

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. С. Корко, Е. А. Городецкая

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СТИМУЛЯЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Минск
БГАТУ
2013

УДК 631.531.011.3:53

Корко, В. С. Электрофизические методы стимуляции растительных объектов / В. С. Корко, Е. А. Городецкая. – Минск : БГАТУ, 2013. – 232 с. : ил. – ISBN 978-985-519-602-1.

Обобщены и системно изложены результаты многолетних исследований авторов и других исследователей по разработке электрофизических методов стимуляции растительных объектов. Приведены обзор и анализ современных технологий семеноводства и повышения урожайности сельскохозяйственных культур, определены проблемы сохранности и факторы снижения качества семян. Изложены теоретические основы электротехнологических методов обработки органических материалов и различных сред, рассмотрены физические процессы в электрических полях с заряженными частицами, действующие на них силы. Рассмотрены технологические свойства электромагнитного поля и их использование для стимуляции биологических процессов. Предложены эффективные электротехнологические методы повышения агрономических качеств семян и растений. Представлены результаты моделирования электрических полей и электрофизических процессов, аналитических и экспериментальных исследований предлагаемых технологий стимуляции семян и растений, сформулированы направления дальнейших исследований по углублению и развитию электрофизических методов в сельскохозяйственном производстве.

Рассчитана на специалистов семеноводства, растениеводства, инженерно-технических работников аграрно-промышленного комплекса, лесного сектора; преподавателей, студентов и аспирантов высших учебных заведений биологического и сельскохозяйственного профиля.

Табл. 24. Ил. 74. Библиогр.: 57 назв.

Рецензенты:

заведующая лабораторией прикладной биофизики и биохимии
ГНУ «Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси»,
доктор биологических наук, доцент *Л. Ф. Кабашикова*;
заведующий кафедрой «Технологии и техническое обеспечение
процессов переработки сельскохозяйственной продукции» БГАТУ,
доктор технических наук, профессор *В. Я. Груданов*

ISBN 978-985-519-602-1

© БГАТУ, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕМЕНОВОДСТВА И ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР	8
1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР	8
1.2. ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН	11
1.3. АГРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СЕМЯН РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП КУЛЬТУР	15
1.3.1. Биология формирования семян, их основные типы и морфоструктура проростков	15
1.3.2. Процессы прорастания семян и развития проростков	18
1.3.3. Методы исследования и оценки физиологического качества семян	22
1.4. СУЩЕСТВУЮЩИЕ БОЛЕЗНИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ДЕКОРАТИВНЫХ РАСТЕНИЙ. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕСТИЦИДОВ	35
1.5. ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОСЕВНЫХ КАЧЕСТВ СЕМЯН	40
2. ПРОБЛЕМЫ СОХРАННОСТИ И ФАКТОРЫ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМЯН	46
2.1. ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СЕМЕНАХ ПРИ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКЕ И ХРАНЕНИИ	46
2.2. ВЛИЯНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА КАЧЕСТВО СЕМЯН В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ	49
2.3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА	51

3. ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СТИМУЛЯЦИИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ	57
3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗЛИЧНЫХ СРЕД	57
3.2. ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	61
3.2.1. Назначение и области использования	61
3.2.2. Физические процессы в электрических полях с заряженными частицами	63
3.2.3. Способы зарядки частиц	66
3.2.4. Силы, действующие на частицу в электрическом поле	71
3.3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ И СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ	74
3.3.1. Обработка семян и растений в электромагнитном поле	74
3.3.2. Электрическая и электромагнитная сепарация смесей	82
3.3.3. Ультразвуковая технология обработки семян	100
3.3.4. Плазменно-радиоволновое воздействие на семена	109
3.3.5. Применение электроактивированных растворов	114
4. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ И МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ	121
4.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ	121
4.2. ПОГЛОЩЕНИЕ И ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВЕЩЕСТВЕННЫХ СРЕДАХ	126
4.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗЛИЧНЫХ СРЕД	128
4.4. МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И РЕАКЦИИ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ	131
5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ	138

5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ СМЕСЕЙ	138
5.2. СТИМУЛИРОВАНИЕ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН ПРИ ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ.....	149
5.3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВОЙ И ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН	157
5.4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР	178
5.5. ОБРАБОТКА СЕМЯН УЛЬТРАЗВУКОМ	183
6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СЕМЯН	191
6.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СТИМУЛЯТОРА ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН.....	191
6.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЦЕССОВ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ.....	196
6.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН	213
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	221
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	224

ВВЕДЕНИЕ

Любая прогрессивная технология получения сельскохозяйственной продукции должна предусматривать экономию материальных и трудовых затрат при высокой стабильности получаемых результатов и сохранении единого согласованного во всех звеньях производственного цикла. Поэтому любой агротехнический прием может быть увязан со всеми остальными агротехническими и организационно хозяйственными мероприятиями и представляет собой неотъемлемое звено всего технологического процесса.

Увеличение количества и качества продукции растениеводства является главной задачей в развитии агропромышленного комплекса. Центральным звеном в решении этой проблемы является семеноводство. Семена, носители биологических свойств, в решающей степени определяют качество и количество получаемого урожая.

Особого внимания требуют технологические приемы выведения семян и посадочного материала из состояния покоя для получения более ранних дружных и выровненных всходов, закладывающих основу увеличения урожая, получения ранней и высококачественной сельскохозяйственной продукции. Ученые и специалисты сельского хозяйства постоянно совершенствуют и разрабатывают новые агроприемы и технические средства для предпосевной стимуляции семян с целью улучшения их посевных качеств.

Результаты многолетних научных исследований и производственных испытаний показывают, что для достижения этой цели могут быть с успехом использованы физические факторы, – в первую очередь, электрические и магнитные поля, а также плазма и токи различной частоты.

Целью работы является разработка и совершенствование электрофизических методов и средств контроля и управления эффективностью сельскохозяйственных технологий, обеспечивающих максимально полную реализацию генетического потенциала сельскохозяйственных растений.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1) выполнить обзор и анализ современных технологий производства сельскохозяйственной продукции, применения пестицидов, определить тенденции развития методов обработки, систем и средств контроля и управления ее параметрами;

2) систематизировать и классифицировать параметры жизнеобеспечения растительной продукции, выявить ростостимулирующие эффекты;

3) выявить механизмы электротехнологических воздействий на растительные объекты;

4) разработать математические модели электрофизических характеристик, электрических полей и электротехнологических процессов, направленных на повышение агрономических качеств семян и растений.

1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕМЕНОВОДСТВА И ПОВЫШЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР

Полевые культуры отличаются по ботаническим, биологическим и хозяйственным признакам, по виду продукции, особенностям возделывания и размещения в севооборотах, по степени механизации, способам уборки и другим показателям [1, 2]. Для удобства изучения множества разнообразных полевых культур их разделяют по производственному принципу (назначению) на четыре большие группы – зерновые, технические, кормовые и бахчевые, которые, в свою очередь, делятся на подгруппы (по П. И. Подгорному):

I. Зерновые (возделываются для получения зерна, семян): типичные хлеба (пшеница, рожь, тритикале, ячмень, овес); просовидные хлеба (кукуруза, просо, сорго, рис, чумиза); зерновые бобовые (горох, бобы, чечевица, фасоль, лобия, люпин и др.); прочие зерновые (гречиха и другие незлаковые).

II. Технические (служат источником сырья для промышленности):

1. Масличные: жирномасличные (подсолнечник, сафлор, горчица, рыжик, рапс, лен, сурепица и другие капустные); эфирномасличные (кориандр, анис, анизет, тмин, фенхель, мята, шалфей мускатный, лаванда и др.).

2. Прядильные (волокнистые): растения с волокном на семени (хлопчатник); растения с волокном в стеблях – лубяные (лен прядильный, конопля, кенаф, канатник, джут, рами и др.); растения с волокном в листьях (юкка, сизаль, лен новозеландский и др.).

3. Сахароносные: корнеплоды (сахарная свекла, цикорий); другие сахароносы (сахарный тростник); крахмалоносные (клубнеплоды – картофель, топинамбур); лекарственные, инсектицидные и др.

(мак, валериана, дигиталис, белладонна, табак, махорка, ромашка далматская, анабазис, хмель и др.).

III. Кормовые (основной источник корма для сельскохозяйственных животных): корнеплоды (листоплодные) – свекла, морковь, репа, брюква, кормовая капуста; однолетние бобовые травы (вика, сераделла, пелюшка, однолетние виды клевера); однолетние злаковые травы (суданская трава, могоар, райграсс однолетний и др.); многолетние бобовые травы (люцерна, эспарцет, клевер, люцернец и др.); многолетние злаковые травы (тимopheевка, житняк, кострец, пырей, ежа, райграсс и др.).

IV. Бахчевые (культуры продовольственного, кормового или технического назначения): кормовые (арбуз кормовой, тыква, кабачки); пищевые (арбуз столовый, дыня, кабачки, тыква столовая); технические (люффа).

Существует группировка полевых культур по характеру использования главного продукта, получаемого в урожае. По этому признаку выделено 6 групп: I – зерновые; II – корнеплоды, клубнеплоды, бахчевые, кормовая капуста; III – кормовые культуры; IV – масличные и эфирномасличные; V – прядильные и VI – табак и махорка.

Достоинство семян оценивается по сортовым и посевным качествам.

Сорт – совокупность сходных по хозяйственно-биологическим свойствам и морфологическим признакам растений одной культуры, родственных по происхождению, которые отобраны и размножены для возделывания в определенных природных и производственных условиях с целью повышения урожайности и качества продукции. Сорт – это биологический фундамент урожая. За счет применения районированных сортов и гибридов сельскохозяйственных культур можно значительно повысить урожай.

Наиболее высокими сортовыми качествами обладают семена суперэлиты и элиты. Семена элиты передаются в хозяйства для размножения. Последовательность пересевов, начиная от посева семян элиты, называется репродукцией семян. От урожая семян элиты получают семена первой репродукции, от них – семена второй репродукции и т. д.

В начале XX века мировое население насчитывало около 1,6 млрд человек, к началу XXI века оно составляет 6,2 млрд, а по прогнозу ООН к 2030 г. составит около 10,0 млрд человек. Производство продовольствия должно соответствовать темпам роста

населения, что потребует как минимум 50 % роста совокупного объема производства к 2030 г. В связи с ограниченностью доступных для сельского хозяйства земель и дефицитом водных ресурсов практически весь прирост производства продовольствия должен достигаться исключительно за счет увеличения урожайности.

На протяжении всей истории главной целью прикладных научных исследований в сфере сельского хозяйства являлось создание культур с более высокой урожайностью и более высокими питательными и товарными характеристиками. В ходе «зеленой революции» урожайность сельскохозяйственных культур возросла, но среднегодовые темпы прироста урожайности хлебных злаков устойчиво снижались. Эта тенденция говорит о том, что потенциал «зеленой революции» практически исчерпан, так как применение методов традиционной селекции и интенсивных агротехнических приемов не обеспечивает прироста урожайности.

Следует обратить внимание на актуальность выбранных объектов исследований, особенно на представителей парка зеленных культур. Основной задачей овощеводства является постоянное и достаточное снабжение населения всеми видами овощей, в том числе зелеными и пряно-вкусовыми культурами. В структуре валовой продукции овощеводства РБ все еще беден ассортимент выращиваемых зеленных культур не только в общественном, но и в индивидуальном секторе. Потребность в них удовлетворяется далеко не полностью, наблюдается сезонность, невысокая урожайность и низкое качество продукции.

Причинами их ограниченного выращивания являются несколько взаимосвязанных факторов: консерватизм культуры питания, недостаточность информации по их пищевым и лечебным свойствам, изменение форм собственности и хозяйствования, недостаточное количество сортов, узкий ассортимент листовых зеленных овощей, предлагаемых товаропроизводителями.

Система питания населения Республики Беларусь, к сожалению, еще далека от средиземноморской, признанной самой здоровой в мире. Последняя не только богата оливковым маслом, но и отличается фруктовым и овощным многообразием – это салаты (как блюдо и как растение), огромный ассортимент сортов и видов капусты, зеленных культур и большое количество пряно-ароматических трав. Недавно и в Беларуси появились семена таких «благородных трав», как базилик, коричная палочка, адонис и многих других, разновидности брусники, клюквы, голубики. Созревание этих культур

тур в наших широтах можно ускорить предпосевной обработкой семян. Предварительные опыты дали положительные результаты даже на такой достаточно «капризной» культуре, как базилик.

Доказана уникальная роль зеленных растений в поддержании жизненного тонуса организма человека и снижении степени риска его поражения многими патогенами. Они используются как лечебные средства в народной и традиционной медицине (Брежнев Д. Д., Коровина С. Н., 1981; Синяков А. Ф., 1990; Филонов М. М., 1995; Николайчук Л. В., Баженова Л. А., 1998). Ценность зеленных растений заключается в том, что многие из них являются дешевым источником большой группы биологически активных соединений, воздействующих на процессы жизнедеятельности человека, в том числе на защитные силы организма (Бунин М. С., 1991; Кононов П. Ф., 2004).

Выращивание зеленных и пряно-вкусовых растений с повышенным содержанием биологически активных веществ и антиоксидантов, а также применение экологически чистых и безопасных технологий их возделывания устранил дефицит производства полноценной экологически чистой продукции.

1.2. ПОСЕВНЫЕ КАЧЕСТВА СЕМЯН

Семена любого районированного сорта могут дать высокий урожай, если они обладают хорошими посевными качествами и соответствуют требованиям ГОСТ на посевные качества семян.

Согласно отечественной терминологии, семена как материал для размножения характеризуются посевными качествами и урожайными свойствами. Посевные качества семян – совокупность свойств, характеризующих степень пригодности семян для посева. К основным посевным качествам семян относятся: чистота, всхожесть, энергия прорастания, сила роста, жизнеспособность, влажность, масса 1000 семян, зараженность болезнями и вредителями.

Чистоту от сорняков определяют по ГОСТ 12037–81, степень зараженности болезнями и вредителями – по ГОСТ 12044–93, 12045–97, всхожесть и энергию прорастания – по ГОСТ 12038–84.

Например, посевные качества семян озимой ржи характеризуются следующими показателями: содержание семян основной культуры – 99 %, семян культурных растений – 5 шт./кг, сорных растений – 5 шт./кг, всхожесть – 90 %. В категориях 1–3 репродукции

содержание семян основной культуры – 98 %, семян культурных растений – 40 шт./кг, сорных растений – 20 шт./кг, всхожесть – 87 % [2, с. 140].

Урожайные свойства рассматривают как способность семян формировать растения, обеспечивающие высокую продуктивность культуры.

В настоящее время в англоязычной научной литературе принято понятие «качество семян» (seed quality). В международных семенных лабораториях оценка качества семян осуществляется по следующим показателям: чистота от примесей и сорняков; степень зараженности патогенами; всхожесть или жизнеспособность (viability); способность к быстрому и одновременному прорастанию в полевых условиях (International Rules for Seed Testing, 1999). При этом показатели, характеризующие жизнеспособность и скорость прорастания семян, составляют физиологическую компоненту качества семян, и при их характеристике часто используют термин «физиологическое качество». Определение физиологического качества семян включает их урожайные свойства.

Для оценки физиологического качества семени в первую очередь тестируют на всхожесть. Всхожесть семян является основным общепринятым параметром оценки жизнеспособности как способности к прорастанию (т. е. живое семя или мертвое). Методология определения всхожести хорошо развита и непрерывно совершенствуется в сторону повышения воспроизводимости и статистической достоверности результатов.

Актуальную и широко изучаемую в настоящий момент проблему составляет оценка способности семян к быстрому и одновременному прорастанию в полевых условиях. Согласно определению Международного общества по оценке семян (International Seed Testing Association = ISTA), сила роста – это сумма тех свойств семян, которые определяют их способность к дружному прорастанию и развитию в нормально развитые проростки в широком диапазоне полевых условий среды. Проведенный специалистами анализ литературы по вышеприведенной терминологии позволил заключить, что термины «физиологическое качество» и «сила роста» можно использовать как синонимы.

Разработкой и модификацией методов по оценке силы роста (или физиологического качества) семян сельскохозяйственных культур занимаются специальные комитеты при Международных обществах по оценке семян. В странах СНГ метод по оценке силы

роста семян сельскохозяйственных культур введен в практику в 1966 году (ГОСТ 12040–66), однако в Государственном реестре производителей семян он не является обязательным. В 1995 году появился ГОСТ 30168–95 для оценки семян сахарной свеклы. Сейчас разрабатываются автоматизированные имиджевые системы, когда семена сканируются под микроскопом и данные о морфологических особенностях их строения и/или размерах и т. п. заносятся в компьютер. Основные усилия биологов сконцентрированы на выяснении физиологических механизмов, обуславливающих различия в силе роста семян, особенно на роли процесса старения (Mc Donald, 1999; Walters, 1998). Старение семян считается основной причиной снижения их качества и потери жизнеспособности и включает процесс ухудшения (deterioration) как накопление дегенеративных изменений до тех пор, пока способность к прорастанию не теряется полностью. Старение семян нельзя сравнивать со старением организма животных, поскольку между ними существует принципиальное различие: у животных и человека старение есть генетически запрограммированный во времени процесс угасания активности функциональных систем организма, у семян это влияние внешних условий на организм, находящийся в вынужденном покое. Детериорация семян, приводящая к их старению, может начинаться уже на стадии физиологической зрелости и продолжается при уборке урожая, обработке и хранении семян со скоростью, определяемой их генетическими особенностями и интенсивностью воздействия неблагоприятных экзогенных факторов. Вследствие детериорации семена прогрессивно снижают способность к прорастанию, включая скорость и одновременность прорастания, устойчивость к экзогенным стрессорам. Потеря силы роста у семян предшествует потере всхожести, поэтому семена различных партий с одинаковой лабораторной всхожестью часто могут различаться по их физиологическому состоянию (степени детериорации) и иметь различную силу роста (или физиологическое качество).

Когда условия прорастания оптимальны, полевая всхожесть, как правило, коррелирует с лабораторной, и сила роста семян может не иметь определяющего значения в дружности и полноте всходов. Однако на практике редко встречаются идеальные условия для прорастания, и стрессорные условия окружающей среды (например, низкая или высокая температура и/или влажность) приводят к появлению различий в полевой всхожести в зависимости от силы роста семян.

Посевной годностью семенного материала называется процентное содержание в нем чистых и одновременно всхожих семян. Для определения посевной годности процент чистоты умножают на процент всхожести, произведение делят на 100. Посевную годность устанавливают только для кондиционных семян. Она служит для внесения поправки в весовую норму посева той или иной культуры.

Энергия прорастания – процент проросших семян за определенный срок (3–4 суток). Определяется одновременно со всхожестью. Характеризует способность семян давать в полевых условиях дружные и ровные всходы, а значит, хорошую выравненность и выживаемость растений. Разницу между энергией прорастания и всхожестью считают показателем зрелости семян (разница до 10 % – семена дозревшие, больше 10 % – физиологически недозревшие).

Сила роста – количество здоровых ростков (%), вышедших на поверхность на 10-е сутки, или масса зеленых проростков в пересчете на 100 ростков (г). Семена проращивают в условиях, максимально приближенных к полевым.

Жизнеспособность – содержание в посевном материале живых семян (%). Позволяет устанавливать качество семян и причины их низкой всхожести. Жизнеспособность семян определяют по различию окраски живой и мертвой тканей при выдерживании в растворах тетразола (живой зародыш окрашивается) или в растворе органических красителей: индигокармин, кислый фуксин (окрашиваются мертвые ткани).

Влажность – содержание влаги в семенах, выраженное в процентах по отношению к массе абсолютно сухих семян. Сухие семена хорошо хранятся, не теряют всхожести, устойчивы к поражению болезнями и вредителями, не теряют продовольственной и кормовой ценности. Влажность семян для каждой культуры не должна превышать установленного предела: для зерновых и зернобобовых – не более 15,5 % (норма 14 %); для рапса, льна – не более 12 % (норма 8 %); для озимых культур в переходящих фондах – 12–13 %. При повышенной влажности семян усиливается их дыхание, повышается температура вороха, что приводит к самосогреванию. В морозные дни влажные семена теряют всхожесть.

Масса 1000 семян – масса семян в воздушно-сухом состоянии, г. Определяется для характеристики полновесности и крупности семян. На практике массу 1000 семян используют для расчета весовой нормы посева.

Зараженность вредителями и возбудителями болезней. Семена должны быть чистыми, не пораженными болезнями и не поврежденными вредителями. Наличие инфекции и вредителей снижает полевую всхожесть семян, урожайность растений, товарные и пищевые качества. Посев зараженными семенами не допускается.

За последние 20 лет в мире сформулирована концепция тестирования семян, основанная на оценке их качества как комплексного параметра, характеризующего способность семян к прорастанию в неблагоприятных полевых условиях. Основные усилия в этот период были сосредоточены на разработке и совершенствовании методов, пригодных к использованию в семеноводческих компаниях. С этой целью при Международном обществе по оценке семян был создан специальный комитет по оценке силы роста семян. Благодаря его активной деятельности разработан ряд методик, полезных как для специалистов по проблемам семеноведения и семеноводства, так и для физиологов растений; отдельные из них включены в Международные правила по оценке семян на уровне ГОСТов [1].

1.3. АГРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СЕМЯН РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП КУЛЬТУР

1.3.1. Биология формирования семян, их основные типы и морфоструктура проростков

В течение многих миллионов лет эволюции у растений сформировались специальные образования – диаспоры, которые обеспечивали размножение и расселение видов. На ранних этапах эволюции универсальной диаспорой была спора (водоросли и высшие споровые растения), позднее эта функция перешла к семенам.

Семя – одна из структурных единиц воспроизведения, размножения и расселения, которая содержит зачаток нового растения (зародыш) и специализированную запасную ткань (эндосперм, перисперм), заключенные в защитные покровы – семенную кожуру (Батыгина, 2000). Семя как генеративная диаспора является надежной системой, поскольку в нем имеются специальные защитные оболочки, запас питательных веществ, и оно при прорастании сразу дает проросток. В ботанической терминологии семя представляет собой зародышевую стадию семенных растений.

Семенное возобновление – многоэтапный процесс, при котором путь от семязачатка до семени проходит на материнском растении, а прорастание семян и формирование новой автотрофной особи осуществляется вне связи с материнским организмом. Исследователь при работе с семенами или проростками должен быть хорошо знаком с основными особенностями их морфологии и анатомии, четко представлять, как образуются семена в процессе репродуктивного развития растений, а также важнейшие структуры зародыша в процессе его дифференциации и превращения в проросток.

Основным органом, где происходят процессы семенной репродукции покрытосеменных растений, является цветок (flos – лат. antos – греч.). В обоеполом цветке происходят микро- и макроспорогенез, микро- и макрогаметогенез, опыление, оплодотворение, развитие зародыша и плода с семенами.

Цветок – это укороченный метаморфизированный побег (почка), служащий для образования спор и гамет для полового процесса. В ходе полового процесса образуются семя и плод. Количество семяпочек в завязи у разных видов растений различно. У пшеницы, ячменя, ржи – одна семяпочка, у хлопчатника – несколько десятков, у мака – несколько тысяч, у орхидных – до миллиона. Соответственно, завязь ячменя дает одно семя, завязь мака – тысячи семян. Поскольку семяпочка является мегаспорангием, в ней происходит процесс образования мегаспоры (макроспоры). Внутри нуцеллуса (внутренний массив паренхимных клеток в семяпочке) в результате делений образуется материнская клетка, которая делится в дальнейшем дважды и образует тетраду мегаспор. Из четырех гаплоидных мегаспор три постепенно дегенерируют, а оставшаяся развивается в женский гаметофит, который называется зародышевым мешком. Зародышевый мешок занимает центральную часть семяпочки. Параллельно микроспорогенез в пыльниках заканчивается образованием микроспор (пыльцевых зерен).

Преимущество двойного оплодотворения заключается в том, что происходит очень быстрое развитие запасной ткани. Наличие запаса питательных веществ в этом случае обеспечивает стабильное и быстрое развитие зародыша.

Собственно семя представляет собой созревший семязачаток, содержащий зародыш, запас питательных веществ и покровные ткани, превратившиеся в защитную семенную кожуру или тесту (Эзау, 1980). В связи с этим одной из функций семени является

хранение запасных питательных веществ, которыми обеспечивается формирующийся из семени проросток, пока он не станет способным к фотосинтезу. У большинства растений запасные питательные вещества семени откладываются вне зародыша – в эндосперме или перисперме. Однако у многих двудольных ткани, из которых образуются эндосперм и перисперм, соответственно, центральная часть зародышевого мешка и нуцеллус, недолговечны и целиком или частично поглощаются развивающимся зародышем. В этом случае запас питательных веществ накапливается в тканях зародыша, главным образом в семядолях (фасоль, люпин, горох). Поскольку питательные вещества могут храниться как в зародыше, так и вне его, то соотношение объемов этих частей семени может быть различно. Каждое семя окружено семенной оболочкой. У односемянных плодов (пшеница, салат) наружной является плодовая оболочка – перикарп. Многообразие строения семян обуславливает также и многообразие типов их прорастания и морфологических особенностей проростков. Каждый организм формируется и функционирует в определенных экологических условиях, которые оказывают влияние на ход его онтогенеза, однако возможные отклонения в цикле индивидуального развития при этом, как правило, не затрагивают сложившиеся в процессе эволюции общие закономерности формирования вегетативных органов.

Зародыши семян по степени морфологической дифференциации разделяются на три группы: дифференцированные, недифференцированные и рудиментарные. У семян большинства сельскохозяйственных растений зародыш является хорошо дифференцированным молодым организмом. У двудольных он имеет зачатки вегетативных органов: зародышевый корень (*radicula*), подсемядольное колено или гипокотиль (*hypocotyle*), несущий зародышевые листья или семядоли (*cotyledons*). Корень и гипокотиль составляют осевую часть зародыша (*axes*). Между семядолями находится почечка (*plumula*) и даже может быть зачаток побега. По форме зародыши двудольных могут быть прямыми (табак, клещевина, хурма), согнутыми (куколь), спирально закрученными (повилика), подковообразными (свекла, пастушья сумка), свернутыми напоподобие плоской пружины (хмель) и т. д.

У однодольных растений, в частности у злаков, зародыш расположен у основания зерновки и достигает высокой степени дифференциации. Он имеет семядолю – щиток, напротив щитка расположен небольшой вырост – эпибласт (рис. 1.1).

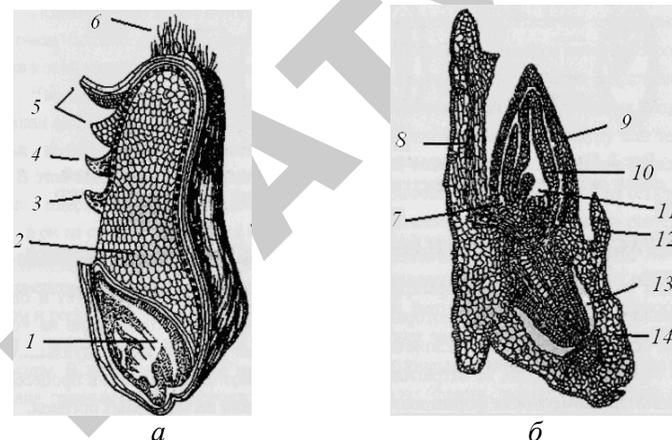


Рис. 1.1. Строение зерновки (а) и зародыша (б) пшеницы:
1 – зародыш; 2 – эндосперм; 3 – алейроновый слой; 4 – семенные оболочки; 5 – плодовые оболочки; 6 – хохолок; 7 – боковая почка в пазухе колеоптиля; 8 – щиток; 9 – колеоптиль; 10 – первый настоящий лист; 11 – апекс; 12 – эпибласт; 13 – главный зародышевый корешок; 14 – колеориза

Прорастание семени, в сущности, является возобновлением роста зародыша в определенных условиях окружающей среды: при наличии влаги, благоприятной температуры и аэрации. Поглощение воды приводит к сильному набуханию семени, сопровождающемуся активацией, прежде всего, дыхания и других метаболических процессов, переводом питательных веществ в доступную для использования в процессах роста зародыша форму. Сначала трогаются в рост зародышевый корень, который, прорвав семенную кожуру, выходит на поверхность семени и внедряется в почву (рис. 1.2).

1.3.2. Процессы прорастания семян и развития проростков

Степень развития гипокотыля у двудольных растений определяет тип прорастания – подземный или надземный. При подземном прорастании, свойственном семенам гороха, вики, дуба, миндаля, гипокотиль и семядоли остаются в почве, а над ее поверхностью появляется побег, развившийся из почечки (апекса).

У подавляющего большинства злаков прорастание подземное. Зародышевый побег, закрытый колеоптилем, выносятся на поверхность в результате удлинения первого междоузлия (рис. 1.3).

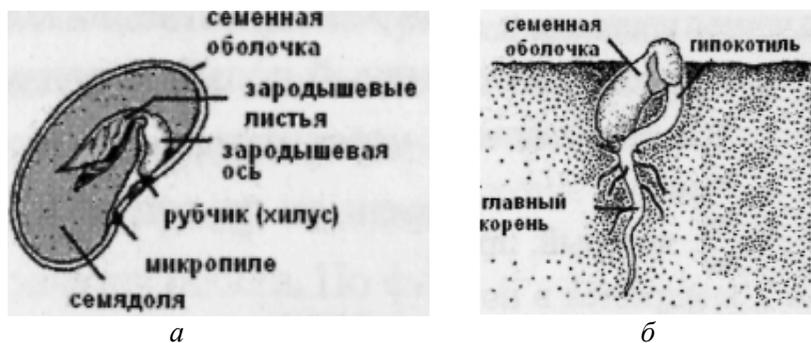


Рис. 1.2. Строение зародыша (а) и подземное прорастание (б) фасоли

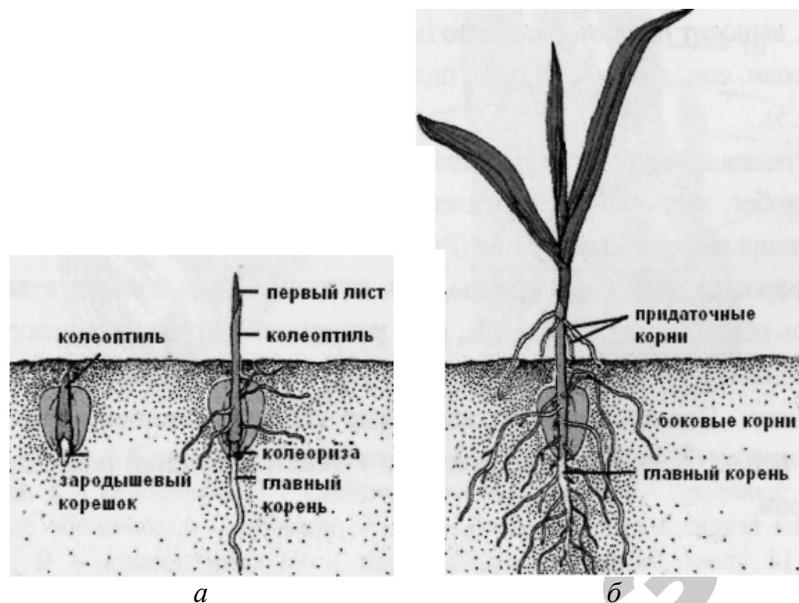


Рис. 1.3. Подземное прорастание семян злаковых (кукуруза) (а) и дальнейшее развитие подземной и наземной вегетативных частей (б)

Проросток имеет все органы, зачатки которых были в зародыше, а также вновь образовавшиеся. Корень, развившийся из зародышевого корешка, называют главным, а его ответвления, растущие обычно горизонтально, – боковыми корнями; переходная зона между

корнем и гипокотилем – корневая шейка, на ней, а также на гипокотиле у многих растений появляются придаточные корни.

Первое междоузлие, расположенное между узлом прикрепления семядолей и первого настоящего листа, называют эпикотилем. У некоторых злаков (кукуруза, овес) удлинится междоузлие между щитком (семядоля злаков) и узлом прикрепления колеоптиля. Его называют мезокотилем. В пазухах листьев на стебле формируются почки (пазушные), из которых развиваются боковые побеги.

При надземном прорастании вслед за зародышевым корнем начинается рост гипокотыля, который вначале петлеобразно изгибается, а затем, выпрямляясь, выносит над поверхностью почвы семядоли. Так развиваются проростки фасоли, сои, люпина, огурца, подсолнечника, лука, льна и других растений (рис. 1.4).

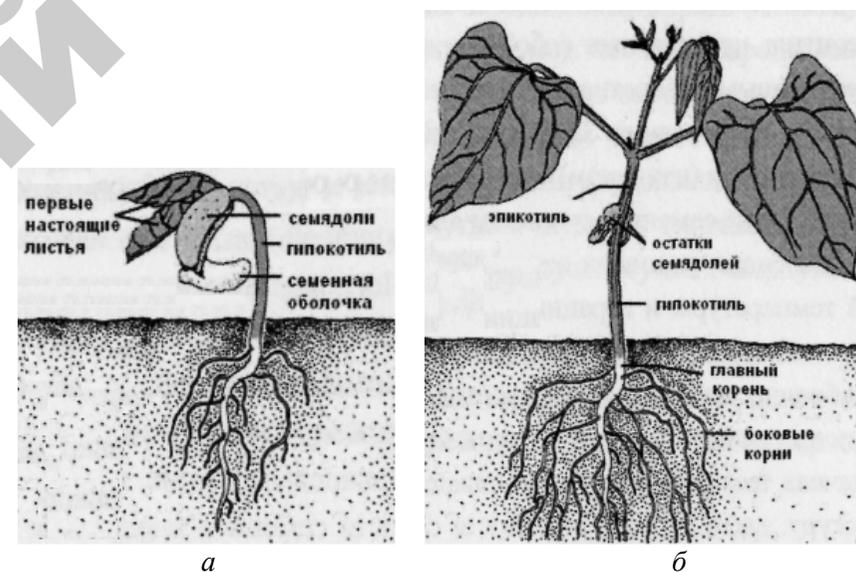


Рис. 1.4. Надземное прорастание семян бобовых растений (фасоль) в фазе первых листьев (а) и в фазе дальнейшего развития (б)

Из почечки зародыша развивается побег, называемый главным. Он заканчивается верхушечной почкой (апексом), осуществляющей нарастание в длину. На стебле различают узлы и междоузлия. Узел – место отхождения листа, междоузлие – участок стебля между двумя узлами.

Считается, что оценка проростков в технологии определения посевных качеств семян занимает второе по значению место после отбора образцов. Главная цель всех семенных тестов – выявление способности семян образовывать нормальные проростки, способные к продолжительному росту в почве при благоприятных условиях.

В последние десятилетия в международных правилах определения качества семян введен раздел, предписывающий оценивать у проростков развитие важнейших морфологических структур, нарушение которого приводит к гибели или слабому росту проростка. Обращается особое внимание и на необходимость оценки потенциалов проростков при попадании их в неблагоприятные условия. С этой целью подготовлены пособия, позволяющие более объективно осуществлять оценку развития проростков. Эти вопросы обсуждаются в изданной на русском языке монографии П. Веллингтона «Методика оценки проростков семян» (1973), где детально описаны признаки нормальных и аномальных по развитию проростков 28 культур с распространением по аналогии этих описаний с иллюстрациями еще на 72 вида растений, относящихся к 8 семействам.

В соответствии с Международными правилами при проведении лабораторных испытаний выделяют следующие категории аномально развитых проростков, которые не могут иметь хозяйственной ценности, поскольку не способны развиваться в нормально развитые растения в полевых условиях:

1) загнившие семена и проростки, в том числе все те, у которых корень и семядоли либо полностью, либо в своей большей части загнили, при условии, что вызывающие гниль патогены не перешли с соседнего проростка;

2) травмированные проростки, у которых отломаны семядоли или часть корня, даже если имеются придаточные корни;

3) аномально развитые проростки, в т. ч. те, которые прорвали семенную оболочку, но прекратили рост, даже если семядоли приобрели зеленую окраску; проростки со слабыми побегам или корнями; проростки, у которых значительная часть корня или побега повреждена возбудителями болезней.

В свою очередь, нормально развитые проростки должны иметь:

1) хорошо развитую корневую систему, включая первичный корешок, за исключением тех растений (например, виды злаковых), которые образуют не менее двух зародышевых корешков;

2) достаточно развитый гипокотиль без повреждения проводящих тканей;

3) не поврежденную почечку с хорошо развитым зеленым листом, находящимся внутри или вышедшим из колеоптиля, или же неповрежденный эпикотиль с нормальной верхушечной почкой;

4) одну семядолю для однодольных и две семядоли для двудольных растений.

1.3.3. Методы исследования и оценки физиологического качества семян

Качество семян является важной характеристикой начальных этапов жизненного цикла растений, и ему следует уделять пристальное внимание для сохранения и воспроизводимости генома сорта или гибрида от поколения к поколению. Семена высокого качества обеспечивают также стартовый потенциал для наиболее оптимального формирования продуктивности и устойчивости растений. В свою очередь, качество семян определяется начиная уже с их формирования на материнском растении и заканчивая посевом.

На качество семян оказывают влияние все процедуры, проводимые после уборки урожая, в том числе и условия хранения. Вопрос о том, что такое качество семян, какие физиологические параметры его определяют и как его достоверно оценить, в настоящее время широко обсуждается учеными в области семеноведения и семеноводства (Basra, 1995; Bino et al., 1998; Hampton, 2002; Powell et al., 1984; Roberts, 1984; Taylor, 2003; Taylor, 1997) [1]. Актуальность данной проблемы определяется ее практической направленностью и востребованностью в сельском хозяйстве.

Стрессоры первоначально влияют на скорость появления всходов, а затем приводят к различиям по темпам роста проростков и конечной продуктивности растений. Семена с высокой силой роста имеют более высокие показатели полевой всхожести при неблагоприятных условиях окружающей среды, хотя по показателям лабораторной всхожести они могут не отличаться от семян с низкой силой роста.

Таким образом, в свете изложенных фактов применение методов, позволяющих оценивать физиологическое качество (или силу роста) семян в лабораторных условиях, приобретает важное практическое значение.

Существующие методы оценки физиологического качества семян могут быть разделены по следующим категориям: оценка прорастающих семян на разных уровнях организации организма и оценка роста проростков.

Оценка прорастания семян. Уровень целого организма включает широко известные в семеноводстве методы оценки всхожести семян. Согласно ГОСТ 12038–84, всхожесть – это способность семян давать нормально развитые проростки за определенный срок (предусмотренный для каждой культуры) при оптимальных условиях проращивания. Процент всхожести устанавливают отношением нормально проросших семян к общему их количеству, взятому для проращивания.

Энергия прорастания характеризует дружность прорастания семян, т. е. количество семян, нормально проросших за более короткий срок, установленный для каждой культуры. Тем не менее, данные, получаемые при оценке энергии прорастания, не всегда достаточно полно характеризуют качество семян. Например, у ячменя энергию прорастания семян следует определять через 3 дня. Однако при оптимальных условиях проращивания часто случается так, что все семена прорастают за 3 дня и в результате показатели энергии прорастания не отличаются от всхожести. Чтобы получить больше информации, в международной практике оценивают скорость прорастания. Подсчеты делают каждый день и рассчитывают время, за которое проросло определенное количество семян. Например, D_{50} есть количество дней, за которые проросло 50 % от общего числа проросших семян. D_{75-25} при этом количественно оценивает одно-временность прорастания. Таким образом, на основе одного только ежедневного подсчета количества проросших семян можно получить достоверную информацию о скорости прорастания.

Следующим подходом к оценке физиологического качества семян является оценка их устойчивости к неблагоприятным факторам прорастания. Диагностика устойчивости растений к различным стрессовым воздействиям, широко используемая в научных исследованиях, также во многом основана на оценке особенностей прорастания семян. Здесь излагаются методы, разработанные Международным комитетом по оценке силы роста семян, осуществляющим свою деятельность под эгидой Международного общества по оценке семян (Seed Vigor Testing Handbook, 1983; Handbook of Vigor Test Methods, 1995).

Тесты на устойчивость к высокой температуре и влажности воздуха (ускоренное старение семян). Тест на ускоренное старение первоначально был разработан для определения потенциальной способности семян к хранению, однако исследования показали, что получаемые результаты хорошо коррелируют с силой семян и их

полевой всхожестью. Данный тест рекомендован Международным обществом по тестированию семян (ISTA) для государственной сертификации качества семян сои (International rules for seed testing, 2004). В исследовательских целях он может быть использован для ряда других культур (горох, бобы, хлопчатник и др.).

Принцип данного теста заключается в выдерживании семян в течение короткого времени при двух основных переменных окружающей среды, которые обычно вызывают детериорацию: высокая температура и высокая влажность воздуха. Семена хорошего качества будут лучше переносить эти экстремальные условия и ухудшаться медленнее, чем семена плохого качества.

Семена взвешивают и помещают на поддон с отверстиями (сито), вкладывают его в пластиковый контейнер, на дно которого налита вода. Контейнер помещают в термостат, где семена подвергаются старению при высокой температуре (41–45 °С) определенное время (48–144 ч), диапазон зависит от вида растений (табл. 1.1). Важно, чтобы семена были размещены на сите в один слой и имели одинаковое расстояние до воды, т. к. наслоение семян повлияет на скорость поглощения паров воды и приведет к вариабельности их влагосодержания. Размер семян также влияет на конечное влагосодержание и последующее прорастание: крупные семена набухают и прорастают медленнее. Однако конечное влагосодержание можно контролировать, если количество семян рассчитывать по массе.

Таблица 1.1

Условия для ускоренного старения (УС) семян некоторых видов растений (данные взяты из Handbook of Vigour Test Methods, 1995).
ВС – влагосодержание семян

Виды растений	Температура, °С	Время, ч	ВС после УС, %
Люцерна посевная (<i>Medicago sativa</i> L.)	41	72	40–44
Фасоль обыкновенная (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	41	72	28–30
Рапс (<i>Brassica napus</i> L.)	41	72	39–44
Кукуруза (<i>Zea mays</i> L.)	41	72	31–35
Салат посевной (<i>Lactuca saliva</i> L.)	41	72	38–41
Фасоль мунго (<i>Phaseolus mungo</i> L.)	45	96	27–32
Лук репчатый (<i>Allium cepa</i> L.)	41	72	40–45

Окончание табл. 1.1

Виды растений	Температура, °С	Время, ч	ВС после УС, %
Перец (<i>Capsicum</i> spp. L.)	41	72	40–45
Клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i> L.)	43	72	39–44
Плевел многолетний (<i>Lolium perenne</i> L.)	41	48	36–38
Сорго обыкновенное (<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench)	43	72	28–30
Овсяница тростниковая (<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.)	41	72	47–53
Табак настоящий (<i>Nicotiana tabacum</i> L.)	43	72	40–50
Помидор (<i>Lycopersicon lycopersicum</i> L.)	41	72	44–46
Пшеница мягкая (<i>Triticum aestivum</i> L.)	41	72	28–30
Соя культурная (<i>Glycine max</i> L. Merrill)	41	72	27–30
Хлопчатник обыкновенный (<i>Gossypium hirsutum</i> L.)	45	72	нет данных
Клевер мясокрасный (<i>Trifolium incarnatum</i> L.)	41	72	
Сосна болотная (<i>Pinus palustris</i> Mill.)	41	96	
Редька посевная (<i>Raphanus sativus</i> L.)	45	48	
Сафлор красильный (<i>Carthamus tinctorius</i> L.)	38	72	
Костер безостый (<i>Bromus inermis</i> Leyss.)	45	72	
Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i> L.)	41	72	
Арбуз обыкновенный (<i>Citrullus lanatus</i> Thunb.)	45	144	

Процедуры:

1. Поддон с отверстиями (сито) и пластиковый или стеклянный контейнер, можно эксикатор (рис. 1.5), тщательно промывают, стерилизуют и высушивают.



Рис. 1.5. Эксикатор с семенами (на дно под сеткой наливают воду или насыщенный раствор солей)

2. Наливают дистиллированную воду в контейнер и аккуратно вставляют туда поддон с отверстиями, чтобы он не касался воды.

3. Определяют начальное влагосодержание семян, значение которого должно находиться в диапазоне, соответствующем сухим зрелым семенам (например, 10–14 % для сои). Если семена слишком сухие или слишком влажные, их соответственно увлажняют или подсушивают до нужной величины влагосодержания.

4. Предварительно взвешенные семена помещают на сито в один слой. Если семена крупные, то используют несколько контейнеров, чтобы поместить необходимое количество семян в один слой.

5. Контейнер закрывают крышкой и помещают в термостат с температурой 41–45 °С. Между контейнерами, а также контейнерами и стенками термостата должно быть не менее 2,5 см свободного пространства, чтобы обеспечить равномерность их нагревания.

6. Время начала эксперимента регистрируют. В ходе эксперимента температура должна быть постоянной, поэтому дверь камеры желательно не открывать до его окончания.

7. Достают семена точно в намеченный срок и в течение 1 часа после окончания инкубации раскладывают их для стандартного определения всхожести согласно ГОСТ.

8. По окончании эксперимента делают контрольный анализ влагосодержания семян. Если полученная величина ниже установленной (см. табл. 1.1), тест не может считаться точным и его следует повторить.

9. Если тестируют одновременно несколько образцов, то их закладывают с интервалом примерно 1 час, что позволяет вовремя проделать работу по раскладыванию семян для определения их всхожести.

Интерпретация результатов: тест на ускоренное старение семян позволяет определить процент нормально и аномально развитых проростков после стрессорного воздействия. При сравнении результатов этого теста с результатами стандартного определения всхожести тех же семян, не подвергнутых ускоренному старению, у семян с высокой силой результаты будут приближены друг к другу в большей степени, чем у семян со средней или низкой силой. Показатели лабораторной всхожести после ускоренного старения хорошо коррелируют со всхожестью семян в неблагоприятных полевых условиях. При использовании методики следует строго следовать процедуре и описанным условиям, поскольку даже незначительные отклонения в температуре, величине образца или времени старения будут приводить к вариациям в конечном влагосодержании семян и/или прорастании, что снизит воспроизводимость этого теста.

Тест на устойчивость к холоду и почвенным патогенам. Холодовой тест был разработан в конце 40-х – начале 50-х годов в США и с тех пор широко используется семенными компаниями, особенно при работе с семенами кукурузы. В Австрии холододовый тест обязателен при сертифицировании семян кукурузы. Показатели холододового теста имеют хорошую корреляцию с полевой всхожестью также для семян сои, хлопчатника, сорго и др. культур. Холодовой тест определяет способность семян прорасти и продуцировать нормально развитые проростки в условиях низких физиологических температур, высокой влажности и в присутствии почвенных патогенов. При низких температурах у семян с низкой силой роста вследствие более высокой проницаемости мембран выделяется значительное количество сахаров, аминокислот и др. веществ, что создает благоприятные условия для размножения патогенных микроорганизмов. Это наиболее распространенный тест, который широко используется для оценки семян в различных странах (ТеКгопу, 1983; Ferguson, 1990; Hampton, 1992; Невзоров и др., 1960). Поскольку способность хорошо прорасти и развиваться в холодной влажной почве зависит от генотипических особенностей, механических повреждений, обработок и физиологического состояния семян, то холододовый тест рекомендуется для оценки (AOSA, 1983):

эффективности фунгицидов при предпосевной обработке; исходного материала в селекции; физиологического состояния семян после хранения и обработок; влияния механических повреждений на прорастание в холодной, влажной почве;

партий семян, рекомендуемых для раннего весеннего сева.

Принцип: семена выдерживают при низкой положительной температуре (для кукурузы +10 °С) 7 дней в нестерильной почве с влажностью примерно 60–70 %, а затем переносят в оптимальные условия (от +22 до +25 °С) на 4–7 дней. Почву желательно взять с поля, на котором планируется высевать семена.

Интерпретация результатов: в каждом эксперименте следует использовать контрольный вариант, когда семена проращивают, не подвергая их холододовому стрессу. Результаты этого сравнения значительно более важны для оценки партии семян, чем простой тест на всхожесть. Обычно рекомендуется начинать проращивание при температуре +10 °С, однако в некоторых странах используют диапазон температур от +8,5 до +13,5 °С, подчеркивая при этом, что различия более отчетливы при использовании более низких положительных температур.

Тест на устойчивость к низким положительным температурам.

Для семян некоторых теплолюбивых культур (напр., огурцы, хлопчатник) температура, рекомендуемая в почвенно-холодовом тесте, может быть слишком низкой. В этом случае используется тест, который представляет собой модификацию описанного метода и проращивания семян в рулонах в течение 7 дней при температуре 18 °С.

Комплексный тест на устойчивость к температурному и кислородному стрессам. Данный тест был разработан в 1982 г. в Венгрии для оценки силы семян пшеницы и кукурузы. Его целью является имитация сразу нескольких стрессорных факторов окружающей среды, под влияние которых семена могут попадать в различных почвенно-климатических условиях.

Принцип: семена подвергают влиянию температурного и кислородного (гипоксия) стрессоров путем полного их погружения в воду и последующей инкубации сначала 48 ч при температуре от +22 до +25 °С, а затем еще 48 ч при низких положительных температурах в пределах 2–5 °С выше нуля. Замачивание инициирует метаболическую активность семян, происходящую в начале прорастания. Однако вследствие постоянной кислородной недостаточности этот процесс затормаживается и вскоре останавливается. Клеточ-

ные мембраны семян в этих условиях постепенно теряют нормальную функциональную активность и начинают «протекать». Низкая температура может приводить в дальнейшем к физиологическим повреждениям семян, уже пострадавших от кислородной недостаточности.

Процедура:

1. 200 семян заливают 200 мл дистиллированной или деионизированной воды, содержащей 0,15 % гипохлорида натрия (для обеззараживания): пшеница – 48 ч при 20 °С, а затем 48 ч при 2 °С; кукуруза – 48 ч при 25 °С, а затем 48 ч при 5 °С.

2. Достают семена из воды, удаляют фильтровальной бумагой излишки воды с поверхности семян и раскладывают на проращивание стандартным рулонным способом.

3. Готовые рулоны ставят в пластиковый контейнер в вертикальном положении (контейнер должен иметь разделительные перегородки, чтобы рулоны не соприкасались). В контейнеры на дно наливают воду и накрывают сверху полиэтиленовыми пакетами для предотвращения потери влаги.

4. Контейнеры с рулонами помещают в термостат при 20 °С для пшеницы и 25 °С для кукурузы и проращивают семена 96 часов. После проращивания рулоны разворачивают и оценивают проростки согласно критериям стандартного теста на всхожесть (нормально проросшие, аномально проросшие, не проросшие). Затем измеряют длину нормально проросших проростков в каждой повторности, определяют среднюю длину пяти самых длинных проростков (d) и умножают ее на коэффициент 0,25.

5. Подразделяют нормально проросшие проростки на две категории:

а) высокая сила: нормально проросшие проростки длиной более чем $0,25d$;

б) средняя сила: нормально проросшие проростки длиной менее чем $0,25d$.

Пример: длина пяти самых длинных проростков – 11,2; 12,6; 12,3; 11,8; 12,1 см. Средняя длина $L = 12,0$ см. Значит $L \cdot 0,25 = 12 \cdot 0,25 = 3,0$ см.

Следовательно, все проростки длиной более 3,0 см имеют высокую силу; все проростки длиной менее 3,0 см имеют среднюю силу. Партия семян может быть оценена следующим образом:

от 80 до 100 % нормально развитых проростков с высокой силой (партия семян с высокой силой);

от 48 до 79 % нормально развитых проростков с высокой силой (партия семян со средней силой);

менее 48 % нормально развитых проростков с высокой силой (партия семян с низкой силой).

Интерпретация результатов: проростки, которые развиваются быстро в описанных условиях, имеют высокую силу. Проростки со средней силой могут выживать при интенсивном стрессе, но их рост и развитие будут заторможены по сравнению с первой группой.

Тест на устойчивость к болезням (тест Хилтнера). Культуры: кукуруза, пшеница, ячмень, рис, овес. Этот тест был разработан *Hiltner* и *Dissen* (1911) для оценки развития на прорастающих семенах болезней, которые вызывают грибы рода *Fusarium spp.* После того как авторы обнаружили, что семядоли инфицированных прорастающих семян короче и не способны проникать через трехсантиметровый слой кирпичного гравия без видимого повреждения, они рекомендовали проводить этот тест при комнатной температуре в темноте, чтобы создать условия для развития патогенов. Дальнейшее совершенствование теста шло в двух направлениях. Во-первых, после того как было установлено, что грибы развиваются лучше при температурах ниже 20 °С, были предложены модификации теста с варьированием температур для определения конкретных видов болезней родов *Drechshera spp.*, *Ascochyta pisi*, *Septoria spp.*, а также для рода *Fusarium spp.* Во-вторых, он развивался также как тест на силу семян, поскольку стало известно, что его результаты зависят от степени повреждения семян не только грибами, но и другими факторами, подавляющими нормальный рост проростков.

Принцип: семена, инфицированные патогенами, поврежденные семена или семена с низкой силой часто неспособны выдерживать неблагоприятные условия прорастания. Субстрат, используемый в тесте Хилтнера, является физическим стрессором. Считают, что проростки, которые способны прорасти сквозь слой субстрата, будут выдерживать физические стрессы и в полевых условиях. Поэтому тест нашел применение как достаточно объективный способ определения силы семян.

