювання роботи генератора ЛПД/ Ю. М. Куценко // Моделирование технологических процессов в АПК // Праці ТДАТУ. - Мелітополь, 2010. - Вип.10, т. 8. - С. 239 - 250.

196. Куценко Ю. М. Дослідження дії енергії геомагнітного поля на гетерогенні структури / Ю. М. Куценко // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: вісник ХНТУСГ. – Харків, 2005. – Вип.37, т. 1. - С. 289 - 293.

197. Куценко Ю. М. Дослідження впливу геомагнітного поля на життєдіяльність рослинних об'єктів гетерогенних структур / Ю. М. Куценко, Г. П. Селезньов // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища: матеріали Всеукраїнської наукової конференції / КНУ. – К., 2006. – С. 213 – 214.

198. Куценко Ю. М. Моделювання процесів магнітодипольної взаємодії елементів в гетерогенних структурах/ Ю. М. Куценко, А. О. Кашкарьов // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища: матеріали VIII Всеукраїнської наукової конференції / КНУ. – К., 2007. – С. 170 – 172.

199. Куценко Ю. М. Аналіз впливу зовнішніх статичних магнітних полів на рух поживних речовин в кореневій системі рослин / Ю. М. Куценко// Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища: матеріали X Міжнародної наукової конференції / КНУ. – К., 2012. – С. 94 – 96.

200. Кондратенко П. В. Методика економічної та енергетичної оцінки типів плодоягідних насаджень, помологічних сортів і результатів технологічних досліджень у садівництві / П. В. Кондратенко, Г. А. Борук [та

інш.]; за ред.. О.М. Шестопаля. – К.: Інститут садівництва УААН, 2002. – 131 с.

201. Куценко Ю. Н. Расчет экономической эффективности при внедрении электромагнитных технологий в сооружениях защищенного грунта / Ю. Н. Куценко // Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. - Харків, 2012. - Вип. 129. - С. 79 - 81.

202. Куценко Ю. Н. Анализ методов и устройств для измерения функций газообмена биологических объектов / Ю. Н. Куценко, О. Н. Речина // Вестник Нижегородского инженерно-экономического института. Сер. Технические науки. – Княгинино, 2012. - С. 37 - 44.

203. Куценко Ю. Н. Определение параметров магнитного и электрического полей для повышения урожайности и качества тепличных культур / Ю. Н. Куценко, В. Ф. Яковлев // Материалы международной научно-производственной конференции / Бел. ГСХА. – Белгород, 2012. – С. 176-179.

204. Баланси та споживання основних продуктів харчування населенням України; за ред. Ю.М. Остапчука. – К.: Державний комітет статистики, 2010. – 54 с.

205. Програма забезпечення продовольчої безпеки Запорізької області на 2011-2015 роки (перший етап: 2011-2012 роки) [Електронний ресурс] .- Запоріжжя, 2011. – 82 с. Режим доступу: <http://www.zoda.gov.ua/images/article/original/000018/18936/programa-prod-bezpeki-2011---2015.pdf>.

206. Томати свіжі. Технічні умови. ДСТУ 3246-95. – [Чинний від 1997. 01.01.]. – К.: Держстандарт України, 1997. – 18 с. – (Національний стандарт України).

207. Огірки свіжі. Технічні умови. ДСТУ 3247-95. – [Чинний від 1997. 01.01.]. – К.: Держстандарт України, 1997. – 21 с. – (Національний стандарт України).

208. Воздействие стационарных электрических полей на семена и корневую систему сельскохозяйственных растений / Ю. Н. Куценко, В. Ф.

Яковлев, Г. В. Степанчук, Е. П. Ключка // Вісник СНАУ. – 2012. - № 6(24).- С.112-116.

209. Куценко Ю. Н. Прикладные аспекты влияния ЭМП на гетерогенные системы [Электронный ресурс]: монография / Ю. Н. Куценко, В. Г. Каниболоцкий, И. В. Золоторевский. - Heinrich-Bocking-Str., Deutschland / Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. - 293 с. Режим доступа:

210. Куценко Ю. Н. Моделирование электрического поля в грунте, созданного системой заряженных металлических штырей /Ю. Н. Куценко // Вестник аграрной науки Дона. - 2013. – № 1(21). - С.54-62.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТА С ПАРАМЕТРАМИ СТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО И СТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ

Полином, используемый для определения процесса в данном плане имеет следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 \quad (\text{A.1})$$

где Y – выходной параметр;

X_i – факторы, определяющие протекание процесса;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – эмпирически определяемые коэффициенты.

Таблица А.1 -

Матрица планирования эксперимента

Уровни опытных точек	Номер опыта	Факторы	
		X_1	X_2
Ядро плана	1	-	-
	2	+	-
	3	-	+
	4	+	+
Звездные точки	5	$-\alpha$	0
	6	$+\alpha$	0
	7	0	$-\alpha$
	8	0	$+\alpha$
Центр плана	9	0	0
	10	0	0
	11	0	0
	12	0	0
	13	0	0

Расчетная матрица для $K=2$ приведена в табл.А.2. Расчет коэффициентов регрессии и расчетная матрица для определения построчной суммы квадратов и дисперсии адекватности приведены в табл.А.3, А.4, А.5.

Таблица А.2 -

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$	Y_1	Y_2	$\bar{Y}$	S_n^2
1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	0,815	0,835	0,825	0,0002
2	+1	+1	+1	+1	+1	-1	0,755	0,735	0,745	0,0002
3	+1	-1	+1	+1	+1	-1	0,765	0,725	0,745	0,0008
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,995	0,975	0,985	0,0002
5	+1	-	0	2	0	0	0,744	0,724	0,734	0,0002
6	+1	+1,41	0	2	0	0	0,966	0,946	0,956	0,0002
7	+1	0	-	0	2	0	0,76	0,80	0,78	0,0008

Матрица для расчета коэффициентов регрессии

№ опыта	$X_1 \bar{Y}_n$	$X_2 \bar{Y}_n$	$X_1 X_2 \bar{Y}_n$	$X_1^2 \bar{Y}_n$	$X_2^2 \bar{Y}_n$	$\bar{Y}_n$
1	-0,825	-0,825	0,825	0,825	0,825	0,825
2	+0,745	-0,745	-0,745	0,745	0,745	0,745
3	-0,745	0,745	-0,745	0,745	0,745	0,745
4	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
5	-1,035	0	0	1,468	0	0,734
6	1,267	0	0	1,712	0	0,856
7	0	-1,100	0	0	1,560	0,780
8	0	1,311	0	0	1,860	0,930
9	0	0	0	0	0	0,730
10	0	0	0	0	0	0,740
11	0	0	0	0	0	0,750
12	0	0	0	0	0	0,730
13	0	0	0	0	0	0,750
Σ	0,307	0,371	0,320	6,480	6,720	14,198

Расчет коэффициентов регрессии и проверка их значимости

№	Наименование величины	Расчетная формула	Расчетные значения
1	2	3	4
1	Сумма квадратов построенных дисперсий	$S_n^2 = \frac{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2}{2}$	
2	Сумма квадратов ошибок	$S_E = \sum_{n=1}^{N=20} S_n^2$	0,0038
3	Повторность опытов	γ	2
4	Количество опытов	N	13
5	Уровень значимости	α	0,05
6	Расчетное значение критерия Кохрена	$G_P = \frac{S_n^2 \max}{S_E}$	0,21
7	Табличное значение критерия Кохрена	G_T при $\alpha=0,05; N=13; f=\gamma-1=1$	0,47
8	Проверка воспроизводимости опытов	$G_P < G_T$	0,21 < 0,47
	Коэффициенты	$b_0 = \delta'_0 \sum_{n=1}^{N=20} \bar{y}_n - \delta''_0 \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{y}_n$	$b_0=0,79$
9	Уравнение регрессии	$b_{ii} = \delta'_{ii} \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{y}_n +$ $+ \delta''_{ii} \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N x_{in}^2 \bar{y}_n - \delta'''_{ii} \sum_{n=1}^N \bar{y}_n;$ $\delta'_{ii}=0,125; \delta''_{ii}=0,01875; \delta'''_{ii}=0,1$	$b_{11}=0,02$ $b_{22}=0,013$
		$\delta_i = -\delta_i \sum_{n=1}^N x_{in} \bar{y}_n; \delta_i = 0,125$	$b_1=0,04$ $b_2=0,05$
		$\delta_{ij} = -\delta_{ij} \sum_{n=1}^N x_{in} x_{jn} \bar{y}_n; \delta_{ij} = 0,25$	$b_{12}=0,08$
10	Дисперсия воспроизводимости	$S_y^2 = \frac{S_E}{N}$	0,000292

1	2	3	4
11	Дисперсия коэффициентов регрессии	$S_{bo}^2 = y_o S_y^2; y_o = 0,2$	0,0000584
		$S_{bi}^2 = y_{ii} S_y^2; y_{ii} = 0,125$	0,0000365
		$S_{bij}^2 = y_{ij} S_y^2; y_{ij} = 0,25$	0,000073
		$S_{bi}^2 = y_i S_y^2; y_i = 0,125$	0,0000365
12	Табличное значение критерия Стьюдента	t_p при $\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0,05 \\ f_2 = N - g - 1 \end{array} \right.$	2,16
13	Условия значимости коэффициентов уравнения регрессии	$ b_0 \geq S_{b0} \cdot t_p$	0,0165
		$ b_i \geq S_{bi} \cdot t_p$	0,012
		$ b_{ii} \geq S_{bii} \cdot t_p$	0,012
		$ b_{ij} \geq S_{bij} \cdot t_p$	0,018
14	Остаточная сумма квадратов	$S_{обц}^2 = \sum_{n=1}^N (\bar{y}_n - \bar{y}_n)^2$	0,0018
15	Частота	$f_{ao} = N - \frac{(K+2)(K+1)}{2} - (N_0 - 1)$	4
16	Остаточная сумма квадратов в центре	$S = \sum_{n=1}^{N_0} (\bar{y}_{on} - \bar{y}_{on})^2$	0,001
17	Ошибка опыта при рототабельном планировании	$S_0^2 = \frac{S}{N_0 - 1}$	0,00033
18	Разница дисперсий	$S_{обц} - S$	0,0008
19	Дисперсия адекватности	$S_{ao}^2 = \frac{S_{обц} - S}{f_{ao}}$	0,0002
20	Расчетное значение критерия Фишера	$F_P = \frac{S_{ao}^2}{S_0^2}$	0,6
21	Табличное значение критерия Фишера	F_T при $\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0,05; f_1 = N - g = 4 \\ f_2 = N - g - 1 \end{array} \right.$	3,179
22	Условие проверки адекватности модели	$F_P < F_T$	0,6 < 3,179

