

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехнологии

## ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением  
по аграрному техническому образованию  
в качестве пособия для студентов  
учреждений высшего образования  
по специальности 1-74 06 05  
Энергетическое обеспечение сельского хозяйства*

Минск  
БГАТУ  
2014

УДК 631.371:621.31(07)

ББК 31.264я7

Э45

*Авторы:*

кандидат технических наук, доцент *И. Б. Дубодел* (гл. 4);  
доктор технических наук, профессор *Е. М. Заяц* (введение, гл. 5);  
кандидат технических наук, доцент *П. В. Кардашов* (гл. 2);  
кандидат технических наук, доцент *В. С. Корко* (гл. 1);  
кандидат технических наук, доцент *Е. А. Городецкая* (гл. 3)

*Рецензенты:*

заведующий кафедрой «Энергоэффективность технологий»  
БГЭУ им. Сахарова, кандидат технических наук,  
доцент *В. А. Пашинский*,  
ведущий научный сотрудник Института физики НАН Беларуси,  
кандидат физико-математических наук *Р. Г. Шуляковский*

**Электротехнологии** : пособие / И. Б. Дубодел, Е. М. Заяц,  
Э45 П. В. Кардашов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2014. – 252 с.  
ISBN 978-985-519-733-2.

Рассмотрены физические основы и описаны устройства электрофизикохимических методов обработки материалов, электроимпульсных, электронно-ионных, ультразвуковых технологий.

Для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства.

УДК 631.371:621.31(07)

ББК 31.264я7

ISBN 978-985-519-733-2

© БГАТУ, 2014

## **ВВЕДЕНИЕ**

Электротехнология – наиболее перспективное и динамично развивающееся направление использования электроэнергии в сельскохозяйственном производстве. Применение ее методов позволяет реализовать наиболее энергоэффективные технологии, которые невозможно выполнить другими способами, заменить распространенные химические препараты экологически чистыми приемами воздействия на биологические объекты.

В учебном пособии рассмотрены основы электрофизических и электрохимических методов и устройства обработки материалов, электроимпульсные, электронно-ионные технологии, применение ультразвука, магнитных полей в технологических процессах.

Электрофизические и электрохимические методы основаны на непосредственном применении в производственных процессах различных электрических и магнитных явлений. Это позволяет использовать не только тепловое действие электрического тока (как в электротермии), но и другие технологические свойства электромагнитного поля: механическое (механические операции и работы выполняются без применения промежуточных преобразователей – электродвигателей), химическое (получение химических реагентов, ускорение химических превращений при обработке продуктов и кормов, электролитические процессы в ремонтном производстве), биологическое (управление поведением животных, подавление или стимулирование жизнедеятельности микрофлоры и фауны).

Многие современные технологические процессы стали возможны благодаря электротехнологии. В настоящее время разработано более 300 электротехнологических процессов. В сельскохозяйственном производстве широко используют электрические изгороди, ионизаторы воздуха в животноводческих и других помещениях, электрические сепараторы семян и зерна, электроаэрозольные установки, электрофильтры воздуха, установки магнитной очистки семян и кормов, электрообеззараживания навоза, почвы, предпосевной и предпосадочной обработки семенного и посадочного материала. При ремонте машин применяют различные способы электрообработки металлов, восстановления, упрочнения, очистки деталей.

# 1. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1. Природные электрофизические факторы в жизнедеятельности биологических объектов

Электротехнологии сельскохозяйственного производства воздействуют на биологические объекты и среды растительного и животного происхождения, поэтому наряду с искусственным влиянием факторов электромагнитного поля необходимо знать и учитывать природные электрофизические факторы в их жизнедеятельности.

Возникновение и эволюция всего живого на Земле (растений, животных, человека, других организмов) происходит вследствие электрофизических и электрохимических природных факторов и в условиях этих явлений. Существование и жизнедеятельность биологических объектов возможны только благодаря непрерывно протекающим в них электрофизическим и электрохимическим процессам как на уровне клетки (обмен веществ, деление клетки и т. п.), так и в целом в жизни растений и животных.

В жизни растений важнейшую роль играют: *фотосинтез* – процесс расщепления углекислоты и накопления углеводов в хлорофилле в виде зеленой массы; *электролиз*, под действием которого происходит преобразование питательных веществ в легкоусвояемое растениями состояние; *электроосмос*, обеспечивающий направленное пропускание растворов стенками (мембранами) клеток; *электрофорез*, под действием которого коллоидные частицы движутся из почвы в растение и обратно, и другие процессы.

Все жизненные функции животных (переработка и усвоение кормов, передача сигналов нервной системы, зрительное восприятие, поведенческие реакции и т. п.) основаны на электрофизикохимических явлениях.

Таким образом, электрофизикохимические явления, наряду с биологическими определяют все жизненные процессы. По этому поводу академик П. Л. Капица писал: «Теперь мы знаем, что все

жизненные процессы имеют электрическую природу и связаны с прохождением тока».

Природные электрофизикохимические факторы являются неотъемлемой составной частью условий окружающей среды, в которой возникали и развивались биологические объекты, поэтому все живое имеет определенные электрические параметры и определенные связи с природным электричеством, изменение или разрыв которых приводят к угнетению их жизнедеятельности и даже гибели.

Живые клетки, растения, животные обладают определенным потенциалом относительно Земли, и чем он выше, тем жизнеспособнее биологический объект. Мертвые биологические объекты теряют свой потенциал.

Из приведенных примеров вытекает важный практический вывод: внешними (искусственными) электрическими воздействиями можно целенаправленно управлять состоянием, поведением и развитием биологических объектов и сред, стимулировать или, наоборот, подавлять их жизнедеятельность.

К природным факторам относят: солнечную радиацию; ионное состояние атмосферы; электрическое поле Земли; магнитное поле Земли; грозовые разряды; электрические токи в атмосфере; электрические токи в Земле и др.

*Солнечная радиация.* Солнце – это энергетическая база Земли и, следовательно, всего живого. Спектр излучения Солнца – это электромагнитные колебания в диапазоне длин волн от нескольких нанометров до метровых радиоволн. Количество энергии, посылаемой Солнцем на Землю, огромно и характеризуется «солнечной постоянной» (энергетическая облученность), равной  $1350 \text{ Вт/м}^2$ . В атмосфере поглощается около 40 % солнечной энергии, так что энергетическая облученность поверхности Земли составляет около  $860 \text{ Вт/м}^2$ . Под действием солнечного излучения протекают важнейшие процессы фотосинтеза и другие биохимические и биологические процессы.

*Ионное состояние атмосферы.* Атмосфера Земли насыщена электрическими заряженными частицами – ионами. Средняя их концентрация над сушей: положительные  $n_+ = 750 \cdot 10^6$  ионов/ $\text{м}^3$ , отрицательные  $n_- = 650 \cdot 10^6$  ионов/ $\text{м}^3$ .

Ионное состояние атмосферы влияет на процессы обмена, усвоения продуктов питания и другие факторы жизнедеятельности и обуславливает электрическую проводимость атмосферы. Среднее значение удельной электрической проводимости атмосферы у поверхности Земли составляет  $2 \cdot 10^{-14}$  См/м.

*Электрическое поле Земли.* Земля и атмосфера представляют собой гигантский конденсатор, у которого отрицательный полюс находится на поверхности. Потенциал Земли принимают равным нулю, с изменением высоты потенциал возрастает, и на расстоянии 12 км достигает 200 кВ. Земля имеет отрицательный заряд, равный  $5,7 \cdot 10^5$  Кл.

*Электрические токи в атмосфере.* Так как существует электрическое поле Земли, ионы в атмосфере, то существуют и токи. Плотность тока в атмосфере  $(2-3) \cdot 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup>. Электрические токи в Земле замыкают атмосферные (рис. 1.1). Суммарный ток составляет 1480 А.

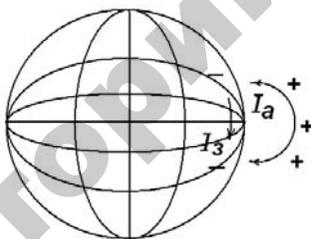


Рис. 1.1. Схема протекания электрических токов в Земле и в атмосфере

*Магнитное поле Земли.* Жизнедеятельность биологических объектов связана с движением ионов и электронов. Так как всякое движение заряженных частиц сопровождается появлением магнитного поля, то и магнитное поле тоже является одним из определяющих факторов.

Магнитное поле среды, окружающей биологические объекты (животных, птиц, людей, растения) складывается из двух основных составляющих: магнитного поля Земли и магнитных полей искусственного происхождения (работающие линии электропередач, электрические двигатели, генераторы и т. п.). Давно обнаружена

биологическая ориентация растений, перелета птиц, влияние магнитных бурь и др. Например, семена, высаженные корешком зародыша к южному магнитному полюсу, прорастают быстрее, чем высаженные корешком к северному. Широко применяется магнитотерапия. Магнитокардиограф позволяет выявить начало серьезных сердечных заболеваний на более ранней стадии, чем электрокардиограф.

Характерная особенность действия магнитного поля заключается в том, что живой организм «прозрачен» для магнитного поля. Даже сильный огонь не сразу приводит к тяжелому исходу. Система кровообращения, мускулатура могут шунтировать опасный ток. Проникающая радиация частично или полностью поглощается в поверхностных областях тела. А магнитное поле действует на весь организм сразу: от тела и органа до клетки и отдельных молекул и атомов.

Напряженность магнитного поля на поверхности Земли невелика и непостоянна: она колеблется по суткам, месяцам, годам. Иногда происходят резкие локальные увеличения напряженности поля. Причина их – спорадические явления, возникающие на Солнце и сопровождающиеся изменением солнечной активности. Во время магнитных бурь, продолжающихся от минут до суток, напряженность магнитного поля Земли возрастает в сотни, иногда и в тысячи раз.

*Грозовые разряды.* Разряд молнии – это образование, хотя и кратковременное, электрической цепи, сопровождающееся возникновением тока большой плотности. В главном канале грозового разряда сила тока – 20–40 кА; напряжение –  $10^9$  В; длительность разряда – 1 мс; длина канала разряда (молнии) – до 10 км; толщина разряда – до 0,2 м.

Ток, особенно таких значений, вызывает появление электрического и магнитного поля достаточно высокой напряженности, которые влияют на живые объекты. Это вызывает беспокойство и изменение самочувствия перед грозой. Повышение напряженности электрического и магнитного полей в атмосфере приводит к своеобразной стерилизации (гибели иногда целых популяций микроорганизмов и к изменению газового состава воздуха), появлению в нем микрогазовых примесей (например, вредных закиси и окиси азота), что опасно.

Электромагнитные поля ЛЭП высоких и сверхвысоких напряжений в какой-то степени имитируют предгрозовую ситуацию. При проектировании крупных ЛЭП требуется специальное санитарно-гигиеническое нормирование, так как их влияние отражается на биосфере.