Процедура:

1. Добавляют 250 мл воды к 1100 г стерильного кирпичного гравия или мелкого кварцевого песка (просеянным через решето с диаметром 1 мм), перемешивают и дают постоять 1 час для уравновешивания влаги. Помещают полученный субстрат слоем 3 см на

дно пластикового ящика. Раскладывают на нем 100 семян (так, чтобы они не соприкасались друг с другом) и присыпают их трехсантиметровым слоем того же субстрата. Сверху ящик накрывают крышкой или полиэтиленовой пленкой и помещают его в термостат при 20 °С на 14 дней. Крышку или пленку удаляют после того, как появляются всходы. Если тестируемые семена не вышли из состояния покоя, то сначала ящики с семенами выдерживают при 5 °С в течение 4 дней, а затем переносят в термостат при 20 °С.

2. Через 14 дней подсчитывают количество появившихся проростков, извлекают их из субстрата и оценивают согласно критериям стандартного теста на всхожесть (нормально проросшие, аномально проросшие). Затем высыпают субстрат из ящика и подсчитывают количество проростков, которые не смогли прорасти сквозь гравий. Их также оценивают как нормально проросшие и аномально проросшие.

Примечание: в случае, если целью эксперимента является определение грибной инфекции, такой как *Fusarium nivale* и *Septoria spp.*, ящики с семенами инкубируют при 10 °С по крайней мере 14 дней, но не более 21 дня. Интерпретация результатов: нормально проросшие семена обычно оценивают как сильные, и количество их выражают в процентах от общего числа проростков. По другой схеме семена делят на 4 категории: нормально проросшие, аномально проросшие, здоровые не проросшие и инфицированные не проросшие. Первая категория семян (проросшие нормальные) является показателем силы семян данной партии семян. Кроме злаковых культур этот тест дал положительные результаты для крупно- и мелкосемянных бобовых, сахарной свеклы, горчицы и др. видов. Однако при этом для каждой культуры следует регулировать толщину слоя субстрата над семенами. Хотя этот тест имеет хорошую воспроизводимость, результаты могут сильно варьироваться по сравнению со стандартным тестом на всхожесть. Кроме того, тест требует много времени и места, имеются также трудности в подготовке субстрата.

Следует отметить, что тест Хилтнера является единственным тестом, принятым в отечественном семеноводстве на уровне ГОСТ для оценки силы роста семян (ГОСТ 12040–66 и 30168–95).

Биохимические тесты. Использование биохимических показателей основано на соответствующих изменениях, происходящих в клетках семян при старении. Эти изменения сложно наблюдать в покоящихся семенах с низким уровнем влагосодержания, поэтому

чаще всего требуется инициация прорастания. Показатели, используемые для изучения изменений, ассоциированных с качеством семян, должны быть объективными и воспроизводимыми; должны обеспечивать возможность работать с большим количеством образцов; быть непродолжительными во времени. На деле ни один из известных на сегодняшний момент методов, имея достаточное количество достоинств, не отвечает всем этим требованиям, что стимулирует ученых к поиску новых параметров и разработке новых методов оценки физиологического качества.

Из наиболее широко распространенных биохимических тестов оценки качества семян можно упомянуть следующие:

1) тетразольный метод – основан на измерении дегидрогеназной активности, уровень которой, как было установлено, коррелирует с жизнеспособностью семени (Tetrazolium Testing Handbook, 2000; ГОСТ 12039–82). Водный раствор хлористого тетразола (2-3-5-трифенил-тетразол-хлорид) под влиянием дегидрогеназы образует водонерастворимое соединение красного или малинового цвета – фармазан. В результате семена, замоченные в тетразольном растворе, окрашиваются в красный цвет, интенсивность которого зависит от активности дегидрогеназы. У мертвых или покоящихся семян окраски не появляется;

2) кондуктометрический метод – измерение количества электролитов, вышедших в раствор из растительной ткани. Для семян впервые его использовали Hibbard и Miller в 1928 году. Сейчас он широко применяется в Европе, Австралии и Северной Америке для оценки потенциальной полевой всхожести многих культур, однако наиболее распространен при работе с семенами бобовых. Данный тест рекомендован Международным обществом по тестированию семян (ISTA) для государственной сертификации качества семян гороха (International Rules for Seed Testing, 2004).

Оценка проростков. Несмотря на то, что стандартный тест на всхожесть проводится на основе подсчета всех нормально проросших семян, скорость прорастания или роста, а также силу проростков при этом не учитывают. Вместе с тем в литературе зафиксированы различные аспекты взаимосвязи детериорации семян с развитием проростков.

Принцип: семена с очевидными симптомами детериорации, например, аномальные проростки, исключаются при учете процента всхожести семян. В ряду же проростков, признанных нормально проросшими, некоторые признаки детериорации не принимаются

в расчет. Данный тест учитывает эти различия путем измерения роста проростков и/или классификации их на сильные и слабые.

В качестве индикаторов здесь используются линейные размеры и сухой вес проростков.

Измерение линейных параметров. Культуры: пшеница, ячмень, кукуруза, овес, овсяница.

Процедура:

1. Метод основан на рулонном способе проращивания семян с небольшими модификациями. Каждый рулон должен содержать три слоя бумаги: два под раскладываемыми семенами и один сверху.

2. Бумагу увлажняют соответственно требованиям для проращивания семян. Для удобства можно до увлажнения провести линию, по которой затем будут разложены семена (15 см от верхнего края бумаги). От центральной линии по направлению к верхнему краю бумаги можно провести дополнительные параллельные линии с интервалом в 1 см, чтобы ускорить в дальнейшем оценку длины проростков.

3. На два слоя бумаги раскладывают по 25 семян так, чтобы сторона с зародышем была наружу от бумаги, а сам зародыш был ориентирован вниз. Затем семена покрывают третьим слоем бумаги, рулон плотно сворачивают в трубку примерно 4 см диаметром и фиксируют липкой лентой.

4. Готовые рулоны помещают в контейнер в вертикальном положении (контейнер должен иметь разделительные перегородки, чтобы рулоны не соприкасались). В контейнеры на дно наливают охлажденную воду и накрывают сверху полиэтиленовыми пакетами для предотвращения потери влаги.

5. Контейнеры ставят в термостат с температурным режимом, соответствующим условиям стандартного теста на всхожесть.

6. Через определенный период времени (согласно условиям стандартного теста на всхожесть) рулон разворачивают и подсчитывают количество нормально проросших, аномально проросших и не проросших семян.

7. Измеряют длину проростков. Для удобства пользуются дополнительными параллельными линиями, проведенными на бумаге. Подсчитывают количество проростков, которые лежат между центральной линией и очередной из проведенных параллельных линий (с интервалом в 1 см). Умножают количество проростков на расстояние (в см) от центральной до данной параллельной линии

и суммируют полученные значения. Результат делят на количество семян, разложенных на проращивание:

$$L = \frac{n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 2 + \dots + n_{15} \cdot 15}{N},$$

где L – средняя длина проростков в см;

n_1, n_2, \dots, n_{15} – количество проростков между центральной линией и очередной параллельной линией;

1, 2, ..., 15 – расстояние от центральной линии до очередной параллельной, см;

N – общее количество семян, разложенных на проращивание.

Интерпретация результатов: длина проростка через определенный интервал времени является суммирующей от времени, необходимого для прорастания семени и последующей скорости роста проростка. Партия семян, при прорастании которой формируются более длинные проростки, рассматривается как партия семян с большей силой.

Условия тестирования (влажность, температура) оказывают значительное влияние на результаты, поэтому сравнение данных, полученных в разное время, нежелательно. При необходимости осуществления такой возможности Реггу в 1987 г. предложил пользоваться корректирующим коэффициентом. Для расчета коэффициента средняя длина проростка d , полученная в конкретном эксперименте, умножается на 10 и затем делится на значение для контрольного образца C :

$$L = \frac{d \cdot 10}{C}.$$

В этом случае правомерно сравнивать значения, получаемые в разных экспериментах. Семена до начала эксперимента не рекомендуются подвергать обеззараживающим процедурам.

Определение сухой массы. Культуры: соя, кукуруза.

Процедура:

1. Готовят рулоны с семенами и ставят на проращивание.

2. Через определенный период времени (согласно условиям стандартного теста на всхожесть) разворачивают рулон и подсчитывают количество нормально проросших, аномально проросших и не проросших семян.

3. Удаляют аномально развитые проростки и не проросшие семена.

4. У нормально развитых проростков удаляют остатки семян и/или семядолей.

5. Высушивают проростки при 80 °С в течение 24 ч.

6. Взвешивают высушенные проростки и делят массу всех нормально развитых проростков на их количество.

Интерпретация результатов. Сухая масса проростка через определенный интервал времени является суммирующей от времени, необходимого для прорастания семени, и эффективности использования запасов эндосперма на формирование первичных морфоструктур. Партия семян с более высоким процентом прорастания и более высокими значениями сухой массы проростков рассматривается как партия семян с большей силой.

Исследование морфологических особенностей. Культуры: горох, кормовые бобы, соя. Простое измерение линейных размеров или сухой массы не всегда подходит для оценки роста некоторых культур из-за их морфологических особенностей или из-за того, что «слабые» семена могут продуцировать «слабые» проростки, такие же по длине, как и «сильные». Альтернативный метод измерения силы семян заключается в модификации стандартного теста на всхожесть. При классификации нормально проросших проростков на сильные и слабые в данном тесте используют характеристики четырех морфоструктур: корневая система, гипокотиль, семядоли и эпикотиль [1].

1.4. СУЩЕСТВУЮЩИЕ БОЛЕЗНИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ДЕКОРАТИВНЫХ РАСТЕНИЙ. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕСТИЦИДОВ

Важными причинами, сдерживающими повышение урожайности, считаются низкая всхожесть, восприимчивость культивируемых видов и сортов к болезням и вредителям, слабая энергия прорастания семян, в т. ч. из-за их твердокаменности. Немаловажным является также соблюдение оптимальных условий хранения выращенной продукции, так как из-за воздействия грибных, вирусных, бактериальных и др. заболеваний потери могут достигать 20 % и более.

Обзор каталога основных болезней, поражающих сельскохозяйственные и декоративные растения в Республике Беларусь, показал, что наиболее опасным заболеванием, например, тюльпана

является *серая гниль*, возбудителем которой является гриб *Botrytis tulipae* (Lib.) Lind. Причем в отдельные годы распространенность болезни достигает 100 %. Луковицы тюльпана поражаются *склероциальной гнилью* (*Sclerotinia bulborum* Walk., *S. tuliparum* Kleb.). Пораженные луковицы загнивают в почве и дают деформированные слабые проростки или вообще не прорастают, они оплетены белым мицелием с черными склероциями. Поражение луковиц вызывается также грибами *фузариоза* *Fusarium oxysporum* Schl., *пенициллеза* *Penicillium corymbiferum* West и проявляется в апреле-октябре, в период хранения.

Виды грибов рода *Botrytis* паразитируют на многих растениях, вызывая серую гниль побегов, листьев, бутонов, цветков, семян – это более 200 видов растений – сложноцветных, пасленовых, бобовых, зонтичных [3]. На распространение заболевания оказывают благоприятное влияние дождливая и затяжная весна, переменчивая температура, условия возделывания (загущенность посадок, оставление растительных остатков, избыток азота, недостаточное рыхление почвы, несоблюдение севооборота). Фитопатологомониторинг показал круг растений-хозяев грибов *Botrytis* – это интродуцированные и аборигенные виды: сложноцветные, лютиковые, лилейные, норичниковые, гвоздичные, крестоцветные, касатиковые, первоцветные, губоцветные, пасленовые, фиалковые, маковые, камнеломковые, бурачниковые, рутовые, геснериевые, гераниевые, орхидные, кипрейные, бегониевые, кактусовые, перечные и др. – всего растения 51 родов. *Серой гнилью* высокой степени интенсивности поражались следующие однолетние и двулетние цветочные культуры: *Aster*, *Digitalis*, *Dianthus*, *Gypsophila*, *Matthiola*, *Papaver*, *Petunia*, *Salvia*, *Tagetes*, *Viola*, *Zinnia* – у этих растений заболеванию подвержены листья, бутоны и цветы.

Выход и качество лекарственного сырья также значительно снижаются вследствие поражения растений вирусами. Размножаясь в растительных клетках и используя их ресурсы для своей репродукции, вирусы не только служат источником инфекции для других растений, но и неизбежно вызывают нарушения в обмене веществ растений-хозяев. Отличающиеся высокой вирулентностью штаммы могут вызывать остро протекающий патологический процесс, приводящий к гибели растения. В других случаях растение переносит патогенное действие возбудителя вирусной инфекции, подвергаясь хроническому заболеванию, длящемуся в течение всего периода вегетации. Выход лекарственного сырья значительно снижают ви-

русы мозаики люцерны, огурцов, белены, вирус кольцевой пятнистости табака на паслене узколистном, дурмане, белене. Эти переносимые тлями вирусы также опасны для мяты перечной, бадана, хмеля, алтея, лимонника, жимолости, голубики. Душица, салат, укроп, петрушка иногда поражаются мучнистой росой *Erysiphe labiatum f. origanum*, фузариозом *Fusarium solani App. et Wz.* и фомозом *Phoma spp. Fr.* Для эхинацеи пурпурной (*Echinacea purpurea (L.) Moench*) выявлены экземпляры с больными листьями хлорозного вида. Исследования на тест-растениях и подтвердившая результаты электронная микроскопия показали присутствие возбудителя ВОМ (*Cucumber mosaic virus*), относящегося к политрофным вирусам и имеющего широкий круг растений-хозяев. Было сделано заключение, что в связи с большим видовым разнообразием патогенных грибов и значительной степенью поражения ими лекарственных растений необходим поиск эффективных, экологобезопасных методов борьбы с ними.

Открытие пестицидов – химических средств защиты растений и животных от различных вредителей и болезней – одно из важнейших достижений современной науки. Сегодня в мире на 1 га вносится 300 кг химических средств. Однако в результате длительного применения пестицидов в сельском хозяйстве и медицине (борьба с переносчиками болезней) почти повсеместно отмечается снижение их эффективности вследствие развития резистентных растений и вредителей и распространения «новых» вредных организмов, естественные враги и конкуренты которых были уничтожены пестицидами. В то же время действие пестицидов стало проявляться в глобальных масштабах. Из громадного количества насекомых вредными являются лишь 0,3 %, или 5 тыс. видов. У 250 видов обнаружена резистентность к пестицидам. Это усугубляется явлением перекрестной резистенции, заключающейся в том, что повышенная устойчивость к действию одного препарата сопровождается устойчивостью к соединениям других классов. С общебиологических позиций резистентность можно рассматривать как смену популяций в результате перехода от чувствительного штамма к устойчивому штамму того же вида вследствие отбора, вызванного пестицидами. Это явление связано с генетическими, физиологическими и биохимическими перестройками организмов. Неумеренное применение пестицидов (гербицидов, инсектицидов, дефолиантов) негативно влияет на качество почвы. В связи с этим усиленно изучаются судьба пестицидов в почвах и возможности их обезвреживания

химическими и биологическими способами. Очень важно создавать и применять только препараты с небольшой продолжительностью жизни, измеряемой неделями или месяцами. В этом деле уже достигнуты определенные успехи и внедряются препараты с большой скоростью деструкции, однако проблема в целом еще не решена.

Важное экономическое значение пестицидов обуславливает рост объема их производства и применения в мировом земледелии. Анализ современных данных показывает, что существует прямая связь между показателями урожайности сельскохозяйственных культур и интенсивностью использования пестицидов.

Согласно данным Института защиты растений НАН Беларуси, проведение защитных мероприятий обеспечивает в среднем прибавку урожая от 5,7 до 6,5 ц/га зерна, 40–60 ц/га картофеля, корнеплодов, плодов и овощей, 1,5–2 ц/га льноволокна при окупаемости затрат в 1,7–2 и более раз. Уровень рентабельности защитных мероприятий колеблется от 118,2 % на зерновых культурах до 205,5 % на картофеле. Для того чтобы повысить среднюю урожайность зерновых культур до 40 ц/га, картофеля – до 300, сахарной свеклы – до 400, рапса – до 20, льна (волокно) – до 10, кукурузы – до 500 ц/га наряду с оптимизацией всех элементов технологий их возделывания, минимальный объем обработок посевов основных сельскохозяйственных культур против вредных организмов необходимо увеличить в 1,6 раза к уровню 2004 года. Более того, защита растений является заключительным звеном технологии возделывания культуры, включая хранение урожая, и по существу определяет эффективность других, в том числе наиболее емких энергетических вложений. К слову, в мире на внесение химических средств защиты растений затрачивается в среднем 16,5 доллара на гектар. Наиболее защищаемые культуры – сахарная свекла (59 долларов), фрукты и овощи (26), картофель (24), пшеница (16 долларов). По расчетам, в РБ на закупку средств защиты в зависимости от фитосанитарной ситуации ежегодно требуется от 80 до 140 млн долларов. Статистика использования пестицидов в Беларуси за последние 30 лет свидетельствует, что за каждые пять лет объем защитных мероприятий (в пересчете на однократную обработку) удваивался. Аналогичная картина наблюдается и сейчас, когда потребность в пестицидах за пять лет – с 2005 – практически выросла в два раза.

Для уменьшения возможной опасности разработаны жесткие требования к современным пестицидам. Во-первых, низкая токсичность для человека, полезных животных и других объектов

окружающей среды. И во-вторых, отсутствие отрицательных эффектов при длительном воздействии малых доз, в том числе мутагенного, канцерогенного и тератогенного (повреждающего зародыш) действия.

В июле 2007 года состоялся пуск первой очереди предприятия по производству химических средств защиты растений ООО «Франдеса» в городе Береза Брестской области. Уже в 2008 году произведено и реализовано в республике более 1,2 млн литров гербицида Шквал и около 100 тыс. литров фунгицида Эхион на общую сумму свыше 32 млрд рублей. При этом препараты получили высокую оценку у потребителей. Проектная мощность первой очереди производства составляет более 10 млн литров пестицидных препаратов в год. В течение 2008–2012 годов производственная мощность предприятия увеличится в четыре раза: к 2012 году можно будет выпускать до 30 млн литров препаративных форм средств защиты растений и в дальнейшем 8–10 тыс. тонн действующих веществ, по словам академика Ф. А. Лахвича [4].

К участию в госпрограмме «Пестициды-2» наряду с учреждениями НАН Беларуси будут привлечены организации различной ведомственной принадлежности. Как результат, в 2013 году в республике планируется выпускать свыше 90 наименований средств защиты растений, в том числе 45 – гербицидов (из них 6 – лифосат-содержащих), 16 – фунгицидов, 11 – инсектицидов и 19 – протравителей семян.

Как видно, к настоящему времени сформировался своеобразный «пестицидный парадокс», смысл которого состоит в том, что человечество, применяя средства защиты растений для уменьшения потерь и повышения урожая сельскохозяйственных культур, само становится мишенью их воздействия. Последнее может быть связано как с непосредственным влиянием при попадании химических соединений в организм, так и с опосредованным действием по пищевым цепям. С другой стороны, неуклонный рост числа применяемых пестицидов создает неблагоприятную ситуацию для фито- и зооценозов. Попадание значительных их количеств с поверхностными и грунтовыми водами с полей приводит к деградации экосистем водоемов и водотоков и быстрому уменьшению ресурсов чистой воды.

При исследовании действия большинства пестицидов основное внимание уделялось их конечным мишеням действия, которые преимущественно расположены на внутриклеточных мембранных

структурах: для симтриазинов это – мембраны тилакоидов, где осуществляется фотосинтетический перенос электронов от ФСII к ФСI, для фунгицидов – биосинтез эргостерина, а пиретроидные инсектициды рассматривались с точки зрения их влияния на функционирование Na^+ -каналов мембран клеток насекомых. При таких подходах не принималось во внимание, что при достижении места своего основного действия у защищаемых растений пестициды должны преодолеть ряд структурных барьеров, в первую очередь, плазматическую мембрану растительной клетки [5]. Таким образом, эффективное решение указанных задач не может быть осуществлено без вскрытия мембранных механизмов действия гербицидов, в частности, их влияния на функционирование отдельных ион-транспортных систем внешней плазматической мембраны *in vivo*.

В настоящее время известны различные механизмы токсического воздействия пестицидов на чувствительные к ним организмы. Однако во всех случаях основным местом действия пестицидов является система клеточных мембран. Среди разнообразных физико-химических свойств пестицидного препарата определяющее влияние на характер его взаимодействия с липидным биослоем мембраны оказывает, в первую очередь, липофильность. Большая часть пестицидов характеризуется высокой липофильностью. Не составляют исключения в этом плане триазиновые гербициды, производные сульфонилмочевин, триазоловые фунгициды, пиретроидные инсектициды. В связи с этим встраивание пестицидов в липидный матрикс мембран приводит к нарушению их барьерных свойств, как показано в исследованиях, путем модифицирующего действия на функционирование транспортных систем плазматической мембраны.

Более глубокое погружение в тематику пестицидного воздействия не входило в цели нашего исследования, мы лишь обозначили проблему, которую предлагаем решать иными, менее «болезненными» для человека и окружающей среды средствами.

1.5. ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОСЕВНЫХ КАЧЕСТВ СЕМЯН

Основой дальнейшего подъема урожайности сельскохозяйственных культур составляют такие мероприятия как улучшение семеноводства, выведение новых сортов, освоение севооборотов, со-

вершенствование качества обработки почвы, мелиорация сельскохозяйственного производства. В вопросе семеноводства первостепенное значение уделяется получению семян с высокими посевными качествами. Этому способствует совершенствование системы семеноводства, перевод его на промышленную основу, разработка и внедрение средств защиты культурных растений. Все другие методы улучшения качеств семян, создающих предпосылки к повышению урожайности, являются второстепенными, хотя при определенных условиях могут вызвать существенную прибавку урожая и быть экономически эффективными. К таким методам следует отнести и многочисленные способы предпосевной обработки семян, основанные на различных по своей природе факторах воздействия (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Классификация приемов предпосевной обработки семян

Факторы воздействия химической природы обычно подразделяют на две группы: росторегулирующие вещества и химические мутагены. Росторегулирующие вещества применяются обычно в виде водных растворов для опрыскивания вегетирующих растений или замачивания семян. Большинство из них несвойственны растительному организму, т. е. они не являются продуктами обмена. Следовательно, введенные соединения выполняют роль своеобразных раздражителей, роль эффекторов, изменяющих структурное состояние протоплазмы растительных клеток и приводящих к наиболее полной реализации их функций.

В качестве перспективных химических стимуляторов в различное время рассматривались дикарбоновые кислоты (янтарная), фунгицидные препараты (ГМТД), микроэлементы (цинк, бор, медь, железо, марганец, молибден и т. д.), ростостимулирующие вещества (гиббереллин, гетероуксин, тиамин, ауксин, нефтяное ростовое вещество и т. д.). Сильной физиологической активностью обладают дихлорфеноксисукусная кислота (2,4-Д), динитроортокрезол (ДОК), марганцовокислый калий. Значительный эффект как по количеству появившихся всходов, так и в последующем их развитии дает совместная обработка ростостимулирующими веществами с микро- и макроэлементами.

Получение качественных семян – длительный и сложный процесс, предполагающий комплекс мероприятий. Урожайные свойства семян определяются наследственностью (генетическая природа сорта) и изменчивостью, возникающей под влиянием условий окружающей среды. Качество семян формируется в поле и на этом этапе зависит от экологических и агротехнических условий. Экологические условия выращивания сельскохозяйственных культур включают обеспеченность светом, влагой, температурный режим.

Агротехнические условия – соблюдение принятой для данной зоны технологии выращивания культуры. В первую очередь это выбор районированного сорта с высокими качественными показателями. Кроме того, размещение семенных участков по лучшим предшественникам, применение необходимой системы удобрения, обработки почвы, ухода за посевами, уборка урожая в оптимальные сроки.

Убранные с семенных участков семена перед закладкой на хранение должны пройти первичную очистку (от крупного сора, от семян сорняков, битого зерна и др.), сушку (доведение до стандартной влажности), сортировку (выделение крупных полновесных се-

мян). После этого семена хорошо сохраняют посевные качества и урожайные свойства.

Для повышения качества посевного материала заблаговременно проводится его подготовка, которая может включать следующие приемы: протравливание, инкрустацию, воздушно-тепловой нагрев, инокуляцию, дражирование, стратификацию, намачивание [6], а также различные методы повышения биологической активности и стимулирования всхожести семян, активации жизнедеятельности проростков и растений.

В защите растений обязательным приемом является обеззараживание семенного и посадочного материала от грибных и бактериальных болезней, предохранение от повреждений почвообитающими вредителями. Применяют химические препараты Байтан универсальный, Агроцит, Витавакс, Гексатиурам, Панорам, Пентатиурам и др. [7].

Протравливание семян совмещают с инкрустацией. Для более полного закрепления пестицида на семенах рекомендуется использовать пленкообразующие составы, т. е. смесь пестицидов с растворами полимеров. Применяют микроудобрения: марганец сернокислый, медь сернокислую, цинк сернокислый, кобальт сернокислый, молибденовокислый аммоний и др. [7]. В качестве пленкообразователей рекомендованы полимеры: натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы.

Воздушно-тепловой обогрев для повышения всхожести семян особенно необходим в условиях, когда их созревание проходило при пониженных температурах и высокой влажности, что замедляло послеуборочное дозревание. Семена оставались жизнеспособными, но маловсхожими. Такой обогрев необходим семенам озимых культур, используемым для посева в год уборки урожая. Его проводят в солнечную погоду на открытой площадке в течение 5–7 дней. Лучшие результаты дает активное вентилирование прогретым воздухом.

Инокуляция – обработка семян зернобобовых культур и многолетних бобовых трав бактериальными препаратами. Способствует образованию на корнях бобовых растений клубеньков, в которых находятся клубеньковые бактерии из рода *Rizobium*. В качестве инокулянта применяют сапронит-1 (200 мл на гектарную норму семян + 2 л воды). Для разных бобовых культур используют специальные штаммы клубеньковых бактерий.

Дражирование – обволакивание семян (свекла, бобовые травы, овощные культуры) защитной питательной оболочкой шаровидной

формы в специальном аппарате – дражираторе. Это позволяет высевать меньшими нормами и более равномерно по длине рядка, облегчает высев мелких шероховатых семян (морковь), улучшает условия роста растений и повышает урожай.

Для дражирования применяют смесь нейтрализованного торфа и перегноя, в которую добавляют клеящие вещества, минеральные и бактериальные удобрения, микроэлементы, стимуляторы роста и др. Такие семена могут храниться 6–9 месяцев. Высевают их во влажную почву.

Калибровка – выделение семян по размерам.

Скарификация – искусственное повреждение твердых оболочек семян многолетних бобовых трав (клевер, люцерна, донник и др.) для повышения всхожести. После скарификации высеванные семена лучше впитывают воду, быстрее набухают и прорастают. Царапины наносят скарификаторы. Можно наносить их путем перетирания семян с песком, железными опилками и др.

Стратификация – длительное воздействие низких температур (от 0 до 35 °С выше нуля). Семена выдерживают во влажном песке, торфе, на льду (1–3 месяца) при температуре в пределах от 0 до 5 °С или под снегом. Семена яблони при этом дают дружные всходы.

Намачивание семян для ускорения появления всходов (овощи). Иногда в воду добавляют микроэлементы, марганцовокислый калий, биологически активные вещества. При механизированном посеве семена подсушивают.

Проращивание клубней картофеля на свету ускоряет рост и развитие картофеля, повышает урожай на 2–3 т/га. Проращивание проводят в теплых (12–15 °С выше нуля) и светлых помещениях при относительной влажности воздуха 80–85 % в течение 25–30 дней. При механизированной посадке длина ростка не должна превышать 0,5 см (18–20 дней).

Важным фактором, способствующим нарушению неглубокого физиологического покоя семян многих видов, а также росту изолированных зародышей, является свет. Для того чтобы светочувствительные семена приобрели способность прорасти, достаточно подвергнуть их кратковременному освещению в набухшем состоянии белым или, лучше, красным светом. Длительность освещения обратно пропорциональна его интенсивности. При достаточно высокой яркости освещать семена можно в течение нескольких минут. Однако превращение фитохрома может осуществляться, хотя и гораздо медленнее, при очень низкой интенсивности света, порядка 2000–5000 лк.

Для стимуляции прорастания покоящихся семян в настоящее время обычно используют обработку семян гибберелловой кислотой, менее доступны, хотя нередко гораздо более эффективны, другие гиббереллины. Нередко используют кинетин, бензиламинопурин, иногда применяются фенилмочевина, тиомочевина, калийная селитра (KNO_3) и некоторые другие.

Следует помнить, что если диапазон стимулирующих концентраций гиббереллинов довольно широк, то для получения стимулирующего действия цитокининов приходится подбирать точные концентрации для семян исследуемого вида. Превышение необходимой концентрации может оказать противоположное, подавляющее действие или вызвать ненормальный рост. Следует помнить, что семена, обладающие водонепроницаемыми покровами, необходимо предварительно скарифицировать. Не исключено, что в некоторых случаях отсутствие эффекта после обработки может объясняться слабой проницаемостью кожуры или эндосперма для стимулирующих веществ. Комбинированные обработки производятся обычно путем последовательного намачивания в разных растворах. Обработка смесью веществ возможна только в тех случаях, когда концентрация компонентов различается на порядок и более.

Применение стимуляторов, даже не очень сильных, например, KNO_3 , дает, как правило, хорошие результаты у семян, находящихся в неглубоком покое. Гораздо сложнее обстоит дело в отношении семян, характеризующихся глубоким физиологическим и морфофизиологическим покоем. Положительный эффект от обработки различными стимуляторами может быть получен далеко не у всех видов и не со всеми веществами.

Существующие методы и технологические приемы предпосевной стимуляции семян, основанные на применении высокотоксичных химических препаратов и использовании гидротермической обработки, связаны с большими затратами труда и низкой технологичностью процесса обработки семян. При внесении в почву обработанных фунгицидами семян ядохимикаты под воздействием ветра и дождей выносятся в водоемы, разносятся на обширные пространства, что загрязняет окружающую среду и наносит вред природе [1].

2. ПРОБЛЕМЫ СОХРАННОСТИ И ФАКТОРЫ СНИЖЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМЯН

2.1. ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СЕМЕНАХ ПРИ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКЕ И ХРАНЕНИИ

В семенах при хранении протекают различные физиологические процессы (основные из которых – дыхание, созревание, прорастание, старение), связанные с собственной жизнедеятельностью, а также с воздействием микроорганизмов и вредителей.

Значение дыхания при хранении семян состоит в том, что не накапливаются токсичные вещества распада сложных соединений, освобождается энергия на поддержание жизни, образуются промежуточные соединения, участвующие в процессах обмена веществ. Интенсивность дыхания семян различных сортов одной и той же культуры зависит от степени зрелости, наличия травм, периода и режимов хранения. Из внешних факторов наибольшее влияние на интенсивность дыхания оказывают влажность, температура, газовая среда. Важнейшим из факторов для семян является влажность, потому что в сухих семенах вода находится в связанном состоянии с белками, углеводами и не может участвовать в реакциях обмена веществ. С повышением влажности появляется свободная, не связанная гидрофильными коллоидами вода, она легко вступает во взаимодействие с другими химическими веществами, и интенсивность дыхания резко возрастает. При хранении зерна и семян с влажностью выше критической развиваются процессы самосогревания, качество продукции ухудшается или же она становится совершенно непригодной для употребления.

Значительно усиливает процессы дыхания зерна и семян температура в зоне хранения. При температуре от 0° до $30-35^\circ$ интенсивность дыхания возрастает на каждые $10^\circ C$ в 2–2,5 раза. При дальнейшем повышении (до $50-60^\circ$) она сначала резко возрастает, а затем быстро падает. Связано это с тем, что при высокой температуре

(более 50 °С) происходит свертывание или разрушение белков и отмирание живых тканей [1, 8].

Партии семян и зерна, хранящиеся при влажности ниже критической (на 2–3 %), могут длительное время иметь невысокую концентрацию углекислого газа, что позволяет без обмена состава воздуха сохранять их качество. Зерновые массы с влажностью выше критической быстро накапливают углекислый газ, и у них при недостатке кислорода могут теряться посевные качества в первые месяцы хранения.

Способность семян пребывать в состоянии покоя – важная приспособительная функция растений к неблагоприятным условиям внешней среды. Длительный покой у семян вызывает неравномерное прорастание и изреженность всходов, увеличение норм высева семян, необходимость создания переходящих фондов. Утрата или слишком короткий покой также нежелательны из-за возможного прорастания семян на корню или в валках, ухудшения технологических свойств, резкого повышения потерь при хранении. Семена многих растений после уборки при благоприятных условиях температуры и влажности не могут прорасти, а трогаются в рост через определенное время.

Различают покой органический (физиологический) и вынужденный. В первом случае задержка прорастания вызывается свойствами самого организма, а во втором, вынужденном, отсутствуют внешние условия для прорастания. Покой может быть неглубоким и глубоким физиологическим.

Неглубокий физиологический покой называется послеуборочным дозреванием и характерен для свежесобраных семян большинства видов травянистых растений умеренных широт (зерновые, бобовые, подсолнечник, салат). Временное отсутствие прорастания проявляется у двулетних овощей, таких как корнеплоды, капуста и др. Для картофеля, чеснока и лука характерен глубокий покой. Во время хранения неглубокий покой постепенно исчезает, а также может быть снят различными стимуляторами, действием температур, света, применением скарификации и стратификации. По современным представлениям покой обуславливается разнообразными причинами, среди которых наибольшее внимание уделяется свойствам покровных тканей, наличию ингибиторов и стимуляторов роста, специфическим анатомо-морфологическим и физиологическим свойствам зародыша [8].

Семена многих видов бобовых, лилейных, пасленовых, мальвовых и других не прорастают из-за водонепроницаемости кожуры (твердосемянности). При хранении твердые семена постепенно утрачивают эти свойства и выходят из состояния покоя. Биохимические механизмы покоя являются более или менее общими для всех растений. Многими исследователями выявлена связь покоя семян, луковиц, корнеплодов, клубней с наличием в них ингибиторов и стимуляторов роста. Начало покоя коррелирует с присутствием ингибиторов, а выход из покоя – с высоким содержанием стимуляторов.

Период покоя семян, клубней и других органов контролируется как ингибиторами, так и стимуляторами роста, оказывая влияние на синтез белков. С завершением покоя усиливается синтез нуклеиновых кислот, изменяется физиологическое состояние тканей. В точках роста увеличивается содержание общего азота, повышается интенсивность окислительно-восстановительных процессов и дыхания.

Семена могут впадать и во вторичный покой, из которого их трудно вывести даже при помещении в благоприятные условия. Вызывается он длительным воздействием неблагоприятных условий внешней среды при хранении (температура, освещение, темнота, недостаток кислорода).

Свежесобраные влажные семена не могут дозревать, так как в них преобладают процессы гидролиза. Такие семена во время хранения не только не улучшают своих качеств, но могут и снизить их.

Например, семена пшеницы, собранной в полную спелость, кондиционной всхожести достигают на 40–45 день, а при уборке в восковой спелости – на 50–55 день. Еще длительнее период покоя у семян, собранных в тестообразном состоянии (60–70 дней). Поэтому в условиях Республики Беларусь посев свежесобраными семенами озимой пшеницы не всегда обеспечивает дружные всходы. При дозревании уменьшается содержание простых веществ и увеличивается концентрация сложных – жир, крахмал, белок. Кроме того, с завершением дозревания уменьшается активность ферментов, что и повышает стойкость семян. Быстрее дозревают сухие семена при достаточном доступе воздуха и температуре более 15 °С [2, 8].

Прорастание семян, луковиц, корнеплодов, кочанов клубней в период хранения является крайне нежелательным явлением, потому что даже в начальной стадии вызывает изменения химического состава хранящейся продукции и усиливает ферментативные процессы. Происходит резкое повышение интенсивности дыхания, усиливается распад органических веществ на простые соединения,

что приводит к ухудшению вкуса, потерям сухого вещества, изменению посевных и пищевых свойств.

Старение – процесс жизнедеятельности органов растения (семян, клубней, луковиц, корнеплодов), связанный с нарушением метаболизма в клетках, приводящий к необратимым изменениям. Это приводит к ухудшению вкусовых, пищевых свойств, потере всхожести, снижению устойчивости к фитопатогенным микроорганизмам, возникновению физиологических расстройств даже при благоприятных условиях хранения. Связано старение с глубокими изменениями в химическом составе – жировом, белковом и углеводном комплексах, содержании витаминов и других веществ. У плодов начало старения характеризуется резким подъемом дыхания, названным климатерическим подъемом. До наступления его идет созревание, а после наступления – старение. Старение у различных видов овощей, плодов, ягод и семян неодинаково как по характеру, так и по срокам. Общим для всех является то, что перезревшие старые овощи и плоды не могут храниться. Со старением семян связаны: долговечность (хозяйственная, биологическая, технологическая), физиологические расстройства, снижение или потеря всхожести, мутационные изменения. Во время старения семян происходят повреждения хромосом, а при проращивании появляются аномальные растения. Семена, содержащие поврежденные хромосомы в больших количествах, становятся нежизнеспособными.

2.2. ВЛИЯНИЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА КАЧЕСТВО СЕМЯН В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ

Вся сельскохозяйственная продукция при закладке на хранение содержит на поверхности микроорганизмы: бактерии, плесневые грибы, дрожжи, вирусы. Во время хранения для продукции не создают стерильных условий, поэтому микрофлора всегда присутствует. Микроорганизмы попадают на семена, овощи и плоды из почвы и воздуха. В почве всегда много микроорганизмов, в период вегетации и уборки они попадают на растение. Преобладают в почве сапрофиты, но на ослабленных растениях и их органах они могут вести себя как факультативные паразиты.

Микроорганизмы – паразиты, поступающие в хранилища совместно с больными клубнями, луковицами, плодами. При определенных условиях микроорганизмы быстро размножаются и наносят

значительный вред. Разрушая органические вещества продукции, грибы вызывают появление неприятного запаха, изменяют ее цвет и вкус. Проникая внутрь тканей, они разлагают химические вещества и могут сделать продукцию непригодной для пищевых и кормовых целей. Почти все грибы поражают зародыш семени, что приводит к снижению всхожести и может быть причиной самосогревания.

Интенсивное развитие плесневых грибов всегда сопровождается потерями сухого вещества, снижением качества или полной порчей продукции. Многие грибы образуют токсичные вещества, из-за чего она становится ядовитой. Несмотря на существование большого количества микроорганизмов, большинство из них не могут проникать в живые ткани и поражать их, так как растения обладают определенной устойчивостью к фитопатогенной микрофлоре. По степени устойчивости разные сорта одного и того же вида могут резко различаться между собой.

У каждого вида растений образуются фитоалексины определенной химической природы. Продуцирование их количества зависит от физиологического состояния организма и условий внешней среды. Чем активнее процессы жизнедеятельности в клетках, тем в большей мере они способны образовывать фитоалексины и лучше защищать себя. По мере хранения образование фитоалексинов уменьшается и падает устойчивость к болезням. По данным исследований, среди огромного числа сортов плодов и овощей нет ни одного, полностью устойчивого к плесеням. Специфическими микроорганизмами, вызывающими болезни овощей и плодов в период хранения, считаются только фузариозные грибы.

В зерновой массе в начале хранения преобладают эпифитные микроорганизмы. Основным представителем их является травяная палочка. По мере хранения видовой состав микроорганизмов значительно изменяется. Увеличивается количество спорообразующих бактерий (картофельная и сенная палочка), особенно в партиях сильно запыленного или подвергавшегося самосогреванию зерна. При длительном хранении зерновых масс травяная палочка исчезает, а количество плесневых грибов увеличивается.

Интенсивному развитию микроорганизмов способствует наличие в партиях механически поврежденных зерен, клубней, луковиц, плодов. При нарушении целостности оболочек внутренние ткани становятся доступными для бактерий и грибов, которые активно размножаются. По данным ВНИИЗ, на целом зерне кукурузы через

10 суток хранения количество плесневых грибов от исходного составило 186 %, а на зерне с трещинами – 5285 %, через 14 суток соответственно 300 и 8293 % [8].

Прорастание семян – один из наиболее важных и сложных процессов, влияющих на прохождение всех последующих этапов развития организмов при вегетации растений. Оно характеризуется интенсивным обменом, запасенные питательные вещества претерпевают значительные изменения, превращаясь в жизненно необходимые для организма соединения, которые обеспечивают нормальный рост и развитие зародыша. В продуктивности растений важную роль играют процессы, протекающие в начале развития, обуславливающие подготовку и переход к генеративному периоду.

2.3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА

Устранение потерь сельскохозяйственной продукции – важный резерв пополнения продовольственного фонда страны. Затраты на устранение потерь в 2–3 раза меньше, чем на дополнительное производство такого же объема продукции.

Естественные условия не всегда благоприятны для нормального развития зародыша, особенно в начальный период, поэтому невольно большое количество семян, жизнеспособных, но не обладающих высокой жизненной активностью, приходится впустую выбрасывать в землю. Поэтому необходимо готовить посевной материал, чтобы все жизнеспособные семена всходили и давали урожай.

Основная биологическая роль семян состоит в получении урожая и дальнейшем размножении вида. В них находятся все необходимые питательные вещества для будущего проростка и поддержания жизнедеятельности до тех пор, пока корневая система, стебли и листья не начнут снабжать себя самостоятельно. В состоянии покоя на поддержание жизнедеятельности семена расходуют питательные вещества очень экономно, так как сухие охлажденные семена обладают способностью впадать в состояние глубокого анабиоза. В таком состоянии жизненные процессы в них сильно замедляются. При наступлении благоприятных температурно-влажностных условий интенсивность физиологических процессов в семенах быстро

восстанавливается, они становятся способными дать полноценное потомство.

Для семеноводства большое значение имеет биологическая долговечность, т. е. период, когда семена могут прорасти и дать потомство. У семян большинства полевых культур, выращенных в Республике Беларусь, биологическая долговечность составляет 5–15 лет. Более долговечны бобовые, из злаков – семена пшеницы, овса, ячменя; менее долговечны семена ржи, проса, кукурузы и всех масличных. Хозяйственная долговечность у большинства семян, выращенных в Республике Беларусь, составляет 3–7 лет. Исходя из этого допустимыми сроками их хранения (I класса посевного стандарта) без заметного снижения всхожести в заготовительных организациях приняты: для пшеницы яровой, ячменя, овса, гречихи – 3,5 года; озимой ржи и озимой пшеницы – 3 года; проса, люпина – до 2,5 лет.

В международных стандартах, научной литературе отмечают, что основными причинами снижения количества и качества зерна, семян являются обменные реакции, а также воздействие микроорганизмов, позвоночных и беспозвоночных животных. Долговечность семян и зерна зависит от наследственных особенностей культуры и условий внешней среды. К наследственным относятся генетические факторы (вид, сорт), морфологические (строение покровов, размеры зародыша, крупность и др.), цитологические (мутации, денатурация белков и нуклеиновых кислот), физиологические (наличие ингибиторов покоя, интенсивность дыхания и других обменных реакций, старение) [1, 2, 8].

Наибольшее влияние на долговечность оказывают внешние факторы: влажность, температура и газовый состав окружающей среды. От них зависят интенсивность жизнедеятельности семян, развитие микрофлоры и вредителей запасов. Хозяйственная и биологическая долговечность во многом зависят от состояния семян перед обмолом и транспортировкой, а также от качества послеуборочной обработки. При повреждении оболочек и зародыша повышается физиологическая активность семян, вызывающая изменения химического состава, способствующая развитию микроорганизмов и вредителей, ускорению старения, ухудшению посевных качеств.

Травмированность зерна и семян зависит от влажности, особенно во время обмолота и подработки. Полноценные семена зерновых получают тогда, когда при уборке их влажность находится в пределах 14–20 %. При влажности 21–25 % всхожесть зерновых и бобо-

вых может снижаться до норм 2–3 класса, а при более высокой влажности часто не удается получить кондиционные семена.

На долговечность и качество зерновых масс отрицательное влияние оказывает самосогревание, которое является результатом активных физиологических процессов и низкой теплопроводности. Интенсивные физиологические процессы в семенах приводят к образованию большого количества теплоты. По мере согревания зерновой массы усиливается ферментативный распад более сложных веществ, что приводит к еще большему выделению теплоты. Температура семян зерновых и бобовых культур при самосогревании достигает 60–70 °С выше нуля, а высокомасличных – даже +90 °С, что приводит к резкому снижению сроков биологической, хозяйственной и технологической долговечности зерновой массы. Даже в первой фазе самосогревания снижается качество семян (сила роста, полевая всхожесть), а при температуре свыше +30 °С в семенах идет распад химических веществ и они теряют жизнеспособность.

Значительный вред семенам и растениям оказывают различные грибковые, вирусные, бактериальные и смешанные инфекции.

Виды грибов рода *Botrytis* паразитируют на многих растениях, вызывая серую гниль побегов, листьев, бутонов, цветков, семян – это более 200 видов растений – сложноцветных, пасленовых, бобовых, зонтичных. Отмечается, что «основными виновниками» передачи болезней являются семена [5].

Выход и качество сельскохозяйственной продукции значительно снижаются вследствие поражения растений вирусами. Размножаясь в растительных клетках и используя их ресурсы для своей репродукции, вирусы не только служат источником инфекции для других растений, но и неизбежно вызывают нарушения в обмене веществ растений-хозяев. Отличающиеся высокой вирулентностью штаммы могут вызывать остро протекающий патологический процесс, приводящий к гибели растения. В других случаях растение переносит патогенное действие возбудителя вирусной инфекции, подвергаясь хроническому заболеванию, длящемуся в течение всего периода вегетации. Выход продукции значительно снижают вирус мозаики люцерны, вирус огуречной мозаики, вирус мозаики белены, вирус кольцевой пятнистости табака. Эти переносимые тлями вирусы также опасны для мяты перечной, бадана, хмеля, алтея, лимонника, жимолости, голубики и многих других сельскохозяйственных культур [5].

В семени каждого растения содержится генетическая информация о взрослом растении и инструкции о том, как себя вести в той

или иной жизненной ситуации (при какой температуре и влажности всходить, как реагировать на засуху, переувлажнение, на заморозки, когда зацвести и т. д. и т. п.). Семя растения – очень сложное образование, содержащее при всей малости своих размеров сотни тысяч клеток. Каждая клетка имеет тысячи сенсоров (специализированных чувствительных образований) молекулярных размеров. Сенсоры как раз и воспринимают все изменения в окружающей среде и внутри семян. Сенсоры запускают сложные, как правило, многоступенчатые реакции, итогом которых являются видимые изменения в росте и развитии растений. У семян есть сенсоры, которые открывают полноту использования генетического потенциала, увеличивают сопротивляемость к неблагоприятным факторам окружающей среды: засухе, повышенной температуре, переувлажнению, пониженным температурам и заморозкам, засолению почвы, повышают сопротивляемость (иммунитет) к вирусным, бактериальным и грибковым заболеваниям. Эти же сенсоры, единожды запущенные, вызывают сотни, а порой и тысячи последовательных цепочечных биохимических реакций не только в самих семенах, но и в растениях, которые из них вырастут, на всех фазах их развития (ювенальной, или, иначе, юношеской фазе, цветении, плодоношении, созревании урожая новых семян). Итогом этих реакций является повышение сопротивляемости, выживаемости растений, рост урожайности. Последнее обстоятельство особенно важно для растений, ибо большее количество семян (то есть большая урожайность) повышают шансы растений завоевать большее жизненное пространство для своего вида. Это повышает конкурентность растений определенного вида среди других видов растений. По сути, это и есть конечная цель биологической жизни растений: увеличить число одновременно живущих особей своего вида.

Для человека повышение урожайности также желанно, ибо требуется меньше вложить усилий для получения большего количества пищи (зерна, плодов, ягод и т. п.). Урожайность растений можно повысить за счет добавления в почву элементов их минерального питания, т. е. внесения удобрений (минеральных и органических). Применение минеральных удобрений вызывает ускорение роста растений и урожайности, но часто параллельно образуются неопасные для растений, но опасные для человека нитраты и нитриты. Кроме того, есть и более глобальные последствия применения минеральных удобрений. Их внесение приводит к неблагоприятному изменению структуры почвы. Часто она становится более прони-

цаемой для промывки водой. Итогом является вымывание минеральных удобрений из верхних слоев почвы (примерно с 60–70 см, где находится основная масса корней) в более глубокие слои почвы, где минеральные компоненты растениям уже недоступны. Затем минеральные удобрения попадают в грунтовые воды и смываются в реки, что влечет за собой помимо снижения эффективности их применения еще и значительное загрязнение окружающей среды [1, 5]. При применении органических удобрений ничего из перечисленного не происходит. Однако органических удобрений явно не хватает для удовлетворения потребностей человека в повышении урожайности. Так объективно появилась потребность в повышении урожайности иными методами, чем внесение в почву минеральных или органических удобрений, точнее, независимо от них.

В настоящее время специалисты сельского хозяйства (агрономы, инженеры-механики) все еще ориентированы на традиционные методы повышения урожайности: применение удобрений и развитие культуры агротехники, обработка семян, посевов химическими агентами. Однако потребности продовольственного рынка все более ориентируются на получение экологически безопасной продукции, называемой в Европе Green Food, цена которой в 4–5 раз выше, чем у обычных продуктов питания, выращенных массовыми методами интенсивного земледелия. Потребительская культура населения стала возрастать. Понимание неразрывности пищевых цепей, зависимости всех нас от того, чем нас снабжают сельхозпроизводители и как обрабатывают сырье пищевые заводы, приводит к востребованности качественной пищи. Исторически на Западе этот процесс начался раньше, чем в нашей стране, в первую очередь из-за того, что интенсивность земледелия в этих странах выше и там раньше нас столкнулись с негативными явлениями высокоинтенсивного хищнического метода эксплуатации земли. Поэтому повышение урожайности даже на 10–20 % без применения химических веществ является желанным элементом в технологии получения экологически безопасной продукции.

В связи с этим в сельскохозяйственной практике применяют комплекс мероприятий, направленных на повышение продуктивности растений. Особенно необходимы такие средства воздействия, которые могут активизировать прорастание семян и усилить жизнедеятельность зародыша на начальном этапе. При благоприятных условиях начинается интенсивный рост и развитие зародыша [9, 10].

Среди современных методов предпосевной обработки семян особое место необходимо уделить тем, которые способствуют увеличению продуктивности растений, обладают лучшими технологическими, техническими и энергоэкономическими аспектами использования фактора воздействия в современном сельскохозяйственном производстве.

Традиционно применяемые методы повышения всхожести семян, роста и развития сельскохозяйственных культур с помощью биологических и химических стимуляторов достаточно трудоемки, экологически небезопасны и не всегда дают хороший эффект.

3. ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СТИМУЛЯЦИИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ

3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗЛИЧНЫХ СРЕД

Еще в начале прошлого века были начаты исследования по выявлению эффективности различных энергетических воздействий на рост растений. Исследованиями ведущих ученых Артемьева Н. А., Евреинова М. Г., Азина Л. А., Басова А. М., Изакова Ф. Я., Шмигеля В. Н., Бородина И. Ф., Тарушкина В. И., Батыгина Н. Ф., Яснова Г. А., Герасимовича Л. С. и других доказано положительное влияние электрического поля на посевные и урожайные качества семян зерновых культур.

Электротехнологические методы основаны на преобразовании электромагнитной энергии в другие виды и их целенаправленном использовании для воздействия на предметы труда в технологических процессах.

Превращение энергии электромагнитного поля в другие виды происходит при поглощении электромагнитных волн средами в результате различных взаимодействий электрических и магнитных полей с элементарными частицами вещества, с индуцируемыми в веществах токами, заряженными телами, внутренними магнитными и электрическими полями и др. При этом обнаруживаются различные проявления или действия электромагнитного поля, которые используют в технологических процессах.

Исследование поведения и отклика таких сложных гетерогенных органических систем, к которым относятся семена и растения, на определенные воздействия электромагнитного поля, оптимизация показателей достигаемого изменения свойств, а также энергетических

и других затрат являются важной научной и народнохозяйственной задачей [11, 12].

В электротехнологии электрический ток или поле выступает не только как энергоноситель, имеющий свои преимущества, но и как комплексный фактор, оказывающий термические, электрофизико-химические и биологические воздействия на обрабатываемую среду, а также определяющий специфическую особенность – информационную составляющую (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Классификация действий и проявлений электромагнитного поля при обработке органических материалов и различных сред

Технологические действия электромагнитного поля проявляются через совокупность поляризационных, электрокинетических, других электрохимических явлений, возбуждаемых в среде протекающим током. Каждая из составляющих общего тока нагрузки определяет соответствующие физико-химические явления в материале, в приэлектродных слоях, на электродах, на границах раздела фаз, а в совокупности все они определяют технологические действия и проявления электромагнитного поля, получение необходимой информации и выработку необходимых технологических и управляющих воздействий [13].

В технологическом процессе различают стадии подготовки сырья и обработки. Подготовленное к переработке сырье должно иметь оптимальные технологические свойства, т. е. обеспечивать выработку продукции высшего качества в максимальном количестве при минимальных удельных затратах. Так как исходные свойства семян отличаются значительным разнообразием, для их оптимизации и стабилизации необходимо осуществить их направленное изменение.

Таким образом, технологические свойства семян являются производными от группы свойств. Очевидно, что управляющая роль в формировании исходных свойств биологических объектов и, соответственно, технологических свойств подготовленного к обработке сырья принадлежит биологической системе. Под воздействием температуры, влажности и других факторов технологического процесса изменяются физико-химические, структурно-механические, биохимические и теплофизические свойства семян и формируются определенной направленности технологические свойства.