Таблица А.5 -

Матрица для расчета адекватности модели

№ опыта	b_0	$b_1 X_1$	$b_2 X_2$	$b_{12} X_1 X_2$	$b_{11} X_1^2$	$b_{22} X_2^2$	$\bar{y}_n$	$\bar{y}$	$(\bar{y}_n - \bar{y})^2$
1	0,74	-0,04	-0,05	0,08	0,02	0,85	0,815	0,825	0,0001
2	0,74	0,04	-0,05	-0,08	0,02	0,065	0,735	0,745	0,0001
3	0,74	-0,04	0,05	-0,08	0,02	0,065	0,755	0,745	0,0001
4	0,74	0,04	0,05	0,08	0,02	0,065	0,995	0,985	0,0001
5	0,74	-0,056	0	0	0,04	0	0,724	0,734	0,0001
6	0,74	0,056	0	0	0,04	0	0,836	0,856	0,0004
7	0,74	0	-0,07	0	0	0,13	0,80	0,780	0,0004
8	0,74	0	0,07	0	0	0,13	0,94	0,930	0,0001
9	0,74	0	0	0	0	0	0,74	0,730	0,001
10	0,74	0	0	0	0	0	0,74	0,74	0
11	0,74	0	0	0	0	0	0,74	0,75	0,0001
12	0,74	0	0	0	0	0	0,74	0,73	0,0001
13	0,74	0	0	0	0	0	0,74	0,75	0,0001
Σ									0,0018

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

АКТЫ И ПРОТОКОЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

INCLUDEPICTURE ".../Temp/FineReader11/media/image1.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE ".../Temp/FineReader11/media/image1.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE ".../Temp/FineReader11/media/image1.jpeg" * MERGEFORMAT



МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ

УкрНДІспецсталь

Український державний науково-дослідний інститут
 спеціальних сталей, сплавів та феросплавів

69000, м. Запоріжжя,
 вул. Патріотична, 74-А
 тел.: 0612 - 334035, 396311
 тел / факс: 0612 - 331136, 336060
 E-mail: USSI@comint.net
 Web: <http://USSI.nm.ru/index-ru.htm>

ЗКПО 00190414
 р/р 26004203775001
 в ЗРУ КБ «Приватбанк»
 МФО 313399
 ІПН 001904108296
 св. № 11784934

Висновок

по дослідженню мікроструктури зразків
 зі сталі 3 ПС, Ст. 45, 14X17H2

Таврійською державною агротехнічною академією для дослі
 подано по одному зразку сталей: 3 ПС, Ст. 45, 14X17H2 від прутків Ø

Після виготовлення подовжніх мікрошліфів зразки сталей 3 ПС і
 були протравлені в 4% спиртовому розчині HNO_3 , а зразок зі ст. 14X17H
 реактиві "Мураками" (10 г червоної кров'яної солі, 10 г їдкого калію,
 води) підігрітому до 60-80 $^{\circ}\text{C}$. Внаслідку травлення виявлені н
 структури, що представлні на рис. 1. Структура зразків сталі 3 ПС (рис.1
 Ст. 45 (рис. 1б) складається з фериту (світлі ділянки) і перліту (темні ді
 Так як у сталі 45 більше вуглецю (45%), ніж у ст. 3 ПС (0,14-0,22), то зі
 Ст. 45 має у своїй структурі більшу кількість перліту. По кількості ф
 перліту зразки зі Ст. 3 ПС і Ст. 45 можливо оцінити за шкалою 7 ГОС
 У сталі 3 ПС співвідношення $\frac{\text{ферит}}{\text{перлит}} = \frac{50}{50}$, а в сталі 45 - $\frac{25}{75}$.

Структура зразка Ст. 14X17H2 (рис. 1 в,г) складається з δ -
 (витягнуті ділянки) та продуктів відпалу мартенситу у вигляді
 ділянок з фериту і дисперсних карбідів. Витягнутість структури обум
 тим, що δ - ферит витягується уздовж вісі злитка при обробці тиском

Заміряно твердість по Бринелю на 3-х зразках: Ст. 3ПС - 134 НВ
 45 - 212 НВ; Ст.14X17H2 - 235 НВ.

Заступник директора
 з наукової праці і ЗЕД, к.т.н.

Зав. лабораторією фізичного
 металознавства, к.т.н.

Керівник групи металографії

Ю.В. Артамоно

Я.І. Спектор

О.А. Щугульна

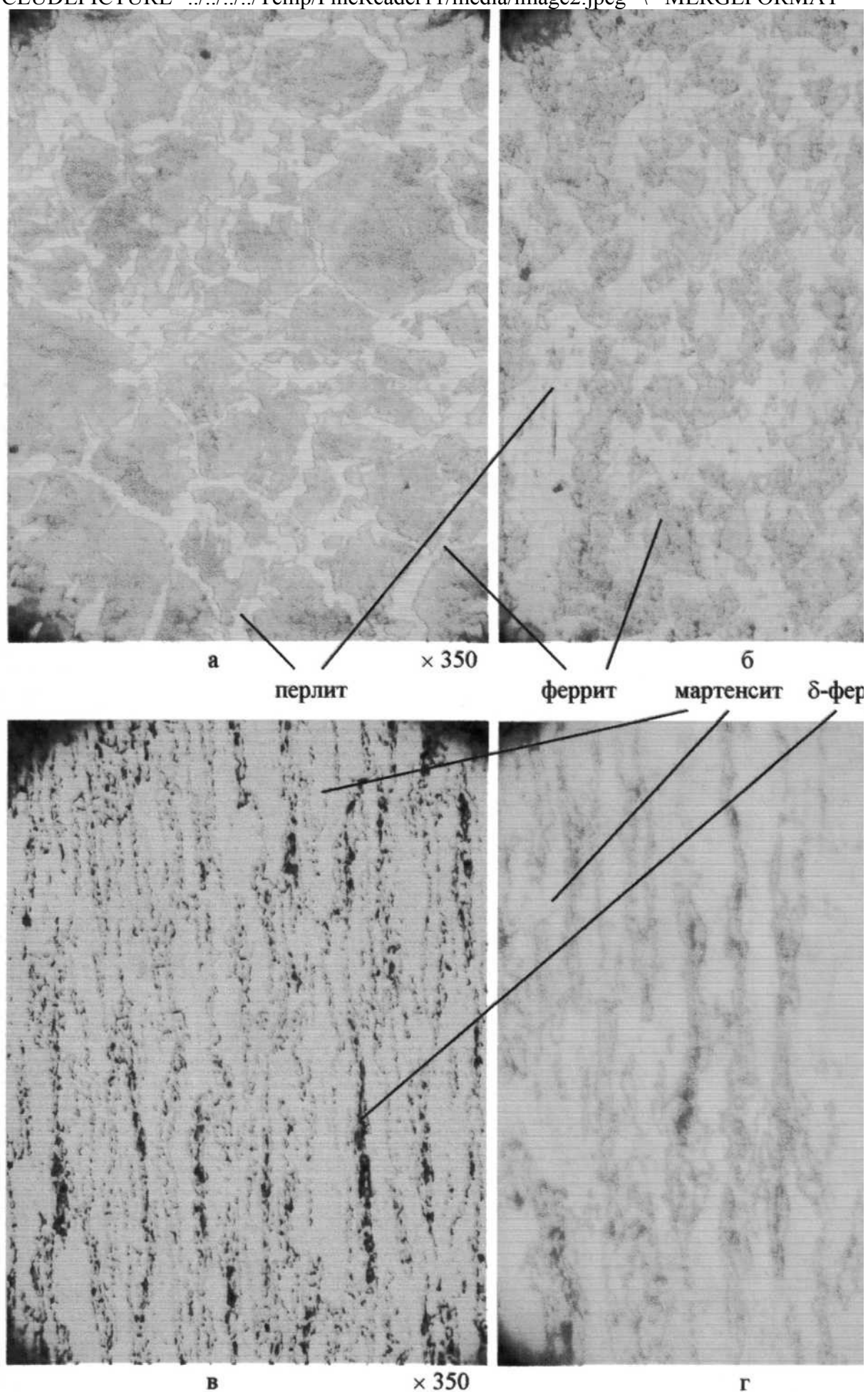


Рис. 1. Микроструктура образцов стали 3 ПС (а), ст. 45 (б), 14Х17Н2 (в),

«Затверджую»

Декан геологічного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
професор, д.г.н. Вижва С.А.

«3» 10

2008 р.



«Затверджую»

декан енергетичного факультету
Таврійського державного
агротехнологічного університету
доцент, к.т.н. В.О. Мунтян

«5»

2008 р.



ПРОТОКОЛ

експериментальних вимірювань повного вектору магнітного поля діл
досліджень при виконанні технологічного процесу впливу енергії магнітно
гетерогенні системи

Загальні відомості

Термін виконання досліджень – вересень 2006 року

Сучасні напрями розвитку електротехнологій представляють собою екологічно чисті та достатньо ефективні способи впливу на життєдіяльність рослинних об'єктів.

Розвиток фізіологічних процесів в рослинах залежить від орієнтації магнітного поля щодо самої рослини. Коріння рослини орієнтується в певному напрямі, відомо [1], що бічне коріння рослин, які ростуть у природних умовах, розташовується в тому ж напрямі північ-південь. Цей напрям знаходиться в площині магнітного меридіана. Залежно від зміни магнітного поля в даному регіоні розвиваються певним чином і рослини.

Відповідно, від орієнтації рослин в магнітному полі, міняється листова, коренева і зернова маса рослин, тому дослідження набувають реального характеру і потребують подальшого вивчення.

Дія слабого постійного магнітного поля на рослини в інтервалі напруженості $0,01 \dots 100$ від H геомагнітного поля проявляється в реакції рослинного об'єкту на напрямок поля, модуль і градієнт його напруженості [2].

Магнітозбурюючими об'єктами є джерела макроскопічного магнітного поля: намагнічені тіла (у ґрунті), провідники, електроди із струмом і рухомі електрично заряджені тіла. Природа цих джерел єдина: магнітне поле виникає в результаті руху заряджених мікрочастинок (електронів, іонів), а також завдяки наявності у мікрочастинок власного магнітного моменту (спину) [3].