## **1.2. Классификация электрофизических и электрохимических методов обработки материалов, области применения**

В технологических процессах сельскохозяйственного производства находят использование различные электрические и магнитные факторы и явления электромагнитного поля: электрический ток (переменный, постоянный, импульсный и др.); электрическое поле (статическое, переменное, высокочастотное и т. п.); магнитное поле (переменное, постоянное, импульсное и др.); ультразвуковые колебания; оптические и другие излучения и т. п. Каждый из этих факторов и явлений обладает в определенных условиях технологическими свойствами – способностью превращаться в рабочей зоне в различные виды энергии (механическую, химическую, тепловую и т. д.) и воздействовать на обрабатываемый материал для достижения положительного технологического эффекта.

В основу принятой классификации, в соответствии с которой расположен материал данной части, положен вид используемого электрофизического фактора (ток, поле и т. д.) и способ его получения, что определяет особенности оборудования (преобразователей, источников питания), общие методы его расчета и выбора.

*Основные признаки классификации:* 1. Природа воздействия на предмет труда (электрофизические и электрохимические методы). 2. Вид электрофизического фактора: постоянный или переменный электрический ток (электрохимические технологии, обработка током и др.); импульсный ток (электроимпульсные технологии); электрическое поле (электронно-ионные технологии); магнитное поле (магнитная обработка); ультразвук (УЗ-технологии).

Электротехнологические установки, обеспечивающие непосредственный ввод электрической энергии в обрабатываемый материал, имеют

различные типы электродных систем, во многом аналогичные применяемым в электродных нагревателях. Прямой (электродный) нагрев применяется для электропроводящих материалов (проводников второго рода). Обрабатываемый материал помещают в электродную камеру и подают необходимое напряжение.

Для электротехнологической обработки кормовых и пищевых материалов применяют и переменный и постоянный ток, используя все преимущества того или другого рода тока для достижения наибольшего технологического эффекта и снижения энергетических и других издержек.

С учетом особенностей обрабатываемых сред, технологических требований, приэлектродных процессов, к электродным системам электротехнологических установок предъявляется ряд дополнительных требований: обеспечение равномерного электрического поля по объему обрабатываемого материала; инертность материала электродов; надежный электрический контакт материала с электродами в течение всего процесса обработки; обеспечение допустимой плотности тока в межэлектродном пространстве. Картину электрического и, следовательно, температурного полей обуславливают форма и размеры электродной системы.

Кинетика процесса обработки корма определяется не только температурной характеристикой проводимости массы, но и многими другими факторами, которые требуют изучения, исследования и соответствующего учета. Например, с возрастанием температуры влажной массы происходит изменение проводимости, теплоемкости и других параметров, которые можно использовать как информационные факторы при разработке средств автоматизации и управления. Для термозависимых сред рациональным считают совмещенное конструктивное исполнение электродного нагревателя и первичного измерительного преобразователя температуры.

Выполнение изложенных требований к электродным системам электротехнологических установок влечет необходимость исследования и учета температурных зависимостей электрофизических характеристик обрабатываемых материалов (в основном, проводимости), выбор электродов, типа электродной системы, расчета ее параметров, принятия конструктивных или иных мер по обеспечению равномерности электрического и, следовательно, температурного полей, требуемой интенсивности и глубины процесса обработки.

Основные области применения электрофизических и электрохимических методов в сельскохозяйственном производстве: очистка и сортировка зерна и семян; предпосевная и предпосадочная обработка семенного материала; обработка воды (снижение накипеобразования, активация, опреснение); получение дезинфицирующих растворов; обработка и обеззараживание кормов, почвы, навоза, стоков, отходов переработки и др.; управление поведением животных; очистка, ионизация и озонирование воздуха; рассоление почв; сушка материалов; обработка металлов и др.

### 1.3. Электрофизикохимические явления в электролитических средах

Прохождение электрического тока в электролитах сопровождается переносом вещества, поляризацией сред, электрокинетическими явлениями (электрофорез, электроосмос, потенциал течения), электрохимическими проявлениями.

*Поляризация* – смещение или выравнивание зарядов вещества под воздействием электрического поля. Различают электронную, ионную, миграционную, концентрационную, ориентационную и электрохимическую поляризацию. При обработке 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 электрические заряды. Если раствор имеет нормальную концентрацию, то нормальный электродный потенциал, В:

$$\varphi_n = -(RT / zF) \ln c_0, \quad (1.1)$$

где  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – термодинамическая температура, К;  
 $z$  – заряд иона с соответствующим знаком;

$F = 96485$  Кл/моль – число Фарадея;

$c_0$  – концентрация ионов до протекания тока, моль/м<sup>3</sup>.

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

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (RT / zF) \ln(c_1 / c_2) \quad (1.2)$$

или  $\varphi = \varphi_n + (RT / zF) \ln|c|$ ,

где  $c_1$  и  $c_2$  – концентрации потенциалопределяющих ионов на электроде и в растворе, моль/м<sup>3</sup>;

$c$  – текущее значение концентрации раствора, моль/м<sup>3</sup>.

Изменение концентрации и потенциала наблюдают не только на электродах, но также на мембранах и в растворе. Причина поляризации – различная активность ионов. Связь между силой тока и поляризацией (перенапряжением) для постоянного тока рассмотрена в разделе 2, а для переменного определяется уравнением Крюгера:

$$\eta_{\text{п}} = \frac{I_F RT}{n^2 F^2 c_0 \sqrt{\omega D}} \sin(\omega\tau - \pi / 4), \quad (1.3)$$

где  $I_F$  – амплитуда тока, А;

$n$  – число электронов, отвечающее разряду одной частицы;

$\omega$  – угловая частота тока, с<sup>-1</sup>;

$D$  – коэффициент диффузии потенциалопределяющих (химически активных) ионов, м<sup>2</sup>/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 адсорбции перераспределяются электрические заряды, и образуется двойной электрический слой (рис. 1.2).

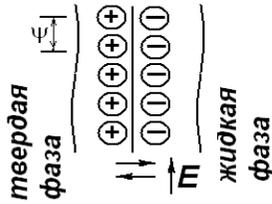


Рис. 1.2. Схема образования двойного электрического слоя

Возникает «скачок» потенциала  $\psi$ . Если вдоль границы раздела фаз приложить напряжение от внешнего источника, создав некоторую разность потенциалов, то слои твердого тела и прилегающей к нему жидкости перемещаются в сторону противоположного (по сравнению со знаком заряда этого слоя) полюса источника.

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:

$$v = \varepsilon \psi E / (4\pi \mu_{\text{ж}}), \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;

$\psi$  – электрокинетический потенциал, В;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

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

Скорость электрофореза определяется формулой Смолуховского, м/с:

$$v = \varepsilon \zeta E / 4\pi \mu_{\text{ж}}, \quad (1.5)$$

где  $\zeta$  – дзета-потенциал (часть электрокинетического потенциала), В.

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

При прохождении жидкости через пористые среды, особенно с избирательной проницаемостью (например, ионитовые мембраны), ионы

разделяются. На этом основаны процессы электродиализа и активации водных растворов.

Технологическое применение физико-химического действия тока в сельскохозяйственном производстве базируется в основном на следующих процессах и методах, изучаемых физической химией: *электролизе, электрокоагуляции, электроосмосе, электродиализе.*

*Электрохимические процессы* в электролитических средах с током связаны с окислительно-восстановительными реакциями, изменением условий переноса заряда, переносом заряженных частиц через мембраны и т. п.

*Электролиз* – совокупность окислительно-восстановительных реакций, протекающих на электродах, погруженных в электролит, через который проходит постоянный электрический ток.

Основное применение электролиза – получение различных веществ и нанесение покрытий. В ряде случаев электролиз имеет негативные последствия (например, загрязнение продуктами электролиза при электродном нагреве воды, почвы на постоянном токе).

Процесс электролиза протекает в специальном аппарате – *электролизере*, представляющем собой емкость с раствором или расплавом химреагента, в которой размещены электроды (рис. 1.3).

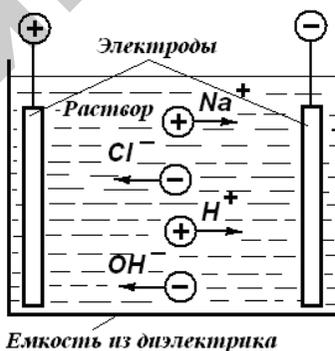
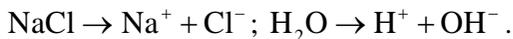


Рис. 1.3. Схема простейшего электролизера

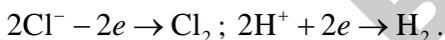
Если анод растворим, то его частицы поступают в раствор с положительным знаком (катионы) и перемещаются к катоду, где нейтрализуются и осаждаются – происходит перенос вещества с анода на катод (процесс гальваностегии и гальванопластики).

Рассмотрим процесс электролиза соли NaCl в воде. Под действием электрического поля вещества диссоциируют на ионы:

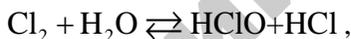


При этом ионы движутся к соответствующему электроду: положительные  $\text{Na}^+, \text{H}^+ \rightarrow$  к катоду, отрицательные  $\text{Cl}^-, \text{OH}^- \rightarrow$  к аноду.

На электродах выделяется хлор и водород:



В объеме раствора хлор соединяется с водой, образуя соляную и хлорноватистую кислоты:



а натрий образует щелочь и гипохлорид натрия:



Хлорноватистая кислота и гипохлорид натрия являются сильными окислителями. Их растворы используют для дезинфекции молочного, доильного и другого оборудования.

Электролиз можно использовать для получения таких веществ, как  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , способствующих коагуляции дисперсных веществ.

*Коагуляция* – процесс перевода растворенных или взвешенных в жидкости частиц в осадок. При коагуляции происходит объединение отдельных молекул, находящихся в растворе, в агрегатные скопления.

Существуют различные методы коагуляции: термические, химические, термохимические, механические, электрические. При химических методах в раствор вводят специальные вещества – коагулянты, которые обеспечивают перевод частиц в осадок.

*Электрокоагуляция* – разделение коллоидного раствора на коагулянт (осадок) и дисперсную среду в электрическом поле. Сущность метода, основанного на получении коагулянта при помощи электролиза, заключается в анодном растворении металла (алюминия, железа) в водной среде с последующим образованием соответствующего гидроксида  $Al(OH)_3$  или  $Fe(OH)_3$ . Хлопья гидроксида, практически нерастворимого в воде, своей поверхностью поглощают взвешенные частицы и вместе с ними выпадают в осадок.

Электрокоагуляцию на принципе электролиза применяют для очистки природных и сточных вод. В электрокоагуляторах алюминиевые или железные пластины-электроды собирают в пакеты с межэлектродным расстоянием 10–12 мм. Плотность тока составляет 10–40 А/м<sup>2</sup>.

В электродной камере с ионоселективной мембраной происходит разделение ионов, изменяется кислотность раствора, что приводит к коагуляции и выпадению осадка. На этом основаны технологии электрокоагуляции белков из молочной сыворотки, картофельного сока.