В стадии обработки подготовленное технологическое сырье (в нашем случае – семена сельскохозяйственных растений) подвергается воздействию электрофизикохимических факторов электромагнитного поля. В итоге происходит изменение всей группы свойств массы и формирование новых технологических свойств семян в соответствии с целевой задачей (рис. 3.2).

Эффективность производства и качество продукции определяются качеством исходного сырья, эффективностью и качеством стадий подготовки и обработки материала. В связи с определенной сложностью внутренних взаимосвязей в составляющих частях семян и зерна технологии переработки, хранения и контроля их параметров имеют целый комплекс научных задач.

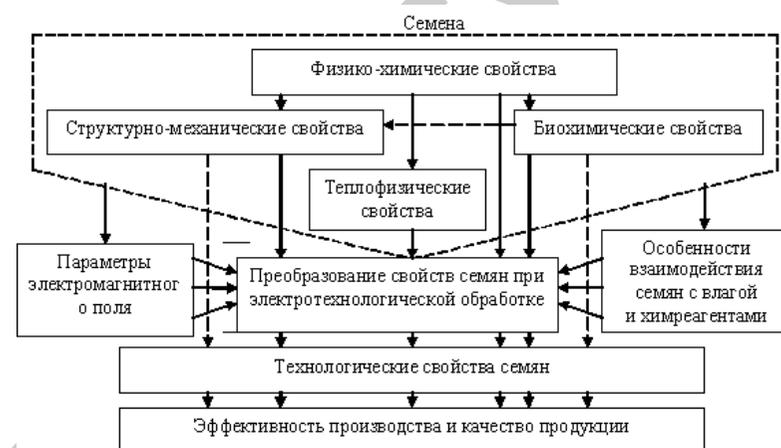


Рис. 3.2. Схема формирования технологических свойств семян в процессе электротехнологической обработки

На основе информации о взаимосвязях различных свойств семян с технологическими свойствами можно заранее определить потенциальные возможности того или иного процесса, выбрать оптимальные параметры режимов основных этапов технологий, дать оценку их эффективности.

Особый интерес для разработчиков электротехнологических процессов представляет выявление качественной и количественной связи между показателями электрофизических воздействий и технологических свойств семян, зерна и любой продукции на их основе. Это обусловлено тем, что электрофизикохимические воздействия относительно несложно, с небольшими затратами времени и средств можно определить в лабораторных условиях.

Классификация электротехнологических методов и некоторые термины до настоящего времени не стандартизированы, но в ряде научных работ определены основные классификационные признаки. Так, в работах [6, 14] в основу принятой классификации положены вид используемого электрофизического фактора (ток, поле и т. д.) и способ его получения, что определяет особенности применяемого оборудования (преобразователей, источников питания), общие методы их расчета и выбора [15, 16].

В обобщенном виде электрофизические методы можно классифицировать по целому ряду факторов: по виду поля (электростатическое,

электромагнитное); по роду тока (переменный, постоянный, модулированный, импульсный и др.); по частоте (низкая, средняя, высокая, сверхвысокая); по виду преимущественно используемого фактора (электрофизические, электрохимические, электробиологические, комбинированные), воздействие низкотемпературной плазмой.

Повышение посевных качеств семян, урожайности культур и качества урожая происходит только при определенных параметрах электромагнитных полей, таких как длительность воздействия, частотный диапазон, плотность мощности, пространственные характеристики электромагнитного поля. Кроме этого каждая сельскохозяйственная культура имеет свой оптимум этих параметров. При этом следует отметить, что даже семена растений одного и того же вида и сорта, произраставшие на разных полях, убранные в разные сроки, высушенные при различавшихся режимах сушки, хранившиеся в отличающихся температурно-влажностных условиях, имеют разные оптимумы [17].

Биологические системы, как растительного, так и животного происхождения, постоянно находятся под воздействием естественных и искусственных источников электромагнитного поля, и в ходе эволюции у них выработались механизмы восприятия информации о состоянии окружающей среды посредством взаимодействия с электромагнитными полями [18].

По имеющимся литературным данным и на основе собственных исследований мы можем утверждать, что наибольшее распространение в сельскохозяйственном производстве в силу большей эффективности и технологичности получили следующие электрофизические методы: обработка семян в электромагнитном поле переменного тока промышленной, высокой и сверхвысокой частоты, в электростатическом поле, в ультразвуковом поле, в низкотемпературной плазме. Отдельного рассмотрения заслуживают активированные водные растворы, которые получают путем магнитной обработки или электрохимическим путем [6, 14, 19].

3.2. ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

3.2.1. Назначение и области использования

Электротехнологии в прикладном плане рассматривают производственное использование электрических и магнитных полей, электрического тока, электрических зарядов и импульсов и других

электрофизических факторов для непосредственного воздействия на материалы, живые организмы, растения и продукты с целью получить в них целесообразно направленные изменения.

Электротехнологии, как и другие производственные процессы, стремятся применять в тех областях, где они повышают качество или количество продукции, снижают энергоемкость, увеличивают производительность труда и экономически себя оправдывают.

Электронно-ионные технологии (ЭИТ) – область электротехнологии, основанная на воздействии сильных электрических полей на заряженные частицы с целью придания им упорядоченного и целенаправленного движения для осуществления определенного технологического процесса.

Действующим электрическим фактором, своего рода рабочим органом в аппаратах ЭИТ являются сильные электрические поля (напряженность более 100 кВ/м). Как правило, применяют постоянные электрические поля: электростатическое и поле коронного разряда. Объектами обработки служат материалы, представляющие собой совокупность отдельных частиц размером от микрометра до десятков миллиметров (пыль, порошки, суспензии, зерна, семена, волокна и т. п.).

Основные области применения ЭИТ в СХП: очистка и сортировка зерна, семян, их дозирование и смешивание; осаждение пыли и микроорганизмов из воздуха; нанесение ядохимикатов, удобрений и др. веществ на семена и растения; распыление лекарственных препаратов; электроокраска; предпосевная и предпосадочная обработка семян и растений; искусственная ионизация среды, озонирование воздуха в помещениях [20–22].

В основе процессов ЭИТ лежат четыре основных стадии: подача материала в зону обработки; зарядка частиц в электрическом поле; упорядоченное движение заряженных частиц под действием сил поля; формирование готового продукта.

Непосредственно в электрическом поле возможны следующие воздействия: ориентирование частиц; упорядочение, регулирование движения частиц; разделение и осаждение в соответствии с приобретенным зарядом [23, 24].

Принципиальное отличие сельскохозяйственной от промышленной ЭИТ состоит в том, что в сельскохозяйственном производстве электрическим полем обрабатывают многие объекты, имеющие в основном биологическую природу и продолжающие свою жизнедеятельность в процессе обработки (например, семена, клубни кар-

тофеля, черенки, грибковые и микробные тела, эмбрионы и т. п.). На такие объекты электрическое поле оказывает не только силовое, но и другие воздействия (электрофизические, электрохимические, биологические) [25].

3.2.2. Физические процессы в электрических полях с заряженными частицами

Электрические поля различают (классифицируют) по конфигурации (плоскопараллельные, плоскомеридианные, трехмерные); по наличию объемных зарядов (электростатические однородные, с объемными зарядами, в частности коронные); по роду тока – постоянного (униполярные и биполярные) и переменного.

В плоскопараллельных полях распределение потенциала зависит от расстояния до электродов, и при проведении секущей плоскости, нормальной к их образующим поверхностям, эквипотенциальные линии имеют вид прямых, параллельных образующим (поля коаксиальных цилиндров; система провод, параллельный плоскости; провод между плоскостями; ряд проводов над плоскостью и т. п.).

Плоскомеридианные поля образуются электродами, имеющими форму тел вращения с общей осью. Параметры таких полей определяются двумя цилиндрическими координатами (поля концентрических шаров; система «шар-плоскость»; система «игла-плоскость» и т. п.).

Трехмерные поля создаются сложными системами электродов, параметры которых определяются тремя координатами (поля систем «равноотстоящие шары или «иглы над плоскостью», «игольчатые электроды»).

Примеры некоторых систем электродов для создания поля коронного разряда приведены на рисунке 3.3.

При анализе полей важна не только их пространственная конфигурация, но и наличие и распределение объемных зарядов, зависящих от напряженности поля и тока.

Электрическое поле как рабочий орган характеризуется: пространственным распределением (формой) поля; напряженностью поля E ; плотностью тока j ; видом вольт-амперной характеристики; характером изменения параметров поля во времени.

Методы исследования электрических полей условно разделяют на экспериментальные (методы сеток, электролитических ванн, исследования на проводящей бумаге, измерения с помощью зонда

или пробного тела) и аналитические (методы сеток, интегральных уравнений, конформных отображений, разложения в ряд, численного интегрирования).

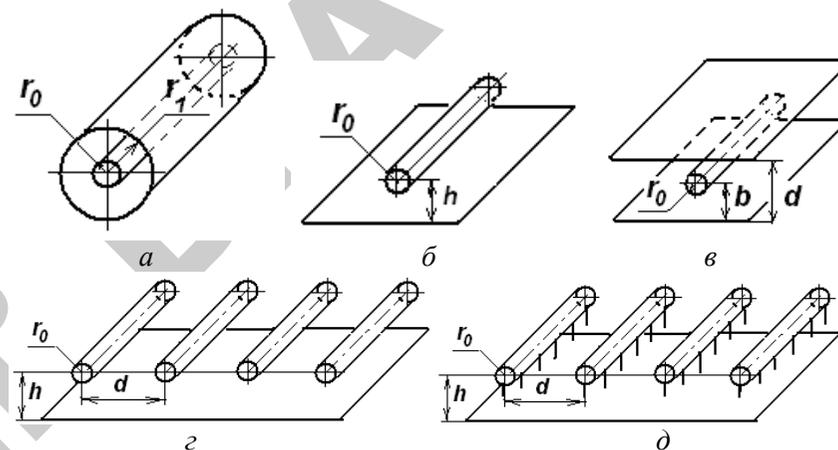


Рис. 3.3. Некоторые системы электродов для создания поля коронного разряда: а – провод по оси цилиндра; б – провод–плоскость; в – провод между двумя плоскостями; г – ряд проводов–плоскость; д – ряд стержней с иглами – плоскость

Для электростатических полей распределение потенциала определяют по уравнению Лапласа $\nabla^2\varphi = 0$ при граничных условиях, соответствующих заданным значениям напряжения на электродах.

Для простых систем распределение напряженности поля находят непосредственным интегрированием. Так, для системы коаксиальных цилиндров (рис. 3.4) напряженность электрического поля

$$E = \frac{U}{r \ln(r_1/r_0)},$$

где U – напряжение между внутренним и наружным цилиндрами, В;
 r – текущее значение радиуса, м;
 r_1 и r_2 – внутренний и наружный радиусы цилиндров, м.

При расчете плоскопараллельных полей более сложных систем используют метод конформных отображений, заключающийся в геометрическом преобразовании исходной системы электродов в систему электродов, для которой распределение потенциала из-

вестно. Так, для системы «провод–плоскость» (рис. 3.3б) распределение напряженности

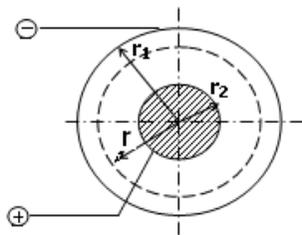


Рис. 3.4. Электродная система коаксиальных цилиндров

$$E = \frac{-2Uhj}{(h^2 + \underline{z}^2) \ln(2h/r_0)},$$

где $\underline{z} = x - jy$;

x, y – координаты исследуемой точки пространства, причем за ось x принята линия плоскости электрода.

При расчете полей сложной конфигурации, особенно с объемными зарядами, требуются значительные допущения, уточняемые при эксперименте.

В экспериментальных исследованиях электрических полей с объемными зарядами широко применяют методы зондовых измерений. Зонд помещают в исследуемую точку и измеряют его вольт-амперную характеристику, по которой находят произведение плотности зарядов и их подвижности, а также потенциал поля. В качестве зонда используют шар, цилиндр или кольцо. Выбор формы зонда определяется конфигурацией исследуемого поля.

При исследовании трехмерных полей значительные трудности возникают из-за помех, вносимых проводами, соединяющими зонд с измерительной аппаратурой. В этом случае применяют изолированный зонд, или пробное тело, в виде металлического шара, подвешиваемого на тонкой изолированной нити. Заряд и напряженность поля определяют по отклонению тела или путем его взвешивания. Чтобы повысить точность измерений, тело сначала помещают в исследуемое поле, а затем в электрическое с известной напряженностью.

Методы сеток и электролитических ванн используют при исследовании простых полей, моделируя их на секущей плоскости.

3.2.3. Способы зарядки частиц

При зарядке частицам сообщают избыточный свободный электрический заряд. Основные способы зарядки: ионная (чаще в поле коронного разряда), контактная (на электроде в электростатическом поле), комбинированная (на электроде и ионная), индукционно-поляризационная, электризацией (механической, химической или тепловой).

Ионная зарядка происходит в результате осаждения ионов из объема газов, окружающего частицу, на ее поверхности. Чаще всего для этих целей используют униполярный коронный разряд, поскольку он позволяет наиболее просто получать высокие концентрации ионов одинаковой полярности.

Коронный разряд (корона) – неполный самостоятельный электрический разряд в газах (воздухе), возникающий в резко неоднородных полях, создаваемых электродами с малым радиусом закругления, когда размер коронирующего электрода намного меньше размера другого электрода, и при напряженности электрического поля, близкой к электрической прочности газа.

Рассмотрим сущность коронного разряда на примере системы «провод–плоскость» (см. рис. 3.3б).

При относительно малом напряжении U сила тока в цепи электродов практически равна нулю. При $U = U_0$ напряженность электрического поля у поверхности провода достигает значения E_0 , при котором в этой области начинается ионизация воздуха. В остальной части межэлектродного промежутка напряженность электрического поля недостаточна для того, чтобы поддержать процесс ионизации. Возникающий разряд и называют коронным.

Начальную напряженность коронного разряда для цилиндрического коронирующего электрода определяют по эмпирической формуле Пика, В/м:

$$E_0 = 30,3 \cdot 10^5 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{\delta r_0}} \right), \quad (3.1)$$

где $\delta = 289 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{P}{T}$ – относительная плотность воздуха;

P – атмосферное давление, Па;

T – температура воздуха, К (при $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па и $T = 293$ К $\delta = 1$);

r_0 – радиус коронирующего электрода (провода), м.

Начальное напряжение коронного разряда, В:

$$U_0 = E_0 r_0 A, \quad (3.2)$$

где A – функция геометрических параметров принятой системы электродов.

При $U \geq U_0$ вольт-амперная характеристика описывается уравнением

$$I_\ell = k \varepsilon_0 G, \quad (3.3)$$

где I_ℓ – удельная (на единицу длины коронирующего провода) сила тока, А/м;

k – подвижность ионов, м/(В · с);

ε_0 – электрическая постоянная;

G – функция напряженности и геометрических параметров принятой системы электродов, В²/м².

При развитой униполярной короне напряженность поля и объемную плотность электрических зарядов вблизи не коронирующего электрода можно определить по следующим формулам:

$$E = D \sqrt{I_1 / (2\pi \varepsilon_0 k)}; \quad (3.4)$$

$$\rho = L \sqrt{I_1 \varepsilon_0 / (2\pi k)}, \quad (3.5)$$

где D, L – параметры, зависящие от системы электродов.

Значения параметров A, G, D, L коронного разряда для простейших систем электродов приведены ниже, более сложных – в специальной литературе.

Для провода, расположенного по оси цилиндра (см. рис. 3.3а):

$$A = \ln \frac{r_1}{r_0}; \quad G = 8\pi \left(1 + \frac{0,0275 \sqrt{r_1/r_0} U (U - U_0)}{r_1^2 A} \right); \quad D = 1; \quad L = \frac{1}{r}$$

где r_1 – радиус провода, м;

r – текущий радиус, м.

Для системы «провод–плоскость» (см. рис. 3.3б):

$$A = \ln \frac{2h}{r_0}; \quad G = \frac{7,2}{h^2} \sqrt{\frac{U_0}{A}} (U - U_0)^{3/2}; \quad D = 2,5; \quad L = \sqrt{\frac{3,525}{xh}},$$

где h – расстояние между проводом и плоскостью, м;

x – расстояние от провода до текущей точки центральной силовой линии, м, для которой приведены значения D и L .

Ионная зарядка в чистом виде происходит без контакта частиц с электродами. Если частица материала оказывается в поле униполярного коронного разряда, то часть линий напряженности поля пересекает поверхность частицы. Ионы, движущиеся по этим линиям, сталкиваются с частицами и осаждаются на них, сообщая избыточный заряд того же знака, что и коронирующий электрод. Ионы на частице создают собственное поле, и через некоторое время, когда заряд достигает максимального значения Q_{\max} , зарядка прекращается. Для достижения заряда, практически близкого к предельному, обычно требуется время порядка 0,1 с.

Зерна, семена сельскохозяйственных культур и их засорителей, которые обрабатывают в аппаратах ЭИТ, имеют форму, близкую к двухосному эллипсоиду. Для таких частиц (рис. 3.5) предельный заряд можно рассчитать по формулам:

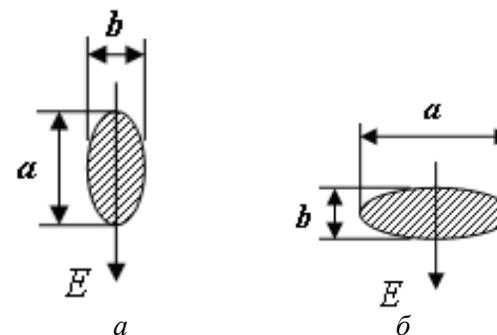


Рис. 3.5. Ориентация семени большой осью вдоль поля (а) и поперек поля (б)

при ориентации большой осью вдоль поля:

$$Q_{\max 1} = \frac{\pi \varepsilon_a b^2}{1 + (\varepsilon_r - 1) d_a} E; \quad (3.6)$$

при ориентации большой осью поперек поля:

$$Q_{\max 1} = \frac{\pi \epsilon_a ab E}{1 + (\epsilon_r - 1) d_b}, \quad (3.7)$$

где a и b – соответственно большая и малая оси эллипсоида, м;
 ϵ_a и ϵ_r – абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы;
 d_a и d_b – коэффициенты деполяризации эллипсоида в направлении соответственно большой и малой его осей.

Значения d_a и d_b зависят от коэффициента сферичности $K_c = \frac{b}{a}$.

Выражение для предельного заряда диэлектрической сферической частицы может быть получено из уравнений (3.6) и (3.7), если учесть, что $a = b$, $d_a = d_b = \frac{1}{3}$:

$$Q_{\max 1} = \frac{3\pi \epsilon_a a^2 E}{\epsilon_r + 2}, \quad (3.8)$$

где a – диаметр сферы.

Преимущества ионной зарядки заключаются в универсальности. Ее действие распространяется на проводящие и непроводящие материалы и частицы, взвешенные в потоке воздуха или газа.

Контактная зарядка (на электроде в электростатическом поле) происходит в результате перехода свободного заряда под действием поля с электрода на частицу или наоборот – с частицы на электрод. Знак заряда частицы совпадает со знаком потенциала того электрода, на котором она находится (рис. 3.6).

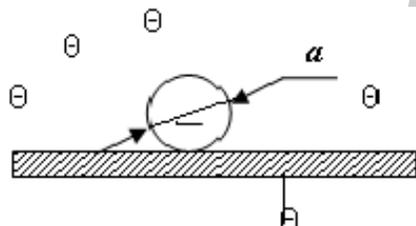


Рис. 3.6. Схема контактной зарядки

Для проводящей сферической частицы диаметром a , при условии отсутствия переходного контактного сопротивления, предельный заряд вычисляется по формуле:

$$Q_{\max 2} = \frac{\pi^3}{6} \epsilon_0 a^2 E. \quad (3.9)$$

Непроводящие частицы на электроде в электростатическом поле практически не заряжаются.

Преимущества контактной зарядки заключаются в относительно малом потреблении энергии и отсутствии побочных газообразных продуктов (озона и оксидов азота), свойственных коронному разряду.

Комбинированная зарядка (совмещение зарядки на электроде с ионной) происходит при нахождении частицы на не коронирующем электроде в поле коронного разряда. Тогда она одновременно заряжается ионами, движущимися от коронирующего электрода, и контактным способом – от не коронирующего.

При совмещенной зарядке частица получает предельный заряд, знак которого зависит в основном от удельной электрической проводимости частицы, переходного сопротивления контакта частицы с электродом и удельной электрической проводимости коронного разряда вблизи частицы. Знак заряда частицы с низкой проводимостью совпадает со знаком потенциала коронирующего электрода, а знак заряда проводящей частицы при хорошем контакте с металлическим не коронирующим электродом может совпадать со знаком его потенциала.

Предельный заряд частицы

$$Q_{\max 3} = Q_{\max 1} \mu_k, \quad (3.10)$$

где $Q_{\max 1}$ – предельный заряд эллипсоида в поле коронного разряда;
 μ_k – коэффициент, зависящий от размеров и ЭФС частицы в поле коронного разряда.

$$\mu_k = \frac{2\tau\beta + 1 - \sqrt{1 + 4\tau\beta(1 + Q_{\max 2}/Q_{\max 1})}}{2\tau\beta},$$

где τ – постоянная времени зарядки частицы на электроде, с;

$$\beta = \frac{\rho_3 k}{4\epsilon_0} \text{ – параметр короны;}$$

k – подвижность ионов, м/(В · с).

Для эллипсоида, ориентированного большой осью вдоль поля:

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 (d_a \varepsilon_r + 1 - d_a)}{d_a \gamma},$$

где γ – удельная электрическая проводимость частицы, см/м.

Индукционно-поляризационная зарядка происходит в том случае, если в среду внести точечный заряд. Он индуцирует на плоскости противоположный по знаку заряд $-Q_3$. Между индуцированным зарядом $-Q_3$ (плоскостью) и точечным Q возникает сила притяжения, которую называют силой зеркального отображения.

3.2.4. Силы, действующие на частицу в электрическом поле

На заряженную частицу в электрическом поле действуют силы механические и электрической природы, а также соответствующие моменты.

Механические силы – это силы трения, тяжести, центробежная, сопротивления среды и др.

Силы электрической природы – электрическая (обусловленная действием поля на заряд частицы), сила зеркального отображения и пондеромоторная сила, вызванная неоднородностью электрического поля.

Рассмотрим силы электрической природы.

1. Электрическая сила:

$$F_k = EQ. \quad (3.11)$$

Если частица находится в поле коронного разряда, силу F_k рассчитывают в следующей последовательности:

начальную напряженность короны E_0 по формуле (3.1);

начальное напряжение короны U_0 по формуле (3.2);

удельную силу тока I_ℓ по формуле (3.3);

напряженность поля E по формуле (3.4);

максимальный заряд Q_{\max} по одной из формул (3.6–3.10);

силу F_k по формуле (3.11).

В аппаратах ЭИТ преимущественно применяют униполярную корону отрицательного знака, так как при ней пробивное напряжение существенно выше, чем при положительной короне. За счет этого достигаются более высокие значения E , Q_{\max} и в конечном счете F_k .

При достаточно малых размерах частиц сила F_k соизмерима с силой тяжести и может ее даже значительно превосходить.

2. Сила зеркального отображения (сила, действующая между зарядом частицы и проводящей плоскостью). Пусть в воздухе на расстоянии h от проводящей плоскости помещен точечный заряд Q (рис. 3.7).

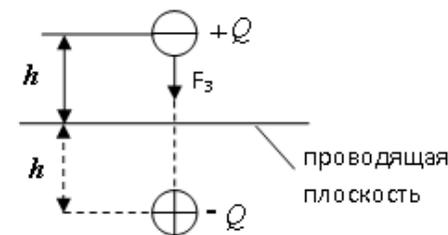


Рис. 3.7. Схема иллюстрации силы зеркального отображения

Он наводит (индуцирует) на плоскости противоположный по знаку заряд $-Q$. Между этими зарядами возникает сила, которую называют силой зеркального отображения. Ее можно определить по закону Кулона как силу взаимодействия двух точечных разноименных зарядов, расположенных на расстоянии $2h$ один от другого:

$$F_3 = -\frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 (2h)^2}. \quad (3.12)$$

Знак «минус» означает, что сила направлена в сторону электрода.

3. Пондеромоторная сила (сила, действующая на заряженную частицу в неоднородном электрическом поле). Частица в электрическом поле поляризуется, на ней возникают разноименные поляризационные заряды $+q$ и $-q$ (рис. 3.8).

На заряды действуют электрические силы, направленные в противоположные стороны. Если поле неоднородно, то силы не равны, так как не равны напряженности внешнего поля E_1 и E_1 в местах расположения зарядов $-q$ и $+q$. Поэтому на частицу действует результирующая сила F_n , отличная от нуля. Если частица находится в воздушной среде, то она будет втягиваться в область с повышенной напряженностью электрического поля.

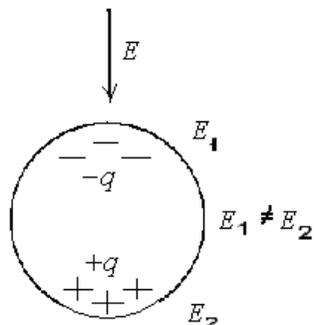


Рис. 3.8. Поляризованная частица в неоднородном электрическом поле в воздушной среде

На диэлектрическую сферическую частицу диаметром a в воздушной среде в неоднородном электрическом поле действует пондеромоторная сила

$$F_n = \frac{\pi \epsilon_0 a^3}{2} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} E \cdot \text{grad} E. \quad (3.13)$$

4. Ориентирующий момент. Если большая ось вытянутой частицы, расположенной в электрическом поле, составляет некоторый угол β с направлением вектора напряженности E , то силы, действующие со стороны поля на разноименные поляризационные заряды частицы, создают вращающийся момент (рис. 3.9а):

$$M_\gamma = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V_\gamma \Phi(K_\phi, \epsilon) \sin 2\gamma, \quad (3.14)$$

где V_γ – объем частицы, м^3 ;

Φ – функция K_ϕ и ϵ ;

$K_\phi = \frac{1 + (\epsilon - 1)\Phi_1}{\epsilon}$ – диэлектрический коэффициент формы;

Φ_1 – коэффициент деполяризации;

γ – угол, дополняющий угол β до 90° .

Под действием вращающего момента частица стремится сориентироваться длинной осью вдоль линий поля (рис. 3.9б). Движение частиц в электрическом поле определяется равнодействующей сил, а также аэродинамическими свойствами среды.

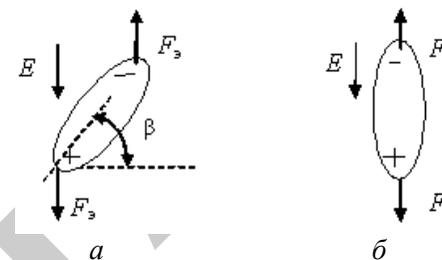


Рис. 3.9. Ориентация вытянутой частицы в электрическом поле в воздушной среде: а – частица в произвольном положении; б – частица, сориентированная силами поля в устойчивое положение

3.3. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ И СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ

3.3.1. Обработка семян и растений в электромагнитном поле

К числу перспективных агроприемов, оказывающих стимулирующее воздействие на рост и развитие растений, следует отнести использование электрических и магнитных полей, которые применяются как при предпосевной подготовке семян, так и в период вегетации растений [14, 26].

Семена естественной влажности помещают между обкладками конденсатора, где создано электрическое поле низкой или высокой частоты (рис. 3.10, 3.11). Технологические параметры низкочастотной и высокочастотной обработки существенно не отличаются: напряженность поля 100–400 кВ/м, экспозиция воздействия 20–180 с, энергоемкость 30–60 Вт · ч/т.

Высокая чувствительность семян пшеницы к низкочастотному магнитному полю связана с изменением рН и высвобождением белков, которые ускоряют выход семян из состояния покоя и стимулируют развитие в них восстановительных процессов, определяемых восстановлением барьерной функции мембран, что, в свою очередь, обуславливает повышение всхожести старых семян и отсутствие на них микрофлоры.

Была также установлена закономерность влияния электромагнитного излучения низкой частоты, макроэлементов и биологиче-

ски активных веществ на продуктивность и болезнеустойчивость растений озимой пшеницы; а также выявлено положительное влияние совместного использования электромагнитных импульсов в комплексе с биологически активными веществами и карбамидом на энергию прорастания, полевую всхожесть и площадь листовой пластины растений озимой пшеницы и положительное влияние комплексного использования электромагнитного излучения низкой частоты и карбамида для обработки семенного материала, с последующим опрыскиванием посевов раствором карбамида [26].

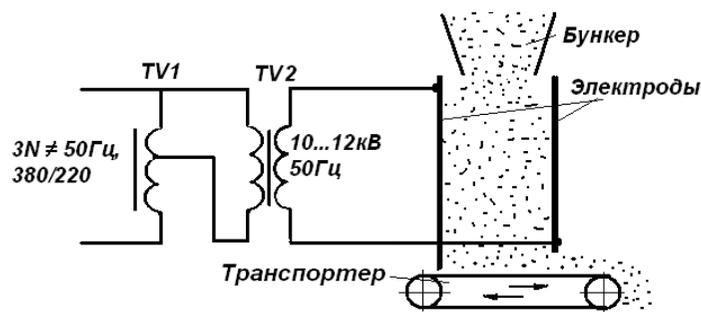


Рис. 3.10. Схема установки для предпосевной обработки семян током промышленной частоты

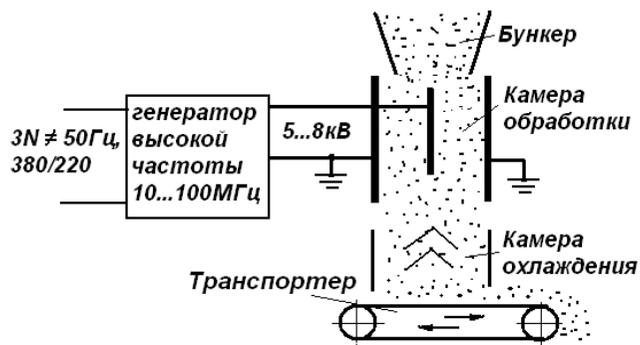


Рис. 3.11. Схема установки для предпосевной обработки семян током высокой частоты

Для обработки семян можно использовать установки высокочастотной сушки: частота тока 1–2450 МГц, напряженность поля около

до 10^4 В/м, экспозиция 12–120 с, энергоемкость 22–24 кВт · ч/т. Операцию проводят за 7–30 суток до посева, совмещая ее с подсушкой семян. Контрольными опытами установлено стимулирование всхожести на 8–12 % и ее повышение на 10–25 %.

Считают, что воздействие электрического поля на зерно определяется величиной поглощенной энергии и выделившейся в виде теплоты.

Доза воздействия, Дж/м³:

$$D = 0,555 \cdot 10^{-5} \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f E^2 \tau,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость семян;
 $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;
 f – частота, Гц;
 E – напряженность электрического поля, В/м;
 τ – экспозиция, с.

Доза обработки и напряженность электрического поля являются нормируемыми величинами. Для расчета времени обработки (экспозиции) необходимо знать ε и $\operatorname{tg} \delta$ семян, которые зависят от влажности и вида семян и определяются экспериментально.

Обработку семян целесообразно производить в следующие сроки: кукурузы – за 7–10, а пшеницы – за 25–30 дней до посева. Лабораторные, полевые и производственные испытания подтвердили эффективность такой обработки для многих сельскохозяйственных культур. Повышаются всхожесть и энергия прорастания, сокращается вегетационный период, повышается урожайность зерновых на 10–20 %, зеленой массы кукурузы – на 25–40 %, улучшается качество продукции, сокращаются сроки уборки. Экономическая эффективность значительно превосходит затраты на обработку [14].

Исследования [27, 28] показали, что при предпосевной обработке семян в электрическом поле постоянного тока высокого напряжения (коронного разряда, электростатическом) ток оказывает стимулирующее действие на их посевные качества. В Ижевской ГСХА исследовано влияние многослойной обработки семян в электростатическом поле на урожайность ячменя сорта «Торос», что позволило выявить наиболее благоприятный режим. Результаты исследований показали, что максимальная урожайность получена при электростимуляции семян с применением источника напряжения 24 кВ в течение 3, 2 и 1 с. Энергия прорастания повысилась соответственно до 86, 84 и 87 %, всхожесть – до 92, 90 и 90 %, а урожайность составила

2,68 т/га, что на 0,52 т/га больше по отношению к контролю. Таким образом, предпосевная многослойная обработка семян в электростатическом поле улучшает их посевные качества и способствует значительному повышению урожайности культуры [27].

Использование нетрадиционных источников энергии для предпосевной обработки семян предлагают в работе [29]. По утверждению авторов, такая обработка посевного материала является экологически чистым агроприемом, направленным на улучшение санитарно-гигиенических условий труда и уменьшение загрязнения пестицидами окружающей среды путем снижения норм ядохимикатов. Она позволяет стимулировать физиолого-биохимические процессы в семенах, повышает энергию прорастания, их лабораторную и полевую всхожесть, способствует формированию дружных всходов, увеличению урожайности.

В лаборатории семеноведения Всероссийского научно-исследовательского института зернобобовых и крупяных культур (ВНИИЗБК) проведено изучение эффективности использования для обработки семян (зерна) электромагнитного модуля (ЭММ), градиента электромагнитного поля (ГрМП), СВЧ-энергии и электромагнитного поля генератора «Биомаг».

Полученные данные показали, что у семян гречихи, обработанных ЭММ и ГрМП, проростки были больше, чем у контрольных. Энергия прорастания и лабораторная всхожесть семян в сравнении с контрольными были выше на 3–5 %, а полевая всхожесть повысилась на 12 %. В результате использования электромагнитных полей урожайность составила 0,34 т/га (прирост 15,8 %).

Обработку семян СВЧ-энергией можно производить с инкрустированием без добавления протравителя. При инкрустировании семян происходит набухание поверхностей семенной инфекции, которая в результате быстрого избирательного нагрева СВЧ-энергией инактивируется. Температура семян при этом повышается незначительно. Результаты опытов показали, что для равномерной обработки семян толщина их слоя не должна быть больше 2–3 см. Посевные качества семян гречихи улучшились, полевая всхожесть повысилась до 11 %, а прибавка урожайности у гречихи составила 0,33–0,38 т/га (прирост 15–18 %).

Предпосевная обработка семян электромагнитным полем прибора «Биолог» обеспечивает прибавку урожайности у гороха 0,05 т/га, ячменя – 0,035 т/га. Обработку семян предлагается проводить за 25 суток до посева [29].

Многолетняя проверка технологии воздействия микроволновым электромагнитным полем на семена в восемнадцати институтах Украинской академии наук показала, что имеет место устойчивый эффект повышения полевой всхожести семян на 10–30 % в зависимости от вида агрокультуры. Существенное увеличение корневой системы привело к повышению устойчивости растений к засухе и заморозкам. Урожай из семян, прошедших предпосевную микроволновую обработку, созрел на 8–12 дней раньше контроля. Микроволновая технология повышает полевую всхожесть на 13–38 %, урожайность – на 10–30 %, позволяет ускорить созревания урожая на 8–12 дней, что дает возможность проводить уборочные работы в более благоприятных условиях, выращивать культуры, ранее не успевавшие созреть в данном регионе, вырастить второй урожай с одной площади. Как показала практика, при использовании обработанных семян зимовку переносят на 450–500 тыс. растений больше с 1 га площади по отношению к контролю. Низко всхожие семена (82–84 %) после обработки давали полноценный урожай (до 70 ц/га площади). Микроволновая обработка позволяет бороться с корневыми гнилями и повышает экологическую чистоту урожая в 1,6 раза [30, 31].

Новые нанотехнологии СВЧ предпосевной обработки семян и дезинсекции применялись как альтернатива химическим методам. Для дезинсекции зерна и семян был использован импульсный режим СВЧ-обработки, который за счет сверхвысокой напряженности ЭМП в импульсе обеспечивает гибель вредителей насекомых. Установлено, что для 100 %-го эффекта СВЧ-дезинсекции необходима доза не более 75 МДж на 1 т семян. Семена обрабатывали за 3–5 дней до посева токами сверхвысокой частоты на лабораторной установке «Хазар-2Р» с гелий-неоновым лазером ЛГН-104, установкой магнитоплазменной обработки семян УМ-ПОС-2 с частотой магнитного поля 20–40 Гц и мощностью светового излучения $2,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{см}^2$ и широкополосной СВЧ-установкой с параметрами облучения не менее $0,5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ в диапазоне частот 4000–6000 Гц [19]. В варианте, где время обработки составило 3 секунды, восковая спелость наступала на 2–3 дня раньше. Остальные варианты опыта были на уровне с контролем. Установлено, что в среднем за 3 года изучения урожайность сорта Приазовский 9 в зависимости от обработок токами различной частоты варьировалась в значительной степени. Так, наибольшая урожайность (3,16 т/га) была получена при обработке семян

с 3-секундной экспозицией, наименьшей она отмечена на вариантах с 5 и 7 секундами и составила 2,90 и 2,98 т/га соответственно при 2,90 т/га (контроль) [19].

Урожай зеленой массы можно повысить на 40 %, пропуская через почву по 12 ч в сутки постоянный электрический ток плотностью 0,1 А/м² или переменный промышленной частоты плотностью 5 А/м². Превышение указанных плотностей тока угнетает растения и ведет к снижению урожайности.

Токи в зоне корневой системы влияют на процессы почвенного питания, в атмосфере – на фотосинтез. Под воздействием тока питательные вещества почвы легче усваиваются растениями вследствие электролиза, изменяется микрофлора почвы, организуется поток положительных ионов к земной поверхности (атмосферных токов).

Искусственно создавая потенциал атмосферы относительно земли (например, натягивая над растениями металлическую сетку, подключенную к отрицательному полюсу источника, в то время как положительный соединен с землей), можно интенсифицировать жизнедеятельность или угнетать растения.

Угнетающее влияние на растения токов большой плотности используют при электроплазмолизе и борьбе с сорной растительностью.

Электроплазмолиз проводят в электроплазмоллизаторах, чаще всего вальцового типа. Это два металлических цилиндра-электрода, вращающихся встречно, в зазор между которыми поступает растительная масса. Чтобы она обрабатывалась равномерно по длине зазора, один из валцов выполняют из нескольких секций, разделенных изоляционными дисками.

Оптимальные параметры по критерию энергоёмкости при обработке током промышленной частоты: напряженность 70 кВ/м, скорость прохождения материала 30 м/с, плотность массы в зоне контакта с электродом 1000 кг/м³, высота слоя 5–6 мм. Расход энергии в этом случае составит 0,6 кДж/кг, или около 16 кВт · ч/т.

При электрообработке травы в поле в случае благоприятной погоды можно получить массу, закладываемую на сенаж, через 7–10 ч, а сено через сутки; это в 1,5–2 раза быстрее, чем при сушке необработанной травы, причем потери питательных веществ снижаются на 25–50 %.

Для усиления эффективности электроплазмолиза применяют импульсный ток. При импульсном воздействии локализуются такие

факторы, как ударная волна, концентрация реагентов, поляризация, и ожидаемый эффект достигается при более низких энергетических затратах по сравнению с непрерывной обработкой током. Электроимпульсную обработку проводят при следующих параметрах установки: напряжение 25 кВ, скорость транспортной ленты 0,04 м/с, число импульсов (в расчете на 1 кг зеленой массы) 67, толщина слоя массы 0,03 м. Энергоёмкость процесса составляет 1,8 кВт · ч/т, при совмещении с плющением – 2,6 кВт · ч/т. Продолжительность сушки обработанных трав в полевых условиях сокращается более чем в 2 раза, потери питательных веществ в высушенной траве снижаются на 12 %, а потери протеина – в 2,3 раза.

В результате обработки электрическим током мезги винограда выход сока увеличивается на 2–6 %, яблок – на 5–12 %, столовой свеклы – на 15–18 %. С помощью электрического тока извлекают сок из ботвы овощей, выращиваемых в теплицах, чтобы восстановить минеральные вещества, необходимые для приготовления питательных растворов, а также проводят предварительную обработку травы при искусственной сушке.

Обработка токами промышленной частоты или СВЧ для борьбы с сорными растениями успешно применяется в США, Великобритании, Франции, ведутся работы в этом направлении и в нашей стране.

Общим в предложенных технических решениях при обработке током промышленной частоты является использование мобильных устройств на базе трактора, от вала отбора мощности которого приводится во вращение электрический генератор, подключенный к первичной обмотке повышающего трансформатора. Выводы вторичной обмотки соединяют с электродами. Распространены три варианта электродной системы.

В первом варианте ток проходит по цепочке: навесной электрод, перемещаемый над поверхностью почвы, – стебель растения – корневая система – почва – заземленный электрод, перемещаемый в толще земли или на ее поверхности.

Во втором варианте ток проходит от одного навесного электрода к другому через стебли и корневую систему двух растений и почву между ними.

В третьем варианте ток идет через почву и находящиеся в ней корни растений между двумя заземленными электродами. Навесными электродами служат гребенки, пластины, провода, стержни; заземленными – лемеха, культиваторные лапы, катки.

Эффективность борьбы с сорными растениями изучали в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства и Костромском сельскохозяйственном институте. В качестве навесных электродов использовали пластины и стержни с шириной захвата 0,5 м, заземленных – катки диаметром 10 см и массой 6,6 кг. Напряжение между электродами – 2–5 кВ, скорость перемещения электродной системы – 1–4 км/ч. Сорные растения обрабатывали до достижения фазы зрелости (старения) при иссушенном верхнем слое (сопротивление растений минимально, а почвы – максимально). При удельных мощности 8–17 кВт/м и затратах электроэнергии 20–90 кВт · ч/га засоренность участков снизилась на 80–90 %.

Для борьбы с семенами сорных растений применяют и СВЧ-установки. Обработки ведут в режиме «провокаций», т. е. стимулируют прорастание семян и затем уничтожают растения обычными пахотными устройствами, или непосредственно воздействуют на семена. Устройства – мобильные, источник питания – генератор, работающий от вала отбора мощности трактора. Получаемый ток преобразуется в ток СВЧ и подается по фидерному тракту к излучателю-антенне. Экспозиция при обработке – 1,45 с, напряженность электрического поля – 115 кВ/м, частота тока – 2450 МГц, скорость перемещения устройства – около 0,2 км/ч, ширина захвата – 1 м, мощность СВЧ-генератора, необходимая при этом режиме, – 26 кВт.

Электромагнитная обработка семян, растений по сравнению с целым рядом других методов обработки не сопряжена с трудоемкими и дорогостоящими операциями, не оказывает вредного воздействия на обслуживающий персонал (как, например, химическая или радионуклидная обработка или использование пестицидов), не дает при обработке летальных для посевного материала доз, является весьма технологичным и легко автоматизируемым процессом, позволяет легко и точно дозировать воздействие, является экологически чистым видом обработки, легко стыкуется с применяемыми в настоящее время агроприемами. Немаловажным является то, что растения, выросшие из обработанных семян, не имеют в дальнейшем патологических изменений и индуцированных мутаций. Воздействие электромагнитного поля увеличивает количество продуктивных стеблей, количество колосьев, среднюю длину растений и колоса, увеличивает количество зерен в колосе, массу зерна. Все это приводит к увеличению урожайности на 10–15 %.

3.3.2. Электрическая и электромагнитная сепарация смесей

Существующие технологические устройства, производящие очистку и сортирование семян, основаны на различии их (семян) свойств: по удельному весу, плотности, размеру, форме, аэродинамическим, физико-механическим и химико-физическим свойствам. Вместе с тем, семена – потенциально живые организмы, их нельзя травмировать, нагревать и помещать в агрессивные среды. Для семян характерна изменчивость физических и морфологических свойств. Поэтому семена даже одного вида могут различаться по форме, размерам, характеру поверхности.

В пищевой, мукомольной и крахмалопаточной промышленности широко используются два наиболее распространенных метода разделения сыпучих продуктов: в движущемся потоке и метод рассева. Литературные исследования показали положительный результат пневмосепарации подобных по составу с нашим объектом исследований смесей на воздушном каскадном сепараторе типа ММ фирмы «Альпине» (Германия). Эффективный способ разделения сыпучих смесей используется в ситовечных машинах, на которых осуществляется обогащение крупок и такой способ считается непревзойденным. Для этих целей применяются рассевы с квадратными рамами фирмы «Эллис Чалмер» и ситовечные машины «Саймонс» (Англия), а также дисковые триеры. Различия частиц по размерам (длине, ширине, толщине), весу и скорости витания – основные принципы, на основании которых может быть разделена смесь с соевой шелухой на воздушно-ситовых очистительно-сортировальных машинах, пневмосепараторах и триерах (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Свойства и признаки сепарации сыпучих материалов

Признаки сепарации	Рабочие органы			
	Решета (сита)	Ячеистая поверхность (триера)	Воздушный поток (каналы аспирационные)	Электромагнитное поле
1	2	3	4	5
Механические свойства:				
масса;	+	+	+	+
плотность;	–	–	–	+
упругость;	+	+	+	–

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5
линейные размеры; парусность	–	–	–	+
Морфологические: форма; свойства поверхности	+	+	+	+
Оптические	–	–	–	–
Электрические	–	–	–	–
Магнитные	–	–	–	+
Комплекс физико-механических свойств	–	–	+	+

При ситовечном процессе различное направление движения частиц компонентов смеси в рабочем пространстве машины обусловлено совместными действиями сил тяжести, аэродинамических сил и вибрацией. Частицы разной плотности можно разделить гидростатическим способом (более и менее плотные в сравнении с плотностью жидкости).

Разделение семенной смеси на решетках и триерных цилиндрах основано на различии линейных размеров: на решетках с продолговатыми отверстиями разделяют частицы по толщине, с круглыми – по ширине, на триерных цилиндрах – по длине. Различие частиц по аэродинамическим свойствам дает возможности разделить сыпучую смесь в воздушном потоке аспирационных каналов и пневматических сепараторов по плотности и парусности. Метод отсева – самый распространенный в настоящее время, реализуют его следующие технические средства.

Методы отсева (сепарации) основаны на использовании тех или иных физико-механических свойств частиц. Каждое свойство частицы тесно связано с признаком качества, поэтому далеко не каждая отсеивающая машина и рабочий орган приемлемы для сепарации и смеси соевой шелухи, и семян мелкосемянных культур. Пример разделения по размерам – это применение пробивных сит с круглыми отверстиями «предельного калибра». Такое действие второстепенных признаков может совпадать по направлению

с действием основного признака разделения, а может быть ему противоположно.

Выбор способа сепарирования в зависимости от основных признаков различия частиц компонентов сыпучей смеси часто неоднозначен: на него влияют не только направленность сопутствующих признаков различия, но и ряд других признаков: место и значение данной сепарации в общем технологическом процессе, энергоемкость способа, требуемая производительность. Эффективность сортирования на отсевах зависит от большого количества факторов: физико-механических свойств частиц, соотношения компонентов различной крупности, удельной нагрузки на сито, материала и качества изготовления сита, размеров и формы его отверстий, условий транспортировки смеси, кинематических параметров, способа очистки сит, аспирации, условий эксплуатации и обслуживания отсева. Их технологическая эффективность оценивается нагрузкой, эффектом очистки, коэффициентом недосева и извлечения.

Известно [32], что, несмотря на измельчение, частицы далее различаются физико-механическими и технологическими свойствами: массой, характеристичной плотностью, крупностью, аэродинамическими и фрикционными свойствами, в т. ч. электрическими. Для избегания появления зарядов статического электричества на ситах их иногда покрывают аппретурой, но это отрицательно сказывается на севкости сит.

Следует отметить, что во время отсева сои, как и многих иных смесей, в т. ч. и семян, выделяется тонкая пыль через неплотности соединений, которая загрязняет производственные помещения и значительно ухудшает условия труда. Для устранения этого недостатка нужна аспирация отсеивающей машины, а также дополнительное охлаждение продукта.

Кроме всего, к недостаткам применения ситовечных машин на отсевах сухих смесей следует отнести такие как необходимость постоянного ситовечного контроля работы – очистки поверхности сит металлической щеткой, замены изношенных поверхностей. Для очистки сита, например, в каждую из трех секций рам помещен инерционный очиститель, выполненный из прямоугольной текстильной пластины с металлической кнопкой в центре. Каждый очиститель движется по сетчатому поддону кнопкой вниз и очищает сито махровыми краями. По мере изнашивания площадь пластины уменьшается и очиститель подлежит замене, при этом срок службы очистителей иногда менее 1 года. Здесь следует учитывать,

что повышенные недосевы влекут неоправданное увеличение нагрузки систем, не высеянные крупки (сход), направляемые на возможное обогащение, снижают эффективность работы ситовечных машин, увеличивают оборот продукта по системам и расход электроэнергии [32].

Создание новой, более эффективной техники и совершенствование технологических приемов ее эксплуатации встречают ряд трудностей, в том числе связанных с многообразием сепарируемых материалов (многокомпонентностью смесей), способов сепарирования; сложностью и многообразием явлений взаимодействия частиц сепарируемого материала друг с другом и с рабочим органом машины; недостаточным развитием теоретических основ механического сепарирования вообще.

Следует отметить, что при использовании сит на смеси с соевой шелухой наблюдалось очень сильное забивание отверстий оставшимися целыми плодами сои и посторонними включениями. Полученная шелуха сои как проход с сит не удовлетворяла необходимым требованиям по качеству соевой шелухи. Это объясняется невозможностью получения чистой соевой шелухи различного размера для дальнейшего выделения пероксидазы на механических устройствах. Таким образом, необходимо исследование процесса разделения сыпучей смеси для получения чистой соевой шелухи гарантированного качества на иных, специальных устройствах.

Принцип разделения зерновых смесей в электрических полях основывается на способности частиц, составляющих смесь и имеющих разные физико-механические и электрические свойства, приобретать и удерживать разный по величине заряд, который определяет разную силу воздействия поля на разные по свойствам частицы и, таким образом, позволяет разделять их.

Совокупность физико-механических и электрических свойств частиц, определяющая возможность их разделения в электрическом поле, называется признаком делимости (критерием разделения). Он считается регулируемым, если влияние характеризующих его свойств зависит от режима работы сепаратора. Различают также динамические и статические признаки делимости: динамические зависят от времени, в течение которого частица находится в электрическом поле, статические не зависят.

Устройства, предназначенные для разделения сыпучих смесей в электрических полях, называют электрическими сепараторами.

Электросепараторы классифицируют:

по виду электрического поля: коронные, электростатические, с переменным полем, комбинированные;

по способу зарядки частиц: ионной зарядки, электродной (контактной) зарядки, зарядки поляризацией (диэлектрические), зарядки трением (трибоэлектрические), комбинированные;

по конструкции: камерные, барабанные, транспортерные (ленточные), решетчатые и др.

В зависимости от способа образования на частицах заряда и его передачи в процессе электрической сепарации различают электростатическую, коронную, диэлектрическую, трибоадгезионную сепарации.

При электростатической сепарации разделение проводится в электростатическом поле, частицы заряжаются контактным или индукционным способами. Разделение по электропроводности происходит при соприкосновении частиц с электродом (например, заряженной поверхностью барабана; проводящие частицы при этом получают одноименный заряд и отталкиваются от барабана, а непроводящие не заряжаются). Образование разноименных зарядов возможно при распылении, ударе или трении частиц о поверхность аппарата (трибоэлектростатическая сепарация). Избирательная поляризация компонентов смеси возможна при контакте нагретых частиц с холодной поверхностью заряженного барабана (пироэлектрическая сепарация).

Коронная сепарация проводится в поле коронного разряда, частицы заряжаются ионизацией. Коронный разряд создается в воздухе между электродом в виде острия или провода и заземленным электродом, например, барабаном; при этом проводящие частицы отдают свой заряд заземленному электроду. Частицы также могут заряжаться ионизацией, например, радиационной.

Диэлектрическая сепарация проводится за счет пондеромоторных сил в электростатическом поле; при этом частицы с различной диэлектрической проницаемостью движутся по различным траекториям.

Трибоадгезионная сепарация основана на различии в адгезии частиц после их электризации трением. Трение может создаваться при транспортировании частиц по специальной подложке, в кипящем слое при соприкосновении частиц друг с другом.

Возможны комбинированные процессы электрической сепарации: коронно-электростатический, коронно-магнитный и др.

Использование электрического поля является наиболее прогрессивным методом. Применение при сепарации семян электромаг-

нитного, электрокоронного, электростатического и диэлектрического методов уменьшает травмирование семян, улучшает очистку семян от сорных растений, отбор по биологически ценным свойствам семян, способствует улучшению их посевных кондиций.

Электромагнитная сепарация. Установки магнитной очистки семян просты по устройству и успешно используются для отделения семян сорняков с шероховатой поверхностью (повилика, плевел, подорожник, смолевка, василек, горчак розовый и др.) от семян клевера, люцерны, льна и других, имеющих гладкую поверхность. Принцип разделения заключается в том, что семена сорных растений в результате предварительной обработки смесей покрываются слоем магнитного порошка (окиси железа) и притягиваются к постоянному магниту или электромагниту. Семена культурных растений не удерживают порошок, и с ними магнитное поле не взаимодействует.