Реакція на напрямок магнітного поля включає до себе орієнтаційні рухи рослин або його частин і зміна темпів фізіологічних і біохімічних процесів.

Мета досліджень наукової роботи

Метою досліджень є наукове обґрунтування екологічно-безпечних електротехнологій та технічних засобів впливу магнітного поля на рослини для їх пригнічення, або стимулювання.

Задачі досліджень

- встановити залежності змінювання величини та розподілу повного вектору магнітного поля дослідної ділянки від зміни конфігурації

магнітозбурюючих об'єктів у якості яких використовувались електроди та елементи електротехнологічної установки впливу ЕМП на гетерогенні системи.

Програма досліджень

- експериментальні вимірювання повного вектору магнітного поля дослідної ділянки виконувались згідно методики повнофакторного експерименту;
- на початковому етапі визначався вміст у ґрунті міцнофіксованих форм важких металів;
- отримання експериментальних даних у формі початкових необроблених даних згідно варіантів;
- обробка даних для наступної роботи з пакетом наукової графіки «Surfer».

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Експериментальні вимірювання повного вектору магнітного поля виконувались на території агрогеофізичного стаціонару «Конони» (на території Великопавлівської сільської ради Зінківського району Полтавської області).

Дослідження проведені кафедрою геофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка у складі: канд. геол.-мін. наук доцента Сухоради А.В., аспіранта Хоменка Р.В., та кафедрою «Електропостачання сільського господарства» Таврійського державного агротехнологічного університету у складі канд. техн. наук доцента Куценко Ю.М.

Протокол складений на основі первинних матеріалів випробувань.

Перед початком виконання експериментальних досліджень було визначено вміст у ґрунті міцнофіксованих форм важких металів у хлористоводневій (1Н) витяжці, результати показано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати інструментальних досліджень ґрунту

Найменування металів	Вміст міцнофіксованих форм важких металів у хлористоводневій (1Н) витяжці, мг/кг
Cu	7,700
Co	3,060
Fe	887,730
Ni	8,310
Cd	0,140
Zn	13,340
Mn	400,070
Pb	7,540
Cr	1,330

Таблиця 2 – План проведення експериментальних вимірювань

номер	Природний фон	Електроди зі сталі Ст. 45			Електроди зі сталі 14X17H2			Кільця Гельмгольца	
		без струму	зі струмом		без струму	зі струмом		без струму	зі струмом
			північ	південь		північ	південь		
3	Дискр.								
4	Динам.								
5		Дискр.							
6		Динам.							
7			Дискр.						
8			Динам.						
9				Дискр.					
10				Динам.					
11	Дискр.								
12	Динам.								
13								Дискр.	
14								Динам.	
15									Дискр.
16									Динам.
17	Дискр.								
18	Динам.								
19					Дискр.				
20					Динам.				
21						Дискр.			
22						Динам.			
23							Дискр.		
24							Динам.		
25	Дискр.								
26	Динам.								

- - Дискр. - дискретні вимірювання
- - Динам. - вимірювання у динаміці

Вимірювання повного вектору магнітного поля ділянки досліджень у процесі технологічного процесу впливу енергії магнітного поля на гетерогенні системи виконувались за схемою:

На першому етапі досліджень вимірювався повний вектор магнітного поля природного фону дослідної ділянки (рисунк 1)



Рисунок 1 – Вимірювання природного фону дослідної ділянки

Отримано результати у формі початкових необроблених даних

Таблиця 3 – Дані вимірювань

Пк	Датчик1 [1]	Датчик1 [2]	Датчик1 [3]	Датчик1 [4]	Датчик1 [5]	Датчик2 [1]	Датчик2 [2]	Датчик2 [3]	Датчик2 [4]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	50560,36	50561,96	50561,97	50561,97	50561,95	50564,53	50564,5	50564,52	50564,52
2	50561,35	50561,36	50561,34	50561,33	50561,34	50563,49	50563,5	50563,47	50563,47
3	50560,88	50560,9	50560,85	50560,91	50560,98	50562,99	50563,01	50563	50562,97
4	50560,85	50560,79	50560,84	50560,78	50560,81	50562,94	50562,89	50562,94	50562,89
5	50560,84	50560,89	50560,89	50560,89	50560,86	50562,95	50562,94	50562,94	50562,93
6	50561,32	50561,36	50561,37	50561,37	50561,35	50564,07	50564,08	50564,07	50564,08
7	50561,97	50561,95	50561,95	50561,96	50562	50567,77	50567,81	50567,79	50567,79
8	50561,95	50561,93	50561,9	50562	50561,99	50570,65	50570,37	50570,43	50570,77
9	50560,71	50560,67	50560,6	50560,66	50560,64	50561,47	50561,6	50561,57	50561,5
10	50560,24	50560,22	50560,17	50560,19	50560,14	50563,01	50563,03	50563,07	50563,09
11	50560	50560,02	50559,98	50560,02	50559,98	50562,68	50562,74	50562,74	50562,74
12	50559,3	50559,29	50559,28	50559,31	50559,3	50560,52	50560,51	50560,51	50560,48
13	50559,02	50558,95	50559,09	50559,04	50559,04	50560,29	50560,29	50560,3	50560,31
14	50559,32	50559,34	50559,3	50559,29	50559,36	50561,45	50561,46	50561,45	50561,45
15	50559,57	50559,62	50559,64	50559,64	50559,54	50562,14	50562,1	50562,11	50562,14
16	50559,54	50559,53	50559,53	50559,51	50559,53	50561,59	50561,6	50561,57	50561,59
17	50559,14	50559,08	50559,13	50559,09	50559,15	50560,73	50560,72	50560,73	50560,72

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	50558,78	50558,81	50558,77	50558,81	50558,78	50560,31	50560,3	50560,31	50560,31
19	50558,32	50558,38	50558,4	50558,38	50558,38	50560,06	50560,08	50560,1	50560,08
20	50557,96	50557,9	50557,93	50557,94	50557,92	50559,33	50559,3	50559,3	50559,3
21	50557,89	50557,86	50557,9	50557,9	50557,94	50559,73	50559,73	50559,73	50559,76
22	50558,05	50558,07	50558,12	50558,12	50558,14	50560,69	50560,69	50560,68	50560,73
23	50558,53	50558,54	50558,56	50558,56	50558,51	50563,45	50563,4	50563,35	50563,37
24	50558,19	50558,23	50558,21	50558,18	50558,21	50561,09	50561,05	50560,99	50560,9
25	50558,31	50558,27	50558,28	50558,29	50558,29	50562,87	50562,89	50562,89	50562,92
26	50559,14	50559,08	50559,08	50559,12	50559,09	50567,2	50567,35	50567,54	50567,61
27	50558,26	50558,23	50558,28	50558,23	50558,2	50560,39	50560,36	50560,35	50560,35
28	50556,46	50556,47	50556,44	50556,36	50556,34	50556,13	50556,16	50556,2	50556,1
29	50556,08	50556,06	50556,09	50556,13	50556,1	50557,63	50557,6	50557,59	50557,62
30	50556,42	50556,38	50556,28	50556,33	50556,34	50558,44	50558,46	50558,41	50558,47
31	50556,81	50556,76	50556,82	50556,76	50556,83	50559,57	50559,59	50559,58	50559,58
32	50557,16	50557,19	50557,25	50557,19	50557,23	50560,52	50560,55	50560,55	50560,56
33	50557,37	50557,43	50557,44	50557,46	50557,44	50560,75	50560,77	50560,75	50560,77
34	50557,59	50557,6	50557,56	50557,59	50557,48	50560,89	50560,9	50560,92	50560,91
35	50557,48	50557,43	50557,38	50557,42	50557,35	50560,44	50560,44	50560,44	50560,44
36	50557,24	50557,2	50557,18	50557,18	50557,13	50559,99	50559,99	50559,99	50559,95
37	50556,99	50556,98	50556,98	50556,99	50556,95	50559,89	50559,87	50559,9	50559,92
38	50556,72	50556,71	50556,7	50556,64	50556,62	50559,19	50559,25	50559,31	50559,34
39	50556,39	50556,36	50556,39	50556,38	50556,38	50559,43	50559,44	50559,44	50559,44
40	50555,96	50555,95	50555,96	50555,97	50555,91	50558,55	50558,53	50558,53	50558,53
41	50555,3	50555,36	50555,34	50555,26	50555,25	50555,74	50555,72	50555,63	50555,53

Таблиця 4 – Дані вимірювань повного вектору (продовження)

Пк	Датчик1 [1]	Датчик1 [2]	Датчик1 [3]	Датчик1 [4]	Датчик1 [5]	Датчик2 [1]	Датчик2 [2]	Датчик2 [3]	Датчик2 [4]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	50560,36	50561,96	50561,97	50561,97	50561,95	50564,53	50564,5	50564,52	50564,52
2	50561,35	50561,36	50561,34	50561,33	50561,34	50563,49	50563,5	50563,47	50563,47
3	50560,88	50560,9	50560,85	50560,91	50560,98	50562,99	50563,01	50563	50562,97
4	50560,85	50560,79	50560,84	50560,78	50560,81	50562,94	50562,89	50562,94	50562,89
5	50560,84	50560,89	50560,89	50560,89	50560,86	50562,95	50562,94	50562,94	50562,93
6	50561,32	50561,36	50561,37	50561,37	50561,35	50564,07	50564,08	50564,07	50564,08
7	50561,97	50561,95	50561,95	50561,96	50562	50567,77	50567,81	50567,79	50567,79
8	50561,95	50561,93	50561,9	50562	50561,99	50570,65	50570,37	50570,43	50570,77
9	50560,71	50560,67	50560,6	50560,66	50560,64	50561,47	50561,6	50561,57	50561,5
10	50560,24	50560,22	50560,17	50560,19	50560,14	50563,01	50563,03	50563,07	50563,09
11	50560	50560,02	50559,98	50560,02	50559,98	50562,68	50562,74	50562,74	50562,74
12	50559,3	50559,29	50559,28	50559,31	50559,3	50560,52	50560,51	50560,51	50560,48
13	50559,02	50558,95	50559,09	50559,04	50559,04	50560,29	50560,29	50560,3	50560,31
14	50559,32	50559,34	50559,3	50559,29	50559,36	50561,45	50561,46	50561,45	50561,45
15	50559,57	50559,62	50559,64	50559,64	50559,54	50562,14	50562,1	50562,11	50562,14
16	50559,54	50559,53	50559,53	50559,51	50559,53	50561,59	50561,6	50561,57	50561,59
17	50559,14	50559,08	50559,13	50559,09	50559,15	50560,73	50560,72	50560,73	50560,72
18	50558,78	50558,81	50558,77	50558,81	50558,78	50560,31	50560,3	50560,31	50560,31
19	50558,32	50558,38	50558,4	50558,38	50558,38	50560,06	50560,08	50560,1	50560,08
20	50557,96	50557,9	50557,93	50557,94	50557,92	50559,33	50559,3	50559,3	50559,3
21	50557,89	50557,86	50557,9	50557,9	50557,94	50559,73	50559,73	50559,73	50559,76
22	50558,05	50558,07	50558,12	50558,12	50558,14	50560,69	50560,69	50560,68	50560,73