Преимущества электрокоагуляции перед химической коагуляцией – экономия реагента, простота обслуживания, возможность полной автоматизации.

Растворение электрода или осаждение на нем ионов зависит от его потенциала. Электрод, помещенный в раствор с ионами его вещества, при некотором *равновесном электродном потенциале* (РЭП) не растворяется и ионы на нем не осаждаются.

Если на электрод подать отрицательный потенциал по сравнению с равновесным электродным, то начнется выделение вещества, если положительный – растворение электрода. Значение РЭП для различных металлов находится в пределах от –2,42 В (калий) до +0,8 В (серебро). За нулевой РЭП принят потенциал водородного электрода. *Разность между действительным потенциалом и РЭП называют перенапряжением.*

Перенапряжение  $\eta_n$ , В, и плотность тока  $j$ , А/м<sup>2</sup>, связаны уравнением Тафеля:

$$\eta_n = a + b \lg j, \quad (1.6)$$

где  $a$  и  $b$  – константы.

Константы скорости реакции на аноде и катоде, м/с, зависят от потенциала электрода:

$$\begin{aligned}k_a &= k_0^a \exp\left[-a_a F (\phi - \psi_1) / RT\right]; \\k_k &= k_0^k \exp\left[-a_k F (\phi - \psi_1) / RT\right],\end{aligned}\quad (1.7)$$

где  $k_0^a$  и  $k_0^k$  – константы скорости анодной и катодной реакции, м/с;

$a_a$  и  $a_k$  – коэффициенты переноса заряда анодной и катодной реакций;

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

$\phi - \psi_1$  – «скачок» потенциала в плотной части двойного слоя, В;

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

$T$  – температура среды, К.

*Электрофлотация* основана на выносе взвешенных частиц на поверхность жидкости пузырьками газа, получаемого при электролизе.

#### 1.4. Электромелиорация почв

Электромелиорацию чаще всего проводят при рассолении почв с целью интенсификации процессов и снижения затрат. В засоленных почвах содержатся токсичные соли, угнетающе действующие на растения. По существующим технологиям такие почвы промывают пресной водой. Расход воды составляет 5–30 тыс. м<sup>3</sup>/Га, процесс длится 6–8 мес.

При использовании электрического тока для рассоления потребность в воде и время промывки значительно сокращаются, интенсификация процесса возрастает из-за повышения фильтрационной способности засоленной почвы при электроосмосе, увеличения растворимости солей вследствие изменения рН среды при электролизе, усиления массообменных процессов в электрическом поле. Это способствует вытеснению растворимых токсичных солей из верхнего почвенного слоя в нижележащие, откуда соли отводят с помощью дренажной системы.

В полевых условиях электромелиорацию проводят следующим образом. Выделенные участки (чеки) готовят к промывке по обычной технологии. Затем монтируют электроды (аноды и катоды), в качестве которых чаще всего применяют металлические трубы или стержни диаметром 35–70 мм. Глубина заделки катодов (3–5 м) обычно больше, чем анодов (0,6–1,8 м). Катоды и аноды устанавливают на одной линии. Расстояние между электродами в линии – 10–20 м, между линиями – 40–80 м (рис. 1.4).

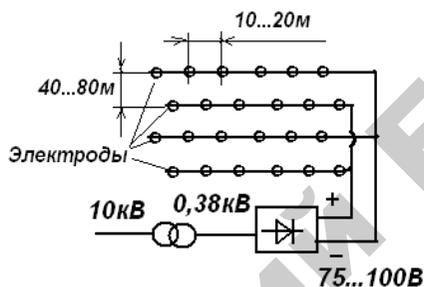


Рис. 1.4. Схема питания электродной системы при электрорассолении почвы

После заполнения чеков водой линии с одноименными электродами подключают к выпрямительному устройству. При постоянном токе напряжение – 75–100 В, плотность тока в почве – 1–10 А/м<sup>2</sup>, расход электроэнергии – 5–20 тыс. кВт·ч/га. Количество воды для промывки уменьшается примерно в три раза, процесс длится 1–2 мес.

Используя специфические свойства электрического тока, варьируя частотой и коэффициентом формы, можно снизить время промывки и энергозатраты на рассоление. Так, применяя асимметричные биполярные импульсы тока, удаляют токсичные ионы в 2–10 раз быстрее, сокращают расход воды, снижают энергозатраты в 2–3 раза. Перспективное направление в интенсификации растениеводства – электрохимическое обогащение почв, поливной воды или питательных растворов (в овощеводстве – защищенного грунта) микроэлементами (медью, марганцем, кобальтом и др.), которые вносят в виде ионов, получающихся при растворении анодов из соответствующих материалов. Обогащение почв таким способом

выполняют в период вспашки с помощью плуга со специальным рабочим органом.

Тяговое усилие почвообрабатывающих машин можно уменьшить на 10–15 %, создав на плуге (катоде) пленку влаги в результате электроосмоса и применяя в качестве анода предплужник. Явление электроосмоса используют для обезвоживания почв, грунтов и навоза. Например, если между анодом и перфорированным катодом поместить навоз, то электроосмотический поток вынесет влагу из него через катод. Недостаток такого способа – большой расход электроэнергии.

### 1.5. Обработка в электрическом поле семян и растений

Электрофизические воздействия на семена, растения могут вызывать биологические эффекты, т. е. стимулировать или подавлять их жизнедеятельность.

*Электростимуляция* (предпосевная обработка) семян необходима для увеличения энергии их прорастания, всхожести, урожайности культур, устойчивости к неблагоприятным погодным условиям, сокращения вегетационного периода. При возбуждении семян усиливается деление клеток, повышается влагопоглощение и компенсируется недостаточное воздействие природных факторов (солнечной радиации, температуры и т. д.).

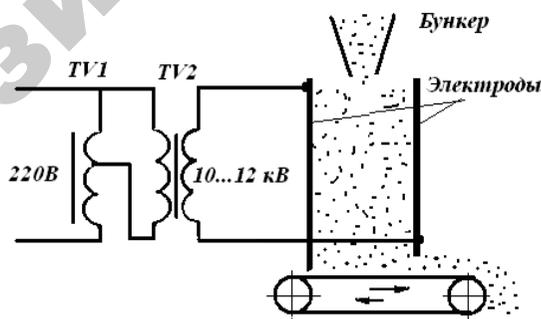


Рис. 1.5. Схема установки для предпосевной обработки семян током промышленной частоты

Семена помещают между обкладками конденсатора, где создано электрическое поле низкой или высокой частоты (рис. 1.5 и 1.6).

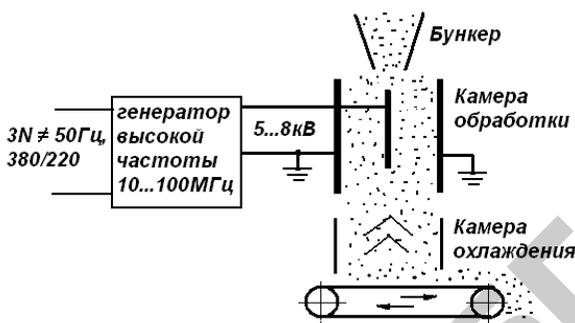


Рис. 1.6. Схема установки для предпосевной обработки семян током высокой частоты

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.

Для обработки семян можно использовать установки высокочастотной сушки: напряженность поля – около  $10^4$  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/м<sup>3</sup>:

$$D = 0,555 \cdot 10^{-5} \varepsilon \operatorname{tg} \delta f E^2 \tau, \quad (1.8)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость семян;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;

$f$  – частота, Гц;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$\tau$  – экспозиция, с.

Доза обработки и напряженность электрического поля являются нормируемыми величинами. Для расчета времени обработки (экспозиции) необходимо знать  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  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.

Повышается 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.

Урожай зеленой массы можно повысить на 40 %, пропуская через почву по 12 ч в сутки постоянный электрический ток плотностью  $0,1 \text{ A/m}^2$  или переменный, промышленной частоты, плотностью  $5 \text{ A/m}^2$ . 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 (рис. 1.7), 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 электроплазмоллизе и в борьбе с сорной растительностью.

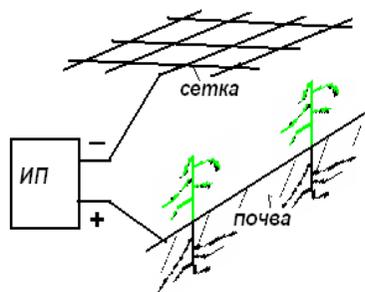


Рис. 1.7. Схема создания потенциала атмосферы относительно земли в зоне растений

**Электроплазмолиз.** Отслоение протопласта клетки от ее оболочки, сопровождающееся сжатием протоплазмы, называют *плазмолизом*, который может быть достигнут механическими, термическими, электрическими и другими методами. Для электроплазмолиза нужны токи промышленной или повышенной частоты либо импульсы тока постоянной полярности. Постоянный ток не применяют из-за возможного загрязнения обрабатываемой массы продуктами электролиза.

Электроплазмолиз проводят в электроплазмолизаторах, чаще всего вальцового типа. Это два металлических цилиндра-электрода, вращающихся встречно. В зазор между ними поступает растительная масса (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Схема электроплазмолизатора вальцового типа

Чтобы она обрабатывалась равномерно по длине зазора, один из валцов выполняют из нескольких секций, разделенных изоляционными дисками.

Оптимальные параметры по критерию энергоемкости при обработке током промышленной частоты: напряженность – 70 кВ/м, скорость прохождения материала – 30 м/с, плотность массы в зоне контакта с электродом – 1000 кг/м<sup>3</sup>, высота слоя – 56 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. Энергоемкость 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 – 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 Беларуси.*

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 размещения электродной системы (рис. 1.9). В первом варианте (рис. 1.9, а) ток от источника питания (ИП) протекает по цепочке: навесной электрод (перемещаемый над поверхностью почвы)–стебель растения–корневая система–почва–заземленный электрод (перемещаемый в толще земли или на ее поверхности).

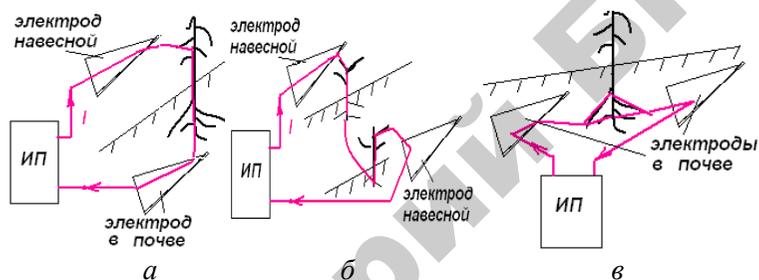


Рис. 1.9. Варианты размещения электродных систем

Во втором варианте (рис. 1.9, б) ток протекает от одного навесного электрода к другому через стебли и корневую систему двух растений и почву между ними. В третьем варианте (рис. 1.9, в) ток течет 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 аграрном техническом университете и Костромской государственной сельскохозяйственной академии. В качестве навесных электродов использовали пластины и стержни с шириной захвата 0,5 м, заземленных – катки диаметром 0,1 м 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 или 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, скорость перемещения устройства – около 0,2 км/ч, ширина захвата – 1 м, мощность СВЧ-генератора, необходимая при этом режиме, – 26 кВт.