Магнитные сепараторы по конструктивным признакам разделяют на цилиндрические, ленточные и дисковые. Промышленность выпускает машины ЭМС-1А, К590А и др. Для лабораторных исследований изготавливают установки К295 с электромагнитами и СМЦ-0,4 с постоянными магнитами.

Технологическая схема установки ЭМС-1А (К590А) представлена на рисунке 3.12.

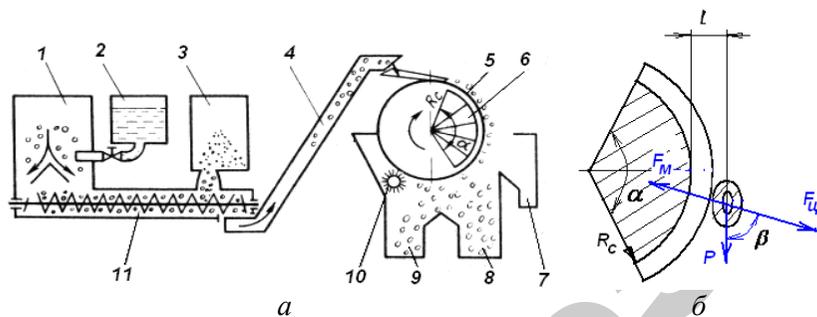


Рис. 3.12. Установка магнитной очистки семян:

a – технологическая схема; *б* – схема сил, действующих на семя в магнитном поле:
 1, 2 и 3 – бункера для зерновой смеси, воды (или масла) и магнитного порошка;
 4 – подающий транспортер; 5 – барабан; 6 – магнитный сектор; 7 – кассета для избыточной воды и крупных предметов; 8 – кассета для очищенных семян;
 9 – кассета для семян сорных растений и магнитного порошка; 10 – чистик;
 11 – транспортер-смеситель

Исходную зерновую смесь подают в бункер 1, где увлажняют водой или маслом, чтобы лучше прилипал порошок. Затем из бункера 3 подают магнитный порошок (окись железа) и тщательно перемешивают с зерном в транспортере-смесителе 11. Приготовленную смесь по транспортеру 4 направляют на вращающийся барабан 5, выполненный из немагнитного материала (алюминия, латуни и т. д.). Внутри барабана установлен неподвижный магнит или электромагнитный сектор. Семена сорняков, покрытые порошком, и его излишки притягиваются к поверхности барабана и удерживаются при его повороте (до конца сектора) или сбрасываются чистиком 10. Семена культурных растений, не покрытые порошком, свободно падают с барабана, не достигнув его нижней части.

При расчете магнитных семяочистительных машин и большинства аппаратов, основанных на воздействии магнитного поля, определяют магнитную индукцию, при которой семена удерживаются в нижней части барабана, и параметры устройств, создающих ее. Должно быть выполнено условие (см. рис. 3.12б):

$$F_M \geq F_c + P \cos \beta, \quad (3.15)$$

где F_M – сила магнитного поля, удерживающая семя, покрытое порошком, Н;

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \text{ – центробежная сила, Н;}$$

m – масса семени с порошком, кг;

v – линейная скорость частицы, м/с;

R – радиус барабана, м;

$P = mg$ – сила тяжести, Н;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – угол между направлениями центробежной силы и силы тяжести, град.

Сила магнитного поля:

$$F_M = \mu_0 \chi m_n V H \text{grad} H F_c + P \cos \beta, \quad (3.16)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м;

χ – магнитная восприимчивость вещества порошка, кг⁻¹;

m_n – масса порошка на семени, кг;

V – объем частицы с порошком, м³;

H – напряженность магнитного поля, А/м.

Учитывая небольшие размеры частицы, принимают $\text{grad}H = \frac{H}{l}$,

где l – расстояние от центра семени до поверхности магнитного сектора, м.

Из выражений (3.15) и (3.16) напряженность магнитного поля

$$H = \sqrt{\frac{g \cos \beta + v^2}{\chi K \mu_0 l V}}, \quad (3.17)$$

где $K = \frac{m_{\text{п}}}{m}$ – коэффициент соотношения масс порошка и семени.

Исходя из габаритов устройства, определяемых его производительностью, и считая магнитную проницаемость близкой к магнитной проницаемости воздуха, находят требуемый магнитный поток, Вб:

$$\Phi = BS = \frac{\mu_0 H_0 \pi L R_c \alpha}{180}, \quad (3.18)$$

где $B = \mu_0 H_0$ – магнитная индукция, Тл;

H_0 – напряженность магнитного поля, А/м;

$S = \frac{\pi L R_c \alpha}{180}$ – площадь поверхности сечения магнитного сектора, м²;

L – активная длина сектора, м;

R_c – радиус магнитного сектора, м;

α – угол между его образующими, град.

Диаметр сердечника $d = 1,13\sqrt{S}$.

Суммарная магнитодвижущая сила (МДС), которую должна развивать намагничивающая катушка:

$$F_k = H_c R_c + \frac{k_p B l}{\mu_0}, \quad (3.19)$$

где H_c – напряженность магнитного поля в секторе, определяемая по кривым намагничивания, А/м;

$k_p = 1,05 \dots 2,5$ – коэффициент рассеяния МДС.

Число витков катушки и длина обмоточного провода, м:

$$W = \frac{F_k}{I} = \frac{4F_k}{\pi d^2 j_{\text{доп}}}; l_{\text{пр}} = W \pi d_{\text{ср}}, \quad (3.20)$$

где I – сила тока, А;

d – диаметр жилы обмоточного провода, м;

$j_{\text{доп}}$ – допустимая плотность тока, А/м²;

$d_{\text{ср}} = d + \frac{h}{2}$ – средний диаметр катушки, м;

h – высота катушки, м.

Активное сопротивление катушки в рабочем состоянии, Ом:

$$R = \rho_{20} \frac{4l_{\text{пр}}}{\pi d^2} [1 + \alpha_T (t - 20)], \quad (3.21)$$

где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление провода, Ом/м;

α_T – температурный коэффициент изменения сопротивления, град⁻¹.

Необходимое напряжение на зажимах катушки, В:

$$U_k = RI = R \frac{\pi d^2}{4} j_{\text{доп}}. \quad (3.22)$$

Необходимость применения магнитных порошков существенно усложняет конструкцию магнитных сепараторов, ограничивает их использование для очистки семян в случае, когда основная культура представлена шероховатыми семенами или магнитная восприимчивость обоих компонентов смеси одинакова.

Кроме того, магнитные сепараторы имеют большие габариты, металлоемки, а удельный расход энергии для разделения семян по форме и свойствам поверхности у них выше, чем у других типов устройств. Необходимо также отметить, что разделение семян на таких сепараторах сопровождается сильным запылением и загрязнением воздуха мелким железным порошком, вредным для здоровья обслуживающего персонала.

Удаление металлических примесей из сыпучих и жидких продуктов производится магнитными и электромагнитными сепараторами. Основу таких установок составляют машины типа «магнитная шайба» и «магнитный шкив», работающие по принципу извлечения примесей из слоя сепарируемого материала. Разработаны установки с концентраторами магнитного поля, создающие неоднородное маг-

нитное поле с высокой магнитной индукцией в межполюсном пространстве.

Электрокоронная сепарация. При электрических способах сепарации семенных смесей используют различие свойств электропроводности, диэлектрической проницаемости, поляризуемости, способности воспринимать и отдавать заряд. Следует отметить, что электрические свойства обрабатываемого зернового материала находятся в тесной взаимосвязи с другими физическими и биологическими свойствами.

По конструкции электрокоронные сепараторы бывают: барабанные, камерные, транспортерные (рис. 3.13), типа горка.

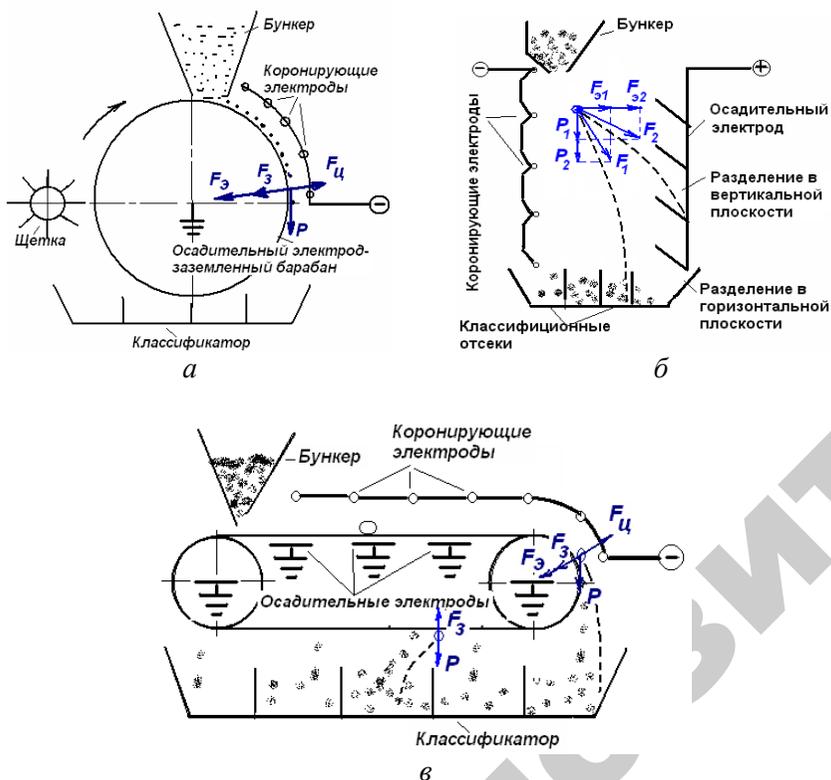


Рис. 3.13. Схемы электрокоронных сепараторов барабанного (а), камерного (б), транспортерного (в) типов и действующих на семя сил:

P – сила тяжести; F_3 – сила зеркального отображения; F_3 – электрическая сила; $F_{ц}$ – центробежная сила

При разделении смеси на электрокоронном сепараторе зерно получает определенный заряд. Его величина всегда меньше максимальной, так как одновременно с зарядкой происходит процесс разрядки на заземленную поверхность барабана через переходное сопротивление. В результате на зерне устанавливается остаточный заряд, и его величина зависит от переходного сопротивления и емкости системы частица–электрод. Основную роль играет сопротивление зерна, поэтому сухие зерна имеют максимальный остаточный заряд, а влажные – ничтожно малый. Таким образом, семенную смесь на барабанном электрокоронном сепараторе можно разделить на влажные и сухие зерна [33].

Широкому применению электрокоронных сепараторов препятствуют следующие факторы: влажность и температура окружающей среды в значительной мере влияют на результат очистки семян, что ухудшает стабильность режимов работы; питание электродов осуществляется от высоковольтного источника постоянного напряжения (30–60 кВ), что вызывает необходимость в выпрямительных устройствах, усложняющих схему питания и повышающих стоимость сепаратора; наличие оголенных электродов приводит к уменьшению электробезопасности при обслуживании сепараторов.

Сепарация в электростатическом поле. Свойство семян удлиненной формы ориентироваться в электрическом поле большей осью вдоль силовых линий поля, а также различия в напряженности ориентирования частиц разной формы положены в основу создания ряда сепараторов, которые могут быть использованы для выделенных компонентов из семенных смесей. Рабочий орган таких сепараторов может совершать поступательное или вращательное движение.

В электростатических сепараторах (рис. 3.14) зерновки получают заряд при соприкосновении с электродом. Знак заряда тот же, что и электрода.

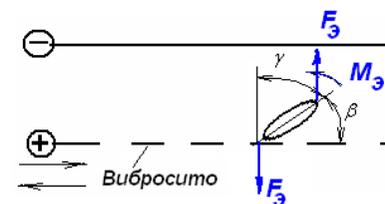


Рис. 3.14. Схема электростатического сепаратора:
 F_3 – электрическая сила; M_3 – ориентирующий момент сил

На вытянутую по форме частицу действует ориентирующий момент сил, который тем больше, чем больше вытянута частица (меньше коэффициента сферичности) и чем больше диэлектрическая проницаемость вещества частицы. Округлые частицы не ориентируются в поле, вследствие этого они остаются неподвижными относительно транспортера.

При очистке и сортировке семян в электрических сепараторах на семена не только действуют силы поля, но и оказываются электрофизические воздействия: поверхностное обеззараживание, возбуждение жизнедеятельности семян за счет поляризации. Эффективность: повышение всхожести на 10 %, повышение урожайности до 20 %, повышение содержания в зерне белка на 0,5–1,2 %.

Диэлектрическая сепарация. Суть диэлектрического принципа сепарации семян сельскохозяйственных культур заключается в различии значений и направлений поляризационных сил, действующих на семена, при их помещении в неоднородное электрическое поле, которое создается системой заряженных электродов – бифилярной обмоткой.

В отраслевой научно-исследовательской лаборатории перспективных автоматических средств сепарации семян Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина» (МГАУ) под руководством профессора В. И. Тарушкина разработан комплекс диэлектрических сепараторов. Движение семян осуществляется: по скатным доскам; по горкам с продольным, поперечным и поперечно-продольным наклонами полотна; по вращающейся винтовой поверхности; с помощью конических и цилиндрических поверхностей вращения. Общий элемент всех диэлектрических сепарирующих устройств – это рабочие органы, которые формируют неоднородные электрические поля.

На рисунке 3.15 приведена схема диэлектрического сепаратора барабанного типа с бифилярной обмоткой.

Благодаря избирательному воздействию неоднородных электрических полей на сепарируемые частицы отбираются наиболее биологически ценные семена, обеспечивающие большую продуктивность растений. Основанные на этом принципе устройства можно использовать для очистки, сортирования и калибровки семян. Интересен вопрос поляризации семян сельскохозяйственных культур в связи с их очисткой и выделением фракции выполненных семян высокого качества на рабочем органе диэлектрического сепаратора.

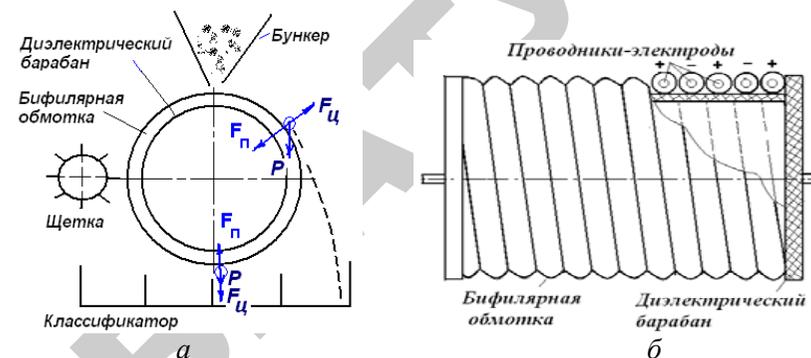


Рис. 3.15. Схема диэлектрического сепаратора (а) и конструкция барабана (б) с бифилярной обмоткой

В 1982–1983 гг. в ТСХА и проблемной лаборатории МИИСП им. В. П. Горячкина проведены исследования по сортировке семян льна сорта Л-1120 и клевера сорта ВИК-1 на диэлектрическом сепараторе СДЛ-1. Семена льна были засорены преимущественно плевелом льяным. Установлено, что сортировка семян снижала засоренность посевного материала льна в два раза, клевера – в 10 раз. В семенной массе льна также наблюдали значительное снижение засоренности. Наиболее пригоден для сортировки первый режим работы сепаратора (напряжение поля 25 В). При более высоком напряжении (30 и 35 В) притяжение семян к барабану было большим, и значительная масса семян попадала в отход. Электросепарирование способствовало выделению более крупных, хорошо выполненных семян в первой и второй фракции. Так, масса 1000 семян льна первой фракции составила 5,32–5,48 г, а клевера – 1,95–2,04 г, что превысило массу 1000 шт. исходного образца на 4,4 и 6,2 % соответственно. При этом улучшалась хозяйственная годность семян, отмечалась экономия семян обеих культур при посеве. Таким образом, применение диэлектрического сепаратора СДЛ-1 позволило дополнительно и более тщательно очистить семена льна и клевера, особенно для семеноводческих посевов.

Известно [34–39], что при помещении диэлектрических частиц (а к ним в полной мере относятся семена) в электрическое поле на связанные заряды, образующие в семени диполь, будут действовать силы, которые ведут к смещению зарядов, т. е. происходит поляризация. Семя приобретает диэлектрический момент

$$p = Ql, \quad (3.23)$$

где Q – заряд, Кл;
 l – смещение зарядов, м.

Произведение электрического момента диполя на число диполей n в единице объема определяет вектор поляризации:

$$P = np = nQl. \quad (3.24)$$

Электрическое поле оказывает силовое воздействие на диполь

$$F = P \text{grad} E. \quad (3.25)$$

Анализ формул (3.23–3.25) показывает, что для максимального воздействия электрического поля на семена в рабочем пространстве сепарирующего устройства необходимо создавать, во-первых, максимально возможную напряженность электрического поля, во-вторых, максимальную его неоднородность, при которой можно пренебречь влиянием противоположно связанного заряда семени.

Смещение зарядов в семени, вызванное поляризацией, требует затрат энергии. Если вектор поляризации P изменяется на dP , то произведение $E dP$ представляет собой величину ΔW , на которую возрастает энергия молекул в единице объема

$$\Delta W_0 = \frac{1}{2} (\epsilon_c - \epsilon_0) E^2. \quad (3.26)$$

Если принять во внимание, что диэлектрическая проницаемость семян пропорциональна их влажности, то, как следует из [40], эффективнее сепарировать более сухие семена.

Несмотря на относительно мелкие размеры, семена не являются абсолютно чистым и однородным материалом (зародыш, эндосперм, иные структурные составляющие – т. е. наличие биохимическая неоднородность). В связи с этим семена рассматриваются как неоднородный диэлектрик и представляются в виде эквивалентной схемы замещения (рис. 3.16).

Эквивалентную схему замещения можно использовать для раскрытия механизма поляризации и появления токов, протекающих через семя. Первая ветвь схемы содержит эквивалентную емкость C_3 , которая учитывает упругую электронную поляризацию, не связанную с потерями энергии. Вторая, характеризующая упругую ионную поляризацию, обусловленную смещением упруго связанных ионов

в кристаллах, включает в себя емкость C_u . В третью входят емкость C_{op} и сопротивление R_{op} , которые учитывают неупругую дипольно-релаксационную поляризацию. Сопротивление R_{op} отражает потери энергии, обусловленные поворотом полярных групп относительно основной молекулы под действием электрического поля. Четвертая ветвь, отражая структурную поляризацию, содержит элементы R_{cm} , C_{cm} . Пятая включает в себя активное сопротивление R_{cn} , учитывающее потери при протекании тока I_{cn} сквозной проводимости (C_o – емкость системы электродов при отсутствии частиц сепарируемой смеси).

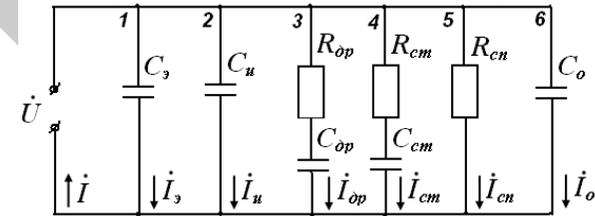


Рис. 3.16. Эквивалентная схема замещения частицы в электрическом поле

Благодаря многообразию видов поляризации, при диэлектрической сепарации осуществляется разделение частиц с равной массой и размерами (что невозможно на механических ситах и аспирационных каналах), но различным биохимическим составом. И это на порядок более интеллигентное разделение смесей.

Многообразие видов поляризации в семенах обуславливает и многообразие протекающих в них токов. Эти токи можно свести в характерные группы и тем самым существенно упростить схему замещения семени, находящегося в электрическом поле. В данном случае при подаче на электроды синусоидального напряжения общий ток I , проходящий через семя, находим, складывая комплексы трех токов:

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \quad (3.27)$$

где I_1 – ток проводимости, обусловленный перемещением зарядов (ветвь 5 рис. 3.16):

$$I_1 = gU, \quad (3.28)$$

где g – активная проводимость частицы, См;
 U – напряжение сети, В;

I_2 – ток, обусловленный электронной и ионной поляризацией семени совместно с поляризацией межэлектродного пространства (ветви 1, 2 и 6):

$$I_2 = j\omega C_2 U, \quad (3.29)$$

где C_2 – эквивалентная емкость ветвей 1, 2 и 6;

I_3 – ток, обусловленный дипольно-релаксационной и структурной поляризацией частиц:

$$I_3 = \frac{U}{f e^{j\varphi}}, \quad (3.30)$$

где f – сложное математическое выражение, содержащее эквивалентное активное сопротивление R_3 и емкость C_3 ветвей 3, 4;

φ – угол сдвига фаз между током и напряжением.

На рисунке 3.17 построены упрощенная схема замещения и векторная диаграмма токов, протекающих через семена при их нахождении в электрическом поле.

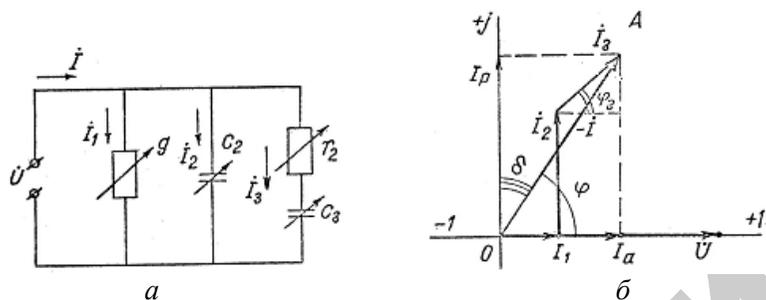


Рис. 3.17. Упрощенная схема замещения частицы (а) и векторная диаграмма токов (б), протекающих через частицу в электрическом поле

Так как электрические параметры частицы (диэлектрическая проницаемость, электропроводность) могут изменяться, элементы схемы замещения взяты переменными. Из векторной диаграммы следует, что частицы, находящиеся в электрическом поле, представляют для сетевого напряжения нагрузку активно-емкостного характера.

Протекание токов внутри частиц, обусловленное поляризацией, связано с поглощением энергии источника поля. Это ведет к их

нагреву. Количество поглощенной энергии сильно зависит от частоты. При низких частотах (50–400 Гц) потери энергии в частицах незначительны.

Интересен вопрос отрицательного воздействия электрического поля, вызывающего поляризацию семян, на их биохимический состав и постоянство структуры, т. е. речь идет о возможности изменения нативных свойств семян.

Для ответа на этот вопрос была использована мембранная теория переноса вещества в клетках. Известно, что каждая клетка, внутренняя сторона которой заряжена отрицательно, имеет наружную сторону, заряженную положительно (рис. 3.18а). Возникновение этих зарядов обусловлено внутриклеточными процессами, в результате которых внутри мембраны создается собственное электрическое поле E_2 .

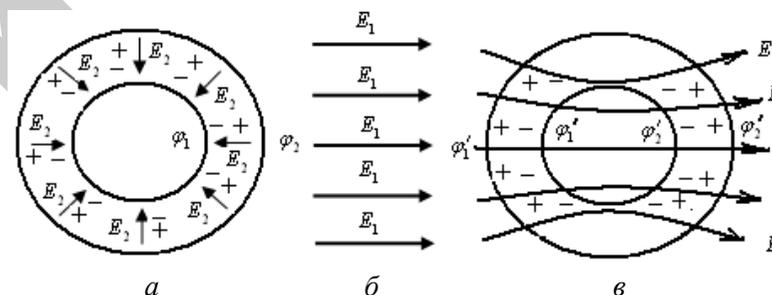


Рис. 3.18. Воздействие внешнего электрического поля на мембранное поле клетки частицы (семена): а – собственное поле клетки; б – внешнее поле; в – результирующее электрическое поле

Разность мембранных потенциалов можно определить по формуле В. Нерста:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{RT}{bNF} \ln \frac{C_i}{Cr}, \quad (3.31)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/моль;

T – абсолютная температура, К;

b – валентность иона;

N – число молей;

F – число Фарадея, $F = 96\,484$ Кл/моль;

$\ln \frac{C_i}{C_r}$ – натуральный логарифм отношения концентраций ионов

по обе стороны мембраны.

Учитывая, что мембрана – очень тонкая прослойка в клетках (10^{-9} м), внешнее электрическое поле E_1 можно считать однородным (рис. 3.18б), т. е. $E_1 = \text{const}$. Как показал расчет, напряженность собственного электрического поля E_2 составляет около 200 кВ/см, внешнее электрическое поле E_1 , создаваемое электродами в электросепарирующих устройствах, колеблется в диапазоне 0,5–1,0 кВ/см [37].

Таким образом, напряженность собственного электрического поля внутри семени сельскохозяйственного растения более чем на порядок превосходит внешнее электрическое поле, необходимое для разделения семян по качеству. Поэтому внешнее электрическое поле не может вызывать изменение нативных свойств семян, что подтверждается экспериментально.

Как было отмечено, при помещении семян в электрическое поле происходит их поляризация (смещение связанных зарядов). При снятии внешнего электрического поля мембранные заряды не могут мгновенно занять свое первоначальное положение. Поэтому требуется некоторое время, чтобы мембранные заряды внутри частиц возвратились на свои места. При подаче и снятии напряжения на рабочем органе электросепарирующего устройства происходят процессы, аналогичные зарядке и разрядке конденсатора (рис. 3.19).

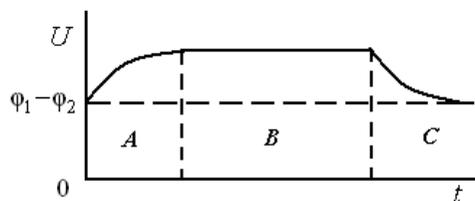


Рис. 3.19. Изменение напряжения $U(t)$ на мембране растительной клетки при наложении и снятии внешнего поля E_1

Зона A характеризуется зарядкой, зона B – стабильным повышенным напряжением, зона C – разрядкой. Очевидно, что для каждого семени кривая $U(t)$ будет сугубо индивидуальной. Она в определенной степени несет информацию о качестве семени, его

биохимическом составе. Третья зона, характеризующая остаточную поляризацию семени, также несет информацию о качестве отдельных частиц.

Таким образом, для семян, помещенных в электрическое поле, характерно явление остаточной поляризации, вызванной последствием внешнего электрического поля на заряды мембраны клеток семян. Следует отметить, что одним из основных свойств электретов является остаточная поляризация. Установлено, что электретные свойства (остаточная поляризация) начинают уменьшаться с увеличением электропроводности (влажности). Чтобы диэлектрик обладал электретными свойствами, его электропроводность должна быть не более 10^{-8} – 10^{-10} См/см. Следовательно, с увеличением влажности семян будут ухудшаться их электретные свойства и разделение вороха семян на составляющие компоненты.

3.3.3. Ультразвуковая технология обработки семян

Ультразвук представляет собой периодические механические упругие колебания с частотой, превышающей верхнюю границу слышимости человеческого уха. Средой распространения ультразвука могут быть газы, жидкости и твердые тела. Границы слышимых звуков у разных людей не одинаковы и изменяются с течением времени. Принято считать область слышимых звуков от 16 до $16 \cdot 10^3$ Гц и колебания от $16 \cdot 10^3$ до 10^{10} Гц ультразвуковыми. Для технических целей наибольшее распространение получил диапазон частот в пределах от 16 до 1600 кГц.

Периодически изменяющее свои размеры тело создает в окружающей его среде периодические процессы сжатия и разрежения, распространяющиеся по этой среде. Тело при расширении сжимает непосредственно примыкающий к нему слой среды, который, в свою очередь, передает это сжатие следующему прилегающему слою. Частицы среды, упруго взаимодействуя, движутся вдоль распространения сжатия. Состояние сжатия проходит через всю среду. В следующий момент, когда тело начинает сжиматься, сжатые слои среды получают возможность расширяться. Частицы среды начинают перемещаться в обратную сторону.

Создаваемые в окружающей среде упругие напряжения сжатия и разрежения возбуждают колебания частиц среды около положения равновесия. Эти чередующиеся процессы сжатия и разрежения, распространяющиеся во все стороны, и есть звуковые волны.

Различают три основных типа волн: продольные, поперечные и поверхностные.

Если изменение объема тела во времени происходит по гармоническому закону, то и вызываемые им ультразвуковые колебания будут гармоническими.

В этом случае смещение частицы в момент времени τ

$$b = B \sin \omega \tau, \quad (3.32)$$

где B – амплитудное значение смещения, м.

Так как полных колебаний за одну секунду совершается f , а за одно полное колебание волна проходит путь, равный длине волны λ , то пройденное за одну секунду расстояние, то есть скорость распространения волны, определится из выражения $c = \lambda f$.

Ультразвуковое поле характеризуется колебательной скоростью частиц, их ускорением, давлением, распространяющимся в среде, интенсивностью и другими параметрами.

Скорость колеблющейся частицы

$$v = \frac{db}{d\tau} = B \omega \cos \omega \tau. \quad (3.33)$$

Максимальное значение скорости

$$v_{\max} = \omega B = 2\pi f B.$$

Ускорение частицы

$$a = \frac{dv}{d\tau} = \frac{d^2 b}{d\tau^2} = -\omega^2 B \sin \omega \tau = -b \omega^2. \quad (3.34)$$

Максимальное значение ускорения

$$a_{\max} = B \omega^2.$$

Давление (Н/м^2), создаваемое ультразвуковыми колебаниями в среде с плотностью ρ (кг/м^3) и скоростью ультразвука c (м/с):

$$p = v \rho c = \omega \rho c B \cos \omega \tau. \quad (3.35)$$

Амплитуда давления

$$P_m = \omega \rho c B = B \omega z_a.$$

Удельное акустическое сопротивление среды $z_a = \rho c$ характеризует акустические свойства данной среды.

Интенсивностью или силой ультразвуковых колебаний называют мощность, приходящуюся на единицу поверхности площадки, перпендикулярной направлению распространения звуковых колебаний.

Для синусоидальной бегущей волны интенсивность ультразвука выражается следующей зависимостью:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{p v}{2} = \frac{v^2 \rho c}{2} = \frac{P^2}{2z_a}. \quad (3.36)$$

Интенсивность применяемых в технике ультразвуков колеблется в широких пределах, начиная с сотен ватт на 1 м^2 до сотен и тысяч киловатт на 1 м^2 , а в установках специального назначения может достигать десятков киловатт на 1 м^2 .

Если вся ультразвуковая энергия проходит окружающую источник колебания поверхность S (м^2), то мощность акустических колебаний

$$P = IS. \quad (3.37)$$

Среда, где происходит распространение колебаний, поглощает часть их энергии, которая переходит в тепловую энергию, а также расходуется на изменение структуры вещества. Больше всего энергии звуковых волн поглощается в газах, меньше в жидкостях и еще меньше в твердых телах, в частности в металлах, кристаллах кварца и др. При этом поглощение всегда растет с увеличением частоты колебаний.

Затухание амплитуды смещения в плоской волне может быть выражено формулой:

$$B = B_0 e^{-\alpha l}, \quad (3.38)$$

где e – основание натуральных логарифмов;

α – коэффициент затухания, зависящий от свойств среды, м^{-1} ;

l – расстояние, пройденное волной, м.

Если на некотором расстоянии l_1 от излучателя измерить амплитуду колебания B_1 , а на расстоянии l_2 – амплитуду B_2 , то значение коэффициента затухания (поглощения) может быть определено по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{B_1}{B_2}. \quad (3.39)$$

Значение коэффициента поглощения для жидкостей и газов может быть определено по формуле:

$$\alpha_{\text{ж}} = \alpha' f^2,$$

а для твердых тел

$$\alpha_{\text{т}} = \alpha' f,$$

где α' – табличный коэффициент.

При $l = \frac{1}{\alpha}$ амплитуда колебаний звука снижается до 0,37 первоначального значения.

Так как интенсивность колебаний зависит от квадрата скорости смещения частиц и, следовательно, от квадрата амплитуды смещения, затухание интенсивности может быть выражено зависимостью

$$I = I_0 e^{-2\alpha l}. \quad (3.40)$$

При падении ультразвуковых волн на границу раздела двух сред часть волн пройдет во вторую среду, а часть отразится.

Интенсивность и характер проявления эффектов ультразвука зависят от частоты и интенсивности колебаний, а также от свойств самих сред.

Эффекты ультразвуковых колебаний проявляются в механических, акустических, термических и биологических действиях.

Механические проявления принимают разнообразные формы вследствие появления в газообразных и жидких средах переменного давления и переменного потока, кавитации и поверхностного трения.

Акустические проявления заключаются в распространении подчиняющихся законам акустики ультразвуковых колебаний в средах.

Термические проявления – это следствие поверхностного трения в граничных поверхностях и поглощения ультразвуковых колебаний в средах.

Биологические эффекты связаны с изменениями в протекании биологических процессов в клетках организмов, возникающими под действием ультразвуковых колебаний.

Рассмотрим некоторые характерные явления, возникающие в средах при распространении в них ультразвуковых колебаний.

Кавитацией называется процесс образования полостей и пузырьков в ультразвуковом поле жидкости во время фазы разрежения и их захлопывания во время фазы сжатия, сопровождающейся

возникновением местных больших мгновенных давлений, приводящих к механическим разрушениям поверхности твердого тела, находящегося вблизи мест захлопывания. При прохождении фазы волны, создающей разрежение, жидкость разрывается в местах, где ее прочность ослаблена, образуя множество мельчайших полостей – пузырьков. В тех местах, где есть маленькие пузырьки газа, частицы посторонних примесей и др., прочность ослаблена. Во время фазы сжатия эти маленькие полости – кавитационные пузырьки – захлопываются. Эти захлопывания сопровождаются возникновением больших мгновенных давлений, достигающих иногда сотен атмосфер. Кавитация лежит в основе большинства практических применений ультразвука. Она управляема: ее можно создавать в нужных местах и нужных дозах.

Интенсивность кавитационных явлений зависит главным образом от интенсивности ультразвука, температуры среды, внешнего давления, свойств среды и других факторов. Ниже приведены значения интенсивности ультразвука, при которой возникает кавитация, в зависимости от частоты ультразвуковых колебаний:

Частота, кГц	20	200	500	3000
Интенсивность ультразвука, Вт/см ²	1	10	200	50 000

Внешне кавитация проявляется как шипящий шум, возникающий в жидкости при определенном значении интенсивности ультразвукового поля.

Диспергирование заключается в мелком дроблении вещества и перемешивании его с другими. Представим себе, что в жидкости, в которой распространяются ультразвуковые колебания, находятся во взвешенном состоянии твердые вещества с размерами, равными длине волны или превышающими ее. В этом случае может оказаться, что один конец взвешенной частицы будет находиться в области сжатия, а другой – в области разрежения. В результате возникнет разрывающее усилие, которое может привести к разрыву частицы твердого вещества, то есть размельчению.

Иногда под действием ультразвука между взвешенными твердыми частицами и колеблющимися частицами жидкости возникают силы трения, которые также могут оказаться достаточными для размельчения твердых частиц. Диспергирование при помощи ультразвуковых колебаний позволяет получить устойчивые эмульсии. Металлы и другие вещества могут быть диспергированы в жидкостях или расплавах. На этом явлении основаны многие технологи-

ческие процессы – ультразвуковая пайка, ультразвуковая очистка, обработка твердых хрупких материалов и др.

Разделение частиц в неоднородных суспензиях возможно на основании того, что в ультразвуковом поле переменное движение частиц, обладающих неодинаковой массой, различно и зависит от частоты колебательного процесса. С увеличением частоты колеблются только наиболее мелкие частицы, а относительно крупные совершают движения по сложным траекториям.

Коагуляция заключается в образовании из мелких частиц более крупных. Под воздействием ультразвука и гидродинамических сил притяжения частицы соударяются и укрупняются, а затем осаждаются. Это явление используют при очистке дымовых газов. Вследствие поглощения ультразвука частицами коагуляция проводится на низких частотах.

Дегазация состоит в укрупнении мелких пузырьков газа, которые образуются под действием кавитации и вследствие колебания и движения сталкиваются, объединяются и образуют пузырьки больших размеров, которые всплывают.

Звуковое давление представляет собой чередование сжатий и разрежений, причем амплитуда сжатия равна амплитуде разрежения. На препятствие, находящееся в поле звуковой волны, звуковое давление действует таким образом, что создает на поверхности этого препятствия силу, меняющую свой знак в соответствии с частотой колебаний звуковой волны.

Радиационное давление существует наряду со звуковым и выражается в том, что поверхность препятствия испытывает постоянное по силе и знаку давление, стремящееся сдвинуть это препятствие по направлению распространения волны.

Звуковой ветер представляет собой постоянное движение частиц среды в виде постоянного потока в направлении распространения волны. Это перемещение проявляется в виде сильных течений, приводящих к интенсивному перемешиванию жидкостей под действием ультразвуков.

Фонтанирование жидкости возникает на поверхности жидкости под действием звукового ветра при определенных интенсивностях ультразвука. С увеличением интенсивности ультразвуковых колебаний увеличивается число одновременно вырывающихся с поверхности капель, и они сливаются в один общий фонтан.

Проведенные исследования [14, 41, 42] показали, что воздействие ультразвуковых колебаний на различные среды обусловлено

эффектами кавитации, ультразвукового ветра и ультразвукового давления, причем максимальное воздействие обусловлено ультразвуковой кавитацией. Практически все физико-химические и технологические процессы протекают на границе раздела (межфазной поверхности), где молекулы различных веществ соприкасаются друг с другом. При этом любой процесс можно представить в виде трех последовательных стадий: приближение молекул двух или нескольких взаимодействующих веществ друг к другу и их столкновение; непосредственно процесс взаимодействия молекул; удаление продуктов реакции из зоны взаимодействия. По литературным данным, после ультразвуковой обработки семян рост урожайности составил: дыни – 45 %; томатов – 15 %, кукурузы – 35 %, пшеницы – 25 %, гречихи – 30 %.

Рассмотрим в качестве примера процессы, протекающие в системе жидкость – твердое тело. По современным представлениям, вблизи поверхности твердого тела формируется слой жидкости, называемый диффузионным граничным слоем, в котором сосредоточено основное сопротивление переносу молекул реагирующих веществ к межфазной границе или уносу продуктов реакции. Причем основное сопротивление оказывает диффузионный слой, непосредственно прилегающий к твердому телу. В этой области перенос осуществляется молекулярной диффузией.

Очевидно, скорость технологических процессов можно увеличить за счет уменьшения толщины или полного устранения диффузионного граничного слоя.

Возникающая при прохождении УЗ волны через жидкость УЗ кавитация и обусловленные ею мощнейшие микропотоки жидкости, а также ультразвуковые ветер и давление воздействуют на граничный слой и «смывают» его. При этом сопротивление переносу молекул реагирующих веществ значительно уменьшается, и скорость технологических процессов за счет этого возрастает.

Кроме толщины диффузионного граничного слоя скорость технологических процессов зависит от величины поверхности соприкосновения реагирующих компонентов. Поэтому увеличение поверхности соприкосновения реагирующих веществ также способно увеличить скорость протекания технологических процессов.

Создаваемый при прохождении ультразвуковых волн в среде ультразвуковой ветер, вызывающий интенсивное перемешивание и мощные микропотоки от захлопывающихся кавитационных пузырьков, приводит к взаимному трению твердых частиц, движущимся

щихся в жидкости, и их сверхтонкому измельчению (какое невозможно осуществить другими методами). Сверхтонкое измельчение увеличивает межфазную поверхность реагирующих компонентов, что в свою очередь увеличивает скорость протекающих процессов. Аналогичные физические процессы протекают и в системах, состоящих из двух и более жидких компонентов.

Таким образом, ультразвуковые колебания, распространяющиеся в жидкофазных средах, приводят к увеличению удельной поверхности взаимодействия и уменьшению величины диффузионного граничного слоя, обеспечивая тем самым многократное ускорение технологических процессов.

Следует дополнительно отметить, что кроме двух рассмотренных факторов, вносящих основной вклад в ускорение технологических процессов, в ультразвуковой волне возникают различные вторичные эффекты (электрические разряды в кавитационных пузырьках, огромные температуры в очень маленьких объемах обрабатываемых веществ, ударные волны и др.).

Сочетание столь разнородных физических эффектов, воздействующих одновременно на обрабатываемые среды, позволяет инициировать неизвестные ранее процессы, приводящие к получению новых веществ и композиций, а также к приданию известным веществам новых, уникальных свойств.

Поэтому при создании ультразвуковых аппаратов технологического назначения основное внимание уделяется изучению физических механизмов различных УЗ процессов, ибо это есть единственная основа рационального подхода к конструированию аппаратуры, выбору оптимальных технических характеристик и режимов работы.

Установка для ультразвуковой обработки материалов (рис. 3.20) состоит из источника питания, преобразователя электрических колебаний в механические, акустического трансформатора (концентратора), рабочего инструмента.



Рис. 3.20. Схема установки для ультразвуковой обработки материалов

Источники питания ультразвуковых установок (ультразвуковые генераторы) – это устройства, предназначенные для преобразования электрической энергии переменного тока промышленной частоты в энергию тока высокой частоты, равной частоте ультразвука.

Преобразователи – источники ультразвуковых волн – могут быть механическими и электроакустическими. Механические (свистки, сирены и др.) преобразуют скорость и давление потока газа или жидкости в ультразвуковые колебания. Они просты по устройству, надежны, однако мощность и частота колебаний низки. Более распространены электроакустические преобразователи на основе магнетострикционного и пьезоэлектрического эффектов.

Акустические трансформаторы – волноводы и концентраторы – служат для ввода ультразвуковых колебаний в ту зону, где обрабатывается материал, а также для согласования параметров преобразователя с нагрузкой.

Первые сообщения о стимулирующем действии ультразвука появились еще в 1936 году. В последующие годы появилась целая серия работ, касающихся стимулирующего действия ультразвука на семена различных растений. «Озвученные» семена помидоров, дыни, кукурузы, капусты, лука, моркови, хлопчатника и т. д. отличаются повышенной активностью ферментов, что создает предпосылки к увеличению урожайности. Так, обработанные ультразвуком зерна ячменя дают всходы на 2–3 дня раньше, чем контрольные посадки, длина колоса и количество зерен в нем увеличиваются на 30 % [41].

Процесс ультразвуковой обработки семян выглядит следующим образом [41, 42]: партия семян помещается в технологический объем с водой, при этом объем семян не должен превышать 30 % объема воды. Вносятся необходимые микроэлементы. В течение 5–10 минут производится обработка ультразвуком.

Характер действия ультразвука на прорастание семян зависит от их вида, состояния, времени применения, а также доз. Стимулирующий эффект многие исследователи связывают с повышением скорости поглощения воды, обусловленным увеличением проницаемости клеточных оболочек и повышением активности ферментной системы. Отрицательный эффект объясняют более глубокими и стойкими изменениями в семенах, затрагивающими химизм нуклеиновых кислот. Большие ограничения на ультразвуковую обработку семян накладывают два факта: стимулирующий эффект является только при обработке семян в водной среде; обработка

сопровождается акустическим эффектом. Кроме этого, следует устанавливать персональные дозы обработок для каждой культуры, ведь биологическое проявление ультразвука заключается во влиянии его на скорость протекания физиологических процессов, которые недопустимо необратимо нарушить (отмирание тканей).

Тем не менее, ультразвуковая предпосевная обработка семян имеет неоспоримое преимущество, которое повышает ее ценность. После ультразвуковой обработки пустые, невсхожие семена остаются плавать на поверхности жидкости, а всхожие семена оседают на дно. Таким образом осуществляется еще и флотация семян.

3.3.4. Плазменно-радиоволновое воздействие на семена

В последнее время отмечен положительный эффект при использовании нетрадиционных микро-, радиоволновых и плазменных методов обработки различных природных объектов [6, 7]. Перспективность применения таких методов обусловлена высокой биологической активностью электромагнитных полей во всех частотных диапазонах, а также специфическими физико-химическими свойствами плазмы. Обработка материалов низкотемпературной неравновесной плазмой является в настоящее время одним из наиболее эффективных методов активации их поверхности. Это обусловлено как комплексным воздействием различных факторов (излучения в УФ-, видимом и ИК-диапазонах длин волн, тепловых потоков, возбужденных и невозбужденных частиц плазмы, активных радикалов), так и экономичностью и экологической безопасностью этих методов, а также возможностью автоматизированного мониторинга процесса обработки [33]. Наиболее часто для решения технологических задач, связанных с поверхностной обработкой материалов, используется плазма высокочастотного (ВЧ) разряда низкого давления. В таких средах степень ионизации – порядка 10^{-17} , средняя энергия электронов составляет $\sim 2-5$ эВ, а энергия ионов близка к энергии теплового движения атомов и молекул ($\sim 0,03$ эВ).

Таким образом, для оптимизации существующих плазменных технологий и создания основ принципиально новых методик на растительных объектах исследование процессов переноса макрочастиц в газоразрядной плазме является актуальной и практически важной задачей.

Также отмечается положительный эффект при использовании плазменных технологий в сельском хозяйстве, в частности, в качестве

альтернативы традиционным химическим способам предпосевной обработки семенного и посадочного материала [6, 7, 19, 33]. Актуальность развития подобных исследований определяется существующим несоответствием физиологического качества посевного материала требованиям интенсивных технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Исследования последних лет [7, 9, 43] показали, что можно добиться положительного эффекта путем использования электромагнитных и плазменных методов обработки семенного и посадочного материала различных культур. В первом случае действующими физическими факторами являются магнитная и электрическая составляющие электромагнитного поля, во втором – к этим двум факторам добавляются излучение в УФ-видимом и ИК-диапазонах длин волн, тепловые потоки, бомбардировка возбужденными и невозбужденными частицами плазмы (ионы, электроны, атомы, молекулы).

Полученные к настоящему времени результаты показывают перспективу данных методов изменения посевных свойств семян. Так, например, в работе [19] выявлено повышение энергии прорастания и лабораторной всхожести семян пшеницы, кукурузы, ячменя и подсолнечника после их обработки слабым (величина магнитной индукции $B \approx 3...15$ мТл) низкочастотными (НЧ) и сверхвысокочастотными (СВЧ) магнитными полями. Улучшение начальных ростовых процессов семян озимой пшеницы и ячменя в результате воздействия постоянного магнитного поля с индукцией $B \approx 1,5$ Тл установлено авторами [43]. Более подробная информация по электромагнитной обработке семян представлена в работе [44], а также в обзоре [43]. Для лучшего понимания эффекта действия плазмы атмосферного давления на семена огурца (прорастание и рост рассады) авторы (Wang Min; Yang Size; Chen QingYun; Gao LiHong; Chen GuangLiang; Liu XiuJun) спроектировали оборудование для обработки семян атмосферной плазмой высокого давления. Семена огурца обрабатывались с различным напряжением от 5610 В до 7310 В. Результаты показали что скорость прорастания, процент прорастания, индекс прорастания и индекс энергии значительно увеличивались. По сравнению с контрольными цифрами они улучшились, соответственно, с 8,22 % до 52,94 %, с 2,21 % до 9,55 %, с 5,37 % до 35,32 % и с 4,72 % до 104,72 %. Кроме того, действие альфа амилазы было активнее, проводимость семян была ниже, чем таковые из контроля. Высота рассады, диаметр стебля, вес, сухой вес, объем корня, активность роста корня, содержание хлорофилла

и активность пероксидазы были отчетливо увеличены. Обработка плазмой под напряжением 6290 В и 6630 В показала лучшие результаты, чем другие напряжения в этом эксперименте.

Впервые выявлена реакция различных видов многолетних злаковых и бобовых трав на обработку семян низкотемпературной гелиевой плазмой экспозицией 120 с. Установлены режимы обработки, оказывающие стимулирующее воздействие на энергию прорастания, рост, развитие и продуктивность многолетних трав: клевера и тимофеевки луговых, ежи сборной, овсяницы луговой. Экономически и экологически оправданно и энергетически эффективно проводить обработку посевного материала перед посадкой [43]. Для повышения биологической продуктивности и устойчивости лесных насаждений смоленские лесоводы обрабатывают семена древесных пород плазмой инертных газов.

Используя плазму низкого давления для *Carthamus tinctorium L.* (Сафлор красильный – красивоцветущее растение, цветки которого содержат желтое и красное красящие вещества, а его семена – 25–36 % жирного масла, из которого получают пищевое и техническое масла), выполнили поверхностную модификацию семян [43]. Низкое давление разреженного газа аргона RF использовалось для поверхностной модификации для увеличения нормы прорастания и сокращения времени прорастания. Результаты показали, что у обработанных плазмой *C. tinctorium L.* семян выявились на 50 % более высокая норма прорастания, 100 %-ное увеличение активности за 24 часа, *relativeto* (относительное) сокращение во времени прорастания. Были также исследованы эффекты обработки плазмой двух различных давлений. Результат показал, что обработка плазмой низкого давления была эффективным способом увеличения прорастания в более короткое время. С помощью электронного микроскопа (SEM) была исследована поверхностная структура обработанного плазмой *C. tinctorium L.* семени (*Carthamii pericarpium* и *Hilum*). Были выявлены изменения в структуре *Carthamii pericarpium* после обработки плазмой – более мягкая структура относительно контроля.

Для модификации семян применялись тлеющий, коронный [43], микроволновый и высокочастотный разряды, возбуждаемые в атмосфере различных газов: воздухе, аргоне, азоте. Установлено, что плазменная обработка семян способствует увеличению их всхожести, ускорению прорастания и повышению урожайности сельскохозяйственных культур, повышает пищевую ценность плодов растений

и подавляет развитие агрессивных фитопатогенов, вызывающих болезни растений в период их вегетации. Установлено также, что плазменная обработка семян различных видов овощных, кормовых и зерновых культур существенно повышает их всхожесть, ускоряет их прорастание, увеличивает на 30–50 % продуктивность сельскохозяйственных растений и качество растениеводческой продукции. Отмечается, что плазменная обработка семян может повышать пищевую ценность плодов растений за счет усиления накопления в них белков (на 10–15 %), сахаров (на 30–70 %), органических кислот (на 20–70 %), аскорбиновой кислоты (на 30–60 %), азота, фосфора и калия (на 15–40 %). Кроме того, плазменная обработка семян подавляет развитие агрессивных патогенов (фузариоз, альтернариоз, ризоктониоз), которые в период вегетации вызывают развитие таких болезней, как черная ножка, желтуха или фузариозное увядание, черная пятнистость, снижая этим важнейшие витальные свойства семян (всхожесть, энергию прорастания). Деактивация зерен и бобов, зараженных *Aspergillus sp.* и *Penicillium sp.*, холодной плазмой низкого давления описывается в специальной литературе (Selcuk, Meral; Oksuz, Lutfi; Basaran, Pervin). Целью исследования было определение эффективности воздействия системы «холодная плазма низкого давления (LPCP)» плюс воздушные газы или SF₆ для деактивации и/или устранения двух патогенных грибов – *Aspergillus sp.* и *Penicillium sp.*, которыми искусственно загрязнили поверхность семян. Обработку плазменной деактивацией выполнили в вакууме, используя газовую инъекцию, сопровождаемую плазменной разгрузкой продолжительностью 5–20 мин. Воздействие плазмы уменьшало грибковые образования на семенах ниже 1 % начального веса в зависимости от начального уровня загрязнения, сохраняя качество прорастания семени. Значительное сокращение с 3 регистрациями для обеих разновидностей было достигнуто в пределах 15-минутной обработкой плазмой. Воздушная плазма газов и плазма SF₆ обеспечивают особенно интересную альтернативу деактивации для семян. Интересны также наблюдения SEM относительно *teliospores Tilletia controversa*, взаимодействующих с плазмой (Sun ZhenYu; Ma Жэнхонг; Wang HaiGuang; Liu Liang; Feng Jian; Zhang GuiXin; Acta Phytopathologica Sinica) [43]. Plasmreatment – новая технология физической стерилизации: *Teliospores Tilletia controversa* (ТСК) обработали плазмой, затем наблюдали за изменениями под электронным микроскопом: *teliospores* были разрушены [43]. Исследование подтвердило гипотезу о возможности

обработки плазмой для достижения стерилизующего эффекта на семенах пшеницы, первоначально содержащих *Teliospores Tilletia controversa*.

Основными факторами, стимулирующими активацию внутриклеточных процессов в семенах при воздействии на них плазмы, по мнению авторов [45], являются травление поверхности семени, ее функционализация и осаждение на ней малых биоактивных молекул. В работе [3] показано, что такими молекулами являются ионы NO_3^- , проникающие в поверхностные слои семени и стимулирующие биохимические реакции, которые ускоряют процессы его прорастания. Более детальные исследования механизмов осаждения биоактивных молекул на поверхность семян проведены в работе [31].

Однако несмотря на достигнутые успехи в использовании многие проблемы остаются нерешенными. В частности, основные результаты, представленные в литературе, были получены при воздействии на природные объекты электромагнитных полей низких частот и сверхвысокочастотного диапазонов, а плазменная обработка проводилась преимущественно при возбуждении разряда на промышленной частоте $f = 13,56$ МГц. По литературным данным, отсутствуют исследования плазменно-радиоволнового воздействия на биологические объекты на вдвое меньшей частоте $f = 5,28$ МГц. Вместе с тем известно, что процессы накопления и ионизации возбужденных химически активных молекул в осциллирующих электрических полях зависят от их частоты [45]. Механизмы воздействия плазмы и электромагнитных полей на биологические объекты изучены недостаточно, практически отсутствовали исследования, направленные на установление взаимосвязи приобретаемых ими свойств с параметрами воздействующих плазменно-радиоволновых сред. В значительной степени это затрудняло выяснение роли отдельных агентов плазменного воздействия в активации внутриклеточных процессов обрабатываемых семян.