Продовження таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

23	50558,53	50558,54	50558,56	50558,56	50558,51	50563,45	50563,4	50563,35	50563,37
24	50558,19	50558,23	50558,21	50558,18	50558,21	50561,09	50561,05	50560,99	50560,9
25	50558,31	50558,27	50558,28	50558,29	50558,29	50562,87	50562,89	50562,89	50562,92
26	50559,14	50559,08	50559,08	50559,12	50559,09	50567,2	50567,35	50567,54	50567,61
27	50558,26	50558,23	50558,28	50558,23	50558,2	50560,39	50560,36	50560,35	50560,35
28	50556,46	50556,47	50556,44	50556,36	50556,34	50556,13	50556,16	50556,2	50556,1
29	50556,08	50556,06	50556,09	50556,13	50556,1	50557,63	50557,6	50557,59	50557,62
30	50556,42	50556,38	50556,28	50556,33	50556,34	50558,44	50558,46	50558,41	50558,47
31	50556,81	50556,76	50556,82	50556,76	50556,83	50559,57	50559,59	50559,58	50559,58
32	50557,16	50557,19	50557,25	50557,19	50557,23	50560,52	50560,55	50560,55	50560,56
33	50557,37	50557,43	50557,44	50557,46	50557,44	50560,75	50560,77	50560,75	50560,77
34	50557,59	50557,6	50557,56	50557,59	50557,48	50560,89	50560,9	50560,92	50560,91
35	50557,48	50557,43	50557,38	50557,42	50557,35	50560,44	50560,44	50560,44	50560,44
36	50557,24	50557,2	50557,18	50557,18	50557,13	50559,99	50559,99	50559,99	50559,95
37	50556,99	50556,98	50556,98	50556,99	50556,95	50559,89	50559,87	50559,9	50559,92
38	50556,72	50556,71	50556,7	50556,64	50556,62	50559,19	50559,25	50559,31	50559,34
39	50556,39	50556,36	50556,39	50556,38	50556,38	50559,43	50559,44	50559,44	50559,44
40	50555,96	50555,95	50555,96	50555,97	50555,91	50558,55	50558,53	50558,53	50558,53
41	50555,3	50555,36	50555,34	50555,26	50555,25	50555,74	50555,72	50555,63	50555,53

На другому етапі виконувались вимірювання повного вектору магнітного поля при встановленні електродів, які виготовленні зі сталі Ст. 45 [5] без підведення постійної напруги - «а»; при підключенні постійної напруги величиною 100 В з полярністю «плюс» - північ у напрямку вимірювання - «б»; при підключенні постійної напруги величиною 100 В з полярністю «плюс» - південь – «в». Результати обробки наведені на рисунку 3.

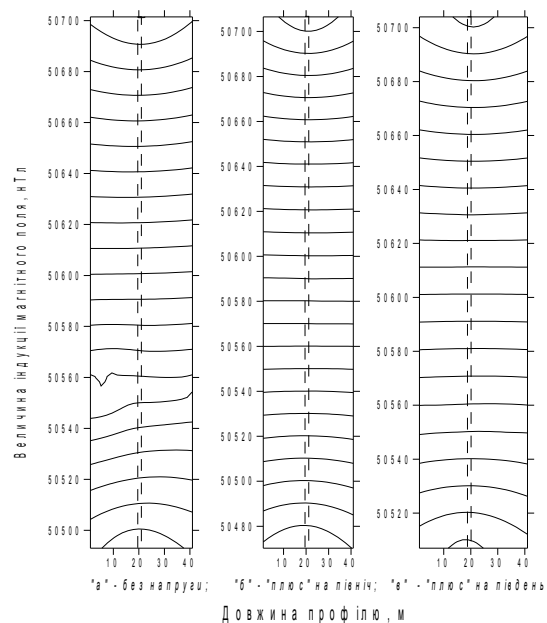


Рисунок 2 – Повний вектор магнітного поля з урахуванням системи електродів зі сталі Ст. 45

Після вимірювань на даному етапі проведено корегування змінювання магнітного поля дослідної ділянки.

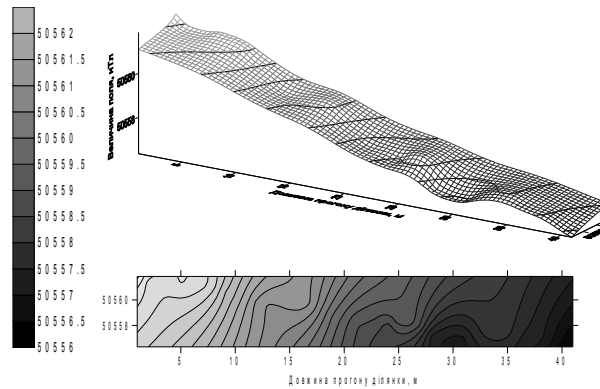


Рисунок 3 - Корегування магнітного поля на дослідній ділянці

На наступному етапі експерименти виконувались із застосуванням кілець Гельмгольца, при цьому датчики знаходилися на висоті 35.....95 см. З метою ідентичності отриманих результатів кожна серія експериментів виконувалась на одній і тій же ділянці. Після вимірювань проведено корегування змінювання магнітного поля дослідної ділянки.



Рисунок 4 – Вимірювання повного вектору магнітного поля при використанні Кілець Гельмгольца

На наступному етапі досліджень використовувалась система електродів зі сталі 14X17H2 [5]: без підведення постійної напруги - «а»; при напрузі 100 В з полярністю «плюс» на північ - «б»; з полярністю «плюс» на південь – «в». Результати обробки наведені на рисунку 5.

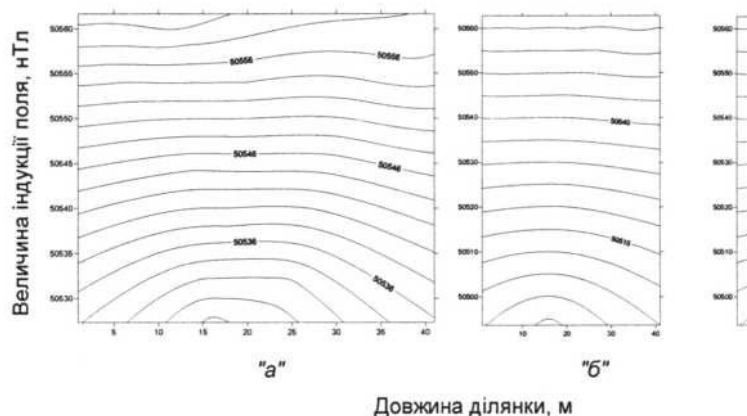


Рисунок 5 – Повний вектор магнітного поля з урахування електродів зі сталі 14Х17Н2

Після вимірювань проведено корегування змінювання дної ділянки.

Вимірювання проводились з використанням модифікованого магнітометра-градієнтометра КМ-8. Точність модифікованої діапазоном вимірювання і при діапазоні 1 на один вимір складалася, не враховуючи схему компаратора та залишені без змін ретворювача. Дискретність датчика становила п'ять вимірювань на один переміщення датчиків у просторі.

Висновки. Проведені дослідження вказують на достаток вектору магнітного поля у зоні розташування системи електродів включення позитивного потенціалу у напрямку «південь-північ» у діапазоні 2,5...3,4%. Важливим фактором, який впливає на зміну величини магнітного поля, є вміст магнітних іонів у ґрунті.

Виконавці роботи:

від Київського національного університету імені Тараса Шевченка
кандидат геолого-мінералогічних наук,

доцент кафедри геофізики

інженер

від Таврійського державного агротехнологічного університету
доцент, кандидат технічних наук

С
Х
К

INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image12.jpeg" *
 MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE
 "../.../Temp/FineReader11/media/image12.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image12.jpeg" *
 MERGEFORMAT

ПОГОДЖЕНО

ЗАТ

Директор

Рект

Інституту зрошуваного

Тавр

садівництва

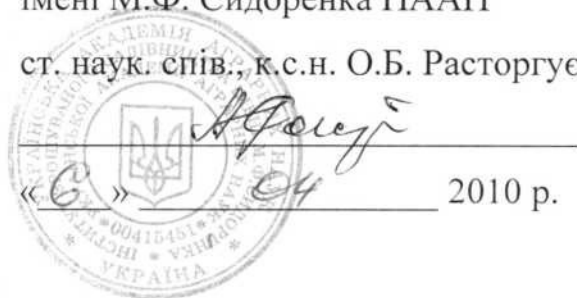
агро

імені М.Ф. Сидоренка НААН

уніве

ст. наук. спів., к.с.н. О.Б. Расторгуєв

прод



2010 р.

ПРОТОКОЛ

проведення експериментальних дос
 у процесі впливу енергії електромагнітного поля і

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Термін виконання досліджень – квітень 2006 року – жовтень 2009 року.

Ґрунт - це складна гетерогенна та поліфазна система, в якій завжди виникають взаємодії різних фізичних полів і переходи енергії з однієї форми в іншу. Ця термодинамічна система є відкритою і має обмін з навколишнім середовищем під впливом зовнішніх чинників. У ґрунті знаходяться живі рослинні організми, умовою існування яких є обмін речовинами та енергією з навколишнім середовищем [1,2].

Змінювання дії вектора напруженості постійного магнітного поля на гетерогенні системи проявляється в реакції рослинного об'єкту на напрямок, інтенсивність та темпи фізіологічних і біохімічних процесів розвитку рослин, модуль і градієнт напруженості усіх складових системи, а також змінювання мікроелементів ґрунту [3].