## 1.6. Электрохимические технологии обработки воды и растворов

Установлено, что при разделении анодного и катодного пространств не только ионитовыми мембранами (рис. 1.10), но и пористыми диафрагмами (бельтинговая, хлориновая ткань и т. д.) наряду с кислотностью и щелочностью исходного раствора изменяются химическая и биологическая активность растворов, их физические свойства, происходит активация водных растворов.

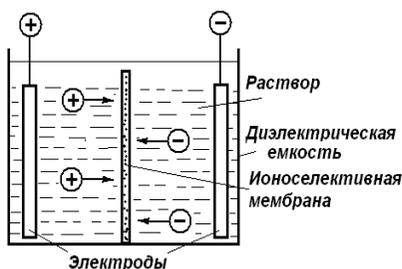


Рис. 1.10. Схема электрохимического активатора водных растворов

*Электродиализ* – процесс переноса ионов в растворе через ионо-селективные мембраны под действием электрического поля. Мембраны, изготовленные из специальных ионообменных материалов, содержат высокую концентрацию неподвижных (фиксированных) ионов, химически связанных с каркасом мембраны, и поэтому пропускают ионы только одного знака.

Основные области применения электродиализа – активация воды и водных растворов, опреснение воды.

При электродиализе *анолит* – раствор, находящийся в прианодном пространстве, – имеет кислотный показатель, а *католит* – в прикатодном – щелочной. Анолит обладает бактерицидными свойствами, католит стимулирует процессы регенерации и развития клеток.

Активированные растворы изменяют скорость химических реакций при получении бетона, силосовании зеленой массы, мойке деталей и др.

*Основные области применения* активированной воды в сельскохозяйственном производстве: приготовление эмульсий (например, из глины – не оседает на дно); полив растений (щелочной водой); замачивание семян (щелочной водой); обеззараживание грунта, посуды, белья и т. п.; санобработка помещений, мебели, оборудования; увеличение продуктивности животных (поение, смачивание сухого корма); уменьшение и удаление накипи; лечение различных заболеваний; борьба с насекомыми в почве и на растениях и др.

Сущность *метода опреснения воды* заключается в следующем. Если через простейший трехкамерный электродиализатор (рис. 1.11), в котором средняя камера с исходной водой отделена от боковых ионоселективными мембранами *A* и *K*, пропускать электрический ток, то катионы растворенных солей, находящиеся в опресняемой воде, под действием электрического поля начнут перемещаться к катоду, а анионы – к аноду.

Мембраны проницаемы только для ионов определенного знака (*A* – для анионов, *K* – катионов). Таким образом, вода в средней камере опресняется, в анодной камере – подкисляется, а в катодной – подщелачивается.

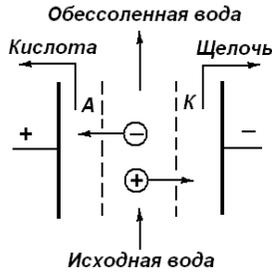


Рис. 1.11. Схема трехкамерного электродиализатора и механизма опреснения воды:  
*A* и *K* – анионовая и катионовая мембраны

В почве парников и теплиц накапливаются вредные вещества и болезни, поэтому необходимо периодически производить ее замену или обеззараживание, что является весьма трудоемким, затратным и длительным.

*Обеззараживание сельскохозяйственных сред* (парников, почвы, навоза, стоков, кормов и пр.) проводят, пропуская по ним постоянный или переменный ток, оказывающий термическое, химическое и биологическое (бактерицидное) воздействие, общая эффективность которого подчиняется известному закону Арндта–Шульце. Обработку проводят в стационарных или подвижных установках.

Почву предварительно увлажняют до 25–30 %, по определенной геометрии заглубляют металлические электроды, на которые подают питание от источника высокого напряжения (рис. 1.12).

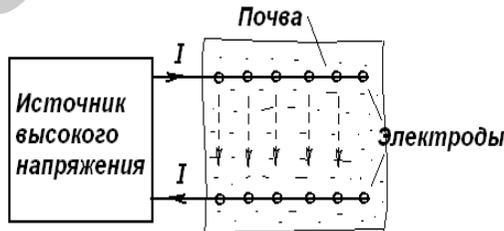


Рис. 1.12. Схема обеззараживания почвы электрическим током

Чтобы подавить грибковую микрофлору, рекомендуется обрабатывать почву при температуре 60–65 °С и напряженности электрического поля 5–7 кВ/м в течение 1,5–4 мин. Расход электроэнергии составляет 25–30 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

При обеззараживании навоза используют переменный и постоянный ток. Обеззараживание (дегельминтизацию) навоза осуществляют в металлических или бетонных емкостях. При этом чаще используют подвесную электродную систему (рис. 1.13).

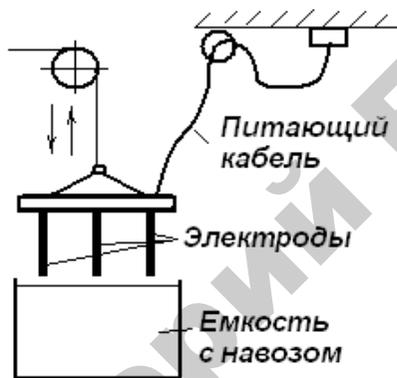


Рис. 1.13. Схема обеззараживания навоза электрическим током

Активацию водных растворов проводят в установках Я8-ФЗА (рис. 1.14), «Аквахлор-500», «Аквахлор-М», СТЭЛ-АНК-СУПЕР, ИЗУМРУД-РЕДОКС и др.

Обработка переменным током основана преимущественно на его термическом действии и связана со значительными энергозатратами – 50–60 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Обработка постоянным током сопровождается электролизом и электрофлотацией, что позволяет сократить расход электроэнергии.

Рекомендуемые режимы обработки: конечная температура – 55–60 °С, плотность тока – 3 кА/м<sup>2</sup>, расход электроэнергии – 3–4 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

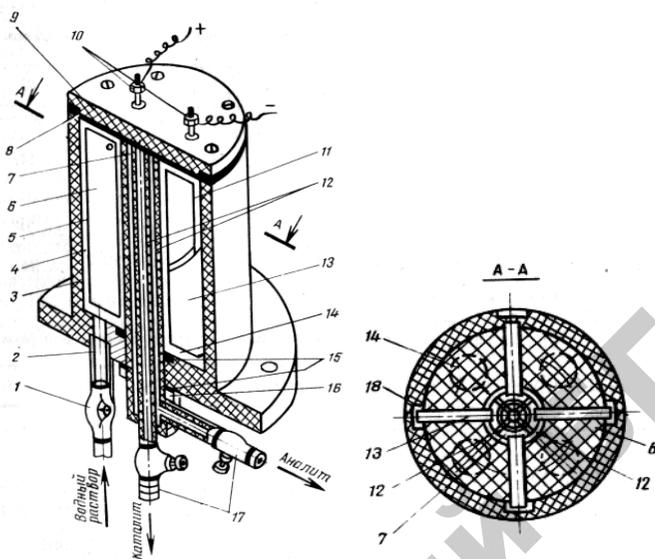


Рис. 1.14. Электродный блок установки Я8-ФЗА для активации водных растворов:

1 – кран подачи водного раствора в устройство; 2 – штуцер; 3 – корпус; 4 – межэлектродное пространство; 5 – рама; 6 – электрод; 7 и 14 – выточки для вывода фракций активированного раствора; 8 – уплотнительные прокладки; 9 – крышка; 10 – токоподводящие устройства; 11 и 12 – рамка и трубки из диэлектрического материала; 13 – мембрана; 15 – прокладки; 16 – гайка; 17 – краны для вывода фракций активированного раствора; 18 – выточка для закрепления мембраны

Обеззараживание оборудования (доильного, молочной посуды, ветеринарного) проводят в дезинфицирующих растворах; в частности в результате электролиза NaCl. По сравнению с применением готовых реагентов (жидкого хлора, хлорной извести, гипохлорита кальция), в этом случае удается избежать трудностей и затрат, связанных с транспортированием и хранением токсичных веществ.

Дезинфицирующий раствор готовят в установке ЭДР-1 в течение 1,5–2 ч. Чтобы получить 1 кг активного хлора, используют 8–10 кг поваренной соли и расходуют 5,5–7 кВт·ч электроэнергии.

Электродный блок представляет собой цилиндр, в котором установлены четыре электрода в виде секторов, разделенных асбестовыми листами (мембранами). Когда к электродам подводят постоянный ток, происходит разделение ионов (активация). Для питания применяют блок ВАС-600/30. Производительность установки – 2000 л/ч, напряжение питания – 30 В, номинальный ток – не более 300 А, мощность – 11,5 кВт.

Установки УЭ ГПХН периодического действия имеют производительность по активному хлору – 0,03–2,00 кг/ч, установленную мощность – 0,15–9,00 кВт. Электролизеры проточного типа, соответственно, 0,30–2,35 кг/ч и мощность – 1,5–10,0 кВт (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Основные характеристики некоторых электролизных установок

Показатель	ГПХН-200	ГПХН-50	ЭН-1,2	ЭН-5	ЭН-25
Производительность по активному хлору, кг/сут.	200	7,2	1,2	5	25
Удельный расход соли на 1 кг активного хлора, кг, не более	1,7–3,0	1,7–3,0	12–15	12–15	8–10
Продолжительность цикла электролиза, ч	3	6	0,75–0,9	7–9	10–12
Рабочее напряжение на ванне, В	14,5	14,5	40–42	40–42	55–60
Рабочий ток, А	100	16	50–70	50–70	130–140
Удельный расход электроэнергии на 1 кг активного хлора, кВт·ч, не более	2,8–4,0	2,8–4,0	7–9	7–9	8–10

Комплексная очистка и обеззараживание питьевой воды при ее суточном потреблении до 10 м<sup>3</sup> выполняется в электрохимической установке УВ-0,5. В установку входят: фильтр-электролизер для электрокоагуляции тонкодисперсных (в том числе бактериальных) загрязнений, гипохлоритный электролизер для обеззараживания и серебряный – для консервирования воды. После обработки ионами серебра вода сохраняет свои свойства больше месяца. Потребляемая мощность установки – 2,5 кВт.

Электролизные установки (см. табл. 1.1) для получения активного хлора состоят из растворного узла, электролизера, бака-накопителя, выпрямительного агрегата, шкафа управления и вентилятора.

Электролизные поточные установки Э-1,25; Э-5; Э-10; Э-15; Э-20; Э-30; Э-40 имеют производительность по активному хлору, соответственно, 1,25–40,00 кг/ч.