В последние годы отмечен положительный эффект при использовании методов электромагнитной и плазменной обработки семенного материала различных культур [44]. В первом случае действующими физическими факторами являются магнитные и электрические составляющие электромагнитного поля, во втором – к этим факторам добавляют излучение в ультрафиолетовом, видимом и ИК-диапазонах длин волн, тепловые потоки, возбужденные и невозбужденные частицы плазмы (ионы, электроны, молекулы, радикалы).

Таким образом, перед учеными стоят следующие важные и актуальные для сельскохозяйственного производства задачи:

- 1) установление взаимосвязи между характеристиками индивидуальных сухих семян и качеством вырастающих из них проростков;
- 2) поиск информационных каналов отклика семян на внешние воздействия;
- 3) исследование влияния физических факторов воздействия на качественный состав партии сухих семян;
- 4) выяснение причин, препятствующих прорастанию ослабленных семян, и роли окислительного стресса в образовании проростков с морфологическими дефектами;
- 5) исследование динамики всхожести семян в период после воздействия на них физических факторов;
- 6) разработка метода анализа качественного состава партий воздушно-сухих семян и прогнозирования их всхожести без проращивания.

3.3.5. Применение электроактивированных растворов

Процесс электротехнологической активации представляет собой гетерогенную реакцию ионного обмена между полупроницаемой мембраной (к которой можно также отнести клеточную мембрану дисперсной частицы [46]) и жидкой фазой, скорость которых выражается уравнением

$$\vartheta = kS_{\text{уд}}(C^S - C^0) \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right), \quad (3.41)$$

где ϑ – скорость реакции, моль/(с · м³);

k – константа скорости реакции, зависящая от физико-химических свойств реагирующих веществ;

$S_{\text{уд}}$ – удельная площадь реакционной поверхности, м²/м³;

C^S, C^0 – концентрация активных ионов на поверхности мембраны и в объеме раствора, моль/м² и моль/м³;

E_a – энергия активации химической реакции, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);

T – температура, К.

Концентрация ионов на поверхности мембраны зависит от количества электричества, протекающего через электролит, и концентрации ионов в жидкой фазе [46]:

$$C^S = C^0 \pm \frac{q\delta^2 \Delta n}{zFD\tau}, \quad (3.42)$$

где q – удельное количество электричества, Кл/м³;
 δ – толщина диффузного слоя, м;
 Δn – разность чисел переноса ионов в мембране и растворе;
 z – заряд ионов, Кл;
 F – постоянная Фарадея, Кл/моль;
 D – коэффициент диффузии ионов в растворе, м²/с;
 τ – время обработки, с.

В формуле (3.42) знак «+» соответствует концентрации анионов на анодной и катионов на катодной сторонах мембраны, а знак «-» – концентрации анионов на катодной и катионов на анодной сторонах мембраны.

Концентрация ионов в жидкой фазе

$$C^0 = C^{\text{нач}} + \frac{q}{F}(\eta_a - \eta_k), \quad (3.43)$$

где $C^{\text{нач}}$ – начальная концентрация активных ионов в жидкой фазе, моль/м³;

η_a, η_k – выход по току анионов и катионов, соответственно.

Концентрация ионов в жидкой фазе и на поверхности мембраны влияет на заряд дисперсной частицы и на потенциал ее поверхности.

Для расчета параметров электрохимического реактора кинетику процесса электротехнологической активации подобно электродиализу [6] представим уравнением

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{1}{V} \left(\frac{I}{F} - k_a \Delta C S_M \right), \quad (3.44)$$

где V – объем ячейки, м³;
 I – сила тока, А;
 k_a – коэффициент активации;
 ΔC – перепад концентраций ионов по обе стороны мембраны, моль/м³;
 S_M – площадь мембраны, м².

В результате интегрирования от начальной концентрации C_n до конечной C_k получим уравнение для определения длительности процесса активации

$$t = -\frac{VF}{k_a S_M} \ln \left(\frac{I - F \Delta C_n k_a S_M}{I - F \Delta C_k k_a S_M} \right), \quad (3.45)$$

где ΔC_n и ΔC_k – перепад концентраций ионов по обе стороны мембраны в начале и в конце процесса.

Изменения концентраций ионов в растворах по обе стороны ионитовых мембран используют в различных технологических процессах, например, для предварительной очистки воды для теплоэнергетических установок, при очистке сточных вод перерабатывающих предприятий, их обессоливании, для опреснения, концентрирования различных жидких сред, содержащих ценные компоненты, перед их последующим извлечением и т. п.

При использовании неселективных ионопроницаемых мембран можно разделять электролиты и неэлектролиты. С помощью селективных (катионообменных или анионообменных) мембран в электрохимическом реакторе можно повысить или понизить концентрацию раствора электролита [47]. Селективные мембраны проницаемы только для ионов определенного знака (А – для анионов, К – для катионов), поэтому в средней камере реактора (рис. 3.21а) вода опресняется, в анодной – подкисляется, а в катодной – подщелачивается. В многокамерном электрохимическом реакторе чередуется большое число (до нескольких сотен) катионообменных и анионообменных мембран, расположенных между двумя электродами (рис. 3.21б).

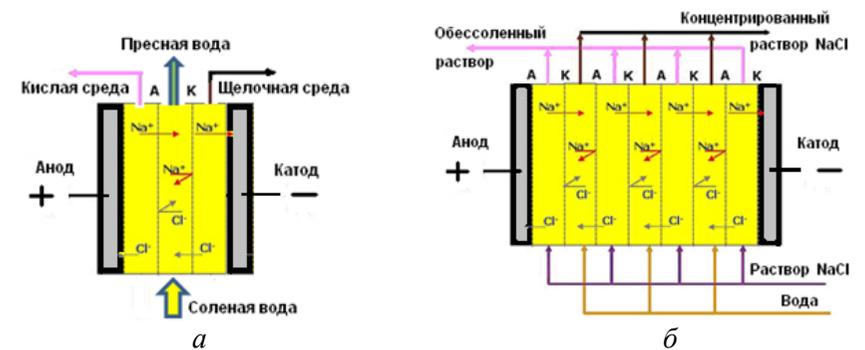


Рис. 3.21. Схемы электротехнологических процессов:
 а – опреснения воды; б – снижения концентрации раствора соли:
 А – анионообменные мембраны; К – катионообменные мембраны

Электроактивированные растворы (анолиты и католиты) в общем случае синтезируют из разбавленных (от 0,05 до 5,0 г/л) растворов неорганических веществ, в качестве которых чаще всего используют водный раствор хлорида натрия. В простейшем проточном электрохимическом реакторе (рис. 3.22) вода с небольшим содержанием солей поступает в анодную и катодную камеры.

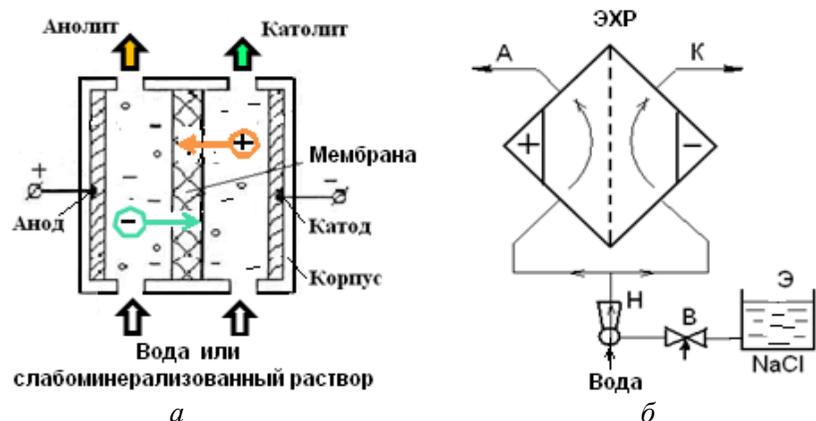


Рис. 3.22. Схема электрохимического реактора (а) и принципиальная гидравлическая схема (б) установки для получения анолита и католита

Если через электролит протекает электрический ток, то процессы восстановления у катода, так же как и процессы окисления у анода, приводят к протеканию электрохимических реакций, в результате которых образуются новые вещества и изменяется вся система межмолекулярных взаимодействий, в том числе структура воды как растворителя.

В упрощенной форме основные процессы, происходящие в электролизере, можно представить следующим образом: окисление воды на аноде — $2\text{H}_2\text{O} - 4e \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2$; восстановление воды на катоде — $2\text{H}_2\text{O} + 2e \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$; образование на аноде газообразного хлора — $2\text{Cl}^- - 2e \rightarrow \text{Cl}_2$; образование в анодной камере высокоактивных окислителей Cl_2O , ClO_2 , ClO^- , HClO , Cl^* , O_2^* , O_3 , HO_2 , OH^* ; образование в катодной камере высокоактивных восстановителей OH^- , H_3O_2^- , H_2 , HO_2^- , O_2^- .

В результате катодной обработки вода приобретает щелочную реакцию (до $\text{pH} = 7,5 \dots 12,0$). Ее окислительно-восстановительный

потенциал (ОВП) резко понижается (достигая значений от -300 до -800 мВ). При анодной обработке кислотность воды увеличивается до $\text{pH} = 6,0 \dots 2,0$, ОВП — от $+300$ мВ до $+1200$ мВ.

С помощью электрохимических реакторов получают несколько разновидностей активированных растворов: К — католит щелочной, А — анолит кислый, АН — анолит нейтральный, АНК — анолит нейтральный катодный, АНД — анолит нейтральный диафрагменный.

При расчете параметров электрохимического реактора силу тока в ячейке I можно определить из закона Фарадея:

$$I = \frac{Fq_v(C_n - C_k)}{\eta}, \quad (3.46)$$

где q_v — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$;
 η — выход по току.

В диапазоне концентрации C_k от 0,01 до 0,5 моль/ м^3 выход по току η находится в пределах 0,89–0,80 [47, 48].

Напряжение на электродах U определяется составляющими:

$$U = U_0 + nE_m(1 + jR), \quad (3.47)$$

где U_0 — падение напряжения на электродах, В;
 n — количество последовательно соединенных ячеек, шт.;
 E_m — мембранный потенциал ячейки, зависящий от температуры, концентрации солей в исходном рассоле и активированных растворах, В;
 j — плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$;
 R — сопротивление ячейки, Ом.

Допустимую напряженность электрического поля $E_{\text{доп}}$, В/м, выбирают по электрической прочности $E_{\text{пр}}$ материала с учетом коэффициента запаса k_3 , т. е.

$$E_{\text{доп}} = \frac{E_{\text{пр}}}{k_3}.$$

Величина $E_{\text{доп}}$ определяет межэлектродное расстояние:

$$l = \frac{U}{E_{\text{доп}}} = \frac{U}{j_{\text{доп}} \rho_t}, \quad (3.48)$$

где $j_{\text{доп}}$ — допустимая плотность тока на электродах, $\text{А}/\text{м}^2$;

ρ , – удельное сопротивление раствора при рабочей температуре, Ом · м.

Максимальная плотность тока

$$j_{\max} = \frac{k_n I_t}{S} \quad (3.49)$$

не должна превышать $j_{\text{доп}}$.

В уравнении (3.49):

$k_n = 1,1 \dots 1,4$ – коэффициент неравномерности плотности тока по поверхности электрода;

I_t – сила рабочего тока при конечной температуре, А;

S – площадь активной поверхности электрода, м².

Растворы при электрохимической активации проявляют свойства окислительно-восстановительного и кислотно-основного катализатора в химических и биохимических процессах. Низкая концентрация продуктов электрохимической активации и релаксация получаемых растворов определяют их экологическую чистоту. Наличие в анолите достаточного количества сильных окислителей и свободных радикалов превращает его в раствор с сильно выраженными биоцидными свойствами. Катодит, насыщенный восстановителями, приобретает высокую адсорбционно-химическую активность, а также сильные моющие свойства. Он относится к малотоксичным соединениям 4 класса опасности; не оказывает раздражающего действия, не обладает кожно-резорбтивным действием, не обладает мутагенным и тератогенным действием [47, 48]. Катодит обладает моющим действием по отношению к различным загрязненным и зажиренным поверхностям.

Анолит кислый АК обладает бактерицидным, вирулицидным, спороцидным, фунгицидным и дезодорирующим действием. Анолит нейтральный катодный АНК, помимо свойств кислого анолита, одновременно обладает и моющими свойствами. Показатели растворов, обеспечивающие моющий и дезинфицирующий эффект: анолит кислый АК – рН = 3,0...4,0, ОВП = +1150±50 мВ, концентрация активного хлора 100–600 мг/л; анолит нейтральный катодный АНК – рН = 7,0...8,0, ОВП = +1000±50 мВ, концентрация активного хлора 100–500 мг/л; катодит К – рН = 9,0...12,0, ОВП = –850±50 мВ [48].

В связи с тем, что анолит АНК получают из катодита, он обладает моющими свойствами и, таким образом, он более активен по

сравнению с анолитом АН в условиях высокой загрязненности обрабатываемых поверхностей органическими соединениями.

Технологические процессы производства электроактивированных водных растворов отличаются относительной простотой реализации, доступностью, низкой энерго- и материалоемкостью. При этом получают широкий спектр растворов, характеризующихся высокой физико-химической, биологической активностью, экологической безопасностью, низкой себестоимостью, что открывает широкие возможности их применения во многих отраслях народного хозяйства.

Освоение собственного производства электротехнологических установок обеспечит импортозамещение, снижение материальных, энергетических и других затрат. Применение электроактивированных растворов значительно повысит технологическую и экономическую эффективность, экологичность сельскохозяйственного производства, особенно в сферах, связанных с биологическими объектами (животноводстве, растениеводстве и др.).

4. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ И МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОБЪЕКТЫ

4.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Вопросы изучения физических основ электротехнологических процессов, их определяющих факторов, сущности происходящих явлений и преобразований в обрабатываемых материалах для достижения технологического эффекта представляют значительный научный интерес.

Группу методов воздействия на объект, при которых электрическая энергия используется непосредственно или с предварительным преобразованием в другие виды энергии (химическую, механическую и др.) относят к электрофизическим и электрохимическим. Классификация технологических действий и проявлений электромагнитного поля при обработке органических материалов и различных сред рассмотрена в п. 3.1.

Электромагнитное поле – одна из форм существования материи, характеризующаяся совокупностью взаимосвязанных и взаимно обуславливающих электрического и магнитного полей. Распространение электромагнитного поля в вещественных средах сопровождается движением электромагнитной энергии, представляющей собой сумму энергий электрического и магнитного полей. Изменениям электрического и магнитного полей сопутствует превращение электрической энергии в магнитную и магнитной в электрическую.

Электромагнитное поле может существовать (проявляться) в различных формах: электрического поля, магнитного поля, электромагнитных волн, электрического тока и других электрических и магнитных явлений. Каждая из этих форм поля несет

соответствующую ей энергию: электростатическую, магнитную, электромагнитную, электродинамическую и др. Наибольшее применение получила электродинамическая, или электрическая, энергия – энергия электрического тока, что объясняется сравнительной простотой ее производства, передачи и преобразования в другие электрические и неэлектрические виды.

Каждый из видов энергии электромагнитного поля имеет определенные технологические свойства – способность поглощаться в вещественных средах и превращаться в тепловую, механическую, химическую или биологическую энергию. Преобразование электрической энергии в другие электрические и неэлектрические виды и их целенаправленное использование для воздействия на предметы труда в технологических процессах составляют сущность электротехнологии.

Из теоретической электротехники известно, что все разнообразие форм и проявлений электричества подчиняется общим законам электромагнитного поля, описываемым системой уравнений Максвелла. Полная система уравнений Максвелла представляет собой математическую модель поля, из которой однозначно вытекают все его свойства, энергетические характеристики и возможные превращения.

Для переменного электромагнитного поля в неподвижной однородной и изотропной среде полная система уравнений имеет вид:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}; \quad (4.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (4.2)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho \vec{v}; \quad (4.3)$$

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}; \quad (4.4)$$

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}; \quad (4.5)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho; \quad (4.6)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0, \quad (4.7)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля, А/м;

\bar{j} – плотность полного тока, А/м²;
 \bar{E} – напряженность электрического поля, В/м;
 \bar{B} – магнитная индукция, Тл;
 τ – время, с;
 γ – удельная электрическая проводимость, См/м;
 \bar{D} – электрическая индукция, Кл/м²;
 ρ – объемная плотность свободных электрических зарядов, Кл/м³;
 \bar{v} – скорость движения свободных зарядов, м/с;
 ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, Ф/м;
 μ_a – абсолютная магнитная проницаемость вещества, Гн/м.

Основное проявление электромагнитного поля в вещественных средах – электрический ток. Плотность полного тока включает плотность тока проводимости

$$\bar{j}_{\text{пр}} = \gamma \bar{E}, \quad (4.8)$$

пропорционального напряженности электрического поля \bar{E} ; плотность тока электрического смещения

$$\bar{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial \tau} = \epsilon_a \frac{\partial \bar{E}}{\partial \tau}, \quad (4.9)$$

пропорционального скорости изменения напряженности \bar{E} ; плотность тока переноса зарядов в разреженном газе

$$\bar{j}_{\text{пер}} = \rho \bar{v}, \quad (4.10)$$

пропорционального скорости \bar{v} движения зарядов.

Ток переноса наблюдается в электронных пушках, используемых в электротермии, в вакуумных электронных и других лампах. Основное значение имеют плотности токов проводимости и смещения, которые в основном и будут рассматриваться.

Уравнения (4.1) и (4.2), записанные для мгновенных значений векторов, являются основными уравнениями электромагнитного поля. Первое представляет собой обобщенный закон полного тока в дифференциальной форме, устанавливающий одну из важнейших связей между электрическими и магнитными явлениями: протекание в среде тока (проводимости, смещения или переноса) вызывает

в ней магнитное поле ($\text{rot} \bar{H}$). Второе выражает в дифференциальной форме закон электромагнитной индукции Фарадея–Максвелла: изменение магнитного поля во времени ($\partial B / \partial \tau$) возбуждает в среде электрическое поле ($\text{rot} \bar{E}$). Уравнение (4.8) представляет собой закон Ома в дифференциальной форме.

Для изотропных сред при синусоидально изменяющихся во времени векторах \bar{H} и \bar{E} первое (без учета $\bar{j}_{\text{пер}}$) и второе уравнения Максвелла можно представить в комплексной форме:

$$\text{rot} \dot{\bar{H}} = \gamma \dot{\bar{E}} + j \omega \epsilon_a \dot{\bar{E}}; \quad (4.11)$$

$$\text{rot} \dot{\bar{E}} = -j \omega \mu_a \dot{\bar{H}}. \quad (4.12)$$

Основными параметрами электромагнитного поля служат векторы напряженности электрического \bar{E} и магнитного \bar{H} полей. Электрическое и магнитное поля – две взаимно связанные и взаимно обуславливающие составляющие единого электромагнитного поля. Каждое из них характеризуется своей энергией, значение которой зависит не только от параметров поля, но и от электрофизических свойств среды. Объемная плотность энергии электрического поля (при линейной зависимости $\bar{D} = \epsilon_a \bar{E}$)

$$W_3 = \frac{\epsilon_a E^2}{2}. \quad (4.13)$$

Объемная плотность энергии магнитного поля (при линейной зависимости между $\bar{B} = \mu_a \bar{H}$)

$$W_m = \frac{\mu_a H^2}{2}. \quad (4.14)$$

Объемная плотность энергии электромагнитного поля

$$W = \frac{1}{2} (\epsilon_a E^2 + \mu_a H^2). \quad (4.15)$$

Энергия переносится электромагнитными волнами, которые согласно закону Максвелла распространяются в вещественных средах со скоростью

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная);
 $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная;
 ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость;
 μ – относительная магнитная проницаемость вещества;
 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – скорость электромагнитных волн в вакууме, приблизительно равная $3 \cdot 10^8$ м/с.

При включении электрической цепи под напряжение движение электрических зарядов в проводниках возникает почти одновременно во всей линии, какой бы длинной она (в масштабе Земли) ни была. В то же время скорость направленного движения электронов в металлах достигает 10^{-3} м/с. Из этого следует, что энергия электромагнитного поля переносится от места генерирования электромагнитными волнами, распространяющимися в диэлектрике (воздухе), окружающем линию электропередачи. Провода лишь формируют вид электромагнитной волны и определяют направление ее распространения, в провода электромагнитная энергия поступает из окружающего пространства и преобразуется в них в энергию электрического тока.

Движение энергии в электромагнитном поле характеризуется вектором Пойнтинга:

$$\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}], \quad (4.16)$$

представляющим собой поток энергии, $В \cdot А/м^2$, переносимой электромагнитными волнами за единицу времени через единичную поверхность, перпендикулярную направлению движения энергии. Направление вектора Пойнтинга перпендикулярно векторам \vec{E} и \vec{H} и совпадает с направлением движения энергии (распространения электромагнитных волн).

Энергия, поступающая в единицу времени в некоторый объем V , ограниченный поверхностью A :

$$S = -\oint_A \vec{P} d\vec{A}. \quad (4.17)$$

Знак «минус» перед интегралом означает, что поток энергии направлен внутрь тела навстречу нормали к элементарной поверхности

тела dA . В целом поток энергии – величина положительная, так как скалярное произведение $[\vec{P} d\vec{A}] < 0$. Решив систему уравнений электромагнитного поля относительно \vec{E} и \vec{H} для конкретных условий поставленной задачи с учетом граничных условий на поверхностях раздела сред и используя выражение (4.17), можно найти поток энергии, поступающей в тело.

4.2. ПОГЛОЩЕНИЕ И ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВЕЩЕСТВЕННЫХ СРЕДАХ

Превращение энергии электромагнитного поля (ЭМП) в другие виды происходит при поглощении электромагнитных волн средами. Интенсивность поглощения и направленность превращений зависит от электрофизических свойств сред и частоты поля. Необходимое условие поглощения – наличие в веществе тела «приемников» электромагнитной энергии – элементарных свободных или связанных электрических зарядов, имеющих собственную частоту колебаний, не сильно отличающуюся от частоты колебаний поля. Поглощение энергии поля тем больше, чем ближе собственная частота колебаний частиц тела к частоте колебаний поля.

В проводниках при сравнительно низких частотах поля приходят в движение «свободные» электроны или ионы, в результате чего образуется ток электронной или ионной проводимости. Связанные заряды металлов слабо реагируют на низкие частоты, а электромагнитные волны частотой выше 1 МГц металлы отражают. В диэлектриках «приемниками» электромагнитных волн на высоких частотах становятся связанные заряды, образуя ток электрического смещения, и т. д. Электромагнитная волна, распространяясь в поглощающей среде, ослабляется в направлении распространения. Поток энергии, определяемый вектором Пойнтинга, является функцией расстояния z от поверхности среды и убывает по экспоненциальному закону

$$S_z = S_e \exp(-2kz),$$

где S_e – поток энергии на поверхности среды, $В \cdot А/м^2$;
 k – коэффициент затухания волны, $м^{-1}$.

Таким образом, интенсивность затухания волны и, следовательно, поглощение энергии определяются коэффициентом затухания k , представляющим собой функцию электрофизических свойств среды и частоты поля. Для поглощающих сред коэффициент k определяется формулой

$$\frac{\gamma}{\omega \varepsilon_a} = 0, \quad (4.18)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая скорость поля, рад/с.

В идеальных диэлектриках $\gamma/\omega \varepsilon_a = 0$, $k = 0$, электромагнитные волны не затухают и энергия не поглощается. В реальных диэлектриках $0 < \frac{\gamma}{\omega \varepsilon_a} \leq 1$, поэтому поглощение энергии поля возможно

лишь на высоких частотах (более 1 МГц). В металлах $\omega \varepsilon_a \ll \gamma$, поэтому в выражении (4.18) можно пренебречь единицей как величиной пренебрежительно меньшей, чем $\gamma/\omega \varepsilon_a$, тогда коэффициент затухания для металлов

$$k = \sqrt{\omega \mu_a \gamma / 2}. \quad (4.19)$$

Из анализа зависимости (4.19) следует, что вследствие высокой проводимости металлов (а у ферромагнетиков и магнитной проницаемости μ_a) электромагнитные волны в них быстро затухают даже на сравнительно низких частотах.

Превращение поглощенной электромагнитной энергии в другие виды происходит в результате различных взаимодействий электрических и магнитных полей с элементарными частицами сред, с индуцируемыми в средах токами, с электрически заряженными телами и т. д. Результатами таких взаимодействий являются различные технологические проявления, или действия поля (тока). Основные из них: магнитное действие тока, тепловое (термическое) действие тока, механические силы поля, химическое действие тока, биологическое действие тока (поля).

Разделение на действия тока и поля условно, во всех случаях первопричиной действий служит электромагнитное поле.

4.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗЛИЧНЫХ СРЕД

Электрический ток является частной формой электромагнитного поля, поэтому его технологические свойства и проявления обусловлены свойствами поля. Прохождение электрического тока в электролитах сопровождается переносом вещества, поляризацией сред, электрокинетическими явлениями (электрофорез, электроосмос, потенциал течения), электрохимическими проявлениями.

При поляризации происходит смещение или выравнивание зарядов вещества под воздействием электрического поля. Различают электронную, ионную, миграционную, концентрационную, ориентационную и электрохимическую поляризации. В процессах обработки материалов электрическим током низкой частоты наибольшее влияние оказывают последние три вида.

На границе между твердым телом и жидкостью происходит пространственное распределение электрических зарядов, приводящее к возникновению разности потенциалов между соприкасающимися веществами. В установившемся режиме обмена ионами создается равновесный потенциал, определяемый концентрацией раствора, при которой ни раствор, ни электрод не приобретают электрических зарядов. Если раствор имеет нормальную концентрацию, то нормальный электродный потенциал, В:

$$\varphi_n = -\frac{RT}{zF} \ln c_0, \quad (4.20)$$

где $R = 8,3144$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная;

T – термодинамическая температура, К;

z – заряд иона с соответствующим знаком;

$F = 96\,485$ Кл/моль – число Фарадея;

c_0 – концентрация ионов до протекания тока, моль/см³.

При отклонении концентрации от исходных условий разность потенциалов между электродом и раствором, В:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_1}{c_2} \quad (4.21)$$

или

$$\varphi = \varphi_n + \frac{RT}{zF} \ln |c|,$$

где c_1 и c_2 – концентрации потенциалопределяющих ионов в электроде и растворе, моль/см³;

c – текущее значение концентрации раствора, моль/см³.

Изменение концентрации и потенциала наблюдают не только на электродах, но также на мембранах и в растворе. Причина поляризации – различная активность ионов.

В основе преобразования электрической энергии в химическую лежит явление электролиза, состоящее в том, что электрический ток способен выделять из электролитов (проводников II рода), помещенных между электродами (проводниками I рода), частицы вещества (ионы), осаждают на электродах и интенсифицировать их взаимодействие. На отрицательном электроде (катоде) всегда выделяются ионы металлов и водорода, на положительном электроде (аноде) – остаток химического соединения. На границе электролит–электрод между ионами и электродами происходит обмен электронами и энергией.

При протекании тока электроды поляризуются, и на границе раздела фаз возникает контактная разность потенциалов электрода φ_1 и электролита φ_2 , называемая перенапряжением:

$$\eta = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Перенапряжение – движущая сила, интенсифицирующая процессы окисления (на аноде) или восстановления (на катоде). Таким образом, работа электрического тока по созданию перенапряжения на электродах превращается в химическую энергию образования новых веществ. При определенных условиях плотность тока J на электродах, характеризующая скорость химических реакций, линейно зависит от перенапряжения:

$$J = \frac{J_0 n F \eta}{RT_1}, \quad (4.22)$$

где J_0 – плотность тока обмена (скорость реакции без наложения электрического поля);

n – число электронов, участвующих в реакции (заряд химически активного иона);

T_1 – температура электролита.

Выражение (4.22) по структуре аналогично закону Ома. Переписав его в виде

$$\eta = \frac{RTJ}{J_0 n F} = \theta_{\text{ох}} J,$$

где $\theta_{\text{ох}} = \frac{RT}{J_0 n F}$ – сопротивление химической реакции, убеждаемся,

что перенапряжение линейно зависит от силы тока. Изменением силы тока можно регулировать интенсивность реакций, иначе говоря, скорость преобразования электрической энергии в химическую.

Количество вещества, выделившегося за время τ , определяется первым законом Фарадея:

$$m_3 = \alpha I \tau, \quad (4.23)$$

где α – электрохимический эквивалент вещества, г/Кл;

I – сила тока системы.

Связь между силой тока и поляризацией (перенапряжением) для переменного тока определяется уравнением Крюгера:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{I_F RT}{n_1^2 F^2 c_0 \sqrt{\omega D}} \sin(\omega \tau - \pi/4), \quad (4.24)$$

где I_F – амплитуда тока, А;

n_1 – число электронов, отвечающее разряду одной частицы;

ω – круговая частота тока, с⁻¹;

D – коэффициент диффузии потенциалопределяющих (химически активных) ионов, см²/с.

Электрокинетические явления – движение под действием электрического поля твердых тел в жидкости (электрофорез) или жидкости относительно твердой фазы (электроосмос). На границе раздела твердой и жидкой фаз вследствие специфической адсорбции перераспределяются электрические заряды и образуется двойной электрический слой (рис. 4.1). Возникает «скачок» потенциала ψ . Если вдоль границы раздела фаз приложить напряжение от внешнего источника, создав некоторую разность потенциалов, то слои твердого тела и прилегающей к нему жидкости будут перемещаться в сторону противоположного (по сравнению со знаком заряда этого слоя) полюса источника.

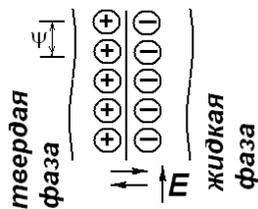


Рис. 4.1. Схема образования двойного электрического слоя

В результате внутреннего трения движение передается соседним слоям. Таким образом, при жестко закрепленном твердом теле начинается движение жидкости, называемое электроосмосом.

Линейная скорость электроосмоса в единичном капилляре, м/с,:

$$v = \frac{\varepsilon \psi E}{4\pi \mu_{\text{ж}}}, \quad (4.25)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;

ψ – электрокинетический потенциал, В;

E – напряженность электрического поля, В/м;

$\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость жидкости, Па · с; $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м})$.

Скорость электрофореза определяется формулой Смолуховского, м/с:

$$v = \frac{\varepsilon \zeta E}{4\pi \mu_{\text{ж}}}, \quad (4.26)$$

где ζ – дзета – потенциал (часть электрокинетического потенциала), В.

Электрокинетические явления используют в процессах обезвоживания влажных и насыщения влагой капиллярно-пористых сред.

4.4. МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И РЕАКЦИИ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Биологические объекты наделены внутренними жизненными функциями самоорганизации, обмена с окружающей средой, воспроизведения себе подобных и др. Эти функции сформировались

под действием внешних электрофизических факторов (радиация Солнца, атмосферное электричество, токи Земли, магнитное поле Земли и др.), и поэтому основаны на протекании в организмах биоэлектрических и биоэлектрохимических явлений. Внешние искусственные электрические воздействия оказывают на биологические объекты неизмеримо более глубокое и сложное влияние, чем на «неживые» тела, ибо затрагивают, в первую очередь, жизненные функции организма. Это имеет большое практическое значение для сельскохозяйственного производства, где основные предметы труда так или иначе связаны с биологическими объектами – высшими или низшими растениями и животными.

Взаимодействие внешнего электромагнитного поля с живыми объектами происходит на уровне клеточных мембран, которые являются первичными структурами ткани и наиболее чувствительными приемниками энергии поля. Каждая клетка представляет собой микроэлектрохимическую систему с мембранами – электродами и внутриклеточной жидкостью – электролитом. Протекание внешнего тока сопровождается электролизом. В системе происходит концентрационная поляризация свободных зарядов – накопление разноименных ионов на противоположных сторонах мембраны, ориентационная и активационная поляризация связанных зарядов вещества мембраны. До определенной плотности поляризующего тока (для растительных клеток порядка 10^{-2} – 10^{-3} А/м², создающего падение напряжения на мембране не более 0,1 В) происходит активация клеток и повышение их жизнедеятельности в результате интенсификации обменных и других процессов.

Биологическое действие электрического поля (тока) зависит от его параметров: напряженности E поля, амплитудного значения плотности тока J , частоты f , формы тока Φ , времени воздействия τ , так что эффект \mathcal{E} является сложной функцией перечисленных факторов:

$$\mathcal{E} = F(E, J, \omega, \Phi, \tau),$$

а также их парных и тройных сочетаний, причем для каждого объекта требуются свои параметры тока (поля) и режимы воздействия.

Изучение и исследование механизмов действий электромагнитных полей на растительные объекты представляет достаточно сложную задачу, поэтому многие исследователи ограничиваются интегральными показателями или моделями отклика функции на те или иные воздействия. Вместе с тем, существует некоторая класси-

фикация, позволяющая условно разделить воздействие электромагнитных полей по характеру изменений, вызываемых в растительном объекте [5, 43]. В первую очередь, это энергетическое воздействие, сопровождающееся ростом температуры и локального давления, а также появлением механических изменений в структуре ткани. Следующий уровень – функциональный, при котором энергия поля не приводит к заметному нагреву, но влияет на энзиматическую активность, конформационную структуру белков, вязкость липидов, возникновение в биологических структурах электрически или магнитоиндуцированных сил и вращающих моментов, инициирующих внутриклеточные процессы [37]. В частности, в работах [37, 38] отмечено возникновение в растительных объектах, подвергшихся воздействию неоднородных магнитных полей, внутриклеточных магнитофоретических смещений крахмалосодержащих структур, а также цитоплазматических ионных токов. Наконец, самый неопределенный уровень воздействия – информационный, когда внешний поток энергии электромагнитного поля не приводит к существенным изменениям в термодинамике биологических процессов, однако может вызвать изменение алгоритма процессов жизнедеятельности. В этом случае действие поля накладывается на эндогенные ритмы растительных объектов, что, в зависимости от условий и характера воздействия, может привести как к стимуляции их роста, так и к его угнетению [43]. В проведенных нами экспериментах заметный нагрев обрабатываемых семян отсутствовал. В связи с этим мы предполагаем, что наблюдаемые изменения агрономических качеств семян связаны с проявлением функционального уровня воздействия используемого в экспериментах высокочастотного электромагнитного поля.

Изучение реакции растений на действие различающихся по своей природе факторов позволяет вычлнить сходство и различие в изменении одноименных метаболических процессов под влиянием того или иного фактора, а также характер изменения показателей, связанных с урожайностью. Независимо от природы все факторы воздействуют на растительные организмы. Каждый из них обладает своей спецификой воздействия на биологический объект. Однако какова бы ни была природа взаимодействия, различные виды химических и физических факторов вызывают ответные реакции растительного организма, проявляющиеся в конечном итоге в изменении темпов ростовых процессов. Если проследить зависимость реакции растительного организма от дозы воздействия [49],

то на кривой «доза–эффект» можно выделить три участка: малые, средние и большие дозы (рис. 4.2). Абсолютная величина дозы для каждого фактора будет своя, однако при соответствующем подборе доз разных факторов можно получить сходные результаты. Малые дозы вызывают стимуляцию жизненных процессов, участки средних доз характеризуется подавлением процессов жизнедеятельности без летальных исходов, большие дозы могут приводить к денатурации белков, вызывать генетические изменения и летальность.

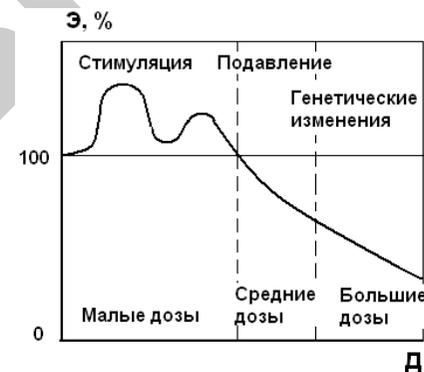


Рис. 4.2. Обобщенная кривая «доза–эффект» при действии физических факторов

Для сопоставления реакций растительных объектов на небольшие дозы физических и химических факторов выделяют наиболее типичные явления, происходящие при обработке семян: активизация ростовых процессов; изменение физико-химических свойств клеток и тканей; изменение интенсивности энергетических процессов; усиление фотосинтеза; активизация метаболизма.

Наиболее доступной для изучения является группа показателей активизации ростовых процессов, куда относятся темпы клеточного деления, накопление сухого вещества и т. д. Активизацию ростовых процессов под действием различных факторов наблюдали давно и на многих объектах. Это обстоятельство позволяет рассматривать активизацию как универсальную реакцию растительного организма.

Изменения физико-химических свойств клеток, тканей и, в первую очередь, состояние мембран рассматриваются в качестве причин всех последующих событий. К показателям, характеризующим физико-химические состояния клеток и тканей, относятся прони-

цаемость мембран, водоудерживающая способность протоплазмы, ее вязкость, рН, водный режим растений и т. д. Для большинства факторов наблюдались изменения этих показателей.

Об изменении интенсивности энергетических процессов можно судить по такому интегральному показателю, как дыхание. Отклонение в количестве выделенной углекислоты свидетельствует об изменении деятельности окислительно-восстановительных ферментов. Анализ экспериментальных данных показывает, что под действием многих факторов происходит активизация окислительно-восстановительных ферментов, а также ферментов, осуществляющих гидролиз запасенных веществ, увеличивается содержание моносахаров и аминокислот, интенсивность дыхания.

При обработке семян различными факторами многие исследователи отмечают активизацию фотосинтеза и накопления хлорофилла. Интенсификация накопления биомассы может косвенно свидетельствовать о повышении фотосинтетической активности.

На основании анализа реакции растительных объектов на воздействие различных факторов по ряду обобщенных биологических тестов делается вывод об ее универсальности. Наличие эффектов, подтверждающих это утверждение, позволяет дифференцированно подходить к решению разнообразных задач растениеводства. Такая важная задача, как улучшение посевных качеств семян может решаться при использовании всех анализируемых факторов. Естественно, что в основе единообразия этих хозяйственно-полезных результатов лежит универсальность биологической реакции.

Отличительной особенностью действия физических факторов на семенной и посадочный материал является универсальность ответной реакции, независимо от природы действующего фактора. Это обстоятельство открывает возможность выбора наиболее продуктивного, простого и надежного в эксплуатации электротехнического устройства для предпосевной обработки семян.

Использование для предпосевной обработки семян источников электрических и магнитных полей позволяет исключить из технологии возделывания сельскохозяйственных культур какие-либо дополнительные операции, требующие применения ручного труда, и обеспечивает сокращение материальных, химических и физических затрат.

Установлено, что в результате электротехнологической обработки в семенах происходит ряд процессов, приводящих к повышению проницаемости семенных оболочек, ускоряется поступление воды

и кислорода в семена. Кроме того, усиливается ферментативная активность, прежде всего гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов. Это обеспечивает более быстрое и полное поступление питательных веществ к зародышу, ускорение темпа клеточного деления и активизацию ростовых процессов в целом. У растений, выросших из обработанных семян, более интенсивно развивается корневая система и ускоряется переход к фотосинтезу, т. е. создается прочный фундамент для дальнейшего роста и развития растений.

При действии электрического поля постоянного тока семена поглощают воду больше и набухают, причем этот процесс протекает более интенсивно, чем у необработанных семян. Более интенсивное превращение запасенных питательных веществ сохраняется не только в начале прорастания, но и в последующие дни. В течение всего срока прорастания в обработанных семенах содержится больше моносахаров, чем в контрольных. Это способствует более интенсивному прохождению синтетических процессов, связанных с ростом клеток, синтезом белка, построением клеточных стенок.

Применение электрического поля высокого напряжения в значительной степени помогает защищать семена от болезнетворных микроорганизмов почти без ядохимикатов. Это значительно улучшает санитарные условия работы по защите семян от болезней, снижает концентрацию ядохимикатов в почве, что, в конечном счете, приводит к улучшению качества продукции растениеводства и улучшению экологии.

Таким образом, исследованиями многих авторов установлено, что под действием электромагнитного поля происходит мобилизация сил и высвобождение энергетических резервов растения, активизируются физиолого-биохимические процессы на ранних этапах прорастания семян, происходит повышение внутриобменных процессов и устойчивое увеличение энергии прорастания, всхожести, силы роста, весенне-летней выживаемости, которые благоприятно влияют на весь последующий период развития растений.

Следовательно, современному сельскохозяйственному производству фундаментальная наука предлагает большое количество альтернативных решений вопроса повышения урожайности растениеводческой продукции. Вполне очевидно, что при разработке технологии и технических средств для стимуляции жизнедеятельности растений необходимо остановить свой выбор на решении, которое экономически более эффективно, требует меньших мате-

риальных, финансовых и трудовых затрат. Отправной платформой для выбора того или иного способа обработки семян должны быть потребности в нем сложившейся системы семеноводства, возможность его включения в технологию поточной линии подготовки семян к посеву, надежность в эксплуатации и простота в изготовлении.

Авторами для исследований были выделены группы растений: бобовые – семена люпина и фасоли; зерновые – рожь, пшеница, ячмень; пряно-ароматические растения – семена базилика и шпината, салата листового; кабачковые – цукини; корнеплоды – свекла кормовая; лекарственные – эхинацея, календула, расторопша пятнистая; из декоративных коллекций – семена астры, тагетиса, луковичи тюльпанов, семена спиреи, будлеи, Курильского чая, сосны обыкновенной. Причем литературный обзор и анализ болезней этих представителей позволили наметить цели исследований: это разработка и исследование способов улучшения агрономических качеств и путей снижения инфекционных заболеваний сельскохозяйственных, пряно-ароматических, лекарственных и декоративных растений путем применения методов электросепарации, ультразвуковой, электромагнитной и плазменно-микроволновой обработок, повышающих энергетику семян и растений и обеспечивающих их подготовку к промышленному возделыванию и хранению.

5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СЕМЯН И РАСТЕНИЙ

5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ СМЕСЕЙ

Метод электросепарации, использующий принцип суперпозиции сил различной физической природы и, прежде всего, пондеромоторной силы, показал высокую эффективность при получении однородных фракций семян сельскохозяйственных культур, лекарственных, пряно-ароматических и красивоцветущих коллекционных растений. Наиболее эффективно использование диэлектрических сепараторов, обладающих научной и практической оригинальностью, реализующих конкурентоспособные технологии. Они разделяют сухие сыпучие смеси, в т. ч. семенной ворох, с учетом электрических свойств частиц на фракции гарантированного качества и нужных свойств.

Способ и устройство, реализующее различия электрических свойств частиц, можно использовать при очистке различных сыпучих смесей (не только семенного вороха) от разнородных примесей и включений и получения однородного и качественного материала, соответствующего международным стандартам. Известно, что продукты помола зерна широко используются в пищевой промышленности в виде широчайшего ассортимента круп, мучнистой основы, полуфабрикатов, готовых кондитерских изделий и их ингредиентов, экструдированных продуктов. Используются в основном продукты, полученные проходом (сходом) с сит рассевов на различных стадиях мукомольного производства: это устройства, реализующие принцип рассева с круговым или возвратно-поступательным движением рабочих сит. Так получают манную крупу, крупки, дунсты, крупчатку, муку широкого диапазона сортности и многие другие продукты. Однако они не способны отделить частицы одной круп-

ности, но различающиеся по биохимическому составу. Таковыми являются размолотые частицы зародыша, эндосперма и оболочки. Попытки их разделения на механических отсевах, даже в комбинации с пневмосепарированием, не дают положительных результатов. Разделение этих частиц помола зерна диктуется необходимостью получения чистых фракций зародыша зерна, т. к. наличие эндосперма влечет быстрое прогоркание муки, чем значительно снижает срок хранения. Более того, однородная фракция зародыша представляет собой наиболее ценную часть зерновки желтовато-воскового цвета, аккумулируя в себе огромное количество витаминов, питательных веществ, масла и других БАВ, ведь зародыш пшеничного зерна – это кладезь витаминов различных групп, которые обеспечивают жизненно важные функции человеческого организма, являясь сильнейшим биологическим стимулятором. Выделение зародыша в однородной фракции позволило бы получать широкий спектр новых диетических и специальных продуктов с колоссальным коммерческим эффектом. Одновременное получение эндосперма, без примеси зародыша, обеспечивает повышенную сортность и классность муки, лучшую ее усвояемость. Жизненно важно применение в меню пшеничных отрубей, богатых клетчаткой и витаминами, являющихся экологически чистым продуктом.

В очистке чая от пыли и различных механических включений выделяют три направления: отделение из чая пылевидной фракции (пыль и мелочь); отделение посторонних неметаллических примесей (бумага, опилки, остатки упаковки) и отделение стеблевой части от листовой. В настоящее время фракционирование чая происходит согласно ГОСТ 1936–85 на ситах, которые в процессе работы ломают продукт, увеличивая выход мелочи и пыли, а в сходовой фракции находились неразделенные стеблевая и наиболее ценная – листовая составляющие. В результате пробных сепараций удалось выделить до 90 % мелкой фракции из нескольких сортов чая; отделялась гранулированная часть; выделяется в отдельную фракцию до 70 % стеблевой и прочей грубой составляющей чайного сырья; можно получить фракции разной крупности, причем выделить до 80 % наиболее ценного скрученного сортового чайного листа (контрольная служба для отбора из общей марочной смеси чая составляющих ее компонентов и оценки массовой доли каждой).

Следует упомянуть об электросепарации травяной резки и муки на листовую и стеблевую фракции. В кормопроизводстве стеблевую

часть, богатую клетчаткой, можно скармливать жвачным животным, листья и муку, богатые протеином, эффективнее скармливать птице и пороссятам. В каждой фракции (травяная резка и мука), полученной электросепарацией злаковой травосмеси, определяли содержание важных питающих компонент (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Химический состав травяной муки из злаковой травосмеси

Показатели качества, %	Исходный образец	Фракции травяной муки, %		Концентрированные корма [50]	
		I	II	горох	овес
		удельный вес 41,4 %	удельный вес 19,5 %		
Питательность, к. е.	0,53	1,15	0,67	1,18	1,0
Сырой протеин	10,86	20,45	13,7	21,8	10,8
Сырая клетчатка	30,64	18,54	27,01	5,4	9,7
Сырой жир	3,0	5,8	3,7	1,9	4,0
Каротин, мг/кг	130,0	202,0	141,0	0,2	3,0

Сепарирование травяной резки позволяет выделить существенную долю корма (листовую часть), в которой содержание сырого протеина и каротина в 1,5–2 раза выше, чем в исходном материале, а концентрация клетчатки в 1,6 раза меньше. Анализ таблицы 5.1 показывает, что сепарация травяной резки и муки может быть эффективным приемом получения концентрированных кормов, которые по содержанию сырого протеина превосходят зерно злаковых культур. Это важно в ситуации обеспечения кормами крупного рогатого скота, когда возможен дефицит протеиновых культур в рационах. Во фракции, обогащенной протеином, в 1,5 раза меньше клетчатки, что позволяет использовать ее в рационах нежвачных животных и птицы.

Большой объем теоретических и экспериментальных исследований, проведенных авторами (полученные приоритетные свидетельства [51, 52]) и сотрудниками профессора В. И. Тарушкина, позволил определить широкие возможности и преимущества метода электросепарирования (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Преимущества электросепарации сыпучих продуктов по сравнению с вибросепарацией на горках и просеиванием на ситах

Улучшение качества основного продукта, увеличение его выхода	Возможность выделения примесей	Уменьшение потерь	Улучшение условий труда	Увеличение производительности технологического оборудования
				Улучшение биохимического состава, стандартности компонентов
Сохранение нативных свойств продуктов	Упрощение технологических линий	Повышение четкости и полноты разделения смесей	Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %	Выделение тонких фракций
				Принципиальное разделение смеси тонкодисперсных материалов
Сепарирование продуктов из неочищенного и нестандартного сырья	Повышение производительности линии.	Универсальность	Возможность автоматизации и дистанционного управления	Сепарирование продуктов из неочищенного и нестандартного сырья
				Упрощение технологических линий
Повышение четкости и полноты разделения смесей	Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %	Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума	Повышение четкости и полноты разделения смесей
				Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %
Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума	Повышение производительности линии.	Универсальность	Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность
				Упрощение управления. Снижение запыленности и шума
Повышение четкости и полноты разделения смесей	Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %	Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума	Повышение четкости и полноты разделения смесей
				Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %
Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %	Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума	Универсальность	Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %
				Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность
Упрощение технологических линий	Повышение четкости и полноты разделения смесей	Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %	Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение технологических линий
				Повышение четкости и полноты разделения смесей
Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %	Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума	Универсальность	Снижение потерь высококачественного сырья до 1–2 %
				Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность
Повышенная производственная готовность и низкая ремонтная потребность	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума	Повышение производительности линии.	Возможность автоматизации и дистанционного управления	Упрощение управления. Снижение запыленности и шума
				Повышение производительности линии.
Универсальность	Возможность автоматизации и дистанционного управления			Универсальность
				Возможность автоматизации и дистанционного управления

Сформулируем наиболее перспективные направления совершенствования метода:

1. Установленная взаимосвязь показателей биохимического состава частиц сепарируемой смеси и параметров электрического поля, создаваемого на рабочем органе, позволяет обосновать уровень оптимальной информации для автоматизации процесса. Возможность моделирования процесса, обработки информации, простота регулирования тока рабочего органа в зависимости от качества сепарируемых смесей создают перспективы оснащения электросепараторов микропроцессорной техникой. Это существенно облегчит управление ЭСУ и позволит решить важные технические и экономические

проблемы за счет расширения технических возможностей, эксплуатации машины в более экономичных режимах, повысит надежность, снизит энергопотребление.

2. Выявление оптимальной частоты подаваемого на электроды напряжения. ЭСУ, как все ДСУ, работает на переменном напряжении промышленной частоты. Если запитать его напряжением повышенной частоты, то появится новая функциональная возможность – подсушивание сепарируемой смеси.

3. Определение возможности использования электрического поля, создаваемого системой заряженных электродов в рабочих органах различных других технологических машин и приспособлениях пищевой промышленности, по которым перемещаются пищевые продукты и сыпучие смеси. Реализация таких рабочих органов позволит увеличить эффективность процесса разделения и повысить качество сыпучих смесей и продуктов с учетом их биохимического состава.

Алгоритм создания и внедрения электросепаратора различных сыпучих продуктов приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Алгоритм создания и внедрения электросепарирующего устройства для различных сыпучих материалов

Теоретические и экспериментальные исследования	Разработка и испытания ЭСУ	Применение ЭСУ в:
1	2	3
Исследование процессов разделения с использованием электрических полей от различных систем электродов	Разработка общих требований к конструкции сепаратора	крахмалопаточной промышленности
Разработка метода очистки с использованием электрических свойств частиц	Разработка конструкторской документации	пищевой (кондитерское производство)
Разработка аналитической модели разделения смеси на рабочем органе	Изготовление электросепаратора	кормопроизводстве

1	2	3
Выявление и оценка факторов, определяющих электросепарацию	Методика оценки эффективности электросепарации	мукомольной промышленности, деревообработке и т. п.
Анализ и реализация результатов	Лабораторные и производственные испытания ЭСУ	фармацевтической промышленности
ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ		

Для лабораторных исследований использовали диэлектрический сепаратор СДЛ-1 (рис. 5.1). Электросепаратор готовили к работе посредством внешнего осмотра, проверкой надежности всех подсоединений и прогреванием в течение 15 минут на среднем режиме 3,0 кВ.



Рис. 5.1. Диэлектрический сепаратор семян лабораторный СДЛ-1

Как правило, электросепарации подвергали подготовленный семенной ворох стандартной влажности 12–15 %, брали три навески по 100 г каждого образца, четвертая – контроль. Засыпались навески – 100 г (50 г для мелкосемянных овощных и пряно-ароматических культур) семенного вороха, включающие крупные выполненные и невыполненные, поврежденные семена и примеси (остатки семенного ложа или колоса, элементы упаковки, мусор, песок, земля и т. п.).

При сепарации семян салата семенной ворох через загрузочный бункер равномерно, посредством загрузочного распределительного валика, обеспечивающего принудительное ворошение, подается на рабочий орган – барабан с бифилярной обмоткой, выполненной проводом АПВ-2,5. Напряжение регулировали ступенчато, с шагом 0,2, начиная от 0,2 кВ до 0,8 кВ. Каждый раз получали три фракции семян, две из которых объединяли, т. к. они были схожими. Распределение по фракциям контролировали визуально и взвешиванием. Показателем удовлетворительной сепарации было взято процентное распределение семян во фракциях при существующем регламенте на семена – наличие не более 3–5 % примесей. После очередного рабочего цикла семена «успокоительно» отлеживались в течение 10 минут.

В результате сепарирования можно получать любое количество фракций, согласно приведенной на рисунке 5.2 схеме разделения, где происходит определение напряжения сепарации (режима сепарации). Она учитывает влияние остаточной поляризации на частицы. Количество исходной смеси, поступающей на рабочий орган в определенный промежуток времени, зависит от ширины открытия заслонки загрузочного бункера, частоты вращения рабочего органа и физического состояния смеси (влажность и размер). Производительность установки определяется по выражению:

$$Q = \frac{3600Gk}{tL}, \quad (5.1)$$

где Q – производительность установки на единицу длины рабочего органа, кг/ч;

G – масса муки, прошедшей через установку за время t , кг;
 k – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения удельной нагрузки по поверхности рабочего органа;
 L – длина рабочего органа, м.