Магнітозбурюючими об'єктами є джерела макроскопічного магнітного поля: рухомі заряджені частинки в рослинах, слабо та сильно магнітні елементи у ґрунті, робочі органи - електроди електротехнологічної установки.

На сьогоднішня загальної теорії, що розглядає функції, механізми дії та роль мікро- та макроелементів в гетерогенних системах, поки що немає. Можна тільки допускати, що мікро- та макроелементи необхідні всім без виключення живим організмам. Останні достатньо різко реагують на недолік, надлишок або несприятливе співвідношення елементів [4,5].

МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою даної роботи є розробка технологій впливу електромагнітного поля на систему «рослина - ґрунт» на основі активації гетерогенних систем, що викликають збільшення продуктивності продукції захищеного ґрунту.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

- встановити закономірності впливу електромагнітного поля на основні показники ґрунту і рослин.

ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

- експериментальні вивчення магнітних властивостей гетерогенних систем «рослина - ґрунт»;
- отримання експериментальних результатів у формі початкових необроблених даних;
- попередній аналіз отриманих результатів.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Експериментальні дослідження магнітних властивостей гетерогенних систем виконувались на території Надеждинської сільської ради Приазовського району Запорізької області.

Сумісні дослідження проведені в атестованій агрохімічній лабораторії (атестат МФ РГ 027 2008 р.) Інституту зрошуваного садівництва імені М.Ф. Сидоренка НААН під керівництвом кандидата сільськогосподарських наук Бичкової Л.І., кафедрою електропостачання сільського господарства Таврійського державного агротехнологічного університету під керівництвом кандидата технічних наук доцента Куценко Ю.М.; кафедрою геофізики

Київського національного університету імені Тараса Шевченка під керівництвом кандидата геолого-мінералогічних наук, доцента Сухарада А.В

У роботі приймали участь магістри Коваль Д.М., Ільїн Д.В., Тараканов О.В., інженер Селезньов Г.П.

Польові дослідження виконувалися електротехнологічною установкою з використанням електродів із сталі марки 14X17H2.

Вплив на систему «рослина – ґрунт» виконувалася з використанням стабілізованого джерела живлення, при цьому напруженість магнітного поля в ґрунті визначалася величинами струму відповідно: 0; 50; 75; 100; 150 мА. Тривалість впливу ЕМП відповідала періоду вегетації рослин. На протязі досліджень вимірювалися кліматичні характеристики навколишнього середовища, біоелектричні потенціали рослин, контролювався технічний стан джерела живлення, системи електродів, надійність контактних з'єднань і провідників,

Електроди були встановлені в точках 3,4,6,7 (рис. 1). Підключення позитивного полюса «+» у напрямі південного полюса. Глибина розташування електродів в ґрунті 1 м, відстань між електродами 1 м. У якості досліджуваних рослин використовувався яровий ячмінь сорт «Одеський 100», посадка рослин виконувалася згідно існуючої агротехнології для Запорізької області.

Протокол складений на основі первинних матеріалів досліджень та попереднього аналізу.

Рисунок 1 - Розташування контрольної і експериментальної ділянок
Зразки ґрунтів, рослин відбиралися у відповідності діючих методик [6,7], визначення кількості мікроелементів виконувалося атомно-абсорбційним методом; макроелементів відповідно до діючих стандартів [8-13]. Результати досліджень представлені в таблицях 1-5.

Таблиця 1 – Вплив ЕМП на вміст макроелементів в рослинах

Номер	Культура	Дата	Вид	%				
				N	P,	K,	Ca	Mg
1	Соняшник, лист	06.06.07	К	1,80	0,24	1,85	-	-
2	Соняшник, лист	06.06.07	Е	2,00	0,26	1,71	-	-
3	Соняшник, лист	19.09.07	К	1,78	0,29	1,78	-	-
4	Соняшник, лист	19.09.07	Е	1,85	0,27	1,66	-	-
5	Амброзія	07.11.07	К	1,95	0,51	2,00	-	-
6	Амброзія	07.11.07	Е	3,15	0,19	1,90	-	-
7	Ячмінь	20.04.08	К	5,50	0,71	3,25	0,160	0,050
8	Ячмінь	04.05.08	К	5,00	0,62	3,37	0,800	0,144
9	Ячмінь	04.05.08	Е	5,20	0,55	3,66	0,160	0,144
10	Ячмінь	18.05.08	К	2,60	0,42	2,70	0,240	0,096

11	Ячмінь	18.05.08	Е	3,30	0,53	3,27	0,160	0,048
12	Ячмінь	01.06.08	К	2,30	0,38	2,19	0,320	0,144
13	Ячмінь	01.06.08	Е	2,00	0,34	2,16	0,400	0,192
14	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	1,40	0,31	1,06	0,640	0,192
15	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	Е	1,90	0,33	1,28	0,800	0,380
16	Ячмінь, середня частина	18.06.08	К	1,20	0,19	1,65	0,320	0,048
17	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	1,20	0,29	1,81	0,490	0,144
18	Ячмінь - колос	18.06.08	К	1,10	0,11	1,77	0,480	0,096
19	Ячмінь - колос	18.06.08	Е	1,80	0,30	0,63	0,080	0,096

Таблиця 2 - Вплив ЕМП на вміст мікроелементів в рослинах

Номер	Культура	Дата	Вид	мг/кг				
				Co	Fe	Ni	Zn	Cr
1	Соняшник, лист	06.06.07	К	0,290	361,6	1,065	99,95	1,865
2	Соняшник, лист	06.06.07	Е	0,615	269,7	1,775	94,75	1,335
3	Соняшник, лист	19.09.07	К	0,180	0,455	0,455	2,500	0,075
4	Соняшник, лист	19.09.07	Е	0,220	1,250	0,180	1,100	0,160
5	Ячмінь	20.04.08	К	0,180	120,0	0,015	19,00	0,030
6	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	0,010	117,6	0,020	18,07	0,040
7	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	0,050	109,3	0,010	18,61	1,530
8	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	0,840	520,6	0,530	21,92	0,010
9	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	0,020	138,5	1,00	11,77	3,20
				Cu	Cd	Mn	Pb	-
10	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	5,330	0,020	51,10	0,030	-
11	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	3,320	0,020	88,20	0,020	-
12	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	6,800	0,040	69,10	0,020	-
13	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	5,600	0,010	49,70	0,010	-

Таблиця 3 - Вплив ЕМП на вміст мікроелементів у ґрунті

Номер	Місце відбору проби ґрунту	Дата	Вид	мг/кг				
				Co	Fe	Ni	Zn	Cr
1	с. Надєждіно	06.06.07	К	0,280	0,456	0,396	2,980	0,081
2	с. Надєждіно	06.06.07	Е	0,320	0,728	0,289	3,120	0,110
3	с. Надєждіно	19.09.07	К	0,290	0,445	0,388	2,780	0,083
4	с. Надєждіно	19.09.07	Е	0,360	0,487	0,292	1,960	0,109
5	с. Надєждіно	20.04.08	К	0,190	0,472	0,414	2,630	0,071
6	с. Надєждіно	18.06.08	К	0,200	0,487	0,385	2,750	0,065
7	с. Надєждіно	18.06.08	Е	0,260	1,370	0,215	1,580	0,170

Таблиця 4 – Вплив ЕМП на вміст основних елементів живлення в темно-каштановому ґрунті

Номер	Місце відбору проби ґрунту	Дата	Вид	рН	Вологіст, %	Гумус, %	N-NO ₃ ,	N-NH ₄ ,	сума мін, N	P ₂ O ₅	K ₂ O
							мг/100 г.			мг/100 г.	
1.	Поле, соняшник	06.06.07	К	7,15	3,00	3,44	129,5	16,7	146,2	25,5	154,5
2.	Поле, соняшник	06.06.07	Э	7,55	3,00	2,90	126,6	15,2	141,8	19,5	199,4
3.	Поле, соняшник	19.09.07	К	7,75	1,66	3,44	125,0	4,50	129,5	25,5	201,3
4.	Поле, соняшник	19.09.07	Э	7,65	1,76	3,01	115,5	4,20	119,7	24,0	205,4
5.	Поле, соняшник	03.10.07	К	-	-	3,55	71,00	6,10	77,10	29,3	179,1
6.	Поле, соняшник	03.10.07	Э	-	-	3,33	71,50	6,20	77,70	28,3	203,4
7.	Поле, ячмінь	20.04.08	К	7,80	20,4	2,90	2,040	3,70	5,740	13,5	87,20
8.	Поле, ячмінь	04.05.08	К	7,65	31,7	-	5,700	4,20	9,900	23,6	121,2
9.	Поле, ячмінь	04.05.08	Э	7,71	29,2	-	19,20	16,1	35,30	25,7	148,6
10.	Поле, ячмінь	18.05.08	К	-	-	3,55	1,800	3,30	5,100	5,40	73,70
11.	Поле, ячмінь	18.05.08	Э	-	-	3,33	4,600	5,70	10,30	9,70	103,9
12.	Поле, ячмінь	01.06.08	К	-	-	-	4,300	8,10	12,40	16,4	112,8
13.	Поле, ячмінь	01.06.08	Э	-	-	-	6,200	12,9	19,10	17,4	123,7
14.	Поле, ячмінь	18.06.08	К	-	-	-	8,200	8,20	16,40	18,2	38,30
15.	Поле, ячмінь	18.06.08	Э	-	-	-	16,70	10,7	27,40	23,0	119,4

Таблиця 5 – Вимірювання магнітної сприйнятливості темно-каштанового ґрунту

Номер	Дата відбору проби				
	20.04	04.05	18.05	1.06	18.06
	Питома магнітна сприйнятливість, $\chi \cdot 10^{-9}$, м ³ /кг				
1	721	743	765	825	833
2	715	717	764	823	825
3	815	689	774	779	894
4	736	812	770	892	811
5	736	773	772	803	817
6	691	846	769	812	810
7	760	772	766	816	829
8	844	817	764	799	836
9	792	780	760	874	817
10	740	756	766	811	833
11	771	772	777	838	855
12	851	833	762	823	826
13	811	824	763	844	846
14	853	844	779	826	855
15	756	761	774	837	844
16	706	740	769	892	824
17	761	766	776	891	824

Визначення коефіцієнта поглинання мікроелементів рослинами

У процесі виконання експериментальних досліджень, для визначення коефіцієнтів поглинання рослинами мікроелементів (наприклад, заліза *Fe*) необхідно виконати перехід від диференціальної форми запису до форми запису кінцевих різниць:

$$\frac{\Delta C_{rs_{i,j}}}{\Delta t_i} = \alpha_{i,j} \frac{C_{gr_{i-1,j}} + C_{gr_{i,j}}}{2} \quad (1)$$

Для вирішення рівняння застосовуємо різницю апроксимацій з використанням ітерацій у вигляді:

$$\alpha_{i,j} = \frac{2}{t_i - t_{i-1}} = \frac{C_{rs,i,j} - C_{rs,i-1,j}}{C_{gr,i,j} + C_{gr,i-1,j}} \quad (2)$$

де Δt - інтервал часу, t_i, t_{i-1} - відповідно поточний і попередній час вимірювання, днів;

$C_{rs,i,j}, C_{rs,i-1,j}$ - відповідно, концентрації елемента в рослинах у поточний і попередній час вимірювання.

i – поточний час, днів;

j – величина струму мА, (магнітна сприйнятливість ґрунту, $\chi \cdot 10^{-9}$ м³/кг);

$C_{gr,i,j}, C_{gr,i-1,j}$ - відповідно, концентрації елемента в рослинах у поточний і попередній час вимірювання.