Для опреснения воды применяют электродиализные установки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Основные технико-экономические характеристики электродиализных установок

Показатель	ИСТОК-AQUA	ЭОУ-НИИПМ	СЭХО-2	ЭОСХ-2М
Производительность, м <sup>3</sup> /ч	3	0,5	0,15	3,5
Содержание солей в воде, г/л:				
– исходная	6,0	4,0	10,0	7,0
– опресненная	0,5	0,85	1,0	1,0
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг удаления соли	1,0	1,5	7,0	2,3

Для деминерализации молочной сыворотки используется электродиализная установка ИСТОК-MILK производительностью 2 м<sup>3</sup>/ч или 1,4 м<sup>3</sup>/ч. Солеосодержание молочной творожной сыворотки снижается с 6,0 г/л до 2,4–1,2 мг/л, соответственно, молочной подсырной – с 20 г/л до 5 г/л. При этом энергозатраты на удаление 1 кг соли составляют 1–2 кВт·ч.

## 1.7. Электротермохимические технологии обработки кормовых материалов

Чтобы рационально использовать корма, следует совершенствовать технологию их обработки, хранения и подготовки к скармливанию. Основная цель обработки – перевод высокомолекулярных природных полимеров в усвояемые низкомолекулярные формы, создание благоприятных условий для жизнедеятельности микрофлоры желудка животных.

При традиционных способах обработки, например, зерна (пропаривание, поджаривание, микронизация и др.) применялось преимущественно термическое воздействие, что приводило к значительной энергоемкости процессов. С помощью электрического тока можно сочетать термическое и физико-химическое воздействия (насыщение ионами, повышение массопереноса, проницаемости, активности ионов), т. е. интенсифицировать химические превращения и снизить расход энергии, прибегнув к нетепловым эффектам.

В зависимости от назначения и конечной цели обработки используется определенное сочетание или преимущественное действие технологических проявлений электрического поля. Например, в процессах сушки, обезвоживания, нагрева материалов больше проявляются термическое и электрофизическое действия, в процессах измельчения, дозирования, сепарирования – электрофизическое действие, в процессах повышения всхожести семян, угнетения или стимуляции жизнедеятельности растений – электрофизикохимические и биологические проявления.

Наиболее полное использование возможностей электрического поля проявляется в электротехнологических процессах обработки кормовых материалов с целью улучшения их кормовых достоинств, повышения переваримости. К ним можно отнести электротермохимическую обработку (ЭТХО) соломы, электрогидротермическую обработку (ЭГТО) и электротермохимическую обработку (ЭТХО) зерна, электроподогрев мелассы, электрообработку картофеля.

Процесс ЭТХО соломы в потоке включает следующие основные операции: измельчение до размеров сечки (5–6 мм), смешивание измельченной массы с раствором химических реагентов (5 % кальцинированной соды, 1,5 % поваренной соли

и водопроводная вода), уплотнение полученной смеси до 350–400 кг/м<sup>3</sup>, перемещение уплотненной массы в рабочую электродную камеру и непосредственно обработку электрическим током напряженностью 800–1000 В/м. Электрический ток в массе корма оказывает термические и электрофизикохимические действия, ведущие к делигнификации соломы. На выходе из камеры обработки масса имеет температуру 90–95 °С, поэтому в технологической линии могут быть предусмотрены варианты рекуперации энергии, например, для подогрева увлажняющего раствора.

Энергоемкость процесса ЭТХО соломы на 40–80 % ниже по сравнению с другими термическими способами обработки. Кормовая ценность соломы после обработки увеличивается в 1,5–2 раза в сравнении с необработанной, обеспечивается прирост живой массы молодняка крупного рогатого скота более чем на 13 %.

Технология ЭГТО зерна в потоке включает следующие основные операции: плющение зерна до толщины хлопьев 10<sup>-3</sup> м, приготовление раствора химреагентов (2 % карбамида и 1 % поваренной соли), дозированную подачу и смешивание плющеного зерна с рабочим раствором в соотношении (по массе) 1,0:0,8, уплотнение массы с усилием 25 кПа, равномерную подачу в рабочую электродную камеру и непосредственно обработку электрическим током при напряженности электрического поля 2500–2700 В/м. Электрический ток протекает через влажную проводящую зерновую массу в течение 2–3 минут, вызывая в ней термические (масса нагревается до 80–90 °С), электрофизикохимические процессы, ведущие к преобразованию свойств белков, углеводов, оказывая биологическое действие, снижая бактериальную загрязненность корма. Поскольку клейстеризация крахмала происходит при температуре 55–70 °С, то при ЭГТО можно завершить процесс обработки при 80 °С, что невозможно сделать при обработке паром, у которого минимальная температура выше 100 °С. В результате снижаются потери питательных веществ, витаминов и т. п., уменьшаются энергозатраты.

После обработки зерновая масса имеет хорошие органолептические показатели, охотно поедается животными. Кормовая ценность зерна и приросты живой массы молодняка животных повышаются на 10–15 %, энергоёмкость процесса в 1,5–2 раза ниже, чем при традиционных технологиях.

Основные параметры и характеристики обработки кормовых материалов приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Основные параметры и характеристики обработки кормовых материалов

Показатель	Электротермо-химическая обработка соломы	Электрогидротермическая обработка зерна	Электро-обработка картофеля
Удельный расход энергии, МДж/г	$\frac{0,5-0,8}{1,0-2,3}$	$\frac{0,288}{0,324-0,36}$	$\frac{0,32}{0,4-0,44}$
Длительность обработки, с	$\frac{300-420}{1800}$	$\frac{120-180}{500-1800}$	$\frac{300-400}{3600}$
Конечная температура, °С	95–99	80	70
Повышение кормовой ценности, к. ед.	До 0,48	До 1,14	До 0,38
Оптимальная напряженность электрического поля, кВ/м	0,8–1,0	2,5–3,0	1,5–2,0

*Примечание.* В числителе даны значения при обработке током, в знаменателе – при термообработке паром низкого давления.

Технология ЭТХО соломы или ЭГТО зерна может быть осуществлена путем включения установки (пример варианта конструктивной схемы приведен на рис. 1.15), где непосредственно производится обработка массы электрическим током, в состав технологических линий существующих или вновь проектируемых кормоцехов.

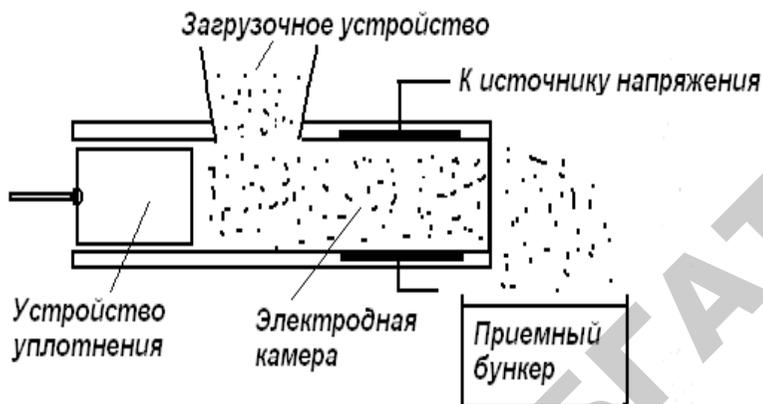


Рис. 1.15. Схема устройства для обработки корма электрическим током

В результате объемного ввода и высокой концентрации энергии при электрообработке корм нагревается быстро и равномерно, а благодаря простому регулированию потока энергии температура снижается до минимального значения, обусловленного технологией процесса.

Работоспособность устройств зависит от надежности контакта между электродами и обрабатываемым материалом, эрозионной стойкости электродов, их химической инертности, старения диэлектрических материалов.

В качестве материалов для электродов используют нержавеющую сталь, графит, титан. Графитовые электроды имеют наименьшее контактное сопротивление и высокую эрозионную стойкость.

Допустимая плотность тока  $j_{\text{доп}}$  зависит от вида корма, материала электродов, напряжения сети, принципа работы (периодическое или непрерывное действие). При обработке соломы, грубых кормов и корнеплодов  $j_{\text{доп}} = 1000\text{--}1500 \text{ А/м}^2$ , мелассы  $j_{\text{доп}} = 500\text{--}1000 \text{ А/м}^2$ .

Схема технологического процесса ЭТХО в основном соответствует ЭГТО, однако режимы обработки и электрические параметры отличаются. Для ЭТХО плющенное зерно смешивается с раствором хлорида натрия (1 % NaCl на 100–120 % воды к массе зерна), затем зерновая масса уплотняется до 8–10 кПа и подается в электродные

камеры, разделенные ионоселективной мембраной. На электродах создается напряженность поля 400 В/м униполярного знака. Обработка осуществляется в течение около 1 ч до прохождения через объем камеры удельного количества электричества (15–18)  $10^3$  Кл/кг сухого зерна, под действием которого в катодной области рН показатель достигает 10–11, а в анодной области – до 2–4. Конечная температура обработанной массы составляет 55–60 °С. Данный способ позволяет (по сравнению с обработкой переменным током) снизить конечную температуру обработки на 20 °С, энергоемкость – в 1,5 раза, при этом переваримость вещества зерна увеличить на 15 %.

### 1.8. Электрохимические технологии обработки металлов

Электрохимические методы обработки применяют при нанесении покрытий, доводке поверхностей штампов, пресс- и литейных форм, затачивании режущего инструмента с пластинками из твердых сплавов, профилировании изделий сложной формы, получении круглых, прямоугольных и фасонных сквозных отверстий, травлении и обезжиривании деталей.

Электрохимические методы обработки материалов, применяемые в ремонтном производстве, основаны на явлениях электролиза. Гальванотехническим способом формируют изделие на катоде из осаждающегося на нем металла анода. При *катодном травлении* очищают изделие (катод) пузырьками выделяющегося на нем водорода, которые удаляют жир и загрязнения с поверхности. При электролитическом *анодном травлении* и полировании изделие является анодом, и его поверхностный слой очищается и сглаживается – полируется. Методом электролитического растворения анода можно придать изделию любую сложную форму.

В гальванотехнике различают *гальваностегию* и *гальванопластику*.

*Гальваностегия* – нанесение на изделия тонкого (5–30 мкм) слоя металла для защиты от коррозии, получения декоративных покрытий, упрочнения деталей (меднение, золочение, никелирование, хромирование).

*Гальванопластика* – покрытие изделий толстым слоем металла, применяемое в художественных промыслах и полиграфии. Для улучшения сцепления наносимого слоя и подложки необходимо, чтобы поверхность была чистой, без окислов и жиров.

В ремонтном производстве восстанавливают детали местным железнением, хромированием, нанесением никель-кобальтового покрытия. Эти металлы осаждают в стационарных ваннах; процесс характеризуется высоким выходом металла по току (75–95 %), большой скоростью осаждения (0,25–0,30 мм/ч).

*Местное железнение* проводят в ванне с герметизированным отверстием под подшипник (рис. 1.16).