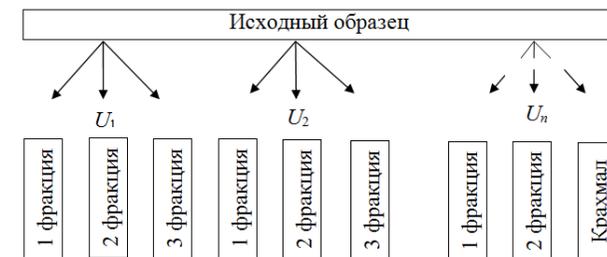


Рис. 5.2. Схема электросепарации сухих сыпучих смесей

При постоянной производительности, но различной частоте вращения рабочего органа на единице его поверхности будет находиться различное количество сепарируемой смеси. Это приводит к различному взаимодействию между электродами (обмоткой) и каждой частицей сепарируемой смеси.

Оптимальное значение удельной нагрузки, при которой сепарируемый материал будет покрывать эффективную рабочую поверхность сплошным потоком в один слой, определяется изменением частоты вращения рабочего органа при постоянной производительности. Под эффективной рабочей поверхностью сепарирующего устройства понимается межэлектродное пространство поверхности рабочего органа. Изменяя размер межэлектродного расстояния, мы оказываем влияние на эффективную рабочую поверхность, что корректирует результирующую электрическую силу и эффект сепарирования.

С целью осуществления оценки эффективности электросепарации, выявления ее возможностей, выбора наиболее оптимального рабочего режима при проведении обработок семян была разработана методика, сущность которой заключается в следующем: сыпучие материалы, в т. ч. и семенные ворохи, с помощью конкретного режима сепарирования разделяют на отдельные фракции, в которых определяются чистота продукта и его агрономические показатели. По полноте выделения чистых продуктов из смеси судят об эффективности способа сепарирования и режима, а также комплекса технологических факторов: диаметра электродов бифилярной обмотки, материала их покрытия, частоты вращения рабочего органа, зоны подачи материала и др.

При шаговом изменении напряжения на рабочем органе состав продуктов в приемниках разделения изменялся незначительно – в первую фракцию попадали крупные выполненные семена, во вторую таких попало немного, в третью – самые мелкие и примеси, сметаемые щеткой. В первой фракции, полученной при напряжении на бифилярной обмотке барабана 0,4 кВ, не было обнаружено никаких примесей, ее вес достигал 35–37 г (из 50 г исходной смеси), в то время как в третьей фракции (где были собраны примеси) семян не было. Здесь правомочен вывод, что соотношение «напряжение/вес семени» было оптимальным и указанное напряжение является лучшим для получения семян салата посевной кондиции для промышленного выращивания этой культуры.

Подобным образом были получены однородные партии семян зеленых культур: базилика, шпината, календулы (оптимальное напряжение на рабочем органе $U = 0,4...0,5$ кВ), эхинацеи (U на рабочем

органе 3,0...4,0 кВ), огурца, капусты ($U = 2,0$ кВ), ели обыкновенной ($U = 3,0$ кВ) без взаимного подсора фракций.

Электросепарации также были подвергнуты семенные ворохи спиреи, будлеи, Курильского чая из коллекции Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Весовое распределение материала по фракциям при различных напряжениях на рабочей обмотке, г

U , кВ	I фракция	II фракция	III фракция	Примечание
Спирея – исходная масса – 900 г				
0,8	860	15	20	Семенной ворох со- держал очень много пыли, измельченных цветолож и листьев, палочек стебля
1,0	850	20	25	
1,2	810	20	60	
1,4	700	70	115	
Будлея – исходная масса – 800 г				
0,8	750	25	20	Очень много пыли, из- мельченных цветолож и листьев, палочек стебля
1,0	750	15	30	
1,2	710	15	70	
1,4	600	70	125	
1,6	560	80	155	
Курильский чай – исходная масса – 500 г				
0,8	480	5	10	Очень много пыли, из- мельченных цветолож и листьев, палочек стебля
1,0	475	5	15	
1,2	470	15	10	
1,4	460	15	20	
1,6	420	40	40	
Айва японская – исходная масса – 300 г				
3,0	290	ок. 5	ок. 4	Плодовые чешуйки, слипшиеся семена, ку- сочки бумаги, пыль, мелкие недоразвитые семена
4,0	270	ок. 10	ок. 17	
5,0	260	25	10	
Сосна обыкновенная – исходная масса – 400 г				
1,0	370	15	12	Плодовые чешуйки- крылышки, пыль, му- сор, мелкие недоразви- тые семена
1,5	375	10	12	
2,0	380	10	8	
2,5	395	2	1	
3,0	395	2	1	

Как видно из таблицы 5.4, процесс разделения семенных ворохов зависит от питающего напряжения. Наиболее эффективными режимами являются: для спиреи, будлеи и Курильского чая – 0,8 кВ; для семян айвы японской – 3,0 кВ; для сосны обыкновенной – 2,0 кВ.

Результаты электросепарирования пшеницы Былина, ржи Пуховчанка и ячменя Дивосны приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Результаты электросепарирования семян зерновых

U, В	I фракция, г	II фракция, г	III фракция, г	Состав исходного образца
Пшеница Былина – масса исходного образца – 500 г				
1,5	440	8	1,3	Небольшое включение мелких, «пустых» семян, пыль, легкий мусор
2,0	440	8	1,4	
2,5	445	–	4,4	
3,0	445	–	4,4	
3,5	445	–	4,5	
Рожь Пуховчанка – масса исходного образца – 500 г				
1,5	440	7	2,5	Небольшое включение мелких, «пустых» семян, пыль, легкий мусор
2,0	440	7	2,5	
2,5	444	–	5,6	
3,0	445	–	3,8	
3,5	445	–	4,8	
Ячмень Дивосны – масса исходного образца – 500 г				
1,5	440	7	–	Небольшое включение мелких, «пустых» семян, пыль, легкий мусор
2,0	444	3	2,2	
2,5	440	–	8,1	
3,0	430	–	19,2	
3,5	420	–	27,4	

Как видно из таблицы, наилучшие фракции пшеницы и ржи получены при рабочих напряжениях СДЛ-1 в диапазоне 2,5–3,5 кВ, в то время как для ячменя оптимальным оказалось напряжение порядка 2,0 кВ.

На рисунках 5.3 и 5.4 представлены фотографии образцов электросепарирования семенных ворохов – ели обыкновенной и календулы. Семенной ворох ели содержит большое количество крупных и мелких засоряющих частиц, которые успешно выделяются

в классификационных отсеках электросепаратора. В ворохе календулы достаточно много цветочного мусора, остатков веток. Все отходы не годны для посадки, но увеличивают нагрузку на высевающие аппараты.



Рис. 5.3. Фотографии фракций, полученных в результате электросепарирования семенного вороха ели (нижняя слева – семена)



Рис. 5.4. Результаты электросепарации семян календулы: а – исходная семенная смесь; б – 1-я фракция (чистые семена) после электросепарации; в – 3-я фракция – «сход» с электросепаратора («цветочный мусор» – остатки семенного вороха)

В результате электросепарации в первом отсеке собираются качественные семена. Очевидно, что при использовании электросепарации можно в несколько раз уменьшить нагрузку на высевающие аппараты при интенсивном промышленном возделывании культур.

5.2. СТИМУЛИРОВАНИЕ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН ПРИ ЭЛЕКТРОСЕПАРАЦИИ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

Для стимулирования всхожести воздействию обычно подвергают неоднородные партии хранящихся семян, состоящие из сильных, слабых и мертвых. Поскольку увеличить всхожесть партии семян можно лишь за счет живых семян, не прорастающих при данных условиях, то для исследования механизма стимулирующего действия факторов необходимо иметь воздушно-сухие семена, однородные по качеству.

Было проведено также сравнительное исследование агрономических показателей некоторых отсепарированных семян (таблица 5.6).

Таблица 5.6

Эффективность стимуляции семян при электросепарации

Культура	Напряжение на рабочем органе, кВ	Показатели качества семян по фракциям, %			
		I		II	
		энергия прорастания	всхожесть	энергия прорастания	всхожесть
Расторопша пятнистая	контроль	16,0	20,0	12,0	3,0
	2,5	16,0	20,0	12,0	5,0
	3,0	60,0	40,0	12,0	3,0
	4,0	85,0	88,0	10,0	3,0
Салат	контроль	14,0	45,0	5,0	10,0
	0,4	14,0	44,0	6,0	10,0
	0,6	32,0	50,0	15,0	15,0
	0,8	90,0	80,0	30,0	55,0
Шпинат	контроль	10,0	20,0	0,2	10,0
	0,4	12,0	20,0	8,0	20,0
	0,6	25,0	40,0	10,0	25,0
	1,0	80,0	100,0	12,0	30,0

Анализ результатов исследования показывает, что все режимы электросепарирования обеспечивают повышение всхожести и энергии прорастания в сравнении с контролем. Достаточно хорошо прослеживается зависимость улучшения агрономических качеств семян

от роста напряжения на обмотке. Задача определения оптимального напряжения при электросепарации и одновременном стимулировании для семян каждой культуры должна решаться комплексно, потому что максимумы эффектов могут не совпадать.

С учетом качественных показателей разделения на фракции семенного вороха и степени стимулирующего воздействия электрического поля можно рекомендовать следующие режимы питающего напряжения: для расторопши пятнистой – 4,0 кВ, для салата – 0,8 кВ с покрытием рабочего органа полиэтиленовой пленкой, для шпината – 1,0 кВ также с покрытием рабочей обмотки полиэтиленовой пленкой толщиной 0,03–0,06 мм. Как правило, покрытие тонкой пленкой обмотки необходимо применять для мелких семян, которые могут застревать и задерживаться в пазах между проводами.

На рисунке 5.5 приведены фотографии 3-дневных проростков рапса после диэлектрической сепарации при разных напряжениях (1 и 2,5 кВ) в сравнении с контролем.

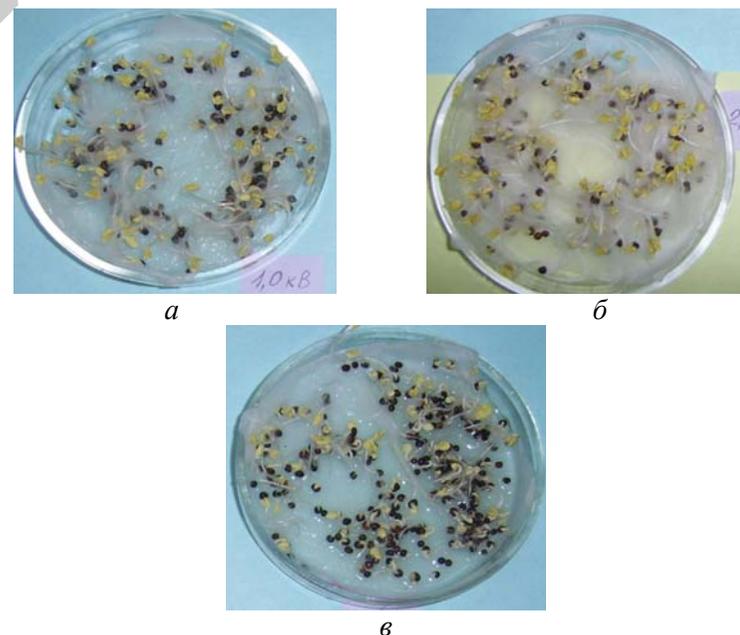


Рис. 5.5. Фотографии 3-дневных проростков рапса после диэлектрической сепарации: а – при напряжении 1 кВ; б – при напряжении 2,5 кВ; в – контроль

На фотографиях (рис. 5.5) отчетливо видно, что сепарированные семена прорастают быстрее и дружнее, чем контрольные, в одинаковых условиях. Также заметно влияние величины напряжения при обработке, повышается всхожесть, увеличиваются размеры проростков.

Следует привести результаты фенологических наблюдений, выполненных в процессе выращивания растений, так как важно оценить дальнейшее их развитие, возможные негативные реакции растений на проведенные электрофизические воздействия. При посеве в почву контрольными считались растения, выросшие из семян, полученных обычным сбором и хранением в стандартных условиях. Опытные растения были получены из семян, подверженных электросепарации или другому виду обработки.

Зеленные культуры имеют относительно короткий период вегетации, и их урожай, в основном, определяется наземной частью: массой стеблей, листьев, соцветий. На рисунке 5.6 приведены фотографии 14-дневных растений салата сорта «Иодистый», а на рисунке 5.7 – базилика сорта «Генова».



Рис. 5.6. 14-дневные растения салата сорта «Иодистый»: К – растение из необработанных семян (контроль); I – растение из фракции, полученной при сепарировании (при $U = 0,8$ кВ); 2 – растение из семян, попавших во второй приемник продуктов разделения ($U = 0,4$ кВ)



Рис. 5.7. Растения базилика сорта «Генова»: два высоких – после электросепарирования; низкое – контроль

Растения салата опытных партий (рис. 5.6) имеют более развитую корневую систему, большее количество листьев и их размер в сравнении с контролем.

Как оказалось, семена базилика очень чувствительны к стимулирующему воздействию: за один и тот же период из контрольного семени выросло растение (рис. 5.7) высотой всего немногим более 3 см, а после электросепарации – намного больше (16 и 22 см).

Аналогичные результаты получены и при выращивании салата листового (рис. 5.8). Опытные растения заметно отличались в лучшую сторону по своему развитию, размеру и цвету листьев, их товарному виду.

Дальнейшие наблюдения за процессом выращивания салата велись до наступления фазы выброса цветоносов. Растения из обработанных на электросепараторе семян были выше (110 см и более) и сильнее, чем из партии контрольных семян (менее 60 см) (рис. 5.9). Опытные растения имели меньший вегетационный период, более раннее появление цветоносов (на 4–6 суток). Повышение урожайности культур в тепличном овощеводстве при уменьшении вегетационного периода позволит значительно уменьшить энергетические и другие затраты и повысить экономическую эффективность.

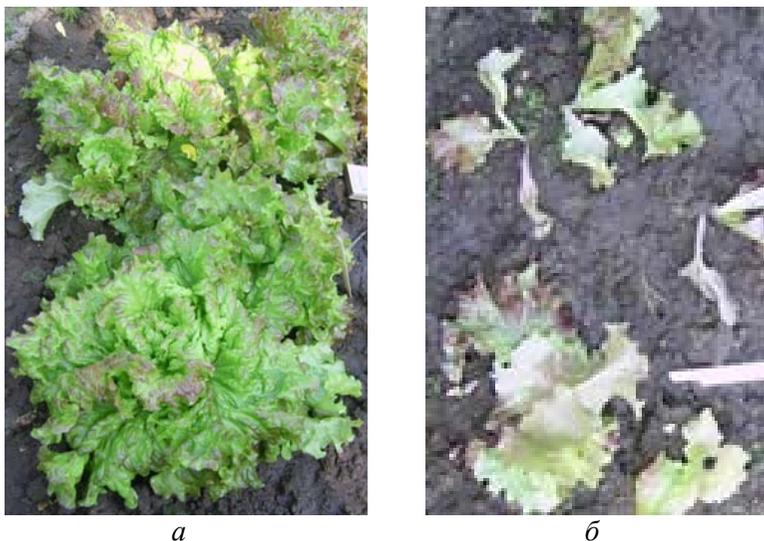


Рис. 5.8. Салат сорта «Листовой»:
a – из семян первой фракции, полученных электросепарированием при напряжении 0,8 кВ; *б* – растения контрольные

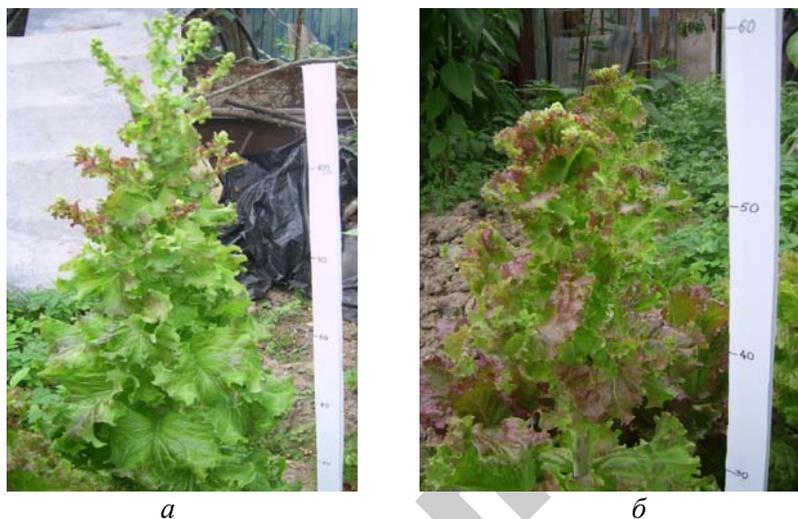


Рис. 5.9. Взрослое растение салата в фазе выброса цветоносов:
a – после электросепарации; *б* – контроль

Таким образом, экспериментами подтверждено, что электросепарация наряду с более качественным разделением семенного вороха на фракции и выделением более качественных семян по физическим признакам обеспечивает стимулирующее воздействие на семена. Электрическое поле, создаваемое бифилярной обмоткой, активирует биологические процессы, в результате которых семена имеют значительно более высокую всхожесть и энергию прорастания в сравнении с необработанными.

Опытные растения, особенно зеленных культур, показали лучшую приживаемость и устойчивость. В результате выращивания в грунте получены здоровые и крепкие растения, имеющие значительно большую облиственность без уходящих в отход первых нижних листьев, обеспечивающие снижение длительности вегетационного периода, более раннее появление цветоносов. Растения были гораздо более развиты, без вредителей и насекомых (это также объясняется тем, что выбранные культуры относятся к классу пряно-ароматических растений).

Научный интерес представляют комбинированные методы обработки, например, разделение семенного вороха на электросепараторе и дополнительно аналогичная обработка на магнитном сепараторе (рис. 5.10).



Рис. 5.10. Электромагнитный сепаратор

Для исследований были взяты стандартные семена рапса после электросепарации и пропущены через электромагнитный сепаратор при силе тока, равной 0,45, 0,6 и 0,7 А. Затем семена были размещены на увлажненную фильтровальную бумагу и проращивались в чашках Петри в стандартных условиях.

Результаты исследований комбинированного воздействия на сухие семена рапса электрического и магнитного полей представлены на рисунке 5.11.

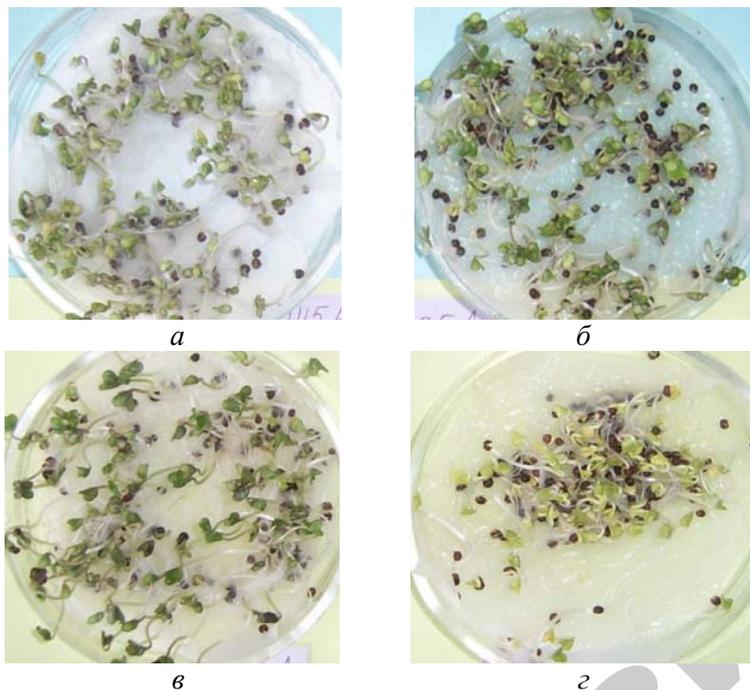


Рис. 5.11. Трехдневные проростки семян рапса после электросепарации и обработки магнитным полем:
а – при рабочем токе 0,45 А; б – при 0,6 А; в – при 0,7 А; г – контроль

Практически все режимы дополнительной обработки семян магнитным полем показали высокую эффективность. Говоря о мелко-семянных культурах, к которым относится рапс, можно утверждать, что обработка его семян в магнитном поле при 0,6–0,7 А существенно ускоряет прорастание семян.

На рисунке 5.12 представлены фотографии растений шпината, выращенных из семян после электросепарации с последующей обработкой на магнитном сепараторе. Дополнительная обработка магнитным полем позволила еще в большей степени активировать биологические процессы и повысить всхожесть и энергию прорастания семян, а затем и общую урожайность культуры.



Рис. 5.12. Растения шпината, выращенные из семян после комбинированной обработки:
а – в фазе вегетации (слева – контроль; справа – опытное); б – в фазе цветения

Комбинация стимулирующих обработок семян показала хорошую результативность. Выращенные опытные растения (рис. 5.12а) имеют значительно лучшие агрономические показатели: большую высоту, количество и размер стеблей и листьев по сравнению с контролем. Кроме всего, у взрослых растений в конце вегетационного процесса раньше и более дружно наступило цветение (рис. 5.12б) и в последующем образование семян.

Фенологические наблюдения показали бесспорное преимущество опытных растений и необходимость применения предпосевной и предпосадочной подготовки семян методом электрофизических воздействий.

Так как семена лекарственных и пряно-ароматических растений выращиваются специальными хозяйствами и представляют собой очень дорогой материал, их возделывание целесообразно переводить на промышленные технологии. Реализация поставленной цели – получение семян высокой однородности и классности –

может быть достигнута путем внедрения конкурентоспособных машин и технологий с использованием высокоэффективных электрических и магнитных сепараторов. Получаемые второстепенные (побочные) продукты при электро- или магнитной сепарации могут быть использованы в пищевой и фармацевтической промышленности при производстве лекарственных сиропов, фиточаев, высокоценных композиций и биологически активных веществ, что обеспечит безотходность и большую экономическую эффективность семеноводства как отрасли.

5.3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВОЙ И ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ СЕМЯН

Для исследования плазменно-радиоволнового воздействия на семена растений был использован модернизированный экспериментальный стенд Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, созданный на основе промышленного генератора высокочастотного тока ВЧИ-62-5-ИГ-101 с рабочей частотой $f = 5,28$ МГц. Работы проводились в тесном сотрудничестве с ведущими научными сотрудниками Института – кандидатами физико-математических наук В. В. Ажаронком, И. И. Филатовой и другими [44, 53]. Общий вид экспериментального стенда представлен на рисунке 5.13.

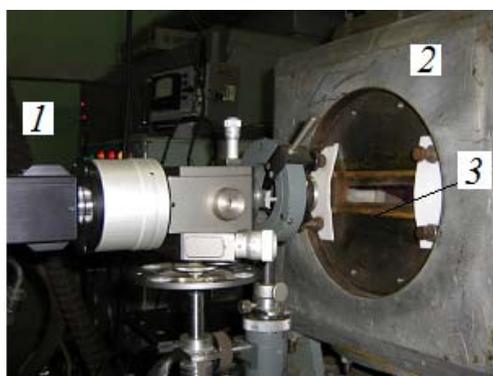


Рис. 5.13. Общий вид экспериментальной плазменно-радиоволновой установки:
1 – ВЧ генератор; 2 – вакуумная камера; 3 – окна разрядной камеры

Основные работы с экспериментальной установкой были связаны с настройкой генератора высокочастотного тока с целью реализации требуемых режимов его работы, а также с разработкой и созданием системы электродов разрядной камеры, позволяющей варьировать межэлектродное расстояние, необходимое для оптимизации плазменной обработки семенного и посадочного материала различной геометрии и объема. Принципиальная схема модернизированной ВЧИ установки представлена на рисунке 5.14.

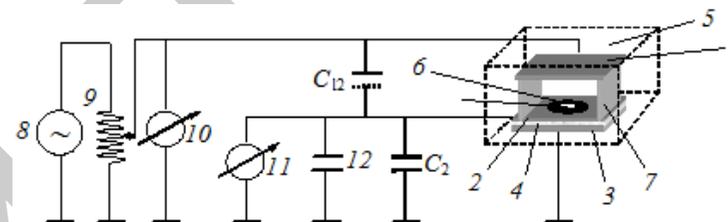


Рис. 5.14. Принципиальная схема модернизированной ВЧИ установки:
1 – верхний электрод; 2 – нижний электрод; 3 – заземленная металлическая подставка; 4 – диэлектрическая прокладка; 5 – вакуумная камера; 6 – контейнер для мелких семян; 7 – фиксирующие кварцевые пластины; 8 – высокочастотный генератор ВЧИ-62-5-ИГ-101; 9 – индуктор; 10 – вольтметр типа В7-26;
11 – вольтметр типа С509; 12 – проходной конденсатор;
 C_{12} – электрическая емкость между верхним и нижним электродами;
 C_2 – электрическая емкость между нижним электродом и землей

Разрядная камера установки образована двумя водоохлаждаемыми плоскими электродами из меди, имеющими форму дисков (диаметр $D = 120$ мм, толщина 15 мм). Нижний электрод установлен на подложке из стекла или фторопласта, закрепленной на заземленной металлической подставке. Верхний электрод установлен на фиксирующих кварцевых пластинах, изменение высоты которых позволяет варьировать расстояние между электродами в пределах $L = 6 \dots 40$ мм. Все элементы разрядной камеры размещены в вакуумной камере, заполненной рабочим газом. Давление плазмообразующего газа контролировали с помощью вакуумметра ВДГ-1.

Поддерживающее разряд высокочастотное напряжение U_1 снимали с части витков индуктора 9 генератора ВЧИ-62-5-ИГ-101 и подавали на верхний электрод 1. Значение U_1 варьировали путем изменения анодного напряжения лампового триода генератора и коэффициента автотрансформаторной связи индуктора с разряд-

ной камерой. Величину напряжения U_1 контролировали с помощью статического вольтметра С509.

Удельную электрическую мощность разряда оценивали с использованием соотношения

$$W = \frac{I_p (U_1 - U_2)}{V}, \quad (5.2)$$

где I_p – полный ток разряда;

U_1 – напряжение между электродом 1 и землей;

U_2 – напряжение между электродом 2 и землей;

V – объем, занимаемый плазмой.

Значение напряжения U_2 измерялось с помощью вольтметра В7-26.

Величину тока I_p рассчитывали по формуле

$$I_p = 2\pi f(C + C_2)U_2, \quad (5.3)$$

где $C + C_2$ – суммарная емкость электрической цепи на участке между нижним электродом 2 и землей.

Емкость конденсатора C подбиралась таким образом, чтобы выполнялось условие $C + C_2 \gg C_{12}$, при котором величина реактивного сопротивления этого участка цепи намного меньше реактивного сопротивления разрядной камеры. Осуществлено электрическое согласование выхода генератора ВЧИ-62-5-ИГ-101 с внешней индукционной и емкостной нагрузкой.

Кроме того, в результате работы с установкой разработаны и изготовлены диамагнитная матрица для размещения образцов в фиксированных пространственных зонах индуктора в предпробойном режиме работы стенда, характеризующихся различной величиной напряженности магнитной и электрической составляющих высокочастотного поля, а также контейнер для внесения в электроразрядную камеру мелких семян.

С целью защиты исследователей и обслуживающего персонала от высокочастотного излучения генератора была создана экранирующая камера для гашения паразитного излучения из зоны индуктора.

Были также проведены исследования по обработке семян высокочастотным электромагнитным полем. Схема рабочей камеры на базе индуктора экспериментальной установки, позволяющей возбуждать электромагнитное поле на промышленной частоте $f = 5,28$ МГц, приведена на рисунке 5.15а. Поле локализовалось в водоохлаждаемом

спиралеобразном трехвитковом индукторе с внутренним диаметром $D = 80$ мм и длиной $L = 90$ мм, подключенном в качестве индуктивной нагрузки к выходу генератора ВЧИ-62-5-ИГ-101.

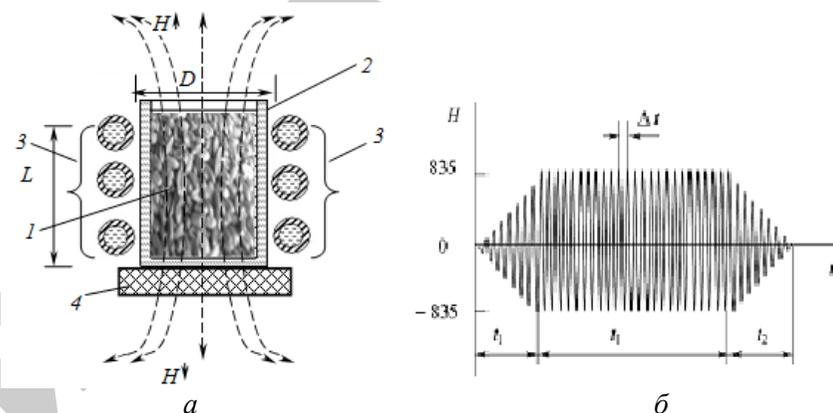


Рис. 5.15. Схема рабочей камеры на базе индуктора (а) и циклограмма (б) обработки семян в высокочастотном магнитном поле:

1 – семена; 2 – стеклянная емкость; 3 – охлаждаемый индуктор; 4 – диэлектрическая подставка

Исследуемые образцы семян помещались в осевую зону. Воздействие проводилось в воздухе при атмосферном давлении в предпробойном режиме (без возбуждения плазмы). Среднеквадратичные величины напряженности магнитной H и электрической E составляющих электромагнитного поля, возбуждаемые на оси индуктора, были определены измерителем напряженности высокочастотного поля ПЗ-15 с индикатором Я6П-110 и составляли 590 А/м ($B \approx 1$ мТл, с погрешностью $\sim 6\%$) и 12 700 В/м (с погрешностью $\sim 4\%$) соответственно. Амплитудные значения $H^* = \sqrt{2} \cdot \bar{H}$ и $E^* = \sqrt{2} \cdot \bar{E}$ достигали 835 А/м ($B \approx 1,5$ мТл) и 17 960 В/м, т. е. величина H^* лишь в 30 раз превышала фоновую индукцию магнитного поля Земли $B_3 \approx 0,05$ мТл.

Перед включением установки стеклянная емкость 2, заполненная семенами, устанавливалась в осевую зону индуктора 3 на диэлектрическую подставку 4. Воздействие проводилось в воздухе при атмосферном давлении по циклограмме, представленной на

рисунке 5.15б. Длительность t_1 вывода генератора на стационарный режим генерации поля и возврата t_2 в исходное нерабочее состояние в сумме не превышали 3 с. Продолжительность t_0 стационарной стадии воздействия синусоидального (с периодом $\Delta t \approx 0,2$ мкс) магнитного поля с амплитудой 835 А/м составляла 5, 10, 15 и 20 мин.

Погрешность воспроизведения режима работы генератора не превышала 0,5 %. С учетом этого суммарная погрешность определения величины электромагнитного поля, действующего на образец, составляла не более 10 %. Значения H в краевой зоне, на расстоянии $\sim D/2$ от оси индуктора, были оценены расчетным путем и отличались от осевых значений не более чем на 15 %. Контроль нагрева семян в результате воздействия электромагнитного поля проводился с использованием хромель-алюмелевой термопары, измерение величины электродвижущей силы которой осуществлялось с помощью милливольтметра М2018, начиная с момента выключения электромагнитного поля. Было установлено, что при использованных нами режимах воздействия электромагнитного излучения нагрев семян отсутствует.

Фрагмент схемы экспериментальной установки для обработки образцов плазмой приведен на рисунке 5.16.

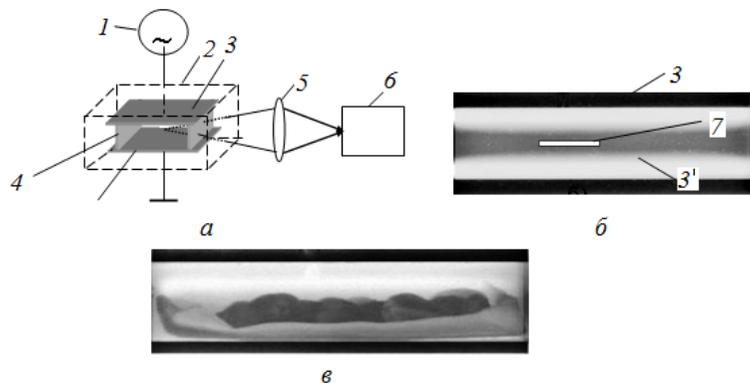


Рис. 5.16. Фрагмент схемы экспериментальной установки для обработки семян плазмой (а) и видеоизображения разряда при внесении в разрядную камеру мелких (б) и крупных (в) семян:

1 – высокочастотный генератор; 2 – вакуумная камера; 3 и 3' – ВЧ и заземленные электроды соответственно; 4 – диэлектрические пластины для фиксации верхнего электрода; 5 – объектив, 6 – цифровая видеокамера; 7 – контейнер для мелких семян

В качестве плазмообразующего газа использовался воздух при давлении $P = 0,7$ Торр. Рабочие режимы установки (давление, ток разряда i , напряжение на электродах разрядной камеры U) выбирались такими, чтобы нагрев обрабатываемых образцов отсутствовал. Было установлено, что приемлемая вкладываемая в разряд удельная электрическая мощность составляла $W \sim 0,3$ Вт/см³. Крупные семена помещали непосредственно на нижний заземленный электрод, а для мелких семян использовали контейнер 7, который также помещали на заземленный электрод 3' (рис. 5.16б, в). Длительность обработки составляла 5, 10 и 15 мин.

Исследования спектроэнергетических характеристик и определение термодинамических параметров возбуждаемой плазмы были выполнены методами эмиссионной спектроскопии с использованием спектрографа S100 с фотоэлектрическим способом регистрации на базе CCD-линейки Toshiba TCD1304AP. Принципиальная схема измерительного блока экспериментальной установки высокочастотного емкостного разряда приведена на рисунке 5.17.

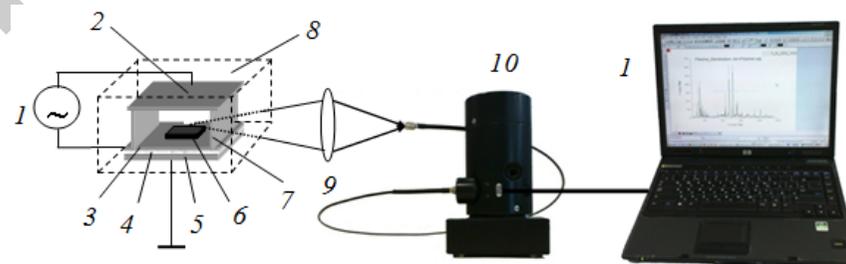


Рис. 5.17. Принципиальная схема измерительного блока установки:

1 – высокочастотный генератор ВЧИ-62-5-ИГ-101; 2 – верхний электрод; 3 – нижний электрод; 4 – диэлектрическая прокладка; 5 – заземленная металлическая подставка; 6 – контейнер для мелких семян; 7 – фиксирующие кварцевые пластины; 8 – вакуумная камера; 9 – фотообъектив; 10 – широкодиапазонный спектрограф S100; 11 – персональный компьютер

Анализируемое излучение плазмы из межэлектродного промежутка разрядной камеры 8 фотографическим объективом 9 собиралось на входном окне оптического волокна и с его помощью доставлялось на входную щель спектрографа 10.

Управление работой спектрографа S100 и процессом регистрации экспериментальных данных осуществлялось компьютер-

ной программой CCDTOOL. Программа CCDTOOL позволяет проводить калибровку измерительного тракта спектрографа, регистрацию и кадровое отображение спектров излучения плазмы, масштабирование и выбор области просмотра спектра, вычитание темнового (фонового) сигнала из регистрируемого спектра, измерение длины волны и интенсивности излучения в том или ином участке спектра, удаление кадров, дисковые операции с кадрами.

Авторами совместно с сотрудниками Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси [44] была изучена ответная агрономическая реакция семян зерновых культур, культивируемых в Беларуси (ржи Пуховчанка, пшеницы Былина, ячменя Дивосны, гороха Агат, фасоли Нежная и люпина узколистного), на воздействие высокочастотного электромагнитного поля (ВЧЭМП) и плазмы высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) с газовой температурой около 300 К. Исследования воздействия на семена высокочастотного магнитного поля и возбуждаемой в нем плазмы проводились на описанной экспериментальной установке ВЧЕР при экспозициях 3, 5, 7, 10 и 20 минут.

Результаты исследования влияния различных режимов обработки ВЧЭМП на всхожесть и энергию прорастания ржи Пуховчанка показали, что лучший результат получен при экспозиции 15 мин (рис. 5.18), что позволяет рекомендовать данный режим для интенсификации ростовых процессов ржи.



Рис. 5.18. Пятидневные проростки семян ржи Пуховчанка: а – контроль; б – после обработки ВЧЭМП в течение 15 мин

Для оценки стимулирующего воздействия плазмы и высокочастотного электромагнитного поля выбраны по одному типичному представителю злаковых – пшеница и бобовых – фасоль. В экспериментах использовали сухие немые семена из расчета 4 повторностей по 100 семян. Выполнены два опыта (табл. 5.7): обработка плазмой в течение 7 и 3 минут в воздухе под давлением $P = 0,15...0,36$ Торр и обработка электромагнитным полем в течение 10 и 20 минут. Одновременно оценивали степень влияния температуры при проращивании в стандартных условиях – чашки Петри находились в термостате при +19 и +22 °С.

Таблица 5.7

Динамика всхожести зерна пшеницы и фасоли в стандартных условиях при различных режимах обработки плазмой и электромагнитным полем

День	Контроль (+21 °С)	Плазма				ЭМП			
		+19 °С		+22 °С		+19 °С		+22 °С	
		3 мин	7 мин	3 мин	7 мин	10 мин	20 мин	10 мин	20 мин
Пшеница									
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	3	0	3	7	15	8	17
7	3	10	25	10	25	25	45	27	55
10	15	15	70	17	73	35	90	50	93
Фасоль									
3	2	4	2	8	4	2	5	4	8
5	42	50	30	60	40	30	75	45	80
7	45	50	45	60	40	80	95	80	97

Анализ результатов исследования (табл. 5.7) показывает, что семена пшеницы после обработки начали прорастать раньше и дружнее, причем эффективность воздействия возрастает с увеличением времени обработки и при большей температуре. Если в контрольной партии семена начали прорастать только на 7-й день и на 10-й день было 15 проросших семян, то в опытных проростки появились на 2–3 суток раньше и количество проросших семян было в 4–6 раз больше.

Семена представителя бобовых – фасоли – в опытах (табл. 5.7) показали несколько отличную от семян пшеницы тенденцию при обработке плазмой: с увеличением длительности обработки эффективность существенно снижалась, а в результате воздействия электромагнитным полем – повышалась, но в меньшей степени, чем семена пшеницы. Повышение температуры проращивания во всех случаях сказывалось благотворно.

Таким образом, можно рекомендовать следующие режимы обработки: семян пшеницы плазмой в течение 7 мин, электромагнитным полем – 20 мин; семян фасоли плазмой в течение 3 мин, ЭМП – 20 мин (рис. 5.19).



Рис. 5.19. 4-х дневные проростки фасоли:
а – контроль; б – после обработки ЭМП в течение 10 мин;
в – после обработки ЭМП в течение 20 мин

Следует отметить, что в контрольном образце и в чашках с пшеницей, обработанной плазмой в течение 3 минут, в конце срока проращивания наблюдали наличие плесени *Penicillium spp.* В других образцах плесень не обнаружена.

При всех энергетических воздействиях на растительные объекты необходимо определять требуемую дозу воздействия, которая определяется произведением мощности на длительность обработки. Если мощность неизменна, то доза воздействия определяется его длительностью. В таблицах 5.8 и 5.9 представлены результаты исследования влияния продолжительности обработки семян электромагнитным полем на накопление биомассы и длины проростков.

Таблица 5.8

Влияние продолжительности обработки семян электромагнитным полем на накопление биомассы 7-дневными проростками зерновых

Культура	Масса проростка							
	Контроль		7 мин		15 мин		30 мин	
	г	%	г	%	г	%	г	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Рожь Пуховчанка	2,75	100	2,97	108	2,95	107,3	2,45	89,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ячмень Дивосны	2,78	100	2,72	97,8	2,45	88,1	2,5	89,9
Пшеница Былина	2,6	100	2,65	101,9	2,8	107,7	3,1	119,2

Таблица 5.9

Зависимость длины проростков D от продолжительности τ обработки электромагнитным полем зерновых культур и гороха

Культура	Контроль	$\tau = 7$ мин		$\tau = 15$ мин		$\tau = 30$ мин	
	D^* , см	D , см	D/D^* , %	D , см	D/D^* , %	D , см	D/D^* , %
Рожь Пуховчанка	13,8	14,8	107,3	10,3	74,6	11,9	86,2
Ячмень Дивосны	10,1	10,4	102,9	11,5	113,8	10,8	106,9
Пшеница Былина	11,7	11,4	97,4	11,3	96,6	14,11	120,5
Горох Агат	6,9	10,2	147,8	9,3	134,8	8,9	128,9

Наибольший эффект в ростовых процессах злаковых (накопление биомассы и длина проростков) наблюдается при длительности обработки семян: у ржи – 7 мин; у пшеницы – 30 мин. Ячмень показал значительный прирост длины проростков при обработке семян в течение 15 мин, но накопление биомассы было меньшим, чем в контроле. Для гороха лучшим оказался режим обработки семян в течение 7 мин, причем эффект увеличения длины проростков достигает 47,8 %.

Анализ приведенных экспериментальных данных показывает, что высокочастотное поле оказывает определенное биологическое воздействие на семена злаковых и бобовых культур. При этом в зависимости от режимов обработки имеет место в различной степени стимулирующий или угнетающий эффект, что требует учета этих особенностей.

Совместно с сотрудниками кафедры сельского хозяйства БГПУ им. М. Танка (М. Комарова, доцент Ж. Э. Мазец) был изучен характер стрессовой реакции растений люпина (*Lupinus Angustifolius* сорта «Першацвет» НПЦ НАН Беларуси по земледелию) под влиянием плазменной и электромагнитной обработки. Исследования прово-

дились не только на стандартных семенах люпина, но и на семенах, которые были подвержены ускоренному старению (УС – выдержка семян в течение 4 дней при температуре +40 °С и влажности воздуха 75 %). Для определения характера реакции обработанных растений были проведены биохимические исследования, где в качестве маркера стресса использовали фермент пероксидазу.

Пероксидазы широко распространены в животных и растительных клетках (могут находиться как в связанном с клеточной стенкой состоянии, так и в цитоплазме); они участвуют в фотосинтезе, энергетическом обмене, в трансформации пероксидов и веществ, чужеродных организму. Активность пероксидазы и изоферментный состав значительно изменяются при стрессовых состояниях, ранении, вирусном или микробном инфицировании организма. Данные по пероксидазной активности учитывают при селекции растений (чем выше эта активность, тем устойчивее к инфекции растения).

Под воздействием различных факторов на растения в их клетках формируется уникальный стрессовый набор изоферментов пероксидаз. В устойчивых растительных организмах данные изоформы образуют оптимальное для нормального функционирования соотношение белков с требуемыми свойствами. У растений, неустойчивых к стрессовым воздействиям, генетического потенциала организма не хватает для того, чтобы сформировать оптимальный изоферментный комплекс, и в критических ситуациях это может привести к летальному исходу. Разумеется, в сложных саморегулирующихся системах, каковыми являются растения, в которых имеется огромное количество биополимеров, надмолекулярных структур и образований, выживаемость организма ни в коей мере не определяется одними пероксидазами, однако последние могут нести достаточную информацию о физиологическом состоянии растений и служить критерием устойчивости к стрессовым факторам.

В самом начале ответной реакции растения очень быстро реагируют на любой стресс, активируются основные пероксидазы как первый шаг ответа, а изменения, связанные с метаболизмом ауксина и этилена, индуцируют усиление синтеза кислых пероксидаз как второй, и более поздний, шаг ответа или защиты. Предполагаемая последовательность реакций, составленная по имеющимся данным, показывает, что только два гормона тесно связаны посредством пероксидазы с процессами ответа на различные нарушения – ауксин и этилен, регулирующие метаболизм растения в целом. Ауксин, пероксидаза и этилен взаимосвязаны при лигнификации тканей

и проявляют свое действие в местах образования локальных повреждений. Сигналом, транспортируемым на расстояние, может быть 1-аминоциклопропан-1-карбоновая кислота (АЦК), присутствие которой в различных частях растения является лимитирующим и определяющим фактором. АЦК-зависимый синтез этилена выражается как градиент реакций по всему растению. Такой тип сигнальной реакции обуславливает повышение уровня пероксидазы.

В связи со всем выше сказанным пероксидаза и была взята в качестве маркера стресса, т. е. диагностического показателя устойчивости растений к различного рода воздействиям.

Экспериментально установлено, что слабоинтенсивное высокочастотное электромагнитное поле, а также плазма могут быть использованы в качестве медиатора рецепторов клеток семян бобовых культур, которые запускают внутриклеточные механизмы, приводящие к улучшению их свойств, в частности к повышению скорости и энергии прорастания, стимуляции роста побегов. Выяснение природы этих механизмов требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

На рисунке 5.20 приведены результаты исследования посевных качеств семян люпина после обработки плазмой ВЧЕР.

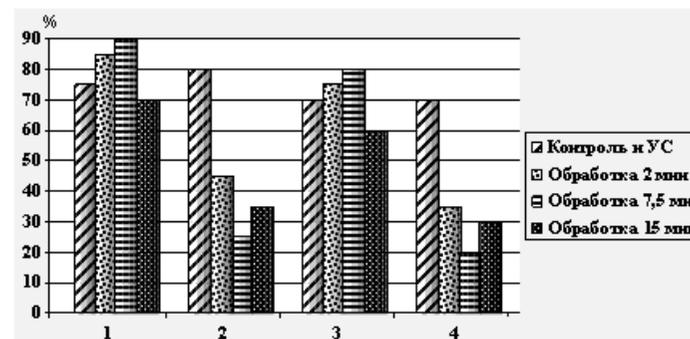


Рис. 5.20. Всхожесть и энергия прорастания семян люпина в результате ускоренного старения семян (УС) и предпосевной обработки семян плазмой на 10-е сутки онтогенеза:

1 – всхожесть; 2 – всхожесть семян, подвергшихся УС; 3 – энергия прорастания; 4 – энергия прорастания семян, подвергшихся УС

В результате обработок семян люпина наблюдали повышение всхожести и энергии прорастания на 15 % в сравнении с контролем.

Выявлено, что лучший эффект показала обработка семян люпина плазмой в течение 7,5 мин, о чем свидетельствуют достаточно высокие показатели длины и массы корней проростков (рис. 5.21) по отношению к контрольным образцам.

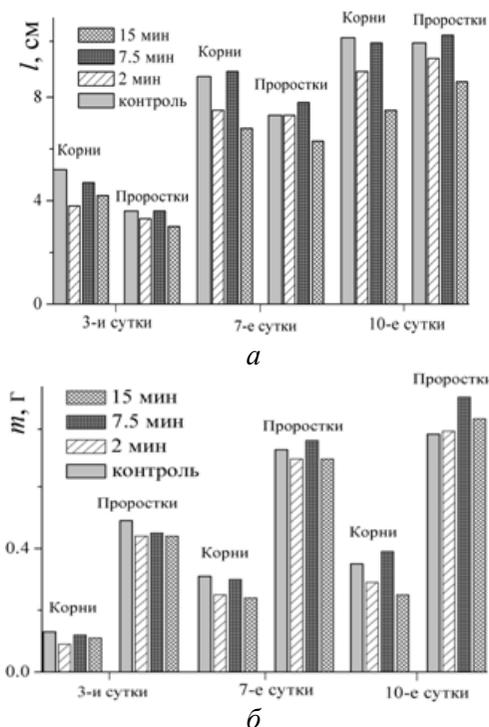


Рис. 5.21. Изменения морфометрических показателей: длины (а) и массы (б) корней и проростков люпина узколистного для контрольных семян и обработанных плазмой ВЧЕР в зависимости от длительности воздействия

Обнаружено, что обработка семян плазмой не столько оказывает положительное влияние на длину корней и проростков, сколько стимулирует их мощность, силу и разветвленность, что, по-видимому, способствует значительному увеличению в процессе онтогенеза энергии прорастания обработанных семян по сравнению с контрольными. Показано также, что положительное действие плазменной обработки проявляется с запаздыванием – на 7-е сутки онтогенеза.

Для биохимических исследований обработанные семена люпина проращивали в рулонах в лабораторных условиях в течение 4 суток при температуре 18 °С: по 20 семян в трех повторностях для каждой экспозиции и контроля (рис. 5.22).



Рис. 5.22. Проращивание семян люпина в рулонах

Для дальнейших исследований были получены студе-экстракты из 8 образцов проростков четырехдневных растений люпина. В экстрактах определены пероксидазная активность (Е/мл) и содержание общего белка (мг/мл), а также рассчитана удельная активность пероксидазы (Е/мг белка) (табл. 5.10). В ходе работы установлено, что исследуемые образцы сильно различаются по уровню пероксидазной активности (табл. 5.10, рис. 5.23). Так нами выявлено снижение пероксидазной активности в четырехдневных проростках люпина узколистного при воздействии ЭМП экспозиции 2,0 мин; плазмой (0,5 мин); у растений, выращенных из семян, подвергшихся УС; а также обработками ЭМП (2,0 мин).

Таблица 5.10

Влияние различных физических воздействий на общую и удельную активность пероксидазы в четырехдневных проростках люпина узколистного

№ п/п	Вариант опыта	Активность пероксидазы, Е/мл	Концентрация белка, мг/мл	Удельная активность пероксидазы, Е/мг белка
1	2	3	4	5
1	Контроль	592,904	0,68147	870,037
2	ЭМП 2,0 мин	430,12	0,51249	839,275

Окончание табл. 5.10

1	2	3	4	5
3	ЭМП 5,0 мин	498,216	0,48571	1025,748
4	Плазма 0,5 мин	481,68	0,38155	1262,43
5	УС	537,128	0,57889	927,858
6	ЭМП УС 2,0 мин	477,384	0,54160	881,433
7	ЭМП УС 5,0 мин	944,04	0,44951	2100,154

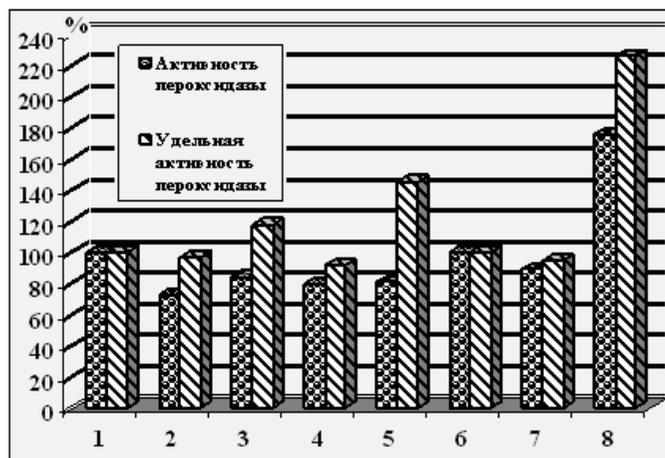


Рис. 5.23. Влияние различных физических воздействий на общую и удельную активность пероксидазы в четырехдневных проростках люпина узколистного: 1 – контроль; 2 – ЭМП 2,0 мин; 3 – ЭМП 5,0 мин; 4 – плазма 0,5 мин; 6 – УС; 7 – ЭМП УС 2,0 мин; 8 – ЭМП УС 5,0 мин

Кроме того, интересно отметить, что в результате всех обработок снижалась концентрация белка в каждом образце по сравнению с контролем. Вероятно, обработки на какой-то момент тормозили биосинтез отдельных белков, особенно в случае с плазмой и ЭМП + УС (5 мин) (табл. 5.10), а возможно, в этот момент происходили перестройки изоферментного спектра пероксидаз, которые и определяют оптимальное для нормального функционирования соотношение белков с требуемыми адаптогенными свойствами.

При сопоставлении данных по активности и удельной активности пероксидазы с показателями ростовых процессов (табл. 5.10

и 5.11) обнаружили увеличение массы проростков, тогда как длина проростков достоверно не изменялась. Это, возможно, связано с процессами активной дифференцировки клеток, сопровождающимися их оводнением.

Таблица 5.11

Средние значения морфометрических показателей люпина узколистного на 4-е сутки онтогенеза после плазменной и электромагнитной обработки

№ п/п	Вариант опыта, время обработки семян	Длина, см		Масса, г	
		корней	проростков	корней	проростков
1	Контроль	4,7±1,8	3,5±1,1	0,12±0,05	0,48±0,15
2	ЭМП 2,0 мин	3,8±1,9	3,5±1,4	0,13±0,06	0,48±0,15
3	ЭМП 5,0 мин	4,5±1,7	3,1±0,9	0,11±0,05	0,42±0,15
4	Плазма 0,5 мин	4,6±1,8	3,2±1,1	0,12±0,05	0,45±0,14
5	УС	3,4±1,9	2,5±0,8	0,10±0,05	0,42±0,12
6	ЭМП УС 2,0 мин	5,5±1,1	3,9±0,8	0,15±0,02	0,51±0,09
7	ЭМП УС 5,0 мин	3,8±1,7	3,4±1,4	0,15±0,04	0,42±0,14

В ходе исследований было выявлено, что все используемые обработки в большей или меньшей степени стимулируют всхожесть и энергию прорастания семян люпина по сравнению с контролем. Вероятно, это связано с воздействием изучаемых обработок на активность гиббереллинов, которые играют важную роль в регуляции работы ферментов (возможно, и пероксидаз) на начальных этапах прорастания семян, оказывая влияние на энергию их прорастания.