Алгоритм розрахунку коефіцієнта поглинання в кожен розрахунковий момент часу $t = t_{j-1}$ полягає в наступному. На початковому етапі експериментально визначаються кількість мікроелементів у ґрунті та рослинах в початковій ітерації. Потім по формулі (2) знаходиться значення коефіцієнта поглинання в наступних ітераціях $n > 1$. На підставі вихідних даних у формі таблиці (в даному випадку для заліза) і проведених розрахунків отримуємо матрицю коефіцієнтів поглинання мікроелементів рослинами залежно від часу.

Отримані залежності представляються в графічному вигляді, виконується статистична обробка отриманих результатів.

Таблиця 6 – Магнітна сприйнятливість ґрунту

Дата	Величина струму, мА				
	0	50	75	100	150
	магнітна сприйнятливість ґрунту $\chi \cdot 10^{-9}$, кг/м ³				
0	0,703	0,712	0,736	0,765	0,846
26	0,706	0,761	0,770	0,779	0,874
52	0,814	0,816	0,825	0,836	0,881

78	0,816	0,822	0,838	0,844	0,892
104	0,819	0,824	0,843	0,855	0,894

Таблиця 7 - Вміст заліза в ґрунті залежно від часу

Дата	Величина струму, мА				
	0	50	75	100	150
	вміст мікроелемента заліза, мг/кг				
0	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457
26	0,456	0,501	0,578	0,677	0,728
52	0,451	0,489	0,564	0,642	0,671
78	0,449	0,468	0,559	0,561	0,578
104	0,445	0,459	0,462	0,476	0,487

Таблиця 8 - Вміст заліза в рослинах залежно від часу

Дата	Величина струму, мА				
	0	50	75	100	150
	зміст мікроелемента заліза, мг/кг				
0	370	370	370	370	370
26	361,6	342,8	302,4	285,9	269,7
52	160,4	172,4	144,3	126,5	111,1
78	75,70	64,20	58,40	43,10	29,62
104	0,455	0,572	0,641	0,920	1,250

Матриця коефіцієнтів поглинання мікроелемента заліза соняшником в процесі розвитку має вид:

$$\alpha = \begin{Bmatrix} -3,460 & -2,184 & -5,024 & -5,704 & -6,510 \\ -17,06 & -13,24 & -10,65 & -9,296 & -7,720 \\ -7,239 & -8,697 & -5,884 & -5,332 & -5,018 \\ -6,474 & -5,279 & -4,351 & -3,128 & -1,049 \end{Bmatrix}$$

На підставі матриці будуюмо графічні залежності коефіцієнтів поглинання мікроелемента заліза соняшником в період вегетації (рис.2).

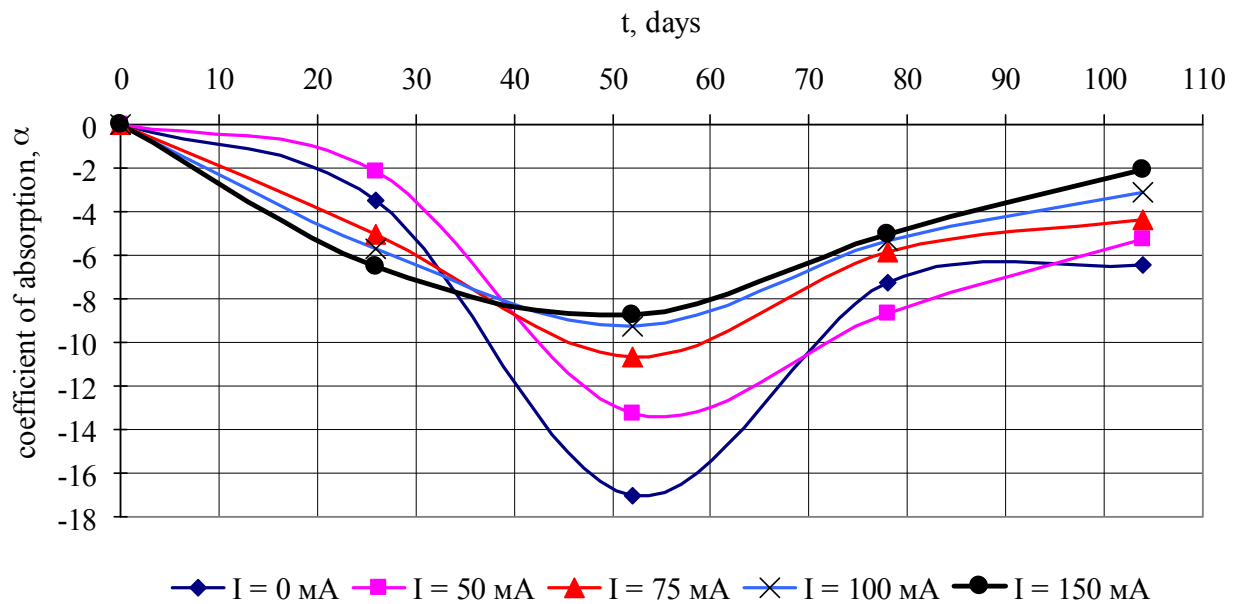


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта поглинання від величини магнітної стрийняливості ґрунту

Після виключення незначущих коефіцієнтів, отримано поліном другого порядку. Кореляційно-регресійний аналіз показав достатньо високе значення зв'язку коефіцієнта поглинання α і магнітної стрийняливості ґрунту χ :

$$y = 0,0019 \cdot x^2 - 0,1756 \cdot x - 3,3732$$

$$R^2 = 0,894$$

Висновки. Проведені дослідження вказують на достатньо великі змінювання магнітних властивостей ґрунту, кількості мікроелементів у зоні розташування системи електродів. При застосуванні схеми включення позитивного потенціалу

INCLUDEPICTURE "../../../Temp/FineReader11/media/image23.jpeg" *
 MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE
 "../../../Temp/FineReader11/media/image23.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE "../../../Temp/FineReader11/media/image23.jpeg" *
 MERGEFORMAT

напрямку «південь» магнітне поле підсилюється у діапазон
 шенню до природного геомагнітного поля.

Важливим фактором, який впливає на ефективність з
 магнітного поля, є вміст елементів, які розташовані у ґрунті
 ними властивостями.

Як показує коефіцієнт детермінації, 89,4%, варіації п
 мікроелементів викликані періодами вегетації, запасами мі
 змінами запасів продуктивної вологи.

Рівняння регресії достатньою мірою дозволяють про
 ність розвитку рослин за певних природно-кліматичних умов

Виконавці роботи:

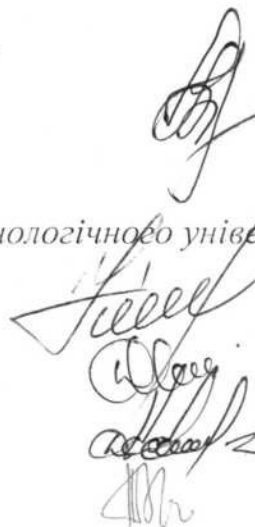
від Інституту зрошуваного садівництва імені М.Ф. Сі
 кандидат сільськогосподарських наук,
 завідувач лабораторією агрохімії

від Таврійського державного агротехнологічного універ
 доцент, кандидат технічних наук

магістр

магістр

магістр



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Биофизика*. Б.Н. Тарусов, В.Ф. Антонов, Е.В. Бурлакова и др. /Под редакцией Б.Н. Тарусова и О.Р. Кольс. – М.: изд. «Высшая школа», 1968. – 467 с.
2. *Новицкий Ю.И.* Реакция растений на магнитные поля // Реакция биологических систем на магнитные поля. М.: Наука, 1978. С. 117–130.
3. *Яновский В.М.* Земной магнетизм. – М. Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. – 585 с.
4. *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и живая природа, М., Наука, 1968,– 288 с.
5. *Звіт НДР по темі: «Створення раціональної методики вимірювання магнітних властивостей ґрунтового покриву, осадового чохла та кристалічного фундаменту нафтогазоперспективних районів ДДЗ для оптимізації їх комплексних геофізичних досліджень».* - НАК “НАДРА УКРАЇНИ” - Балаклія, 2006 р.
6. *Церлинг В.В.,* Агрохимические основы диагностики минерального питания сельскохозяйственных культур. М., «Наука», 1978, 216 с.
7. *ДСТУ ISO 11464-2001 Якість ґрунту.* Попереднє оброблення зразків для фізико-хімічного аналізу. – К.: Держстандарт України, 2003 – 10 с.
8. *ДСТУ 4290:2004 Якість ґрунту.* Методи визначання валового фосфору і валового калію в модифікації ННЦ ІГА ім. О. Н Соколовського – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – III, 10 с.
9. *ДСТУ 3980-2000 Ґрунти.* Фізико-хімія ґрунтів: Терміни та визначення. – Вед. 2001.06.01 – Офіційне видання. – К.: Держстандарт України, 2000. – III, 20 с.
10. *ДСТУ 4114-2002 Ґрунти.* Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Мачігіна – К.: Держстандарт України, 2002. – 7 с.
11. *ДСТУ 4115-2002 Ґрунти.* Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова – К.: Держстандарт України, 2002. – 5 с.
12. *ДСТУ ISO 11263-2001 Якість ґрунту.* Визначання вмісту рухомих сполук фосфору. Спектрометричний метод визначання фосфору в розчині гідрокарбонату натрію. – К.: Держстандарт України, 2002. – 5 с.
13. *ДСТУ ISO 11265-2001 Якість ґрунту.* Визначання питомої електропровідності. – К.:

Держстандарт України, 2002 – 5 с.

INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image25.jpeg" *
MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE
"../.../Temp/FineReader11/media/image25.jpeg" * MERGEFORMAT
INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image25.jpeg" *
MERGEFORMAT

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор

Інституту зрошуваного садівництва

імені М.Ф. Сидоренка НААН

ст. наук. спів., к. с. г. н. О.Б. Расторгуєв



« 6 »

2010 р.

АКТ

ВИКОНАНИХ РОБІТ

У відповідності з договором від 31.10. 2007 р. про творчу співдружність, в атестованій агрохімічній лабораторії (атестат МФ РГ 027 2008 р.) інституту зрошуваного садівництва імені М.Ф. Сидоренка УААН під керівництвом кандидата сільськогосподарських наук Бичкової Л.І., в 2006-2009 році проведені аналітичні роботи на вміст макро- і мікроелементів у ґрунтах і рослинах щодо виявлення впливу ЕМП (таблиця 1-6)

Таблиця 1 – Вплив ЕМП на вміст макроелементів в рослинах

Номер	Культура	Дата	Вид	%				
				N	P,	K,	Ca	Mg
1	Соняшник, лист	06.06.07	К	1,80	0,24	1,85	-	-
2	Соняшник, лист	06.06.07	Е	2,00	0,26	1,71	-	-
3	Соняшник, лист	19.09.07	К	1,78	0,29	1,78	-	-
4	Соняшник, лист	19.09.07	Е	1,85	0,27	1,66	-	-
5	Амброзія	07.11.07	К	1,95	0,51	2,00	-	-
6	Амброзія	07.11.07	Е	3,15	0,19	1,90	-	-
7	Ячмінь	20.04.08	К	5,50	0,71	3,25	0,160	0,050
8	Ячмінь	04.05.08	К	5,00	0,62	3,37	0,800	0,144
9	Ячмінь	04.05.08	Е	5,20	0,55	3,66	0,160	0,144
10	Ячмінь	18.05.08	К	2,60	0,42	2,70	0,240	0,096
11	Ячмінь	18.05.08	Е	3,30	0,53	3,27	0,160	0,048
12	Ячмінь	01.06.08	К	2,30	0,38	2,19	0,320	0,144
13	Ячмінь	01.06.08	Е	2,00	0,34	2,16	0,400	0,192
14	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	1,40	0,31	1,06	0,640	0,192
15	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	Е	1,90	0,33	1,28	0,800	0,380
16	Ячмінь, середня частина	18.06.08	К	1,20	0,19	1,65	0,320	0,048
17	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	1,20	0,29	1,81	0,490	0,144
18	Ячмінь - колос	18.06.08	К	1,10	0,11	1,77	0,480	0,096
19	Ячмінь - колос	18.06.08	Е	1,80	0,30	0,63	0,080	0,096

Таблиця 2 - Вплив ЕМП на вміст мікроелементів в рослинах

	Культура	Дата		мг/кг
--	----------	------	--	-------

г. м. р.			Вид	Co	Fe	Ni	Zn	Cr
1	Соняшник, лист	06.06.07	К	0,290	361,6	1,065	99,95	1,865
2	Соняшник, лист	06.06.07	Е	0,615	269,7	1,775	94,75	1,335
3	Соняшник, лист	19.09.07	К	0,180	0,455	0,455	2,500	0,075
4	Соняшник, лист	19.09.07	Е	0,220	1,250	0,180	1,100	0,160
5	Ячмінь	20.04.08	К	0,180	120,0	0,015	19,00	0,030
6	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	0,010	117,6	0,020	18,07	0,040
7	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	0,050	109,3	0,010	18,61	1,530
8	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	0,840	520,6	0,530	21,92	0,010
9	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	0,020	138,5	1,00	11,77	3,20
				Cu	Cd	Mn	Pb	-
10	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	5,330	0,020	51,10	0,030	-
11	Ячмінь, верхня частина	18.06.08	К	3,320	0,020	88,20	0,020	-
12	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	6,800	0,040	69,10	0,020	-
13	Ячмінь, середня частина	18.06.08	Е	5,600	0,010	49,70	0,010	-

Таблиця 3 - Вплив ЕМП на вміст мікроелементів у ґрунті

Номер	Місце відбору проби ґрунту	Дата	Вид	мг/кг				
				Co	Fe	Ni	Zn	Cr
1	с. Надєждіно	06.06.07	К	0,280	0,456	0,396	2,980	0,081
2	с. Надєждіно	06.06.07	Е	0,320	0,728	0,289	3,120	0,110
3	с. Надєждіно	19.09.07	К	0,290	0,445	0,388	2,780	0,083
4	с. Надєждіно	19.09.07	Е	0,360	0,487	0,292	1,960	0,109
5	с. Надєждіно	20.04.08	К	0,190	0,472	0,414	2,630	0,071
6	с. Надєждіно	18.06.08	К	0,200	0,487	0,385	2,750	0,065
7	с. Надєждіно	18.06.08	Е	0,260	1,370	0,215	1,580	0,170

Таблиця 4 - Вміст заліза в ґрунті залежно від часу

Дата	Величина струму, мА				
	0	50	75	100	150
	вміст мікроелемента заліза, мг/кг				

0	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457
26	0,456	0,501	0,578	0,677	0,728
52	0,451	0,489	0,564	0,642	0,671
78	0,449	0,468	0,559	0,561	0,578
104	0,445	0,459	0,462	0,476	0,487

Таблиця 5- Вміст заліза в рослинах залежно від часу

Дата	Величина струму, мА				
	0	50	75	100	150
	зміст мікроелемента заліза, мг/кг				
0	370	370	370	370	370
26	361,6	342,8	302,4	285,9	269,7
52	160,4	172,4	144,3	126,5	111,1
78	75,70	64,20	58,40	43,10	29,62
104	0,455	0,572	0,641	0,920	1,250

Таблиця 6 – Вплив ЕМП на вміст основних елементів живлення в темно-каштанових ґрунтах

Номер	Місце відбору проби ґрунту	Дата	Вид	рН	Вологість, %	Гумус, %	N-NO ₃ ,	N-NH ₄ ,	сума мін, N	P ₂ O ₅	K ₂ O
							мг/100 г.			мг/100 г.	
16.	Поле, соняшник	06.06.07	К	7,15	3,00	3,44	129,5	16,7	146,2	25,5	154,5
17.	Поле, соняшник	06.06.07	Э	7,55	3,00	2,90	126,6	15,2	141,8	19,5	199,4
18.	Поле, соняшник	19.09.07	К	7,75	1,66	3,44	125,0	4,50	129,5	25,5	201,3
19.	Поле, соняшник	19.09.07	Э	7,65	1,76	3,01	115,5	4,20	119,7	24,0	205,4
20.	Поле, соняшник	03.10.07	К	-	-	3,55	71,00	6,10	77,10	29,3	179,1
21.	Поле, соняшник	03.10.07	Э	-	-	3,33	71,50	6,20	77,70	28,3	203,4
22.	Поле, ячмінь	20.04.08	К	7,80	20,4	2,90	2,040	3,70	5,740	13,5	87,20
23.	Поле, ячмінь	04.05.08	К	7,65	31,7	-	5,700	4,20	9,900	23,6	121,2
24.	Поле, ячмінь	04.05.08	Э	7,71	29,2	-	19,20	16,1	35,30	25,7	148,6
25.	Поле, ячмінь	18.05.08	К	-	-	3,55	1,800	3,30	5,100	5,40	73,70
26.	Поле, ячмінь	18.05.08	Э	-	-	3,33	4,600	5,70	10,30	9,70	103,9
27.	Поле, ячмінь	01.06.08	К	-	-	-	4,300	8,10	12,40	16,4	112,8
28.	Поле, ячмінь	01.06.08	Э	-	-	-	6,200	12,9	19,10	17,4	123,7
29.	Поле, ячмінь	18.06.08	К	-	-	-	8,200	8,20	16,40	18,2	38,30
30.	Поле, ячмінь	18.06.08	Э	-	-	-	16,70	10,7	27,40	23,0	119,4

INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image30.jpeg" *
 MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE
 "../.../Temp/FineReader11/media/image30.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image30.jpeg" *
 MERGEFORMAT

Виконавці роботи:

від Інституту зрошуваного садівництва імені М.Ф. Сидор
 кандидат сільськогосподарських наук,
 завідувач лабораторією агрохімії

від Таврійського державного агротехнологічного університету
 доцент, кандидат технічних наук

магістр

магістр

магістр

```
INCLUDEPICTURE "../../../Temp/FineReader11/media/image31.jpeg" \*  
MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE "../../../Temp/FineReader11/media/image31.jpeg" \  
* MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE "../../../Temp/FineReader11/media/image31.jpeg" \
```

* MERGEFORMAT

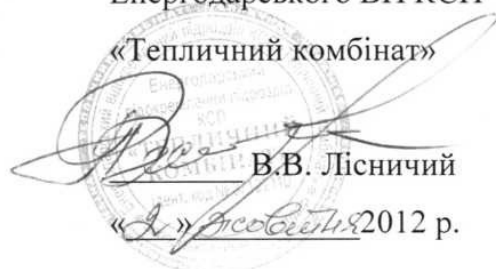
INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image32.jpeg" *
 MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE
 "../.../Temp/FineReader11/media/image32.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE "../.../Temp/FineReader11/media/image32.jpeg" *
 MERGEFORMAT

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор

Енергодарського ВП КСП

«Тепличний комбінат»



В.В. Лісничий

«2» жовтня 2012 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор

Таврійського державного

агротехнологічного

університету

професор



АКТ

виробничої перевірки закінченого наукового дослідження

«ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ І МАГНІТНІ СИСТЕМИ

В СПОРУДАХ ЗАХИЩЕНОГО ҐРУНТУ

Даний акт складено комісією в кількості чотирьох членів у період з 2010-2012 рр. в тепличному господарстві Енергодарський ВП «Тепличний комбінат» м. Енергодар Запорізької області були використані результати наукових розробок Куценка Юрія Миколайовича (ТДАТУ) щодо впливу продуктивності та якості томатів сорту «Лілос» та огірків селекції на технологію впливу стаціонарних електричних і статичних полів на розвиток тепличних культур.