Рис. 1.16. Схема приспособления для железнения посадочных мест

В производственных условиях электролит приготавливают путем травления (до насыщения) металлической стружки из малоуглеродистой стали в растворе соляной кислоты. Стружку обезжиривают в 10%-м растворе каустической соды при температуре 60–70 °С и тщательно промывают горячей водой. После этого стружку небольшими порциями погружают в кислотостойкую емкость, содержащую дистиллированную воду и кислоту в соотношении 2:1 и травят при температуре 30–40 °С до тех пор, пока не перестанет выделяться водород. После отстоя электролит фильтруют через стеклоткань и проверяют его плотность ареометром. Железнение ведут при температуре 35–40 °С и плотности тока 1,0–1,5 кА/м<sup>2</sup>. Время железнения, ч:

$$\tau = 10^2 h \rho / (\alpha j_k \eta_T), \quad (1.9)$$

где  $h$  – требуемая толщина слоя железа, м;

$\rho = 7820 \text{ кг/м}^3$  – его плотность;

$\alpha = 1,042 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(А} \cdot \text{ч)}$  – электрохимический эквивалент железа;

$j_k$  – катодная плотность тока,  $\text{А/м}^2$ ;

$\eta_T = 75\text{--}85 \%$  – выход металла по току, т. е. процентное отношение количества вещества, полученного при опыте, к рассчитанному по законам Фарадея.

Определяя параметры электролизеров, проводят электротехнологический, тепловой, гидравлический, механический и другие расчеты. Последовательность электротехнологического расчета:

1. Задают требуемую производительность (скорость осаждения)  $m_t$ , кг/с.

2. На основе закона Фарадея определяют ток электролизера, А:

$$I = F m_t n / A \eta_T, \quad (1.10)$$

где  $F = 96485 \text{ Кл/моль}$  – число Фарадея;

$n$  – валентность вещества;

$A$  – атомная масса вещества.

3. Находят площадь электродов,  $\text{м}^2$ , задавшись плотностью тока  $j_{\text{опт}}$ ,  $\text{А/м}^2$ , рекомендуемой по условиям обработки:

$$S = I / j_{\text{опт}}. \quad (1.11)$$

4. Рассчитывают напряжение, подводимое к электролизеру, В:

$$U_{\text{эл}} = E_p + E_{\text{п}} + U_{\text{э}} + U, \quad (1.12)$$

где  $E_p$  – напряжение разложения (разность потенциалов анодной и катодной реакций), В;

$E_{\text{п}}$  – сумма анодного и катодного перенапряжений, В;

$U_3 = IR_H$  – падение напряжения в электролите, В;  
 $R_H$  – сопротивление электролита (нагрузки), Ом;  
 $U = I(R_{ш} + R_k + R_3)$  – падение напряжения в шинах, контактах и электродах, В.

Эффективность работы электролизной ванны зависит от выхода вещества по энергии  $q_3$  и по току  $\eta_T$ , %:

$$q_3 = \alpha \eta_T / (100 U_{эл}). \quad (1.13)$$

Если снимают значительное количество металла, то скорость обработки уменьшается, так как на аноде выделяются продукты реакции. Чтобы устранить этот недостаток и обеспечить высокую производительность процесса, необходимо непрерывно удалять их с поверхности обрабатываемого изделия – анода, т. е. проводить депассивацию. Это делают двумя способами: либо сильной струей проточного электролита, вымывающего продукты пассивации из межэлектродного пространства (рис. 1.17, а), либо механическим путем (рис. 1.17, б).

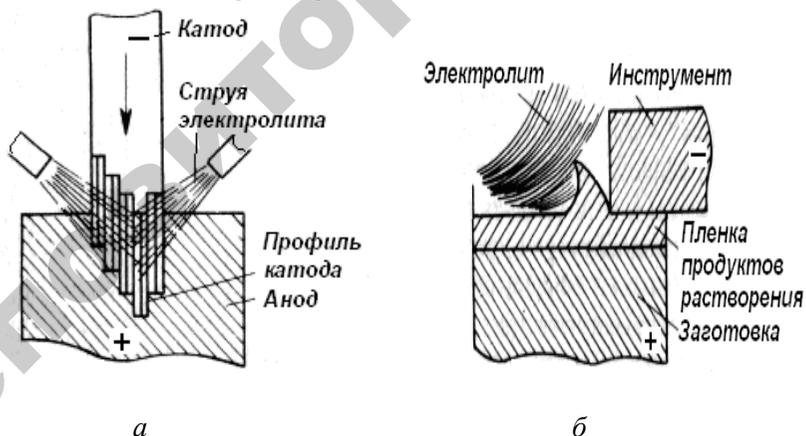


Рис. 1.17. Схема анодно-гидравлической обработки (воспроизведение профиля катода в аноде) (а) и чистовой анодно-механической обработки (б)

В первом случае процесс называют анодно-гидравлической размерной обработкой, во втором – анодно-механической. При анодно-гидравлической обработке шлифованием плотность тока составляет 0,2–0,5 А/см<sup>2</sup>, при других операциях может достигать 50–2000 А/см<sup>2</sup>, напряжение на электродах – 10–30 В, скорость электролита – 4–5 м/с, удельный объем снимаемого металла – 8–16 см<sup>3</sup>/(кВт·ч), удельная энергоемкость при обработке сталей – 6–25 кВт·ч/кг. При анодно-механической чистовой и отделочной обработке плотность тока 0,5–10,0 А/см<sup>2</sup>, при черновой обработке – 100–500 А/см<sup>2</sup>; напряжение на электродах – 2–36 В.

К источникам питания (преобразователям) для электрохимической обработки предъявляют следующие требования: выходное напряжение – 12–115 В; номинальный ток – 100–25 000 А; плавное и глубокое (от нуля до номинального значения) регулирование выходного напряжения; автоматическая стабилизация выходных параметров (напряжения, силы и плотности тока в гальванической ванне во всем диапазоне); защита от коротких замыканий на стороне постоянного и переменного тока, а также от перегрузок и перегрева тиристоров; автоматическое реверсирование выходного тока; возможность установки в непосредственной близости от гальванической ванны.

Наибольшее распространение получили преобразователи серии ВАК и ВАКР (прилож. 1), выполненные на тиристорах по шестифазной схеме выпрямления с уравнительным реактором.

### **1.9. Применение электрического тока в ветеринарии и животноводстве**

В ветеринарии применяют следующие виды физиотерапии: светолечение, электролечение (гальванизация, дарсонвализация, диатермия, УВЧ-терапия и др.), водолечение, грязелечение, теплолечение, массаж, рентгенотерапию, радиотерапию, ультразвуковую терапию, аэротерапию, аэроионизацию, магнитотерапию, лазеротерапию. В ответ на воздействие световой, электрической, тепловой или механической энергии организм реагирует соответствующими реакциями в виде активной гиперемии, образованием в тканях химически активных

соединений, усиливает взаимодействие составных элементов клеток, обмен веществ, трофическую функцию вегетативной нервной системы. Также физические факторы оказывают успокоительное, тонизирующее или болеутоляющее действие, способствуют повышению иммунобиологических реакций, образованию биологически активных соединений (витамин D, гистамин). Физиотерапевтические процедуры используют в основном для лечения у животных параличей, болезней суставно-связочного аппарата, органов дыхания, нарушений обмена веществ. Лечебный эффект физиотерапевтических процедур зависит от их правильного выбора, характера патологического процесса, своевременности и учета стадийности воспалительного процесса и методики оказания физиотерапевтической помощи. В некоторых случаях целесообразно одновременное воздействие двух физических факторов для увеличения лечебного эффекта – сочетание физиотерапии с фармакотерапией. В ветеринарной практике физиотерапевтические процедуры применяют и с профилактическими целями.

Применение в ветеринарии постоянного и переменного тока низкой, средней и высокой частот основано на термических явлениях, поляризации в биологических системах, активном транспорте, электропаркозе и электрокоагуляции.

Физиологическое действие постоянного тока в значительной мере связано с процессами, происходящими в электролитах, заполняющих клетки и ткани. Наблюдаемое раздражение клеток обусловлено преимущественно их поляризацией и имеет определенный порог, ниже которого действие тока живым организмом не ощущается. Пороговое значение определяется не только уровнем воздействия тока, но и его продолжительностью.

*Гальванизация* – применение с лечебно-профилактической целью постоянного непрерывного тока низкого напряжения (до 80 В) и небольшой силы (до 50 мА). Источник тока – специальные аппараты, превращающие сетевой переменный ток в постоянный. Применяют электроды из тонких свинцовых пластинок (0,25–0,50 мм), которые фиксируют на соответствующих участках тела резиновыми бинтами или прижимают на туловище мешочками с песком. Во время гальванизации между электродами и кожей возникают продукты электролиза (кислые – под положительным электродом, щелочные – под отрицательным). Чтобы не вызывать раздражение кожи при многократных

процедурах, электроды перед фиксацией вкладывают в матерчатые мешочки, смоченные водой (гидрофильные прокладки). В основе гальванизации лежат электрическое раздражение рецепторов кожи и перемещение ионов и коллоидных частиц в тканях в области мест наложения электродов. В результате усиления физико-биохимических процессов под действием постоянного тока в клетках тканей ускоряются внутриклеточные обменные процессы.

Показания к назначению: травмы и заболевания периферической нервной системы инфекционного, токсического и травматического происхождения; заболевания желудочно-кишечного тракта, протекающие с нарушениями моторной и секреторной функций; сердечно-сосудистые заболевания в начальных стадиях; переломы костей, воспалительно-дегенеративные заболевания двигательного аппарата; отиты.

В зависимости от места приложения свинцовых электродов раздражение передается от кожи по нервам на тот или иной орган, изменяя его обменные или функциональные свойства. Ответная реакция на раздражение – рефлекторное расширение капилляров, изменение проницаемости клеточных мембран, электролиз в клетках и тканях, приводящий к образованию новых веществ с иной физиологической активностью, и т. п.

*Электрофорез* – сочетанное воздействие электрического тока и вводимого с его помощью лекарственного вещества.

*Диадинамотерапия* – применение токов Бернара (выпрямленные синусоидальные токи низкой, периодически меняющейся частоты).

При лечении переменными токами различают дарсонвализацию, диатермию, УВЧ- и коротковолновую терапию, электрохирургию.

*Дарсонвализация* – метод лечения импульсными токами не более 15–20 мА, частотой 200–500 кГц при напряжении до 20 кВ.

В ветеринарной практике используют аппараты «Искра-1» и «Ультратон», создающие импульсы длительностью 100 мкс с интервалами 0,02 с. Для передачи тока от генератора к животному служит набор стеклянных вакуумных трубок различной формы. На концах трубок находятся металлические цилиндрические контакты, которые вводят в ручку-резонатор, соединенную кабелем с генератором.

В основе физиологического действия токов Д'Арсонваля лежат рефлекторные явления, обусловленные поляризационными эффектами на клеточных мембранах.