Кроме семян злаковых и бобовых культур объектами исследований выбраны также семена некоторых цветочных, лекарственных и пряно-ароматических культур.

Были обработаны электромагнитным полем (табл. 5.12) и плазмой (табл. 5.13) семена астры однолетней (*Callistephus Chinensis*), затем пророщены на рассаду и высажены в грунт. Замеры были выполнены куратором коллекции однолетних культур ЦБС НАН Беларуси научным сотрудником И. А. Коревко. В результате фенологических наблюдений установлено, что растения обладали всеми зелеными живыми листьями (в отличие от контрольных растений, где первые нижние листья, пораженные фомозом, засыхали и подлежали удалению).

Таблица 5.12

Процентное соотношение всхожести/выживаемости семян астры в зависимости от времени обработки электромагнитным полем

Сорт	Контроль	М-1 (7 мин)	М-2 (15 мин)	М-3 (30 мин)
«Карловы» красный	24,2/64,7	55,5/88,0	36,2/82,7	50,0/83,3
«Ирида»	37,1/65,3	45,7/84,3	62,8/72,7	40,0/91,6

Таблица 5.13

Процентное соотношение всхожести/выживаемости семян астры в зависимости от времени обработки плазмой

Сорт	Контроль	П-1 (2 мин)	П-2 (7,5 мин)	П-3 (15 мин)
«Карловы» красный	24,2/64,7	50,0/40,0	43,3/69,0	34,2/70,8
«Ирида»	37,1/65,3	41,4/79,3	54,5/58,3	41,3/66,6

Анализ данных таблиц 5.12 и 5.13 позволяет определить наиболее эффективные режимы обработки семян астры: электромагнитным полем – 7 мин; плазмой – 7,5 мин.

Обработке в высокочастотном электромагнитном поле были также подвергнуты навески стандартных повторностей семян душицы (видообразцы), часть луковиц тюльпанов (сорта «Ментон», «Первый бал», «Вопузза»). Последующая их выгонка позволила исследовать наличие на их поверхности серой (*Botrytis tulipae* (Lib.) Lind.) и склероциальной (*Sclerotinia bulborum* (Wakh.) Rehm) гнилей. Был выявлен режим максимального влияния обработки с целью улучшения фитосанитарного состояния луковиц и молодых побегов – экспозиция 15–20 минут. Обработка ВЧЭМП не ликвидировала проявление заболеваний, но значительно – на 20–25 % – снизила их проявление у луковиц разного разбора. Заболеваемость семян душицы мучнистой росой (*Erysiphe labiatum* f. *Origanum*) и фузариозом (*Fusarium solani* App.) после 7–12 минутной обработки в электромагнитном поле снизилась на 23–26 %.

Аналогичные результаты наблюдались и при проращивании семян сосны обыкновенной – обработанные электромагнитным полем семена на 5-е сутки были свободны от наличия бактериальной инфекции (рис. 5.24).

В Беларуси тагетис (*Tagetes*) из семейства астровых – одна из самых востребованных декоративных культур, применяемая от га-

зонов до букетов. В медицине применяется как противомикробное средство.



а

б

Рис. 5.24. Фотографии семян сосны после 5-дневного проращивания: а – контроль; б – обработанные ВЧЭМП

Обработанные электромагнитным полем с экспозицией 7 мин семена тагетиса дали дружные выравненные всходы, зацвели на 7 дней ранее стандартного срока в условиях стандартной агротехники (рис. 5.25). При этом отмечены одновременность выхода в фазу цветения, развитость вегетативных частей (достаточная высота, высокая облиственность, большие соцветия).



а

б

Рис. 5.25. Иллюстрация дружности всходов и цветения (а) и развитости вегетативных частей тагетиса (б) после обработки семян электромагнитным полем

В декоративном цветоводстве существуют проблемы ограниченных севооборотов, твердокаменности семян, их низкой всхожести. В коллекции Центрального ботанического сада НАН Беларуси есть культуры «сложной агротехники», которые требуют вспомогательных операций для преодоления процессов всхожести. Это твердокаменные семена галеги восточной, воробейника, мелкие семена валерианы (рис. 5.26).



Рис. 5.26. Растение и плоды воробейника лекарственного (а), цветущие растения Галеги восточной (б) и валерианы (в)

Галега восточная (*Galega orientalis* Lam.) сорт «Нестерка» (селекции БГСХА) – это высокоурожайная кормовая бобовая культура многолетнего использования, источник получения дешевых питательных высокобелковых кормов с ранней весны до поздней осени для всех видов сельскохозяйственных животных и птицы. Является перспективной кормовой культурой, которая при возделывании на минеральных и на торфяно-болотных почвах обеспечивает стабильно высокий урожай семян и зеленой массы без пересева в течение продолжительного времени (до 10 и более лет).

Ценность галеги как кормовой культуры заключается в наличии в ней перевариваемого протеина, незаменимых аминокислот, таких как лизин, метионин, аргенин, чистидин, в сбалансированности минерального состава. Использование галеги восточной сорта «Нестерка» в кормопроизводстве обеспечит снижение себестоимости и повышение рентабельности продукции

животноводства до 60 %. Активное продвижение культуры на поля сдерживается недостаточной изученностью приемов предпосевной обработки семян, имеющих твердую оболочку, препятствующую дружной всхожести семян (всхожесть семян составляет около 12 %) [54]. Твердокаменность семян галеги достигает 36 %. Основная предпосевная обработка семян заключается в механическом (скарификация) или химическом воздействии (обработка концентрированной кислотой H_2SO_4), но при этом гибнет порядка 20 % зародышей.

Воробейник лекарственный (*Lithospermum officinalis* L.) – многолетнее травянистое растение, у которого в уникальных лечебных целях используется полностью все растение. Плоды – белые блестящие, гладкие и твердые, яйцевидные орешки, величиной около 3 мм (рис. 5.26).

Плоды воробейника появляются в июле-августе, но собирают их в августе ради того жирного масла, которое в них содержится. Орешки твердые, как камень, отсюда латинское название этого растения, происходящее от греческих слов *lithon* – «каменный» и *spermatum* – «семя», народное название – каменное семя [55]. Твердокаменность семян достигает 40 %. Внесен в список редких растений некоторых областей России, в Красные книги Ленинградской и Тверской областей, Красную книгу природы Санкт-Петербурга.

Валериана лекарственная относится к группе мелкосемянных культур. Техника сбора семян хорошо разработана, проблема заключается в неравномерности их созревания. К уборке приступают при созревании не менее 35 % семян. Цветоносы скашивают, перевозят на площадки и подсушивают на различного типа сушилках при температуре 35–40 °С, после этого обмолачивают на молотилке или зерновом комбайне.

Результаты исследования различных режимов обработки вышеуказанных семян приведены в таблицах 5.14–5.16.

Таблица 5.14

Влияние различных режимов микроволновой обработки на всхожесть и энергию прорастания семян галеги восточной (9 день)

Показатели	Экспозиция			
	Контроль	7 мин	15 мин	30 мин
Энергия прорастания, %	6	7	34	40
Всхожесть, %	6	12	25	67

Таблица 5.15

Влияние различных режимов микроволновой обработки на всхожесть и энергию прорастания семян воробейника (7 день)

Показатели	Экспозиция			
	Контроль	7 мин	15 мин	30 мин
Энергия прорастания, %	1	5	15	47
Всхожесть, %	1	8	25	58

Таблица 5.16

Влияние различных режимов микроволновой обработки на всхожесть и энергию прорастания семян валерианы (5 день)

Показатели	Экспозиция			
	Контроль	7 мин	15 мин	30 мин
Энергия прорастания, %	4	6	62	30
Всхожесть, %	4	15	58	24

Анализ данных, приведенных в таблицах 5.14–5.16, показывает очень высокую эффективность электрофизических методов стимуляции всхожести и энергии прорастания особенно твердокаменных семян. Так, в результате микроволновой обработки при экспозиции 30 мин всхожесть семян галеги восточной увеличилась в 11 раз, а воробейника – в 58 раз. Для семян валерианы более эффективна обработка при экспозиции 15 мин (всхожесть и энергия прорастания увеличились в 15 раз). При проращивании обработанных семян образовывались нормально развитые проростки, которые имели хорошо развитую корневую систему и гипокотиль без повреждения проводящих тканей и эпикотиль с нормальной верхушечной почкой.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют об актуальности проблемы и перспективности использования методов электросепарирования и плазменно-радиоволнового воздействия на семенной и посадочный материал с целью его предпосевной обработки, повышающих всхожесть и продуктивность семян в полевых условиях.

В результате исследований рекомендованы оптимальные режимы физического воздействия на семена разных культур как способа их предпосевной обработки для возделывания и перед закладкой на хранение.

Разработанная методика заключается в предварительном выделении партий выполненных, кондиционных семян методом

электросепарирования, которые в дальнейшем для повышения их всхожести и энергии прорастания следует подвергать воздействию высокочастотного электромагнитного поля: злаковые и бобовые культуры (пшеницу, рожь, ячмень, горох) – с экспозицией 7 и 15 минут; мелкосемянные культуры (пряно-ароматические и лекарственные травы) – с экспозицией 7, максимум 15 минут. Наиболее эффективный режим плазменно-радиоволновой обработки, улучшающей фитосанитарное состояние луковиц тюльпанов и молодых побегов, соответствует экспозициям 7 и 15 минут.

Перспективность данных работ обусловлена возможностью экономии финансовых средств за счет снижения объемов закупки элитных семян, большей эффективностью их использования, а также отсутствием необходимости применения традиционных химических и биологических методов их предпосевной подготовки, приводящих к ухудшению экологии.

5.4. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР

Для реализации метода электрофизической обработки семян использовали экспериментальную установку для создания неоднородного электрического поля с помощью диэлектрической плоскости с бифилярной обмоткой, подключенной к источнику высокого напряжения частотой 50 Гц [56].

Наиболее типичными представителями зеленных культур, урожайность которых определяется всей вегетативной частью растения (кроме корешков), является салат листовой, укроп, петрушка и др. Для определения эффективности обработки неоднородным электрическим полем использовали семена укропа. На рабочую поверхность диэлектрической плоскости с бифилярной обмоткой равномерным слоем укладывали семенной материал, подавали требуемое напряжение и выдерживали экспозицию. Контрольную партию (35 шт.) оставляли без обработки, а три экспериментальные обрабатывали в электрическом поле, изменяя напряжение на обмотке и время воздействия. Режимы обработки и результаты исследований приведены в таблице 5.17.

Таблица 5.17

Количество проросших семян в зависимости от напряжения и времени обработки

Время проращивания, сутки	Контроль	Время обработки в электрическом поле при напряжении, В								
		2 с			4 с			6 с		
	Без обработки	1500	3500	5000	1500	3500	5000	1500	3500	5000
1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	4	0	1	0	0
3	0	4	6	0	5	10	0	6	4	0
4	2	8	16	2	12	16	1	16	8	1
5	10	14	21	8	16	32	4	21	14	4
6	20	21	27	16	26	32	16	25	19	15
7	22	22	28	20	26	33	19	26	20	17
8	22	22	28	20	26	33	19	26	20	17

Анализ результатов исследования показывает, что в контрольной партии семян первые ростки начали появляться на 4–5-е сутки, более дружно – на 5–6-е сутки. В опытных партиях наблюдается определенная зависимость скорости прорастания и количества проросших семян от режимов обработки: напряжения и экспозиции. Положительный эффект воздействия на всхожесть семян наблюдается до определенной дозы, определенной значением как напряжения, так и времени воздействия.

При высоких напряжениях (5000 В) даже при кратковременном воздействии наблюдается угнетающее действие поля, которое усиливается с ростом экспозиции. В лучшем из рассмотренных образцов при напряжении 3500 В и времени обработки 4 с ростки начали появляться уже на 1–2-е сутки и практически все семена проросли к исходу 5–6-х суток.

Таким образом, доза воздействия электрического поля на семена является одним из основных действующих факторов, стимулирующих пуск в рост и начальные зародышевые стадии развития растений. При возбуждении семян усиливается деление клеток, повышается влагонасыщение, компенсируются недостаточные воздействия природных электрофизических факторов. В оптимальных условиях за счет стимулирующего действия факторов электрического поля

можно в 1,5–2 раза ускорить начало прорастания семян и обеспечить более дружные всходы.

Приготовление электрохимически активированной воды осуществляли с помощью экспериментальной установки (рис. 5.27), которая состоит из источника постоянного тока 3, электрохимического реактора 2, емкости для исходного раствора хлоридов 8, емкостей для хранения приготовленных растворов – анолита и католита, соединительной и регулирующей арматуры.

Конструктивно электрохимический реактор представляет собой электролитическую камеру с разделительной диафрагмой, подключенную к источнику постоянного напряжения. В рабочих электродных камерах получают анолит и католит.

Принцип работы установки заключается в следующем. Вода из водопроводной сети через фильтр-грязевик и вентиль, который позволяет регулировать поток воды, поступает по шлангу подачи воды 20 в насос эжекторный 4. Из емкости 8 с солевым раствором по шлангу забора солевого раствора 25 при открытом зажиме регулятора 7 в эжекторный насос поступает исходный раствор соли. Выйдя из эжекторного насоса, потоки воды и солевого раствора смешиваются и через тройник 8 поступают в камеры реактора электрохимического 2. По шлангам 21 и 22 анолит и католит поступают в накопительные емкости.

Требуемую силу тока устанавливают регулятором 10 при включении источника питания в сеть. Содержание в анолите свободного активного хлора и общей щелочности католита изменяется регулятором подачи солевого раствора 7 и регулятором силы тока 10. В качестве объекта активирования использовали раствор поваренной соли NaCl концентрацией 10 г/л в водопроводной воде, имеющей исходные параметры pH = 7,3...7,5 и ОВП = +250...309 мВ. Электроактивированные растворы, параметры которых представлены в таблице 5.18, приготовлены в экспериментальном электрохимическом реакторе при напряжении питания 12 В и рабочем токе 4 А.

Таблица 5.18

Показатели электроактивированных растворов

Католит		Анолит		Смесь католита и анолита 1:1	
pH	ОВП, мВ	pH	ОВП, мВ	pH	ОВП, мВ
7,8–8,2	от –350 до –530	5,1–6,0	от +600 до +807	3,1–4,1	от +390 до +600

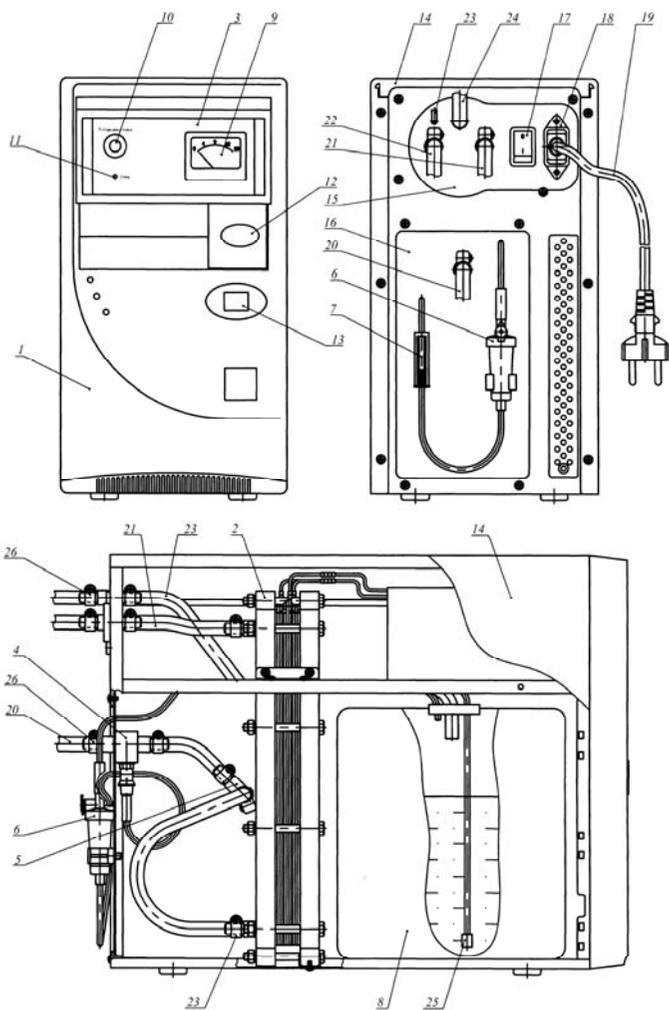


Рис. 5.27. Экспериментальная установка электроактивации воды:

- 1 – корпус; 2 – реактор электрохимический; 3 – источник тока;
 4 – насос эжекторный; 5 – тройник; 6 – фильтр; 7 – регулятор раствора;
 8 – емкость солевого раствора; 9 – амперметр; 10 – ручка регулировки тока;
 11 – лампа сигнальная; 12 – выключатель подсветки; 13 – окно; 14 – кожух;
 15 – крышка верхняя; 16 – крышка нижняя; 17 – выключатель питания установки;
 18 – разъем; 19 – кабель питания; 20 – шланг подачи воды; 21 – шланг анолита;
 22 – шланг католита; 23 – шланг атмосферный; 24 – шланг заливки раствора;
 25 – шланг забора раствора; 26 – хомут

В соответствии с поставленной целью и методикой опыта перед проращиванием проводили следующую обработку партий семян салата листового (по 100 шт. в каждой): 1 (контроль) – замачивание в обычной воде без обработки; 2 – обработка неоднородным электрическим полем при напряжении 3500 В и замачивание в водопроводной воде; 3 – замачивание в электрохимически активированной воде (католите); 4 – комбинированная обработка неоднородным электрическим полем при напряжении 3500 В и замачивание в католите. Проращивание семян осуществляли в чашках Петри на субстрате из минеральной ваты при одинаковых тепличных условиях в осенний период. Результаты опытов приведены в таблице 5.19.

Таблица 5.19

Количество проросших семян салата листового в зависимости от способов обработки и времени проращивания

Время проращивания, сутки	Партии образцов			
	1 (контроль)	2	3	4
4	0	0	0	2
5	0	4	2	4
6	4	16	10	14
7	14	27	14	32
8	34	38	38	41
9	40	55	48	59
10	55	68	68	71
11	71	72	71	79
12	71	79	79	86
13	71	86	87	94

Анализ результатов исследования (таблица 5.19) показывает, что в контрольной партии семян первые ростки начали появляться на 6-е сутки, более дружно – на 7–8-е сутки. Во всех опытных партиях наблюдается положительный эффект воздействия на интенсивность проращивания семян. Первые ростки в 4-й партии появились уже на 4-е сутки, во 2-й и 3-й партиях – на 5-е сутки.

Кроме ускорения сроков прорастания имеет место увеличение количества проросших семян в каждом из замеров. Общая всхожесть семян контрольной партии составила всего 71 %, что, в общем, соответствует показателю их кондиции. В опытных партиях общая всхожесть в конце срока эксперимента заметно выше, значит, электрофизические и электрохимические факторы и в отдель-

ности, и, в большей степени, в сочетании повышают кондиционность семян. Семена, которые находились в глубоком покое и не проросли в обычных условиях, в результате стимуляции пусть и с некоторой задержкой, но дали всходы.

Вегетативный период салата листового составляет в среднем 30–35 суток, и урожайность его определяется выходом зеленой массы листьев. Для сравнительной оценки интенсивности роста корешков, проростков и листьев в начальный период после проращивания произвели фотографирование образцов (рис. 5.28). По своему биологическому развитию проросшие семена в каждой партии имеют определенные различия по длине корешков, проростков и по фазе развития листьев, причем в пользу стимулирующих видов обработки. Во всех опытных партиях происходит более интенсивный рост корешков и биологической массы листьев. Очевидно, что под действием электрофизических и электрохимических факторов в семенах происходит ряд процессов, приводящих к более быстрому и полному поступлению питательных веществ к зародышу, ускорению темпа клеточного деления и активизации ростовых процессов в целом.

Результаты эксперимента показали, что применение комбинированной обработки (сочетание обработки неоднородным электрическим полем с последующим замачиванием для проращивания в электрохимически активированной воде) обеспечивает наибольшую эффективность по основным показателям стимулирующего воздействия на семена.

Таким образом, улучшение посевных качеств семенного материала под действием электротехнологических факторов выражается в более быстром и полном выходе семян из состояния покоя (на 1–2-е сутки), возрастании лабораторной всхожести (на 15–22 %), увеличении энергии прорастания, размеров корешков и проростков. В результате следует ожидать уменьшения естественного разнообразия по фазам развития растений, выросших из обработанных семян, и обеспечения более дружного созревания.

5.5. ОБРАБОТКА СЕМЯН УЛЬТРАЗВУКОМ

Ультразвуковой технологический аппарат, как правило, представляет собой совокупность следующих блоков и элементов (рис. 5.29): собственно технологического аппарата (рабочей

камеры 1 с обрабатываемым материалом 2); ультразвуковой колебательной системы 3, состоящей из преобразователя электрических колебаний 4, волноводной системы 5, концентрирующей УЗ колебания, и рабочего инструмента 6 для ввода УЗ колебаний в обрабатываемые среды; электрического генератора 7; систем контроля и автоматизации 8.

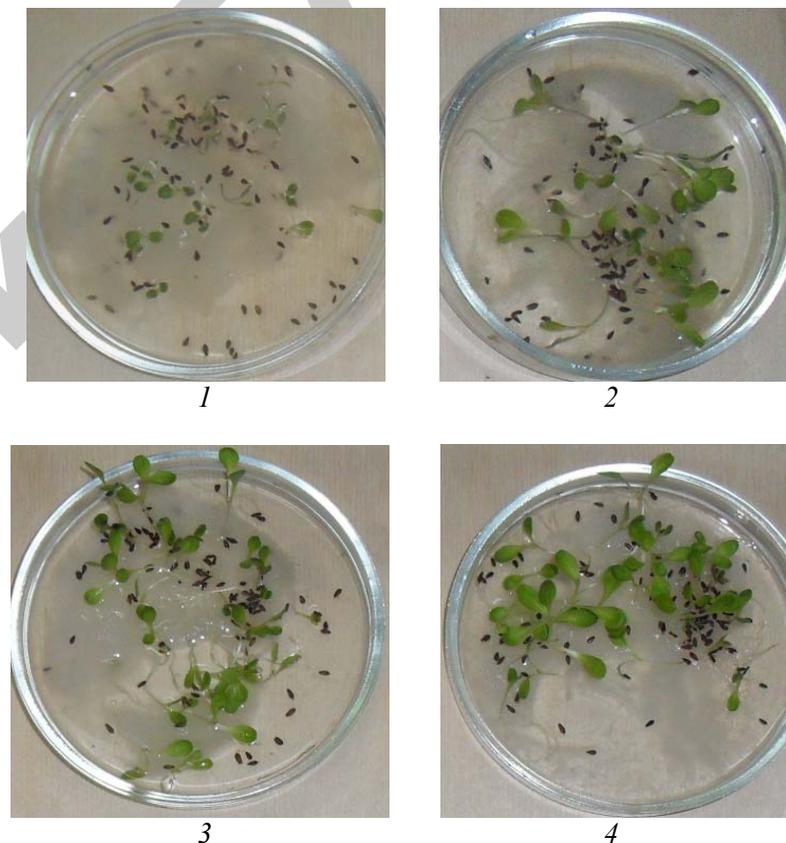


Рис. 5.28. Фотографии образцов на 8-е сутки проращивания салата листового: 1 – контроль; 2 – обработка неоднородным электрическим полем; 3 – замачивание в электрохимически активированной воде; 4 – комбинированная обработка

В ультразвуковых аппаратах технологического назначения необходимо согласование требований к объему рабочей камеры

с объемом обрабатываемого вещества. Обусловлено это тем, что при создании аппарата следует, прежде всего, задаться необходимой интенсивностью УЗ колебаний в различных участках объема обрабатываемого вещества, ограниченного жесткими стенками.

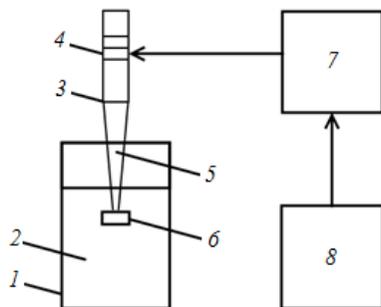


Рис. 5.29. Структурная схема ультразвукового технологического аппарата

Если на поверхности рабочего инструмента средняя интенсивность ультразвуковых колебаний составляет $3-10 \text{ Вт/см}^2$, то и в других точках обрабатываемого объема интенсивность УЗ колебаний должна быть достаточной для обеспечения кавитационных процессов.

При распространении ультразвуковых колебаний в различных жидких средах происходят необратимые потери энергии, обусловленные внутренним трением. Для жидких сред в обычных безкавитационных условиях коэффициент поглощения ультразвуковых колебаний, обусловленный всеми действующими факторами, не превышает 40 м^{-1} [2]. По этой причине затуханием ультразвуковых колебаний малой интенсивности при их распространении вдоль акустической оси рабочего инструмента в обычных условиях пренебрегают, и продольный размер объема акустического аппарата может выбираться без учета фактора затухания УЗ колебаний.

Следует учитывать, что при распространении УЗ колебаний от излучающей поверхности в обрабатываемой среде возникает распределенное в пространстве поле звуковых давлений. При этом в структуре поля, создаваемого гармоническим излучателем, различают три области: дальнейшее ультразвуковое поле; область расстояний, сравнимых с размерами излучающей поверхности и длиной волны; область ближнего поля.

Сравнимость геометрических размеров излучающего рабочего элемента и объема технологического аппарата с длиной УЗ колебаний в среде обуславливает ряд интерференционных явлений в среде.

Ультразвуковое поле в области расстояний, сравнимых с длиной волны, характеризуется рядом максимумов и минимумов, расположенных на различных расстояниях от излучающей поверхности. Количество интерференционных максимумов и минимумов уменьшается с уменьшением диаметра излучающей поверхности. Если диаметр излучающей поверхности становится меньше половины длины волны УЗ колебаний, то неоднородность поля исчезает и излучатель ведет себя как сферический излучатель нулевого порядка.

Ближнее поле излучения также характеризуется рядом максимумов (рис. 5.30), которые пропадают при диаметре излучающей поверхности, меньшей половины длины волны λ .

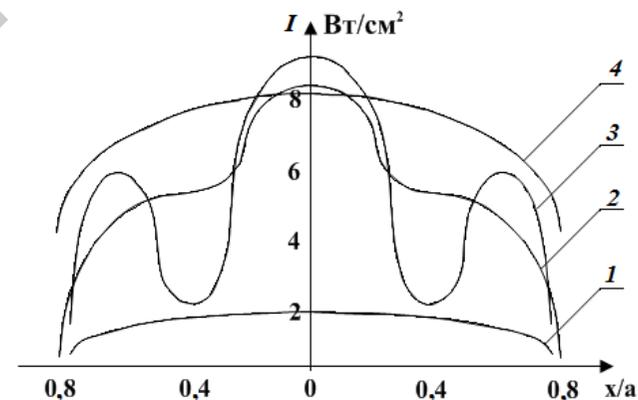


Рис. 5.30. Зависимость распределения интенсивности колебаний вдоль диаметра излучающей поверхности рабочего элемента:

1 – при $2pa/\lambda = 1 \dots 3$; 2 – при $2pa/\lambda = 2$; 3 – при $2pa/\lambda = 4$; 4 – при $2pa/\lambda = 10$

Из приведенного графика следует, что, с точки зрения обеспечения равномерности излучения, оптимальный диаметр излучающей поверхности должен определяться из условия $2pa/\lambda = 1 \dots 3$. С учетом того, что длина волны ультразвуковых колебаний на рабочей частоте технологических аппаратов, равной 22 кГц, составляет 6,8 см, оптимальный диаметр излучающей поверхности рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы должен быть выбран в пределах от 1 до 3 см.

При выполнении этого условия обеспечивается отсутствие интерференционных максимумов и минимумов и излучение вдоль поверхности рабочего инструмента является практически равномерным и плавно уменьшается к краям излучающей поверхности.

Отражения от стенок и верхнего уровня жидкости могут быть учтены при малых интенсивностях УЗ колебаний при отсутствии развитой кавитации и мощных гидродинамических потоков.

Жидкость с развитой кавитационной областью по своим свойствам (плотности, сжимаемости и др.) существенно отличается от жидкости в обычных условиях. Распределение кавитационных зародышей и пузырьков в жидкости случайно, и имеет место их размножение вокруг захлопывающегося пузырька. На границах раздела кавитационная область–жидкость происходит рассеяние и отражение УЗ волн.

Рассеяние и отражение УЗ волн от изменяющейся в пространстве и времени кавитационной области приводит к усреднению акустического поля, интерференционная картина сглаживается, и поле приобретает ярко выраженный мелкомасштабный диффузионный характер.

Следует отметить еще одну особенность акустических свойств жидкостей с развитой в них кавитацией. Вследствие несимметричного характера колебаний кавитационного пузырька в УЗ поле волновое сопротивление жидкости будет характеризоваться существенной нелинейностью, и это еще более изменит и сгладит интерференционную картину в кавитирующей жидкости.

По мере увеличения интенсивности УЗ колебаний происходит увеличение коэффициента поглощения за счет затрат энергии на образование и поддержание кавитации. Для развитой кавитационной области поглощение увеличивается настолько, что интенсивность УЗ колебаний существенно уменьшается на расстояниях, равных нескольким диаметрам излучающей поверхности. Отсюда следует, что увеличение продольного размера рабочего объема акустического аппарата до размеров, превосходящих десять диаметров излучающей поверхности, нецелесообразно.

Таким образом, из анализа распределения акустического поля УЗ колебаний в жидкости с развитой кавитацией следует, что диаметр излучающей поверхности рабочего инструмента должен находиться в пределах от 1 до 3 см, а продольный размер рабочего объема акустического аппарата не должен превышать 10–30 см.

Поскольку рабочий инструмент ультразвуковой колебательной системы выполняется обычно в виде диска необходимого диаметра

и имеет две противоположные излучающие поверхности (т. е. одновременно излучает УЗ колебания в сторону дна рабочего объема и свободной поверхности жидкости в объеме), оптимальным будет погружение рабочего инструмента в обрабатываемую среду на глубину, близкую к половине продольного размера рабочего объема.

Выбор необходимого многофункционального УЗ технологического аппарата определяется потребителями исходя из необходимости решения ряда конкретных задач в определенных условиях и наличия вполне определенных возможностей.

Общий вид ультразвуковой установки с ультразвуковой ванной представлен на рисунке 5.31.



Рис. 5.31. Общий вид ультразвуковой установки с ультразвуковой ванной

Для исследования агрономических качеств использовали семена культур, обладающих твердокаменностью и низкой всхожестью.

На рисунке 5.32 приведены фотографии проростков хурмы после обработки в ультразвуковой ванне с водой в течение 10 мин. Опытный образец по сравнению с контролем имеет более высокие всхожесть, энергию прорастания, длину корешков и проростков. Кроме того, налицо улучшение их фитосанитарного состояния. Несмотря на то, что семена проращивались в одинаковых условиях, в контрольном образце явно прослеживается наличие разросшегося

Penicillium spp., а в опытном образце он отсутствует: в ультразвуковом поле происходят не только активация жизнедеятельности семян, но и подавление вредной микрофлоры.



Рис. 5.32. Фотографии проростков хурмы после обработки в ультразвуковой ванне с водой в течение 10 мин

После ультразвуковой обработки в течение 10 мин семян огурца белорусских сортов «Родничок» и «Верасень» наблюдались более ранние и дружные всходы. Растения из обработанных семян значительно опережали в развитии контрольные растения в одинаковых условиях выращивания (рис. 5.33).



Рис. 5.33. Растения из обработанных ультразвуком и контрольных семян огурца на разных стадиях развития

Ультразвуковой обработке были подвержены семена такой податливой культуры, как кабачки-цукини сорта «Лайконик», их семена озвучивались в течение 5 (обозначение У31) и 10 (обозначение У32) мин. Фотографии развивающихся растений представлены на рисунке 5.34а.



Рис. 5.34. Растения кабачка-цукини (а) и свеклы кормовой (б), выращенные из семян, обработанных ультразвуком

Полученный в августе урожай продемонстрировал стандартную лежкость плодов – до марта следующего года (затемненное проветриваемое помещение при температуре 15–17 °С выше нуля и относительной влажности воздуха 60–80 %).

В худших условиях (затемненные участки поля) выращивалась кормовая свекла из семян, обработанных в ультразвуке в течение 5 минут и контрольных (рис. 5.34б). Как видно, опытные образцы значительно опережают контрольные в своем развитии, имеют зеленые, хорошо развитые листья, более крупные корнеплоды.

В результате проделанной работы и последующих фенологических наблюдений мы приходим к выводу о высокой целесообразности обработки семян ультразвуковым полем в течение 5–10 мин с целью улучшения их агрономических качеств, повышения устойчивости к заболеваниям и достижения прибавки урожайности. Все полевые опыты проводились без использования удобрений и подкормок, растения были в состоянии пройти всю вегетацию и дать полноценный урожай без применения дополнительной агротехники.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СЕМЯН

6.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СТИМУЛЯТОРА ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН

Основным элементом стимулятора всхожести семян является диэлектрическая плоскость с бифилярной обмоткой, подключенной к источнику питания высокого напряжения [56]. Для моделирования и анализа электрического поля, создаваемого бифилярной обмоткой, рассмотрим картину поля двухпроводной линии (рис. 6.1). При переменном напряжении в каждый полупериод времени направление тока в каждом из двух проводов будет противоположным. В пространстве между проводами возникает неоднородное электрическое поле в силу того, что заряды проводов распределяются по поверхности с неодинаковой плотностью.

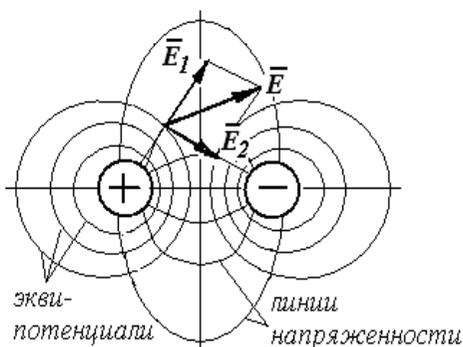


Рис. 6.1. Конфигурация линий и векторная диаграмма напряженностей электрического поля бифилярной обмотки

Напряженность в поле одного провода изменяется обратно пропорционально расстоянию r точки от оси:

$$E = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_a r}, \quad (6.1)$$

где q_l – заряд на единицу длины провода, Кл/м;
 ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м.

Как следует из анализа векторной диаграммы (рис. 6.1), в определенный момент времени вектор напряженности поля в зоне нахождения семени имеет значение и направление, зависящее от места его (семени) расположения на обмотке (симметрично между проводами или ближе к одному из проводов). В любой точке поля результирующая напряженность равна геометрической сумме напряженностей поля от обоих проводов:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (6.2)$$

Потенциал в данной точке поля равен сумме потенциалов от каждого провода:

$$\varphi = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_a} \left(\ln \frac{1}{r_1} - \ln \frac{1}{r_2} \right) = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (6.3)$$

где r_1, r_2 – соответственно расстояние от данной точки до каждого из проводов, м.

Выразим напряжение между проводами через разность потенциалов:

$$U = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_a} \cdot 2 \ln \frac{d}{r_n} = \frac{q_l}{\pi\epsilon_a} \ln \frac{d}{r_n}, \quad (6.4)$$

где d – расстояние между осями проводов, м;
 r_n – радиус провода, м.

Уравнение (6.4) позволяет определить заряд на единицу длины провода:

$$q_l = \frac{\pi\epsilon_a U}{\ln \frac{d}{r_n}}. \quad (6.5)$$

Таким образом, каждый провод бифилярной обмотки будет иметь знакопеременный заряд, изменяющийся с частотой и напряжением питающей сети. Поскольку величина заряда пропорциональна питающему напряжению и зависит от конструктивных параметров обмотки, напряженность поля и потенциал в зоне нахождения семени в соответствии с уравнениями (6.1–6.3) также будут определяться этими параметрами.

В созданном неоднородном электрическом поле происходит поляризация частиц. В поляризованном веществе (семенах) молекулы представляют собой диполи (рис. 6.2), которые под действием поля стремятся ориентироваться таким образом, чтобы их электрический момент был направлен параллельно вектору напряженности электрического поля.

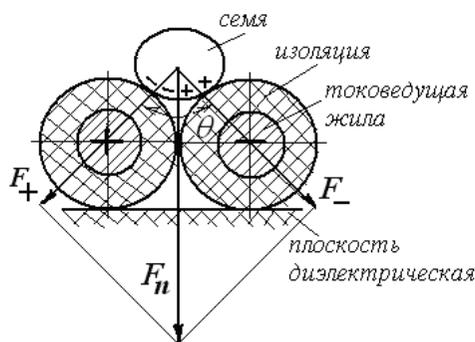


Рис. 6.2. Схема поляризации зарядов и действующих сил в зоне нахождения семени

Электрический момент суммы диполей, находящихся в единице объема семени, определяет вектор поляризации \vec{P} , который пропорционален напряженности электрического поля:

$$\vec{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum q\vec{l}}{V} = \epsilon_0 \chi \vec{E}, \quad (6.6)$$

где $q\vec{l}$ – электрический момент двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов q диполя, находящихся друг от друга на расстоянии l , Кл · м;
 V – объем семени, м³;

χ – электрическая восприимчивость;

\vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м.

Взаимодействие поля, созданного бифилярной обмоткой, с собственным полем поляризованной частицы образует пондеромоторную силу, направление которой показано на рисунке 6.2.

Для семени сферической формы, находящегося в воздушной среде, силу, действующую в неоднородном электрическом поле, определяют по выражению [28]:

$$F_n = 4\pi\epsilon_0 r^3 \frac{\epsilon_c - 1}{\epsilon_c + 2} E \frac{dE}{dx}, \quad (6.7)$$

где r и ϵ_c – соответственно радиус, м, и относительная диэлектрическая проницаемость семени;

$\frac{dE}{dx}$ – производная напряженности электрического поля в направлении максимального ее изменения.

С учетом конструктивного исполнения бифилярной обмотки и векторной диаграммы сил (рис. 6.2) уравнение для определения пондеромоторной силы имеет вид [14]:

$$F_n = \frac{\epsilon_0 \epsilon_c \epsilon_n (\epsilon_c - 1)}{(2\delta_n \epsilon_c + l\epsilon_n)^2} S_{эф} U^2 \cos \frac{\theta}{2}, \quad (6.8)$$

где ϵ_n и δ_n – соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и толщина изоляции провода;

l – средняя длина линии напряженности в семени;

$S_{эф}$ – эффективная поверхность заряженной части семени, контактирующая с изоляцией электродов;

U – напряжение, подаваемое на электроды, В;

θ – угол между направлениями действия сил на семя со стороны разноименно заряженных электродов, град.

Как следует из уравнений (6.7) и (6.8), степень поляризации и характеристики действующих сил зависят от диэлектрических свойств семян и параметров поля. Значит, на плоскости с бифилярной обмоткой при питании от источника переменного напряжения можно придать материалу определенное внутреннее состояние и управлять им в соответствии с целевой задачей.

6.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЦЕССОВ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Как известно, принцип работы диэлектрического сепарирующего устройства заключается в том, что на семена, помещенные в электрическое поле, действуют силы, обусловленные этим полем. Следовательно, чтобы достичь необходимых работоспособности и долговечности устройств, определять рациональные режимы их работы и области применения, необходимо знать, каковы природа указанных сил и влияющие на них факторы. В связи с этим рассмотрим силовое воздействие электрического поля на ворох семенной смеси при сепарировании.

На частицы сыпучих материалов, помещенные в электрическое поле, могут действовать ponderomotorные силы, обусловленные свободными зарядами частиц F_k , смещенными поляризованными зарядами F_{II} и зарядами, появляющимися на границах раздела слоев частиц (семян) F_C – электрострикционная сила. Сила F_k есть результат взаимодействия поля со свободными зарядами, которые частицы могут получать при воздействии коронного разряда, трения и т. д. В зависимости от знака заряда электрода, около которого находится частица, последняя будет либо притягиваться к нему, либо отталкиваться. Если объемную плотность свободных зарядов частицы обозначать ρ , то эту силу можно рассчитать по формуле

$$F_k = \int \rho E dV. \quad (6.9)$$

Как видно из формулы (6.9), сила F_k зависит от напряженности электрического поля E и от количества свободных зарядов, которое, в свою очередь, определяется способом их приобретения и электрическими свойствами частицы.

Теперь рассмотрим появление силы F_{II} . Сепарируемые семена могут быть отнесены к диэлектрикам, молекулы которых состоят из симметрично расположенных зарядов. При отсутствии электрического поля их дипольный момент равен нулю: $p = 0$. Под действием поля молекулы поляризуются, симметрия расположения их зарядов нарушается, молекулы приобретают электрический момент $p = Ql$.

Смещенные заряды приобретают поле, обратное по знаку внешнему полю. Взаимодействие смещенных зарядов частиц с внешним электрическим полем ведет к появлению силы

Результаты моделирования и исследования показывают, что вокруг плоскости с бифилярной обмоткой, подключенной к источнику высокого напряжения, создается неоднородное электрическое поле и в находящиеся на плоскости семена происходит поляризация связанных электрических зарядов. В зоне нахождения семени вектор напряженности поля и действующие силы имеют значения и направления, зависящие от места его расположения относительно проводов, поэтому при многослойном размещении семян на обмотке условия обработки будут отличаться в зависимости от количества слоев, размеров и диэлектрических свойств семян, их местоположения в каждом слое. Экспериментально подтверждены результаты аналитического моделирования поля, действующих сил и поведения семян различных культур, отличающихся формой, размерами, массой, диэлектрическими свойствами, положением на бифилярной обмотке.

Экспериментально установлено (рис. 6.3), что угол скатывания семян α определяется размерами, формой и массой семян и напряжением на обмотке.

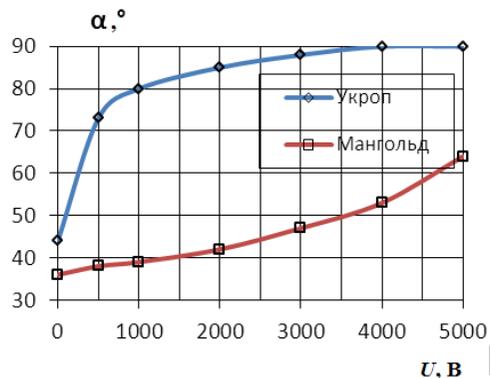


Рис. 6.3. Зависимость угла скатывания семян укропа и мангольда на наклонной плоскости от напряжения на бифилярной обмотке

Семена укропа имеют удлиненную форму (длина – 1,5–2 мм, толщина – 0,8–1,0 мм, масса 1000 семян – 5 г), а мангольда – сферическую (диаметр – 3 мм, масса 1000 семян – 14 г). Различия физических свойств, сортовых и других параметров семян обуславливают отличия их поведения в электрическом поле.

$$F_{\Pi} = -\frac{1}{2} \int E^2 \text{grad} \epsilon dV, \quad (6.10)$$

или

$$F_{\Pi} = \int np \text{grad} |\vec{E}| dV, \quad (6.11)$$

где $\text{grad} \epsilon$ и $\text{grad} E$ – градиенты, учитывающие неоднородность диэлектрической проницаемости и электрического поля в частице;
 dV – элемент объема.

Сила F_{Π} стремится переместить частицу в зону с большей напряженностью электрического поля или прижать ее к поверхности электродов (при относительной диэлектрической проницаемости частицы $\epsilon > 1$). Именно на эту силу ориентируются при разработке диэлектрических сепарирующих устройств. Из анализа формул (6.9–6.11) следует, что сила зависит не только от напряженности электрического поля, но и от его неоднородности, поляризуемости частиц (семян), а последняя – от их биохимического состава. В диэлектрическом сепарирующем устройстве сила F_{Π} должна быть соизмерима с весом частиц, в некоторых случаях – превосходить его. Необходимое условие появления этой силы – неоднородность электрического поля. На рисунке 6.4 изображены картины электрических полей, создаваемых одним электродом и двухэлектродной системой в среде с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_c .

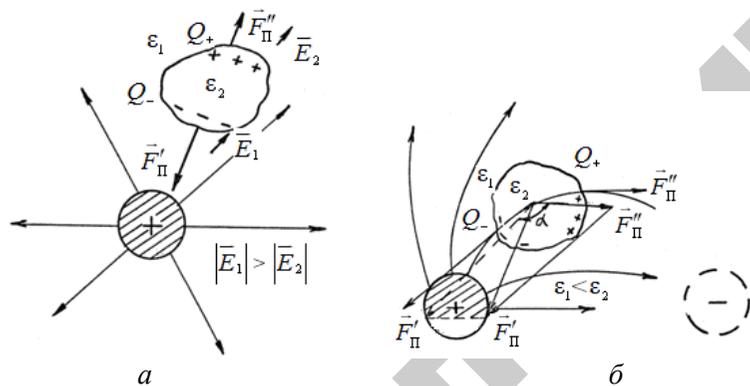


Рис. 6.4. Силовое воздействие на частицу семенного вороха неоднородного электрического поля, создаваемого одним электродом (а) и двумя электродами (б)

Во втором случае (рис. 6.4б) симметрия поля искажена взаимным влиянием электродов. При помещении частиц с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_2 ($\epsilon_2 > \epsilon_1$) в такое поле на их поверхности, обращенной к положительно заряженному электроду, наводится отрицательный заряд $-Q$, а на противоположной стороне – положительный $+Q$. На эти заряды действует электрическое поле, и если оно неоднородно ($E_2 < E_1$), то возникают две различные по направлению и величине силы:

$$F_{\Pi}' = -\frac{Q}{E_1}; \quad F_{\Pi}'' = +\frac{Q}{E_2}, \quad (6.12)$$

где E_1 и E_2 – векторы напряженности электрического поля в местах нахождения электрических зарядов $-Q$ и $+Q$.

Результирующая поляризующая сила

$$F_{\Pi} = F_{\Pi}' + F_{\Pi}'' \quad (6.13)$$

В первом случае (рис. 6.4а) поляризационная сила пропорциональна разности напряженности электрического поля в местах нахождения зарядов $-Q$ и $+Q$:

$$F_{\Pi} = (+Q)E_1 + (-Q)E_2 = Q(E_1 - E_2). \quad (6.14)$$

Так как по модулю заряды $-Q$ и $+Q$, то при равных по модулю E_1 и E_2 , что наблюдается в однородном поле, и при $\epsilon_0 = 0$ поляризационная сила $F_{\Pi} = 0$.

Во втором случае (рис. 6.4б) между направлениями сил F_{Π}' и F_{Π}'' существует угол α , отличный от 180° . Тогда, пользуясь теоремой косинусов, после некоторых преобразований получим

$$F_{\Pi} = \sqrt{(F_{\Pi}')^2 + (F_{\Pi}'')^2 + 2F_{\Pi}'F_{\Pi}'' \cos \alpha}. \quad (6.15)$$

Из анализа уравнений (6.13–6.15) видно, что во втором случае (рис. 6.4б) поляризационная сила F_{Π} больше, поскольку больше неоднородность поля.

Из выражений (6.14) и (6.15) следует, что сила F_{Π} зависит от угла α , который определяется пространственным расположением разноименно заряженных электродов относительно частиц. Следовательно, электрод противоположной полярности необходимо располагать так, чтобы действующая на частицы поляризационная сила была наибольшей.

На рисунке 6.5а показано несколько вариантов размещения второго электрода относительно первого и положения частицы. При симметричном расположении частицы (по модулю поляризационные силы $F_{II}' = F_{II}''$) формула (6.15) примет следующий вид:

$$F_{II} = F \sqrt{2 + 2 \cos \alpha} = F \cdot 2 \cos \frac{\alpha}{2} = 2QE \cos \frac{\alpha}{2}. \quad (6.16)$$

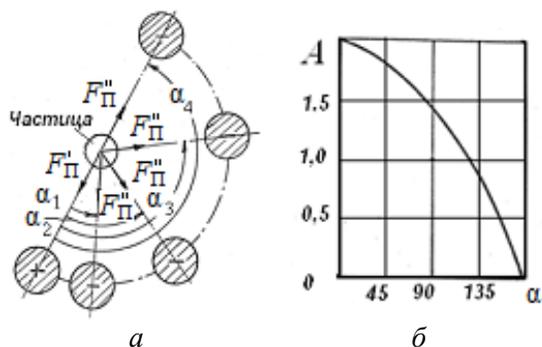


Рис. 6.5. Варианты расположения второго электрода относительно частицы сыпучей смеси (а) и зависимость коэффициента A от α (б)

Введем коэффициент $A = 2 \cos \frac{\alpha}{2}$ и построим зависимость A от α (рис. 6.5б).

С ростом угла α коэффициент A и сила F_{II} уменьшаются (естественно, угол α не может быть равным нулю, поскольку диаметры электродов и толщина их изоляции имеют небольшое, но конечное значение). Чем меньше расстояние между электродами, тем больше поляризационная сила. Следовательно, на эту силу влияют не только подведенное напряжение, но и угол α , т. е. расположение электродов.

Таким образом, два разноименно заряженных электрода и их близкое расположение создают электрическое поле с наибольшей неоднородностью, причем напряженности в разных точках отличаются не только по модулю, но и по направлению (рис. 6.5). Такая система электродов позволяет получить наибольшую поляризационную силу при меньшем напряжении, чем в случае одноименно заряженных электродов. Эти положения учитываются при

разработке систем электродов рабочих органов диэлектрических сепарирующих устройств.

Электрострикционная сила F_C вызывает внутри семени и иной частицы сепарируемого вороха деформацию (сжатие или растяжение) отдельных слоев. Деформация приводит к изменению плотности частицы, что изменяет ее диэлектрическую проницаемость. Эта сила рассчитывается следующим образом:

$$F_C = \frac{1}{2} \int \text{grad} \left(E^2 \frac{\delta \epsilon}{\delta \tau} \tau \right) dV, \quad (6.17)$$

где τ – плотность частицы, кг/м³;

$\frac{\delta \epsilon}{\delta \tau}$ – изменение диэлектрической проницаемости частицы при ее деформации.

Природа силы F_C более сложная, чем двух предыдущих. Семя имеет сложную слоисто-неоднородную структуру (рис. 6.6). Диэлектрическая проницаемость слоев частиц неодинакова, поэтому получить ее аналитическую зависимость от номера слоя весьма сложно. Можно представить физическую модель частицы (семени), изобразив поле вне и внутри нее в виде силовых линий (рис. 6.6). Известно, что внутренние слои частицы имеют большую влажность и большую плотность, чем внешние. Если предположить, что число слоев равно m , и считать их от внешних к внутренним, запишем:

$$\epsilon_c < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \dots < \epsilon_m, \quad (6.18)$$

где ϵ_c – диэлектрическая проницаемость среды (воздуха);

$\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m$ – диэлектрическая проницаемость слоев частицы.

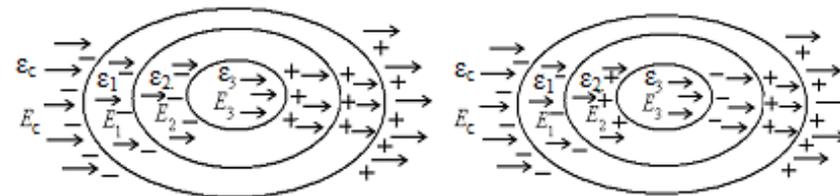


Рис. 6.6. Схемы электрического поля внутри и вне частицы при $\epsilon_c < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ (а) и при $\epsilon_c < \epsilon_1 < \epsilon_2 > \epsilon_3$ (б): 1, 2, 3 – слои частицы (семени); 4 – воздушное пространство

Если поместить частицу в электрическое поле, то при переходе от слоя к слою сохраняется неизменной нормальная составляющая вектора диэлектрического смещения D :

$$D = \varepsilon_c E_c = \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 = \dots = \varepsilon_m E_m. \quad (6.19)$$

Из уравнений (6.18–6.19) следует, что

$$E_c > E_1 > E_2 > \dots > E_m. \quad (6.20)$$

Вследствие этого на поверхности частицы и на границах слоев наводятся заряды с определенной поверхностной плотностью:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \varepsilon_c(E_1 - E_c); \\ \sigma_2 &= \varepsilon_1(E_2 - E_1); \\ \sigma_3 &= \varepsilon_2(E_3 - E_2); \\ &\dots \\ \sigma_m &= \varepsilon_{m-1}(E_m - E_{m-1}). \end{aligned} \quad (6.21)$$

Пограничные заряды:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \sigma_1 S_1; \\ Q_2 &= \sigma_2 S_2; \\ Q_3 &= \sigma_3 S_3; \\ &\dots \\ Q_m &= \sigma_m S_m. \end{aligned} \quad (6.22)$$

где S_1, S_2, \dots, S_m – площади поверхности слоев частицы с наведенными зарядами.

В результате взаимодействия зарядов внутри частицы ее слои сжимаются, растягиваются или изгибаются. Чтобы вскрыть закономерности внутренних воздействий и их влияние на силу F_{Π} , удобнее оперировать не зарядами $-Q_2$ и $+Q_1$, а их алгебраической суммой:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (6.23)$$

Постоим картину силовых линий поля внутри трех слоев частицы. Если принять во внимание уравнение (6.23), то при условии (6.18) все поверхности слоев частицы слева зарядятся отрицательно, а справа – положительно (рис. 6.6а). Число силовых линий в том

или ином слое зависит от его диэлектрической проницаемости. Чем больше диэлектрическая проницаемость, тем меньше напряженность электрического поля и тем меньшее число силовых линий проходит через этот слой.