Лабораторні дослідження не виявили генетичних змін і кількісних елементів тепличних культур.

Підвищення врожайності томатів і огірків забезпечить експлуатація від впровадження електротехнічної і магнітної систем загальної потужності 1 тис. грн.

Акт складено 2 жовтня 2012 р. у трьох примірниках.

Підписи:

головний агроном

головний бухгалтер

к.е.н., професор

к.т.н., доцент



РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ СИСТЕМ В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

Расчет проводился по методике определения экономической и энергетической оценке использования в народном хозяйстве новой техники и технологий [190, 200].

Оптимальный вариант принятых решений определяется системой экономических показателей. Коэффициент экономической эффективности внедрения электротехнической и магнитной систем рассчитывают по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{нов.техн.}} = \frac{\Delta\Pi}{K} \quad (\text{B.1})$$

где $\Delta\Pi$ – прирост прибыли;

K – общая сумма дополнительных капиталовложений, тыс. грн.

Срок окупаемости дополнительных капиталовложений определяется по формуле

$$T_{\text{доп.кап. влож. нов. техн.}} = \frac{K_1 - K_2}{B_1 - B_2} \quad (\text{B.2})$$

где $T_{\text{доп.кап. влож. нов. техн.}}$ – срок окупаемости дополнительных капитальных вложений на внедрение новых электротехнологий.

K_1, K_2 – капитальные вложения в контрольном и опытном вариантах;

B_1, B_2 – приведенные затраты контрольного и опытного варианта.

Приведенные затраты в контрольном (базовом) и опытном варианте определяются по формуле

$$B_i = C_i + E_n \cdot K_i \quad (\text{B.3})$$

$$B_1 = C_1 + E_n \cdot K_1 \quad (B.4)$$

где C_1, C_2 – себестоимость единицы продукции, грн/ц.;

E_n – нормативный срок окупаемости капитальных вложений, предусматривающий минимально допустимую эффективность вложения средств.

Для создания новой электротехнической и магнитной системы в тепличном хозяйстве необходимо использование электротехнологических установок (ЭТУ). ЭТУ включает в себя: источник стабилизированного напряжения, систему электродов, монтажный комплект проводников и кабелей. Для измерения диэлектрической проницаемости газовой среды используется электронная система, в состав которой входит генератор ГЛПД, работающей на частоте 70 ГГц.

Таблица В.1-

Показатели экономической эффективности

Показатели	Вариант	
	Томат сорт «Лилос»	Огурец Сорт «Кураж»
1	2	3
Урожайность, кг		
опыт	34320,0	32760,0
контроль	11840,0	11680,0
Прибавка урожая, кг	22480,0	21152,0
Затраты на продукцию, контроль, грн.	71040,0	69648,0
Выручка от реализации продукции, контроль, грн	137344,0	119562,4
Себестоимость единицы продукции, контроль, грн/кг	6,0	6,0
Стоимость дополнительно полученной продукции, грн.	263768	217865,6
Дополнительные затраты:		
Стоимость ЭТУ, грн	7300	7300
Стоимость ГЛПД, грн.	15000	15000

INCLUDEPICTURE ".././.././../Temp/FineReader11/media/image35.jpeg" *
 MERGEFORMAT INCLUDEPICTURE
 ".././.././../Temp/FineReader11/media/image35.jpeg" * MERGEFORMAT
 INCLUDEPICTURE ".././.././../Temp/FineReader11/media/image35.jpeg" *
 MERGEFORMAT

Про

Показатели	В:
	Томат сорт «Лилос»
Затраты на электроэнергию, грн	15284,0
Монтаж электрооборудования, грн	3650,0
Стоимость 1 кВт·час. электроэнергии, грн	0,87
Затраты на продукции, опыт	105155,0
Всего дополнительных затрат, грн	151389
Выручка от реализации продукции, опыт, грн	351712,0
Себестоимость единицы продукции, опыт, грн/кг	4,41
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений, лет.	1,53
Уровень рентабельности, %	110,3
Коэффициент экономической эффективности	0,655
Экономический эффект, грн	27500
в том числе грн./м ²	34,4

Таким образом, расчеты показывают, что экономичность внедрения электротехнической и магнитной системы тыс. грн, в том числе грн/м²: томаты – 34,4; огурец – 31,4.

Ведущий экономист

к.э.н., профессор

к.т.н., доцент



ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЗАКАЗА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ



ООО «ПОЛИМАГНИТ»

04080 г. Киев, ул. В.Хвойки, 18/14, корп. №7, оф. №705

тел./факс: 38 (044) 230-60-99, 230-60-98

e-mail: artyushov@polymagnet.com.ua <http://www.polymagnet.com.ua>

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЗАКАЗА МАГНИТНЫХ СИСТЕМ

Заказчик Таврический государственный агротехнологический университет

Адрес, телефон, e-mail: г. Мелитополь пр. Б.Хмельницкого, 18,
тел. 0619-42-31-59, kucenko2010@gmail.com

Контактное лицо (ФИО, должность) Куценко Юрий Николаевич, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода

Требования к магнитному полю

- однородное статическое магнитное поле в почве

Габариты магнитного поля

- диаметр электрода - 0,1 м;
- длина электрода - 0,2 м,
- расстояние между электродами - 0,6 м.

Напряженность магнитного поля в центре объема

- 15 мТл, допуск $\pm \Delta 10\%$

Напряженность магнитного поля в точке

Точка А - 50 мТл, допуск $\pm \Delta 10\%$.

(указать координаты,)

Точка В - 50 мТл, допуск $\pm \Delta 10\%$.

(указать координаты,)

Точка С - 50 мТл, допуск $\pm \Delta 10\%$.

(указать координаты,)

Точка D - 50 мТл, допуск $\pm \Delta 10\%$.

(указать координаты,)

Место эксплуатации магнитной системы

- закрытое помещение – теплица, рН = 7,0....7.5

- содержание углекислоты 0,13 %;

- температура почвы 18... 27 °С;

- почва – чернозем южный;

- влажность – до 100%.

Предусмотреть возможность изменения напряженности

магнитного поля - да, пределы изменения $\pm \Delta 15...50$ мТл

Количество заказываемых изделий - 4 (четыре), шт

Начальник отдела магнитных систем



Р.М. Артюшов

ЭСКИЗНЫЙ РИСУНОК
к техническим условиям для заказа магнитных систем

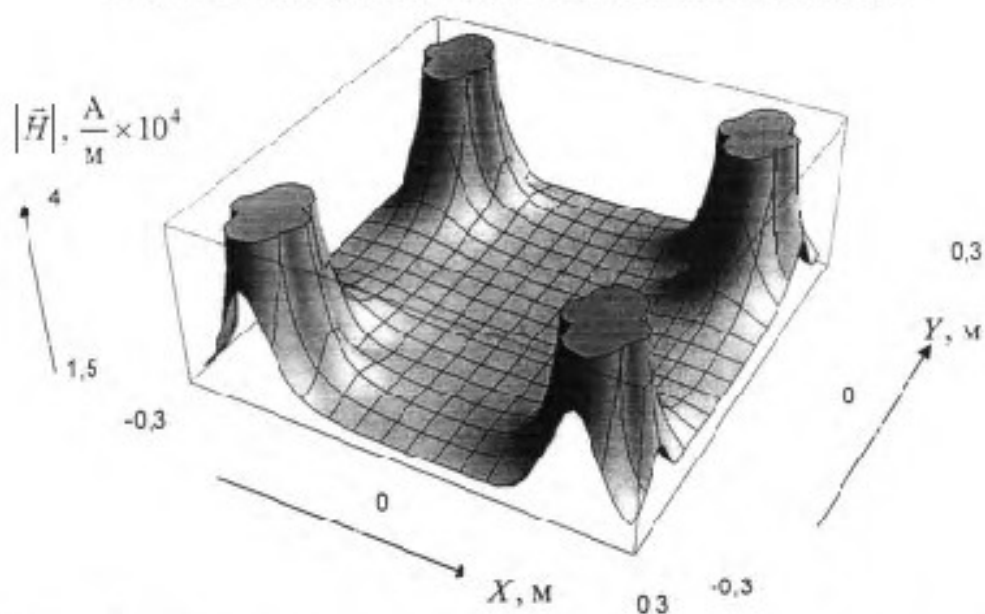
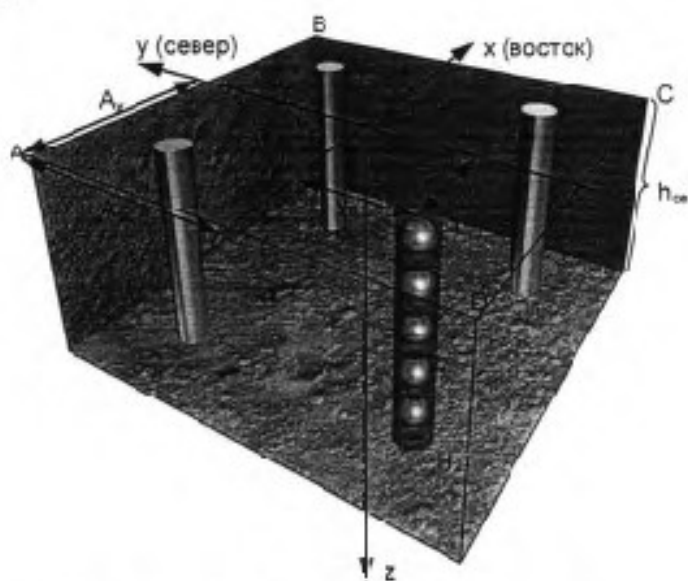


Рисунок 1 - Зависимость амплитуды статического магнитного поля $H^{(0)}(r)$ от координат точек, расположенных между источниками этого поля



$A_x = 0,3 \text{ м}; A_y = 0,3 \text{ м}; x_0 = 0,3 \text{ м}; y_0 = 0,3 \text{ м}; H_0 = 0,2 \text{ м};$

Рисунок 2 – Расположение электродов в почве

Начальник отдела магнитных систем

Р.М. Артюшов