*Амплипульстерапия* – применение для лечебных и профилактических целей синусоидальных модулированных токов (СМТ). Для электрофореза, гальванизации, дарсонвализации, амплипульстерапии, электросна и т. п. применяют комбинированные аппараты «Элэскулап», ЭГСАФ-01-«Процессор»; «Корона-С»; «Элад»; УЛЬТРАДАД; АмДГ «Искра-4» и др.

Аппарат АмДГ «Искра-4» (дарсонвализация и гальванизация) (рис. 1.18) предназначен для лечения высокочастотным током высокого напряжения и малой силы тока неврологических, дерматологических, стоматологических, отоларингологических, проктологических, гинекологических заболеваний, а также для воздействия постоянным током на организм с лечебными и профилактическими целями.



Рис. 1.18. Аппарат АмДГ «Искра-4»

Аппарат представляет собой импульсно-модулированный высокочастотный генератор, на выходе которого включен резонатор (повышающий трансформатор), питающий высоким напряжением стеклянные вакуумные электроды различной формы, обеспечивающие применение местной дарсонвализации. Действующими факторами местной дарсонвализации являются: электромагнитные импульсные колебания, высоковольтные искровые разряды, в некоторой степени озон и окислы азота. Высокочастотные колебания, вырабатываемые генератором высокой частоты, модулируются с частотой 50 или 100 Гц. Потребляемая мощность – не более 80 ВА, частота высокочастотных колебаний –  $(110 \pm 8,25)$  кГц.

*Диатермия* – прогревание глуболежащих тканей эндогенной теплотой, создаваемой токами 1–3 А, частотой 1,0–1,5 МГц при напряжении 200–250 В. В результате локальная температура тканей повышается на 2–5 °С, что приводит к расширению кровеносных сосудов, увеличению кровоснабжения и активизации биохимических процессов, в частности фагоцитарных и бактерицидных свойств тканей.

Аппараты «Миомастер-102» и «Миомастер-104» (рис. 1.19) – современные многофункциональные устройства для проведения процедур низкочастотной электротерапии 6 видов: гальванизация, диадинамотерапия, СМТ-терапия, электростимуляция, электросон. Аппарат «Миомастер-102» имеет 2 независимых выходных канала. По каждому независимым выходным каналам могут течь токи, отличающиеся своими характеристиками. «Миомастер-102» включает в себя одно- и двухканальные методики.



Рис. 1.19. Аппарат «Миомастер-104»

Аппарат «Миомастер-104» имеет 4 независимых выходных канала, по которым могут проходить электрические сигналы с разными характеристиками. «Миомастер-104» может, кроме одно- и двухканальных методик, включать и воспроизводить трех- и четырехканальные методики лечения. Максимальная частота импульсов – 10 000 Гц; максимальное среднеквадратическое значение силы тока – 75 мА; максимальное выходное напряжение – 80 В; потребляемая мощность – 60 Вт.

*УВЧ-терапия* – способ лечения токами смещения частотой 30–300 МГц. При УВЧ-терапии костные, мышечные и жировые ткани нагреваются интенсивнее, чем кровеносные сосуды и лимфатиче-

ские узлы. Наряду с термическим важно действие тока, связанное с активизацией ферментов и превращением грубодисперсных белковых молекул в менее крупные с соответствующим изменением рН цитоплазмы. Этот способ применяют при лечении острых воспалительных процессов, болезней суставов, маститов, фурункулеза и т. п.

Источниками питания служат аппараты УВЧ-30, УВЧ-60, УВЧ-66, УВЧ-70, УВЧ-80 и др.

Аппарат УВЧ-60 (рис. 1.20) предназначен для местного лечебного воздействия электромагнитным полем частотой 27,12 МГц, мощностью 60 Вт.



Рис. 1.20. Аппарат УВЧ-60

Установка ЛПДА-УВЧ-1 для лечения маститов выполнена на базе модифицированной тележки ПДА-1 и доильного аппарата. Токи УВЧ подают во время доения на пластинчатые электроды, расположенные в доильных стаканах.

*Коротковолновая терапия* классифицируется как высокочастотная терапия. При использовании таких частот электромагнитная энергия превращается в тепловую в результате индукции циркулярных токов в тканях организма и диэлектрического поглощения в электрически непроводящих тканях. Используются электрические и магнитные поля. Короткие волны применяют, используя метод

поля конденсатора или метод поля катушки. При помощи метода поля конденсатора облучаемая поверхность тела находится между двумя конденсаторами (боковой электрод или мягкий резиновый электрод). Под воздействием высоких частот от переменного электрического поля происходят периодические изменения в обрабатываемых участках ткани.

Сохраняя минимальное расстояние между электродами и кожей, поддерживается равномерное нагревание всех слоев облучаемого участка ткани. В методе поля катушки последняя используется как электрод с вихревыми токами или диплоид. Ток высокой частоты будет течь через эти электроды, вызывая переменное магнитное поле в окружающей среде. Это вызовет нагрев в ткани с хорошей проводимостью (соединительная ткань и мускулатура).

Во время импульсного режима коротковолновой терапии возникает субтермальный эффект с улучшением трофики и влиянием на рефлекторную составляющую сосудистой системы. Во время постоянного режима облучения преобладает местный термальный эффект с улучшением клеточного метаболизма, уменьшением вязкости жидкостей тела, повышением растяжимости коллагеновых волокон и стимуляция циркуляции крови.

Применяют аппараты ИКВ-4, «Луч-2», СМВ20-3, «ФИЗИОТЕРМ-С», Thermopulse Compact и др.

*Apparat Thermopulse Compact* способен генерировать на выходе сигнал частотой 27,12 МГц, мощностью до 70 Вт в непрерывном режиме, что обеспечивает существенный нагрев в подвергаемой воздействию области тела. По этой причине такое воздействие часто называют коротковолновой диатермией (глубокий прогрев).

Аппарат для коротковолновой терапии и индуктотермии последнего поколения «ФИЗИОТЕРМ-С» используется для лечения хронического воспаления, острых и хронических инфекций, уменьшения спазмов и деионизации, снижения болевых ощущений. Рабочая частота коротковолнового излучения – 27,12 МГц; частота импульсов – 10–300 Гц; длительность импульсов – 200–600 мкс; максимальная мощность излучения – 400 Вт (непрерывный режим)/1000 Вт (импульсный режим).

Электронаркоз, электротомию и электрокоагуляцию иногда объединяют общим понятием *электрохирургия*. Сила тока при элек-

трохирургии не более 1 А, частота от нескольких кило- до нескольких мегагерц.

*Электронаркоз* – обезболивающее действие переменного синусоидального или импульсного тока. Для общего обезболивания применяют игольчатые электроды, которые вводят под кожу за тылочной части. К электродам подают напряжение от генератора. Используя переменный ток, эффекта обезболивания для крупнорогатого скота достигают при частоте 1 кГц и силе тока 80–100 мА, для овец и пушных зверей – при частоте около 5 кГц и силе тока 15–30 мА.

На мясоперерабатывающих предприятиях перед убоем скота проводят электрооглушение для того, чтобы исключить сознание животного, лишить его защитных функций. К животному прикладывают контакты: два к голове в области височно-теменных костей и два в тазово-поясничной. Применяют переменный ток силой 0,8–1,2 А при напряжении 220 В. Шоковое состояние сохраняется около 5 мин после включения тока. Используют установки Я01-80.

*Электротомия (электрорезание)* – рассечение тканей в результате интенсивного парообразования тканевой жидкости в области, прилегающей к электроду. Теплота, выделяемая при прохождении тока через ткань, вызывает коагуляцию белков, что приводит к оплавлению рассекаемой поверхности и свариванию кровеносных сосудов. Большая плотность тока (до 40 кА/м<sup>2</sup>) достигается тем, что площадь контакта скальпеля или иглы с поверхностью тела очень мала.

*Электрокоагуляция* – операция, применяемая для выжигания злокачественных опухолей, сваривания кровеносных сосудов и альвеол, крепления сетчатки к сосудистой оболочке глаза. Плотность тока – 5–10 кА/м<sup>2</sup>.

Для электрохирургии используют установки ЭИ-1, УЭИ-1, ЭН-57, электрохирургические высокочастотные аппараты (коагуляторы) ЭХВИ-500-5, ЭХВ402-100, ЭХВЧ 200-02С «ЭФА-М», ЭХВЧ 300-03С «ЭФА-М», ЭХВЧ 90-01 «ЭФА-М» Viridis и др.

*Электрохирургический высокочастотный аппарат Dr. Oppel ST-511* – универсальный хирургический нож, разработанный с использованием последних достижений медицинской техники. Он позволяет проводить точные и сложные хирургические опе-

рации. Прибор значительно облегчает проведение различного рода операционного вмешательства при помощи цифрового управления аппаратом, способен проводить порезы, коагуляцию, их комбинирование и биполярную коагуляцию с оптимальной длиной волны.

***Контрольные вопросы:***

1. Какие основные области технологического применения электрического тока?
2. Что такое электрофорез, электродиализ, электроосмос, электрокоагуляция, электрофлотация, электролиз, их физическая сущность и области применения?
3. Как получают дезинфицирующие растворы с помощью электролиза?
4. Какие законы лежат в основе электролиза?
5. Как ускорить рассоление почв с помощью электрического тока?
6. Для чего применяют электрохимические технологии обработки воды и растворов?
7. Какие физиологические действия электрического тока применяют в ветеринарии?
8. Что такое гальваностегия и гальванопластика? Приведите примеры технологического применения в ремонтном производстве.
9. Классификация электрохимических технологий обработки металлов.

**Практическое занятие № 1**

**Расчет параметров рабочей камеры  
установки обработки электрическим током  
влажных кормовых материалов**

*Задача занятия:* определить конструктивные параметры электродной системы и рабочей камеры, обеспечивающие необходимую мощность, производительность и режимы обработки.

### Задание для самостоятельной подготовки

Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3], изучить методику расчета параметров рабочей камеры установки поршневого прямоходного типа для обработки плющенного увлажненного фуражного зерна, измельченной соломы и других подобных влажных полидисперсных систем, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

### Индивидуальные задания

**Задача 1.1.** Рассчитать параметры трехкамерной ( $n = 1$ ) рабочей поршневой прямоходной установки ([3], рис 21.1) для обработки влажных кормовых материалов. Напряжение питания камер – 380/220 В, материал электродов – графит ГЭ, схема соединения – «звезда», материал стенок – текстолит ПТ. Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.1.1.