Анализ физических моделей частицы (рис. 6.б) позволяет отметить следующее:

1. При внесении частиц в электрическое поле внутри них появляются электрострикционные силы, которые обусловлены появлением электрических зарядов на границе раздела сред. Эти силы воздействуют на внутренние слои частиц: одни слои сжимаются, другие растягиваются. Сжатие или растяжение зависит от соотношений диэлектрических проницаемостей веществ, входящих в биохимическую структуру. Так, когда $\varepsilon_c < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$ (рис. 6.6а), внутренние слои растягиваются.

2. Электрострикционная сила зависит не только от напряженности электрического поля и его неоднородности, но и от диэлектрической проницаемости веществ, из которых состоят смежные слои частицы. Чем больше разность диэлектрических проницаемостей, тем больше механическая сила, действующая на эти слои. Ее можно изменять путем увлажнения или подсушивания частиц, а также изменением подводимого напряжения.

3. Сжатие и растяжение слоев частицы приводит к изменению ее влагоудерживающей способности. Следовательно, изменяя напряженность электрического поля, можно изменять указанную способность частиц. Использование этого явления может существенно экономить время и затраты энергии при сушке и доведении до кондиционной влажности семян сельскохозяйственных растений.

Определим влияние внутренних зарядов на поляризационную силу при внесении частиц в неоднородное электрическое поле, созданное двумя разноименно заряженными электродами. Для этого построим силовые линии поля внутри частиц и вне их. На рисунке 6.7а дана картина поля для случая, когда $\varepsilon_c < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$.

На рисунке 6.7б показана картина поля, когда внутренний слой частицы имеет диэлектрическую проницаемость ниже, чем все остальные, т. е. $\varepsilon_c < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 > \varepsilon_3$. В таком случае внутренние заряды максимально усиливают поляризационную силу (рис. 6.7з). Если же это условие нарушается, то заряды, наведенные внутри частицы, могут несколько уменьшать эту силу. Это привело к тому, что результирующая поляризационная сила F_{Π} уменьшилась по сравнению со случаем, когда $\varepsilon_c < \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3$ (рис. 6.7а).

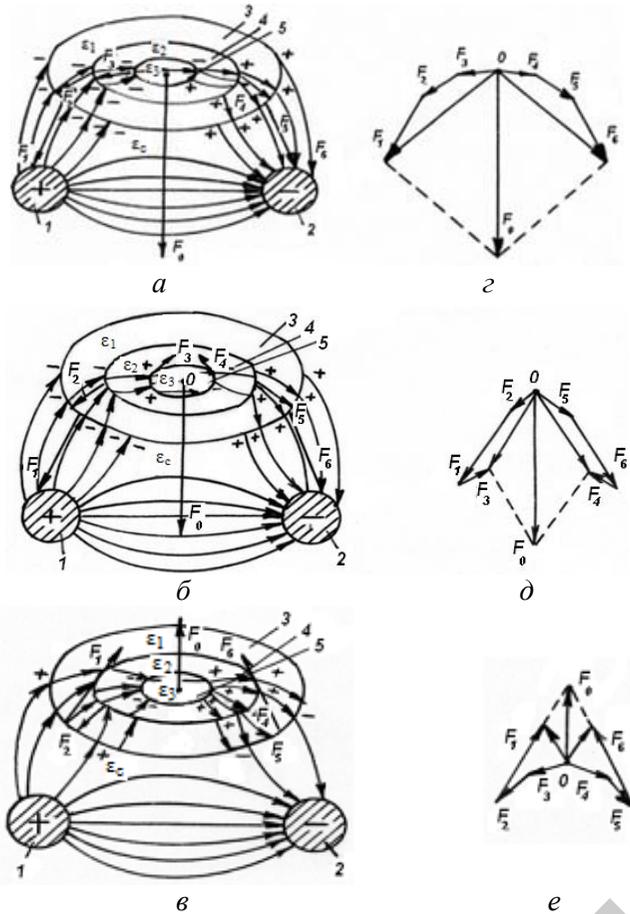


Рис. 6.7. Структура электрических полей (а, б, в) и диаграмма сил в частице сыпучей смеси (z, d, e): 1, 2 – электроды; 3, 4, 5 – слои частиц (семян)

Направление действия поляризационной силы зависит от диэлектрической проницаемости среды. Если диэлектрическая проницаемость среды ϵ_c меньше, чем у всех слоев частицы, то она притягивается к электродам (рис. 6.7а), в противном случае частица выталкивается из области поля с большей напряженностью в область с меньшей (рис. 6.7в, е).

Суммарная сила для m слоев частицы:

$$\vec{F} = \sum \vec{F}_i. \quad (6.24)$$

Анализ физических явлений, моделей частицы (семени) и структуры электрического поля позволяет сделать следующие выводы.

1. Заряды внутри частицы, вызванные воздействием внешнего электрического поля, выполняют две функции: создают электрострикционную силу, которая либо сжимает, либо растягивает отдельные слои частицы; влияют на поляризационную силу, усиливая или ослабляя ее. Максимальное увеличение поляризационной силы наблюдается при $\epsilon_c < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$.

2. Размещение зарядов внутри частицы зависит от ее структуры и диэлектрической проницаемости веществ слоев. Если $\epsilon_c < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$, все заряды со знаком минус сосредотачиваются против электрода, заряженного положительно, а со знаком плюс – против отрицательного. При нарушении указанного условия изменятся и знаки зарядов.

3. Направление поляризационной силы зависит от диэлектрической проницаемости среды. При $\epsilon_c < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ частица притягивается к электродам, если же $\epsilon_c > \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$, частица выталкивается из области с большей напряженностью в область с меньшей. Так как диэлектрическая проницаемость частиц больше, чем воздуха, поляризационная сила всегда направлена к электродам.

Теперь рассмотрим влияние изоляции электродов на частицу, не имеющую свободного заряда. Рабочие органы диэлектрического сепарирующего устройства покрыты изоляцией, диэлектрическая проницаемость ϵ_n которой больше диэлектрической проницаемости среды (воздуха) ϵ_c . В электрическом поле, создаваемом разноименно заряженными электродами, частица поляризуется и в ней наводятся заряды $-Q$ и $+Q$. Под действием зарядов электродов поляризуется и изоляция. Слои изоляции, непосредственно прилегающие к электродам, имеют заряды, знаки которых отличны от знаков зарядов электродов, а внешние слои имеют те же заряды, что и электроды. Отрицательный и положительный заряды частицы усиливают поляризацию изоляции. В результате этого появляется поле (E_n), создаваемое зарядами поляризованной изоляции. Таким образом, на положительный и отрицательный заряды частицы действует поле, создаваемое зарядами электродов и зарядами поляризованной изоляции.

Основываясь на принципе суперпозиции полей, запишем уравнение, определяющее силу, которая прижимает частицу к электроду (и к изоляции):

$$F_0 = (E_3 + E_{II})(-Q) + (E_3 + E_{II})(+Q), \quad (6.25)$$

или

$$\begin{aligned} F_0 &= (-Q)E_3 + (-Q)E_{II} + (+Q)E_3 + (+Q)E_{II} = \\ &= F_{II'} + F_{II''} + F_{II1} + F_{II2} = F_{II} + F_{II}. \end{aligned} \quad (6.26)$$

В диэлектрических сепарирующих устройствах поляризационная сила (сила притяжения), действующая на частицу, складывается из двух сил, обусловленных взаимодействием частицы, ее поляризованного заряда и зарядов электродов и взаимодействием зарядов поляризованного материала с зарядами поляризованной изоляции.

Силовые линии электрических полей (E_{II} и E_3) в изоляции направлены встречно, что частично компенсирует электрическое поле в изоляции. Но так как

$$\sum E_i \cdot l_i = U, \quad (6.27)$$

то поле в воздушном околоэлектродном пространстве (E_b) усиливается (E_i – напряженность поля на отдельных участках между электродами; l_i – длина этих участков), поэтому $E_b > E_{II}$. Моделирование электрических полей в изоляции и воздушном пространстве полностью подтверждает этот вывод. Следует отметить, что при подаче напряжения U на электроды в изоляции возникают электрострикционные силы, так как ближайшие к электродам слои изоляции прижимаются к ним, а удаленные – отталкиваются.

Как уже было отмечено, если вблизи электродов создается коронный заряд, то в этом поле частица приобретает заряд Q_K и на нее действует сила F_K . При помещении частицы, обладающей зарядом Q_K , в электрическое поле, образованное двумя разноименно заряженными электродами, на частицу действуют силы:

$$F_{K1} = Q_K E_1; F_{K2} = Q_K E_2, \quad (6.28)$$

где F_{K1} , F_{K2} – сила электрического воздействия на частицу первым и вторым электродами;

E_1 , E_2 – векторы напряженности электрического поля, создаваемого первым и вторым электродами.

Результирующая сила

$$F_K = \sqrt{F_{K1}^2 + F_{K2}^2 + 2F_{K1}F_{K2} \cos \beta}, \quad (6.29)$$

где β – угол между силами F_{K1} и F_{K2} .

Таким образом, на частицы, помещенные в электрическое поле, действуют силы F_K , F_{II} , F_C , суммарная плотность которых, отнесенная к единице объема:

$$f = \rho E - \frac{1}{2} E^2 \text{grad} \epsilon + \frac{1}{2} \text{grad} \left(E^2 \frac{\partial \epsilon}{\partial \tau} \right). \quad (6.30)$$

Как было показано выше, природа появления и действия сил F_{II} и F_C обусловлена явлением поляризации частиц в электрическом поле. Академик Н. Е. Тамм [39] предложил равенство

$$f = f_1 + f_2,$$

где $f_1 = \rho E$ – объемная плотность силы электрического воздействия, обусловленной взаимодействием электрического поля со свободными зарядами частиц;

f_2 – объемная плотность силы, обусловленной поляризацией частиц в электрическом поле.

Сила электрического воздействия в диэлектрических сепарирующих устройствах в отличие от поляризационной силы F_{II} не всегда направлена к электродам. В зависимости от расположения семени по отношению к электроду, сила F_K либо отталкивает частицу от электрода, ослабляя действие поляризационной силы, либо прижимает ее, усиливая F_{II} .

Исследуем совокупное влияние сил F_{II} и F_K при питании электродов переменным напряжением $U = U_m \sin \omega t$. Напряженность электрического поля, создаваемая разноименно заряженными электродами, изменяется также по синусоидальному закону: $E = E_m \sin \omega t$. Так как поляризационная сила пропорциональна квадрату напряженности поля, то

$$F_{II} = k E_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{k E_m^2}{2} (1 - \cos 2\omega t), \quad (6.31)$$

где E_m – результирующая амплитуда напряженности поля в заданной точке пространства, В/м;

k – коэффициент пропорциональности.

Из выражения (6.36) следует, что поляризационная сила изменяется во времени с удвоенной частотой сети, а сила электрического воздействия – с частотой сети. Поляризационная сила не меняет свой знак во времени, сила электрического воздействия изменяет его (рис. 6.8a). Среднее значение поляризационной силы

$$F_{\text{Ппр}} = \frac{kE_m^2}{2} = kE^2. \quad (6.32)$$

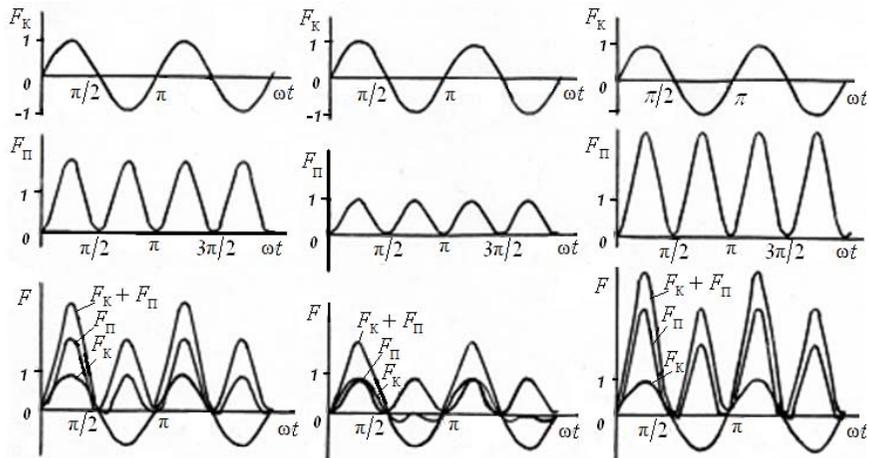


Рис. 6.8. Волновые диаграммы поляризационной силы, электрического воздействия и их результирующей при различных амплитудах:

$$F_{m\Theta} = F_{m\kappa}; F_{m\Theta} = 1; F_{m\Theta} = \frac{1}{2}; F_{m\Theta} = \frac{3}{2}$$

Из анализа рисунка 6.8 следует, что результирующая сила $|F_{\text{П}} + F_{\text{К}}|$ может принимать как положительное и отрицательное (рис. 6.8а, б), так и только положительное значения (рис. 6.8в).

Следовательно, частицы, помещенные в неоднородное электрическое поле, созданное разноименно заряженными электродами, могут притягиваться к электродам и отталкиваться от них. Соотношением указанных сил в диэлектрических сепарирующих устройствах можно управлять, что позволяет изменять режимы их работы и устанавливать наиболее оптимальные режимы для получения фракций семян сельскохозяйственных растений заданного качества.

Таким образом, среднее значение поляризационной силы не изменяется, если постоянное напряжение заменить синусоидальным, действующее значение которого равно постоянному. Использовать же переменное напряжение в диэлектрических сепарирующих устройствах предпочтительнее, так как в этом случае не нужны выпрямительные устройства.

На рисунке 6.9а изображена схема возникающих углов и сил при попадании частиц сепарируемой смеси на обмотку рабочего органа, выполненного проводом АПВ; на рисунке 6.9б, в – схема сил, действующих на частицу сепарируемой смеси при покрытии обмотки тонкой полиэтиленовой пленкой толщиной h ; на рисунке 6.9г – при разнесении электродов по высоте и попадании частиц в межэлектродное пространство. На рисунке 6.9а изображена система электроды–частица, могущая быть элементом рабочего органа. Данная система характеризуется тем, что здесь используется система разноименно заряженных изолированных электродов (бифилярная обмотка), установленных вплотную.

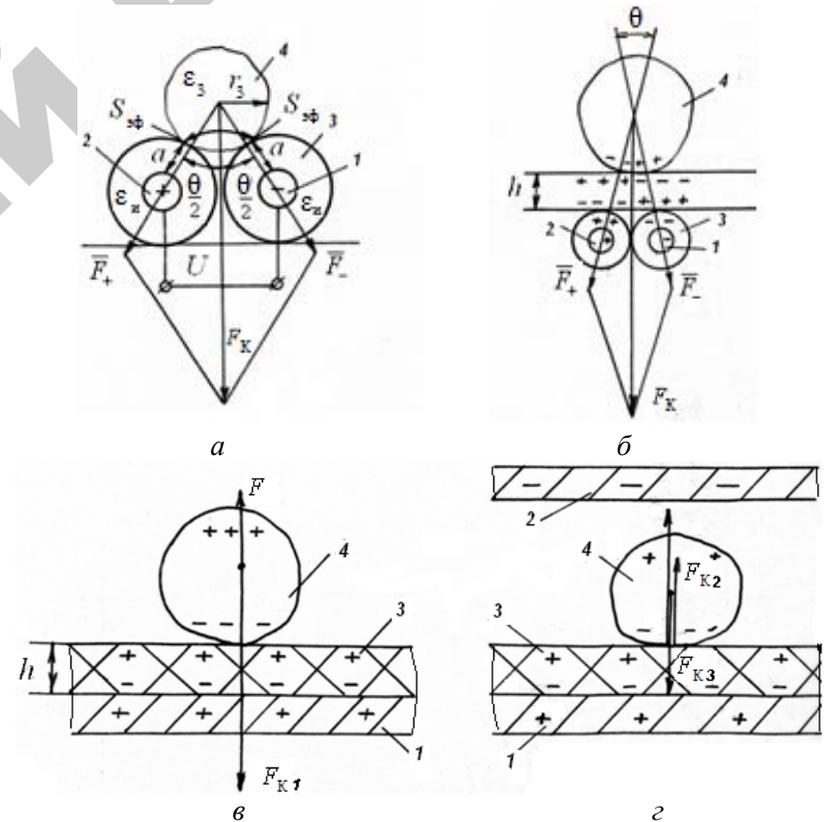


Рис. 6.9. Система электродов рабочих органов электросепаратора: 1, 2 – электроды; 3 – изоляция; 4 – частица семенного вороха.

При подаче напряжения на частицу воздействует пондеромоторная сила, обусловленная поляризацией, которая может быть подсчитана по формуле

$$F_{\Pi} = \frac{2U^2 \varepsilon_n^2 \varepsilon_0^2 (\varepsilon_n - 1) S_{\text{эф}}}{(2a\varepsilon_n + l\varepsilon_n)^2} \cos \frac{\theta}{2}, \quad (6.33)$$

где U – напряжение на разноименно заряженных электродах, В;
 $\varepsilon_n, \varepsilon_n$ – относительные диэлектрические проницаемости изоляции и частицы;
 $S_{\text{эф}}$ – эффективная поверхность заряженной частицы, контактируемая с изоляцией электродов, м²;
 ε_0 – электрическая постоянная;
 a – толщина изоляции электродов, м;
 l – средняя длина силовой линии в частицу, м;
 θ – угол между направлениями действия сил на частицу со стороны разноименно заряженных электродов, град.

На рисунке 6.9б изображен элемент рабочего органа сепарирующего устройства, который может быть использован на разделении очень мелких сыпучих смесей. Например, салат посевной, лук-батун, шпинат имеют мелкие семена, сепарировать которые на СДЛ-1 с применением обычной обмотки проводом АПВ-2,5 не представляется возможным. Названные культуры относятся к мелкосемянным и «перекрывают» активную межвитковую рабочую зону на барабане, тем самым препятствуя «работе пондеромоторной силы», которая является характерной при диэлектрической сепарации.

Возникла гипотеза о модернизации рабочего органа – возможного применения пленки, обтягивающей барабан с обмоткой. Была взята обычная тонкая полиэтиленовая пленка, изготавливаемая по ГОСТ 10354–82 с толщинами от 0,015 до 0,080 мм (прозрачная полиэтиленовая пленка, получаемая методом экструзии из полиэтилена высокого давления (низкой плотности) и композиций на его основе, содержащих пигменты (красители), стабилизаторы, скользящие, антистатические и модифицирующие добавки).

Картина распределения силовых линий, возникающих в процессе диэлектрической сепарации (наличие частиц семенной смеси обязательно) будет выглядеть в соответствии с рисунком 6.9б, в.

Проведено также исследование зависимости эффективности разделения семян на СДЛ-1 от толщины пленки: на обмотку барабана были закреплены образцы полиэтиленовой пленки разной толщины: 0,015, 0,020, 0,025, 0,030, 0,040, 0,050, 0,060, 0,070 и 0,080 мм. Мы можем рекомендовать при электросепарации мелкосемянных культур применение полиэтиленовой пленки толщиной 0,03–0,06 мм. Более тонкие пленки не выдерживали эксплуатационных нагрузок, более толстые перекрывали рабочие зоны и делали сепарацию неэффективной (смесь просто сыпалась).

Пондеромоторная сила, действующая на частицу на такой системе электродов:

$$F_{\Pi} = \frac{U^2 C^2 (\varepsilon_n - 1)}{\varepsilon_n^2 \varepsilon_0 S_{\text{эф}}} \cos \frac{\theta}{2}, \quad (6.34)$$

где C – эквивалентная емкость, создаваемая изоляцией электродов, изоляционным материалом и частицей семенного вороха.

На рисунке 6.9в изображены электрод 1, покрытый изоляционным материалом 3, и лежащая на них частица 4. Находясь под напряжением электрода, частица поляризуется и, в случае ее многослойности, на нее подействует прижимающая сила. Следует подчеркнуть, что дополнительное пленочное покрытие (его следует выполнить возможно более тонкой пленкой из полиэтилена) создаст возможность использования типового диэлектрического сепаратора семян для разделения очень мелких смесей.

На рисунке 6.9г изображена система, состоящая из электродов 1 и 2, которые находятся под разными потенциалами, а на нижнем, покрытом изоляционным материалом 3, находится частица 4. Здесь сила нормального давления будет определяться по формуле:

$$N_d = mg(F_{31} + F_{32}), \quad (6.35)$$

где F_{31} – сила взаимодействия поляризованных частиц с нижним электродом,

F_{32} – сила взаимодействия с верхним электродом.

Рассмотренные системы легко реализуются на цилиндрической рабочей поверхности. На рисунке 6.10 изображены технологические схемы разделения семенного вороха на различных рабочих органах диэлектрического сепарирующего устройства (без пленочного покрытия и с таковым).

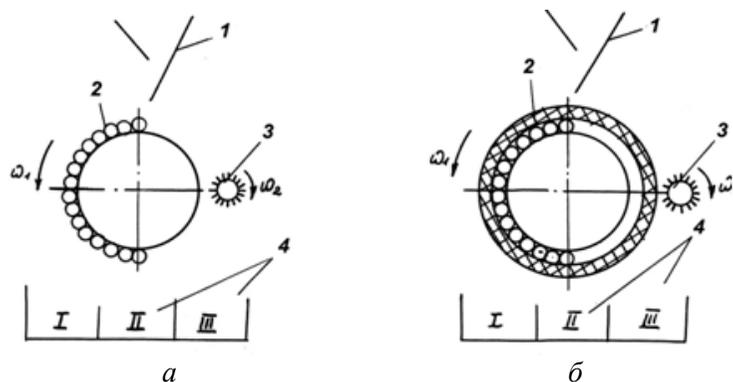


Рис. 6.10. Технологические схемы электросепарирования на различных системах рабочих органов:

a – простая бифилярная обмотка; *б* – бифилярная обмотка с пленочным покрытием; 1 – загрузочный бункер; 2 – электроды; 3 – очистительная щетка; 4 – приемники продуктов сепарации (разделения)

Увеличение или уменьшение емкости рабочего органа электросепарирующего устройства ведет к изменению общего тока и коэффициента мощности. Следовательно, в таком случае имеется принципиальная возможность автоматизации процесса сепарации путем регистрации силы тока рабочего органа.

Диэлектрические сепараторы обеспечивают отбор биологически ценных семян по совокупности их свойств (с более развитым зародышем, т. е. биологически полноценные), очистку от трудноотделимых семян карантинных сорных растений, калибровку по размерам с учетом их физиологических свойств, определяющих урожайность (битые, колотые или резаные).

Диэлектрические сепараторы обеспечивают эффективное разделение многих иных сыпучих смесей по качеству их компонентов: разделение древесной щепы по смолистости, разделение продуктов помола зерна (выделение зародыша), калибровка чайного листа и очистка его от веточек, калибровка травяной резки и круп, очистка дробленого арахиса от кожуры в кондитерском производстве.

На основании полученных моделей можно сделать следующие заключения:

1. Исследованные процессы, имеющие место в частицах сыпучих материалов при помещении их в электрическое поле, говорят

о возникновении токов, обусловленных поляризацией частиц, перераспределением потока электрической индукции, слоистой структурой и неоднородностью химического состава. Для разделения сыпучих смесей необходимо выбирать сухой материал, что значительно повышает эффективность электросепарирования (уменьшается потребляемая мощность и повышается полнота разделения). К тому же сам процесс электросепарирования оказывает на семена подсушивающее действие.

2. Установлено силовое воздействие электрического поля на частицы сыпучей смеси, что является следствием их поляризации. На частицу действуют силы: поляризационная $F_{\text{П}}$, обусловленная поляризацией частиц; электрострикционная $F_{\text{С}}$ (неоднородность структуры частиц); сила электрического воздействия $F_{\text{к}}$ (свободные заряды частиц). Если диэлектрическая проницаемость внутренних слоев частиц меньше, чем наружных, то $F_{\text{к}}$ усиливает действие $F_{\text{Э}}$, а если наоборот – ослабляет. Так как появление сил $F_{\text{П}}$ и $F_{\text{С}}$ связано с поляризацией частиц, их целесообразно рассматривать как одну результирующую силу $F_{\text{Э}}$, стремящуюся прижать частицу к электродам либо переместить ее в зону с большей напряженностью, поскольку диэлектрическая проницаемость частицы больше, чем воздуха. Установлено также, что сила $F_{\text{Э}}$ не всегда направлена к электродам. Соотношением сил $F_{\text{Э}}$ и $F_{\text{к}}$ в электросепарирующем устройстве можно управлять.

3. Определены методы и средства, реализующие разделение частиц сыпучих материалов на различные по качеству фракции. Разделение частиц сыпучих смесей в электрическом поле происходит при наличии либо различий в диэлектрических проницаемостях, либо в динамике поляризации и деполяризации частиц, что обусловлено различным биохимическим составом, но подобными физико-механическими свойствами.

4. Раскрыт механизм разделения сыпучей смеси электросепарированием. Установлено, что в электросепарирующем устройстве смеси разделяются по совокупности механических и биохимических свойств.

5. Отсутствие или снятие напряжения на электродах рабочего органа сопровождается деполяризацией частиц, следовательно, отсутствуют противопоказания широкому применению электросепарирующих устройств для пищевых продуктов.

6. Установлена зависимость электрической силы, действующей на частицы в электрическом поле, от диэлектрических свойств этих частиц и технологических параметров рабочего органа. Недостаток, свойственный бифилярной обмотке ДСУ, заключающийся в просыпании частиц мелких продуктов в межэлектродный зазор и забивании его эффективной рабочей зоны, может быть успешно устранен установкой пленочного покрытия обмотки. Одновременно достигается наведение в частицах сепарируемой смеси внутренней поляризации (пленочное покрытие препятствует инжекции зарядов и стеканию поляризации).

6.3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОФИЗИКОХИМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ВСХОЖЕСТИ СЕМЯН

Для установления взаимного влияния определяющих факторов, получения математической модели процесса стимуляции семян применена методика многофакторного эксперимента [57]. Принятые в исследовании уровни и интервалы варьирования определяющих факторов указаны в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Обозначение		Интервалы варьирования	Натуральные уровни факторов, соответствующие кодированным				
	натуральное	кодированное		+1,682	+1	0	-1	-1,682
Напряжение, В	U	X_1	1500	5523	4500	3000	1500	477
Экспозиция, с	τ	X_2	2	7,364	6	4	2	0,636
Уровень рН	рН	X_3	2	3,63	5	7	9	10,36

Центральный композиционный ротатбельный план второго порядка для трех факторов (таблица 6.2) состоит из плана полного факторного эксперимента типа 2^3 (опыты 1–8), шести опытов в «звездных точках» (опыты 9–14) и шести опытов в центре плана (опыты 15–20) для исследований, описанных в 5.4. «Исследование

методов электрофизической и электрохимической стимуляции всхожести семян зеленных культур».

Таблица 6.2

Матрица планирования и результаты опытов

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$y, \%$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	91
2	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	89
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	86
4	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	87
5	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	84
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	85
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	84
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	85
9	+1	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	74
10	+1	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	81
11	+1	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	82
12	+1	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	79
13	+1	0	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	80
14	+1	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	78
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	85
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84

Уравнение регрессии по результатам опытов, в общем случае, представляется в виде полинома второй степени:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2, \quad (6.36)$$

где y – функция отклика (всхожесть семян);

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коэффициенты уравнения, определяющие степень влияния фактора или их сочетаний на величину функции отклика.

В общем виде коэффициенты уравнения определяют по формулам [57]:

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[2\lambda^2 (k+2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda C \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j \right];$$

$$b_i = \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} y_j;$$

$$b_{il} = \frac{C^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N X_{ij} X_{lj} y_j;$$
(6.37)

$$b_{ij} = \frac{A}{N} \left\{ [C^2 (k+2)\lambda - k] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + C^2 (1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda C \sum_{j=1}^N y_j \right\},$$

где $A = \frac{1}{2\lambda[(k+2)\lambda - k]}$;

$$C = \frac{N}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2};$$

N – число опытов в матрице;

k – число факторов;

y_j – значение функции отклика в j -м опыте;

X_{ij}, X_{lj} – кодированные значения i -го и l -го факторов в j -м эксперименте;

n_0 – число опытов в центре плана;

$n_n = N - n_0$.

Коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_0 = 0,16666 \cdot 1671 - 0,05694 \cdot 3414 = 84;$$

$$b_1 = 0,07322 \cdot 4,908 = 0,359;$$

$$b_2 = 0,007322 \cdot 12,046 = 0,882;$$

$$b_3 = 0,07322 \cdot 2,364 = 0,173;$$

$$b_{12} = 0,0125 \cdot 7 = 0,875;$$

$$b_{13} = 0,0125 \cdot 3 = 0,375;$$

$$b_{23} = 0,0125 \cdot 3 = 0,375;$$

(6.38)

$$b_{11} = 0,06254 \cdot 1129,514 + 0,00695 \cdot 3414,005 - 0,05694 \cdot 1671 = -0,77959;$$

$$b_{22} = 0,06254 \cdot 1146,489 + 0,00695 \cdot 3414,005 - 0,05694 \cdot 1671 = 0,282;$$

$$b_{33} = 0,06254 \cdot 1138,002 + 0,00695 \cdot 3414,005 - 0,05694 \cdot 1671 = -0,2488.$$

Дисперсию воспроизводимости S_y^2 определяем по результатам опытов в центре плана, для чего составим вспомогательную таблицу 6.3.

Таблица 6.3

Вспомогательная таблица для расчета S_y^2

№ опыта	Значение функции отклика		Отклонения значений	Квадрат отклонений	Дисперсия воспроизводимости
	y_u	\bar{y}			
15	86	$\bar{y} = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} y_u}{n_0} = 84,166$	1,86	3,45	$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1} = 2,27$
16	84		-0,166	0,027	
17	83		-1,166	1,36	
18	85		0,833	0,693	
19	83		-1,166	1,36	
20	84		-0,166	0,027	
	$\sum_{u=1}^{n_0} y_u = 506$			$\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 = 6,92$	

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии, вычисляют по формулам:

$$S_{b_0}^2 = \frac{2A\lambda^2 (k+2)}{N} S_y^2;$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{C}{N} S_y^2; \quad (6.39)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = \frac{C^2}{N\lambda} S_y^2;$$

$$S_{b_{ii}}^2 = \frac{AC^2[(k+1)\lambda - (k-1)]}{N} S_y^2.$$

Дисперсии коэффициентов уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} S_{b_0}^2 &= 0,16666 \cdot 1,38 = 0,23; \\ S_{b_1}^2 &= 0,07322 \cdot 1,38 = 0,101; \\ S_{b_{11}}^2 &= 0,125 \cdot 1,38 = 0,173; \\ S_{b_{111}}^2 &= 0,0695 \cdot 1,38 = 0,096. \end{aligned} \quad (6.40)$$

Доверительные интервалы для коэффициентов уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} \Delta b_0 &= \pm t S_{b_0} = \pm 2,57 \cdot 0,23 = \pm 0,59; \\ \Delta b_1 &= \pm t S_{b_1} = \pm 2,57 \cdot 0,101 = \pm 0,26; \\ \Delta b_{11} &= \pm t S_{b_{11}} = \pm 2,57 \cdot 0,173 = \pm 0,44; \\ \Delta b_{111} &= \pm t S_{b_{111}} = \pm 2,57 \cdot 0,096 = \pm 0,25, \end{aligned} \quad (6.41)$$

где $t = 2,57$ – табличное значение критерия Стьюдента при 5 %-ном уровне значимости и числе степеней свободы $f = 5$ [57].

Коэффициенты b_{23} , b_{33} , b_3 меньше доверительных интервалов, поэтому их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. После чего уравнение регрессии (6.36) принимает вид:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{111} X_1^3. \quad (6.42)$$

Так как среди незначимых оказались коэффициенты при квадратных членах, то коэффициенты уравнения (6.42) необходимо пересчитать с использованием метода наименьших квадратов. Система нормальных уравнений для пересчета коэффициентов уравнения (6.42) имеет вид:

$$\begin{aligned} &20b_0 + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j} + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j} + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j} + b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{3j} + b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 + \\ &+ b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 = \sum_{j=1}^{20} y_j; \\ &b_0 \sum_{j=1}^{20} X_{1j} + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j} X_{1j} + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{2j} X_{1j}^2 + b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{3j} + \\ &+ b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^3 + b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j}^2 = \sum_{j=1}^{20} y_j X_{1j}; \\ &b_0 \sum_{j=1}^{20} X_{2j} + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j} + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j}^2 + b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{3j} X_{2j} + \\ &+ b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{2j} + b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^3 = \sum_{j=1}^{20} y_j X_{2j}; \\ &b_0 \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{3j} + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{3j} + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j} X_{1j} X_{3j} + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} + \\ &+ b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{3j}^2 + b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^3 X_{3j} + b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 X_{1j} X_{3j} = \sum_{j=1}^{20} y_j X_{1j} X_{3j}; \\ &b_0 \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j} + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{2j} + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 X_{1j} + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{2j}^2 + \\ &+ b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{2j} X_{3j} + b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^3 X_{2j} + b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^3 X_{1j} = \sum_{j=1}^{20} y_j X_{1j} X_{3j}; \\ &b_0 \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^3 + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j} X_{1j}^2 + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{2j} X_{1j}^3 + b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^3 X_{3j} + \\ &+ b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^4 + b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 X_{1j}^2 = \sum_{j=1}^{20} y_j X_{1j}^2; \\ &b_0 \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^2 + b_1 \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j}^2 + b_2 \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^3 + b_{12} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{2j}^3 + b_{13} \sum_{j=1}^{20} X_{1j} X_{3j} X_{2j}^2 + \\ &+ b_{11} \sum_{j=1}^{20} X_{1j}^2 X_{2j}^2 + b_{22} \sum_{j=1}^{20} X_{2j}^4 = \sum_{j=1}^{20} y_j X_{2j}^2. \end{aligned} \quad (6.43)$$

Решив систему уравнений (6.43), определим значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} b_0 &= 83,41; \\ b_1 &= 0,3592; \\ b_2 &= 0,8819; \\ b_{12} &= 0,875; \\ b_{13} &= 0,375; \\ b_{11} &= -0,5218; \\ b_{22} &= 0,303. \end{aligned} \quad (6.44)$$

В результате получим следующее уравнение регрессии:

$$y = 83,41 + 0,3592X_1 + 0,8819X_2 + 0,875X_1X_2 + 0,375X_1X_3 - 0,5218X_1^2 + 0,303X_2^2 \quad (6.45)$$

Адекватность полученной модели проверили по критерию Фишера. Расчетное значение F -критерия $F_p = \frac{S_{ан}^2}{S_y^2} = \frac{36,1}{2,27} = 15,9$ меньше табличного $F_T = 19,3$ [57], следовательно, полученная модель адекватна при 5%-ном уровне значимости.

Кодированные значения факторов связаны с натуральными следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{U - U_0}{\varepsilon_1} = \frac{U - 3000}{1500}; \\ X_2 &= \frac{\tau - \tau_0}{\varepsilon_2} = \frac{\tau - 4}{2}; \\ X_3 &= \frac{pH - pH_0}{\varepsilon_3} = \frac{pH - 7}{2}, \end{aligned} \quad (6.46)$$

где U , τ , pH – натуральные значения основных уровней факторов; ε_1 , ε_2 , ε_3 – интервалы варьирования факторов.

Переходя от кодированных X_1 , X_2 , X_3 к натуральным значениям U , τ , pH , получим зависимость всхожести семян от основных определяющих факторов:

$$y = 86,18 - 41 \cdot 10^{-5}U - 1,04\tau - 0,375pH + 29 \cdot 10^{-5}U\tau + 125 \cdot 10^{-6}UpH - 23 \cdot 10^{-8}U^2 + 0,076\tau^2. \quad (6.47)$$

Полученное уравнение регрессии (6.36) адекватно, и его можно использовать как интерполяционную формулу для вычисления всхожести семян салата при различных значениях определяющих факторов в пределах, указанных в таблице 6.2.

Аналогично по вышеприведенной методике многофакторного эксперимента получена математическая модель процесса стимуляции всхожести семян укропа:

$$\gamma_y = 79,6 - 0,0086U - 1,11\tau - 0,275pH + 0,0031U\tau + 225 \cdot 10^{-6}UpH - 0,27 \cdot 10^{-6}U^2 + 0,144\tau^2. \quad (6.48)$$

Таким образом, определяющими факторами всхожести семян при обработке неоднородным электрическим полем являются напряжение (напряженность поля) и экспозиция, а при использовании электрохимически активированной воды – значение водородного показателя (величины pH).

Электрофизические факторы (напряжение, экспозиция) в большей степени проявляют стимулирующее действие при выводе семян из состояния покоя и начале проращивания, а электрохимическое воздействие (активированная вода) также является стимулирующим, но в большей степени – при выращивании проростков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных математических моделей и экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Семена различных культур после определенного срока хранения в определенной степени теряют способность к пробуждению, выходу из состояния покоя и всхожести при обычных условиях окружающей среды, т. е. полевая всхожесть заметно ниже лабораторной даже у кондиционных партий. Это означает, что заложенный в них биологический и генетический потенциал более глубоко «законсервирован», менее доступен действию факторов среды, определяющих начальный период выхода из состояния покоя, биологической активности и прорастания. Часто имеет место процесс «ускоренного старения» семян (детериорации) как следствие несоблюдения технологических параметров хранения и действия неуправляемых факторов.

2. Поскольку процессы, происходящие в растительных организмах, имеют физико-химическую природу и их интенсификация определяется структурой и энергетическим состоянием живого организма, обменно-восстановительными реакциями, то электрофизикохимические технологии имеют дополнительные возможности углублять процессы, активно ими управлять для достижения необходимого технологического эффекта, в частности стимулирования всхожести, активизации прорастания семян.

3. Определяющими факторами всхожести семян при обработке переменным электромагнитным полем являются напряженность и экспозиция, а при использовании электрохимически активированной воды – значение водородного показателя (величины рН).

4. Электрофизические факторы в большей степени проявляют стимулирующее действие при выводе семян из состояния покоя и начале прорастания, а электрохимическое воздействие также является стимулирующим при прорастании, но в большей степени – при выращивании проростков. При этом в результате каждого

вида воздействия происходит общее увеличение всхожести и кондиционности семян по сравнению с контролем.

Было выявлено, что все используемые обработки в большей или меньшей степени стимулируют всхожесть и энергию прорастания. Вероятно, это связано с воздействием изучаемых обработок на активность гиббереллинов, которые играют важную роль в регуляции работы ферментов (возможно, и пероксидаз) на начальных этапах прорастания семян, оказывая влияние на энергию их прорастания.

5. Интегральный технологический эффект электрофизического и электрохимического стимулирования семян проявляется в более раннем появлении проростков, интенсивном их росте (возрастании энергии прорастания), гарантированной дружности всходов, быстрейшем наборе биомассы, бактериологической «чистоте» семян и проростков, здоровых первых листьях, что увеличивает фотосинтез на ранних стадиях и дает преимущество растению в борьбе с негативным проявлением абиотических факторов.

6. Предпосевная обработка, стимулирующая всхожесть и повышающая общую урожайность, снижает потребность в химических веществах, повышает экологичность продукции. Наибольшей эффективностью обладает технология комбинированного сочетания определяющих факторов, поэтому предлагается следующий алгоритм стимуляции: обработка сухих семян переменным электромагнитным полем (диэлектрическая сепарация) и либо прорастивание в субстрате с электрохимически активированной водой, либо обработка в ультразвуке или в низкотемпературной плазме и высокочастотном поле. Если отсутствуют технические возможности для перечисленных обработок – рекомендуется ограничиться диэлектрической сепарацией. Она эффективно отделяет кондиционные семена по качеству от всех остальных компонентов смеси и значительно снижает нагрузку на высевальные аппараты. После сепарации семена оказываются простимулированными в электрическом поле и подготовленными для посева.

7. Обзор литературных и патентных источников, приведенные результаты многочисленных лабораторных и производственных испытаний по применению электротехнологических методов стимуляции растительных объектов свидетельствуют об актуальности и перспективности данного направления исследований. Вместе с тем, очевидна необходимость углубления и расширения научных исследований, обоснований, оптимизации процессов и технических средств, разработки рациональных режимов применения электро-

физических и электрохимических методов обработки семян в отдельности для каждой культуры и для каждого сезона года в климатических условиях Республики Беларусь.

8. Дальнейшее развитие научных основ моделирования и создания систем стимулирования жизнедеятельности семян и растений возможно в следующих направлениях:

продолжение и развитие исследований в направлениях уточнения и обобщения биофизиологических характеристик различных культур и ростостимулирующих эффектов электротехнологических факторов;

аналитическое моделирование системной динамики продукционного процесса для предварительной оценки влияния определяющих факторов на изменение состояния семян и растений в процессе развития и разработка планируемых факторных экспериментов;

разработка моделей полного продукционного процесса биотехнологической системы «семя (условия хранения, стимулирующая обработка, посевные качества, проращивание) – растение (корнеобитаемая среда, атмосфера, стимулирующие воздействия) – урожай (выход, качество, сохранность)»;

изучение системных свойств стимулирующих электротехнологий и разработка современных адаптивных систем автоматического управления биопродукционным процессом, в том числе с использованием компьютерных информационных технологий – выполнение исследований на стыке двух огромных областей знаний – агрофизики и электротехнологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы растениеводства : учеб. пособие / И. П. Козловская [и др.]; под ред. И. П. Козловской. – Минск : Беларусь, 2010. – 328 с.

2. Корнеев, Г. В. Растениеводство с основами селекции и семеноводства / Г. В. Корнеев, П. И. Подгорный, С. Н. Щербак; под ред. Г. В. Корнеева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 575 с.

3. Исследование структурных изменений биотипического состава патогенов и фитофагов при интродукции растений : Отчет заключительный по ГПОФИ «Динамика биологического разнообразия природной и интродуцированной флоры и фауны...» («Биологические ресурсы»), выполненной в 2003–2005 гг. в ЦБС НАН Беларуси, № Госрегистрации 20019673.

4. Лахвич, Ф. А. Пестициды : опасность или необходимость? [Электронный ресурс] / Ф. А. Лахвич // Беларуская думка. – 2008. – № 11, ноябрь. – Режим доступа : http://beldumka.belta.by/isfiles/000167_120794.pdf. – Дата доступа : 6.01.2013.

5. Пестициды и растение : влияние на ион-транспортные системы плазматической мембраны : монография / В. М. Юрин [и др.]. – Минск : БГУ, 2011. – 260 с. : ил. – ISBN 978-985-476-900-4.

6. Корко, В. С. Повышение эффективности процессов переработки и контроля влагосодержания злаков электрофизическими методами : монография / В. С. Корко – Минск : БГАТУ, 2006. – 349 с.

7. Корко, В. С. Предпосевная доработка семян злаковых культур электрофизическими методами / В. С. Корко, А. Е. Лагутин, Е. А. Городецкая // Агропанорама. – 2009. – № 5. – С. 16–19.

8. Казанина, М. А. Обработка и хранение сельскохозяйственной продукции / М. А. Казанина, В. Я. Воронкова. – Минск : Ураджай, 1988. – 160 с.

9. Азин, Л. А. Активация семян ячменя / Л. А. Азин, П. П. Романов // Уральские нивы. – 1978. – № 7. – С. 26–30.

10. Магеровский, В. В. Разработка твердотельных лазеров голубой области спектра для предпосевной обработки семян / В. В. Магеров-

ский, С. А. Чудин // Энергосберегающие технологии, оборудование и источники электропитания для АПК : сб. трудов. – Вып. 421(151). – Краснодар : КубГАУ, 2006. – С. 185–191.

11. Повышение болезнеустойчивости и урожайности сельскохозяйственных культур воздействием на семена электромагнитным излучением низкой частоты и микро- и макроэлементами (Рекомендации) / В. Ф. Фирсов [и др.]. – Мичуринск, 2005. – 19 с.

12. Курзин, Н. Н. Методология проектирования устройств и оценка электрофизического воздействия на биологические объекты сельскохозяйственного производства / Н. Н. Курзин. – Краснодар, 2008. – 300 с. : ил.

13. Пашинский, В. А. Энергосберегающая технология предпосевной обработки семян электрическим полем / В. А. Пашинский // Сахаровские чтения 2009 года : экологические проблемы XXI века : Материалы 9-й международной научной конференции, 21–22 мая 2009 г., г. Минск, Республика Беларусь / под ред. С. П. Кундаса, С. Б. Мельнова, С. С. Позняка. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2009. – С. 326–327.

14. Электротехнология : учебн. и учеб. пособия для вузов / В. А. Карасенко [и др.]. – Москва : Колос, 1992. – 304 с.

15. Васильев, А. Н. Электротехнология и управление при интенсификации сушки зерна активным вентилированием / А. Н. Васильев. – Ростов-на-Дону : Терра-Принт, 2008. – 240 с.

16. Бармин, Н. В. Воздействие электрического поля промышленной частоты на семена сельскохозяйственных культур / Н. В. Бармин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – Самара : СГСХА, 2006. – № 3. – С. 118–125.

17. Долговых, О. Т. Разделение семенных смесей по влажности отдельных зерен / О. Т. Долговых, А. М. Ниязов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 5. – С. 14–15.

18. Шмигель, В. В. Зерновой слой в электростатическом поле / В. В. Шмигель, А. М. Ниязов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1998. – № 6. – С. 13–14.

19. Казакова, А. С. Влияние предпосевной обработки семян ярового ячменя электромагнитным полем переменной частоты на их посевные качества / А. С. Казакова, М. Г. Федорищенко, П. А. Бондаренко // Технология, агрохимия и защита с.-х. культур : межвузовский сборник научных трудов. – зерноград : ФГОУ ВПО АЧГАА, 2005. – С. 207–210.

20. Кобзев, А. П. Основные направления исследований на ускорителе ЭГ-5 ОИЯ / А. П. Кобзев // Труды XII Междунар. конф. по электростатическим ускорителям. – Обнинск, 1999. – С. 33–38.

21. Элементный анализ аэрозолей / А. П. Кобзев [и др.] // Сообщения ОИЯИ P18-2005-188.

22. Ламан, Н. А. Физиологические основы и технологии предпосевной обработки семян : ретроспективный анализ, достижения и перспективы / Н. А. Ламан // Матер. 5-й Междунар. научн. конф. «Теоретические и прикладные аспекты биохимии и биотехнологии растений». – Минск, 2007. – С. 3.

23. Electrophysical complex on basis of the electrostatic accelerator ESA-2 for fundamental and applied investigations / A. E. [et al.] // RuPAC'06, Novosibirsk, September 2006. – THLO05, p. 129 (2006).

24. Городецкая, Е. А. Анализ биологических объектов ядерно-физическими методами / Е. А. Городецкая, А. Е. Лагутин // Inzenieria i aparatura chemiczna. – 2007. – № 1. – С. 79–80.

25. Садкевич, К. Польская аппаратура для исследования зерна, муки и хлебобулочных изделий / К. Садкевич, Ю. Садкевич, Я. Садкевич. – Bydgoszcz : Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, 2005. – 156 с.

26. Басов, А. М. Признак разделения зерновых частиц в электрическом поле / А. М. Басов, И. Ф. Чиров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 3. – С. 57–58.

27. Об использовании нетрадиционных источников энергии для предпосевной обработки семян / А. Ф. Путинцев [и др.] // Селекция и семеноводство. – 2003. – № 1–2. – С. 14–16.

28. Шмигель, В. В. Сепарация и стимуляция семян в электрическом поле : дис. ... д-ра с.-х. наук / В. В. Шмигель. – Кострома, 2004. – 405 с.

29. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – Москва : Высш. шк., 1986. – 263 с.

30. Изаков, Ф. Я. Нетрадиционные СВЧ-технологии для экологически чистого земледелия / Ф. Я. Изаков, Н. Д. Полевик, В. В. Жданов // Микроволновые технологии в народном хозяйстве. – Одесса, 1996. – С. 18–26.

31. Старухин, Р. С. Метод предпосевной обработки семян с использованием эллиптического электромагнитного поля / Р. С. Старухин, И. В. Белицын, О. И. Хомутов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 97–103.

32. Городецкая, Е. А. Диэлектрическая сепарация пищевой картофельной муки : дис. ... канд. техн. Наук / Е. А. Городецкая. – Москва, 1993. – 165 с.

33. Ксенз, Н. В. Анализ электрических и магнитных воздействий на семена / Н. В. Ксенз, С. В. Качеишвили // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – № 5. – С. 10–12.

34. Шмигель, В. В. Поведение заряженных эллипсоидальных частиц в электростатическом поле / В. В. Шмигель // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 5. – С. 13–14.

35. Шмигель, В. В. Характер поведения семян в электростатическом поле / В. В. Шмигель // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1997. – № 6. – С. 32–33.

36. Тарушкин, В. И. Машины для отбора биологически ценных семян / В. И. Тарушкин // Техника в сельском хозяйстве. – 1994. – № 6. – С. 18–19.

37. Тарушкин, В. И. Новые сепараторы семян / В. И. Тарушкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 12. – С. 44–45.

38. Тарушкин, В. И. Новые электросепараторы семян / В. И. Тарушкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1996. – № 4. – С. 32–33.

39. Предпосевная многослойная электростимуляция семян / В. В. Шмигель [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1997. – № 3. – С. 4.

40. Тарушкин, В. И. Технологический комплекс диэлектрических сепарирующих устройств / В. И. Тарушкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1983. – № 4. – С. 33–38.

41. Луценко, А. М. Обработка семян ультразвуком и урожай / А. М. Луценко // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1974. – № 1. – С. 128–130.

42. Эльпинер, И. Е. О действии ультразвуковых волн на растительные клетки / И. Е. Эльпинер. – Москва : Наука, 1964. – 456 с.

43. Ресурсы животного и растительного мира : отчет о НИР ГПОФИ по заданию 39 «Исследование эффективности использования методов электросепарации и плазменно-микроволновой обработки посевного и посадочного материала представителей ботанических коллекционных фондов для повышения их продуктивности и устойчивости при хранении» / науч. рук. Е. А. Городецкая / НАН Беларуси, 2010. – 85 с.

44. Влияние плазменно-микроволновой обработки на посевные качества семян / Е. А. Городецкая [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2007. – № 6. – Т. 51. – С. 68–72.

45. <http://rushitech.polymixweb.com/embib.htm>.

46. Заяц, Е. М. Электрохимическое изменение свойств органических дисперсных гидросистем / Е. М. Заяц, В. С. Корко // Материалы международной НТК «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК». – Минск : БГАТУ, 2009. – С. 151–154.

47. Шапошник, В. А. Необратимая диссоциация молекул воды на межфазной границе ионообменной мембраны и раствора электролита при электродиализе / В. А. Шапошник, А. С. Кастючик, О. А. Козадерова // Электрохимия. – 2008. – Т. 44. – № 9. – С. 1155–1159.

48. Некоторые аспекты получения и применения электрохимически активированного раствора – анолита АНК / В. М. Бахир [и др.] // Электрохимическая активация в медицине, сельском хозяйстве, промышленности : третий Международный Симпозиум : тезисы докладов и краткие сообщения. – Москва, 2002. – С. 3–25.

49. Перспективы использования факторов воздействия в растениеводстве / Н. Ф. Батыгин [и др.]. – Москва : ВАСХНИЛ, 1978. – 78 с.

50. Нормы и рационы кормления с.-х. животных : справ. пособие. – Москва : Агропромиздат, 2000. – 46 с.

51. А. с. 1650065 : Способ получения пищевой картофельной муки / Е. А. Городецкая [и др.]. – Москва : МИИСП им. Горячкина В. П., 1991.

52. А. с. 1764701 : Устройство для разделения сыпучих материалов / Е. А. Городецкая [и др.]. – Москва : МИИСП им. Горячкина В. П., 1992.

53. Решетников, В. Н. Электросепарация и плазменно-микроволновое воздействие на семена и растительные объекты / В. Н. Решетников, Е. А. Городецкая, В. В. Ажаронок // Inzenieria i aparatura chemiczna. – 2006. – № 1–2. – С. 66–67.

54. Ацапкин, А. И. Лабораторная и полевая всхожесть семян гаалеги восточной под влиянием регуляторов роста в условиях северного Казахстана : дипломная работа / А. И. Ацапкин. – Минск : БГАТУ, 2008 г.

55. Красная книга природы Санкт-Петербурга / отв. ред. Г. А. Носков. – Санкт-Петербург : Проффессионал, 2004. – 287 с.

56. Корко, В. С. Стимулирование всхожести семян зеленных культур электромагнитным полем / В. С. Корко, Н. И. Ермалицкий // Материалы международной НТК «Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК». – Минск : БГАТУ, 2009. – С. 162–165.

57. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации технологических процессов / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : УПИ им. Кирова, 1975. –140 с.

Для заметок

Для заметок

Научное издание

Корко Виктор Станиславович, Городецкая Елена Анатольевна

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СТИМУЛЯЦИИ
РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*
Редактор *А. И. Третьякова*
Компьютерная верстка *А. И. Третьяковой*
Дизайн и оформление обложки *И. А. Усенко*

Подписано в печать 1.07.2013. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 10,55. Тираж 100 экз. Заказ 408.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.