Таблица ПЗ.1.1

Исходные данные к задаче 1.1

№ варианта	Способ обработки	Производительность $m_{\tau}$ , кг/ч	Температура обработки, °С		Удельная электрическая проводимость массы при 20 °С, $\gamma_{20}$ , См/м	Температурные коэффициенты		Удельная теплоемкость массы $C$ , Дж (кг · °С)
			начальная $t_1$	конечная $t_2$		$\lambda$ , $10^{-3}$ °С <sup>-1</sup>	$\beta$ , $10^{-4}$ °С <sup>-2</sup>	
1	ЭГТО фуражного зерна	450	12	75	0,18	3,6	-3,96	2680
2	ЭХТО соломы	200	24	95	0,3	3,32	-1,68	3620

Продолжение табл. ПЗ.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	ЭГТО фуражно- го зерна	400	14	80	0,4	3,7	-3,86	2680
4	ЭХТО соломы	250	22	90	0,1	3,42	-1,58	3620
5	ЭГТО фуражно- го зерна	350	16	75	0,2	3,8	-3,76	2680
6	ЭХТО соломы	300	20	95	0,3	3,52	-1,48	3620
7	ЭГТО фуражно- го зерна	300	18	80	0,4	3,9	-3,66	2680
8	ЭХТО соломы	350	18	90	0,1	3,62	-1,38	3620
9	ЭГТО фуражно- го зерна	250	20	75	0,2	4,0	-3,56	2680
10	ЭХТО соломы	400	16	95	0,3	3,72	-1,31	3620
11	ЭГТО фуражно- го зерна	200	22	80	0,4	4,1	-3,46	2680
12	ЭХТО соломы	450	14	90	0,1	3,82	-1,31	3620
13	ЭГТО фуражно- го зерна	450	22	75	0,2	4,2	-3,36	2680
14	ЭХТО соломы	200	12	95	0,3	3,92	-1,38	3620
15	ЭГТО фуражно- го зерна	400	20	80	0,4	4,2	-3,26	2680
16	ЭХТО соломы	250	24	90	0,1	4,02	-1,48	3620

Окончание табл. ПЗ.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
17	ЭГТО фуражно- го зерна	350	18	75	0,2	4,1	-3,96	2680
18	ЭХТО соломы	300	22	95	0,3	3,32	-1,58	3620
19	ЭГТО фуражно- го зерна	300	16	80	0,4	4,0	-3,86	2680
20	ЭХТО соломы	350	20	90	0,1	3,42	-1,68	3620
21	ЭГТО фуражно- го зерна	250	14	75	0,2	3,9	-3,76	2680
22	ЭХТО соломы	400	18	95	0,3	3,52	-1,68	3620
23	ЭГТО фуражно- го зерна	200	12	80	0,4	3,8	-3,66	2680
24	ЭХТО соломы	450	16	90	0,1	3,62	-1,58	3620
25	ЭГТО фуражно- го зерна	450	15	75	0,2	3,7	-3,56	2680

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета рабочей камеры установки обработки электрическим током влажных кормовых материалов?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета рабочей камеры установки обработки электрическим током влажных кормовых материалов?

3. Запишите общее выражение для температурной характеристики удельной электрической проводимости влажной кормовой массы.

4. Как определяют длину электрода и расчетную длину рабочей камеры?

5. Схема технологического процесса ЭГТО зерна и ЭГТО соломы.

6. В чем состоит задача проверочного расчета рабочей камеры установки обработки электрическим током влажных кормовых материалов?

7. В чем состоит относительная сложность расчета рабочей камеры установки обработки электрическим током влажных кормовых материалов?

8. К проводникам какого рода относят влажные кормовые материалы?

## **Практическое занятие № 2**

### **Расчет электрокоагулятора белков**

*Задача занятия:* определить конструктивные параметры электрокоагулятора, отвечающие технологическим требованиям, напряжение между анодом и катодом, расчетную мощность.

### ***Задание для самостоятельной подготовки***

Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3], изучить методику расчета электрокоагулятора белков картофельного сока, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

### ***Индивидуальные задания***

**Задача 2.1.** Рассчитать электрокоагулятор белков картофельного сока. Плотность картофельного сока  $\rho = 1028 \text{ кг/м}^3$ . Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.2.1.

Таблица ПЗ.2.1.

## Исходные данные к задаче 2.1

№ варианта	Производительность $m_{\tau}$ , кг/с	Значение водородного показателя		Напряженность электрического поля $E$ , В/м	Средняя удельная электрическая проводимость картофеля-го сока $\gamma_{cp}$ , См/м
		начальное, $pH_n$	конечное, $pH_k$		
1	2	3	4	5	6
1	1,0	6,2	4,9	380	0,60
2	1,5	6,3	4,8	390	0,62
3	2,0	6,4	4,7	400	0,64
4	2,5	6,5	4,6	410	0,66
5	3,0	6,6	4,5	420	0,68
6	3,5	6,7	4,3	430	0,70
7	4,0	6,8	4,2	440	0,72
8	4,0	6,9	4,2	450	0,74
9	3,5	6,2	4,3	380	0,76
10	3,0	6,3	4,4	390	0,78
11	2,5	6,4	4,5	400	0,80
12	2,0	6,5	4,6	410	0,60
13	1,5	6,6	4,7	420	0,62
14	1,0	6,7	4,8	430	0,64
15	1,0	6,8	4,9	440	0,66
16	1,5	6,9	4,9	450	0,68
17	2,0	6,2	4,8	380	0,70
18	2,5	6,3	4,7	390	0,72
19	3,0	6,4	4,6	400	0,74
20	3,5	6,5	4,5	410	0,76
21	4,0	6,6	4,4	420	0,78

1	2	3	4	5	6
22	4,0	6,7	4,3	430	0,80
23	3,5	6,8	4,2	440	0,78
24	3,0	6,9	4,2	450	0,76
25	2,5	6,7	4,3	380	0,74

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета электрокоагулятора белков?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета электрокоагулятора белков?
3. Что понимают под коагуляцией белков?
4. Какие существуют способы коагуляции белков?
5. Приведите выражение зависимости удельной электрической проводимости картофельного сока от pH среды.
6. Приведите выражение зависимости удельного количества электричества от pH среды.
7. Как определяют расчетную мощность электрокоагулятора белков картофельного сока?

**Практическое занятие № 3**

**Расчет электрического плазмолизатора растительного сырья**

*Задача занятия:* определить размеры электродов (длину и ширину), силу тока, мощность, продолжительность процесса.

**Задание для самостоятельной подготовки**

Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3], изучить методику расчета электрического плазмолизатора растительного сырья, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

## Индивидуальные задания

**Задача 3.1.** Рассчитать параметры электроплазмолизатора технологической линии для обработки стружки сахарной свеклы. Напряжение питания – 380/220 В. Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.3.1.

Таблица ПЗ.3.1

Исходные данные к задаче 3.1

№ варианта	Производительность $Q$ , кг/ч	Удельное сопротивление массы сахарной свеклы $\rho$ , Ом·м	Конечная температура обработки $t$ , °С	Расстояние между фазным электродом и заземленным барабаном $l$ , м	Ширина канала $h$ , м	Диаметр барабана $d$ , м	Расстояние между электродами $X$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	6000	8,2	30	0,01	0,8	1,0	0,01
2	6200	8,4	32	0,02	0,7	0,9	0,02
3	6300	8,6	34	0,03	0,6	0,8	0,01
4	6400	8,8	36	0,04	0,5	0,7	0,02
5	6600	9,0	38	0,05	0,4	0,6	0,01
6	6800	9,2	40	0,01	0,3	0,5	0,02
7	7000	9,4	42	0,02	0,2	0,4	0,01
8	7200	9,6	44	0,03	0,8	1,0	0,02
9	7400	9,8	46	0,04	0,7	0,9	0,01
10	7600	10,0	48	0,05	0,6	0,8	0,02
11	7800	10,0	50	0,01	0,5	0,7	0,01
12	8000	9,8	50	0,02	0,4	0,6	0,02
13	8200	9,6	48	0,03	0,3	0,5	0,01
14	8400	9,4	46	0,04	0,2	0,4	0,02

1	2	3	4	5	6	7	8
15	8600	9,2	44	0,05	0,8	1,0	0,01
16	8800	9,0	42	0,01	0,7	0,9	0,02
17	9000	8,8	40	0,02	0,6	0,8	0,01
18	9200	8,6	38	0,03	0,5	0,7	0,02
19	9400	8,4	36	0,04	0,4	0,6	0,01
20	9600	8,2	34	0,05	0,3	0,5	0,02
21	9800	9,0	32	0,01	0,2	0,4	0,01
22	10000	9,2	30	0,02	0,8	1,0	0,02
23	6300	9,4	40	0,03	0,7	0,9	0,01
24	6500	9,6	42	0,04	0,6	0,8	0,02
25	6700	9,8	38	0,05	0,5	0,6	0,01

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета электрического плазмоллизатора растительного сырья?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета электрического плазмоллизатора растительного сырья?
3. Что такое электроплазмоллиз?
4. Какие типы электроплазмоллизаторов растительного сырья существуют?
5. Как определяют частоту вращения барабана?
6. Как определяют длину зоны электрообработки и площадь фазного электрода?
7. Как определяют мощность электроплазмоллизатора?

**Практическое занятие № 4**

**Расчет и выбор оборудования для гальванических покрытий**

*Задача занятия:* определить число гальванических ванн и выбрать источник питания.

### Задание для самостоятельной подготовки

Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3], изучить методику расчета оборудования для гальванических покрытий, его выбор, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

### Индивидуальные задания

**Задача 4.1.** Рассчитать число и выбрать источник питания ванн для нанесения гальванического покрытия на пластины из углеродистой стали. Покрытие наносится в нормализованной ванне с двумя катодными штангами. Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.4.1.

Таблица ПЗ.4.1

Исходные данные к задаче 4.1

№ варианта	Вид гальванического покрытия	Количество деталей годовой программы $N_2 \cdot 10^3$ шт.	Размер пластин (длина $\times$ ширина $\times$ толщина) $10^{-3}$ м	Толщина покрытия $\delta$ , $10^{-6}$ м	Годовой фонд работы оборудования $\Phi_2$ , ч	Кол-во деталей единичной загрузки $N_3$ , шт	Межэлектродное расстояние $l$ , м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Хромирование	8	20x50x2	3,0	2896	60	0,15
2	Никелирование	7	50x50x2	1,5	3180	80	0,20
3	Цинкование	14	40x50x3	2,0	5792	75	0,25
4	Осталивание	10	50x60x4	2,5	4344	75	0,17
5	Хромирование	7	30x45x3	2,5	2800	85	0,15
6	Цинкование	8	40x60x2	4,0	3180	60	0,20
7	Осталивание	9	30x70x3	2,0	4000	75	0,15

Окончание табл. ПЗ.4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
8	Никелирование	13	40x50x2	2,0	5200	65	0,20
9	Хромирование	7	30x55x2	1,5	2920	78	0,15
10	Никелирование	13	60x50x3	2,5	5600	70	0,20
11	Цинкование	11	55x55x2	3,5	4200	72	0,25
12	Осталивание	8	30x40x5	3,5	3000	85	0,20
13	Хромирование	7	30x40x3	2,0	2890	88	0,15
14	Осталивание	13	40x50x2	4,0	5400	75	0,17
15	Никелирование	11	45x50x2	2,0	4300	74	0,20
16	Цинкование	13	55x70x2	2,5	5500	65	0,25
17	Хромирование	8	25x50x4	2,0	3120	80	0,75
18	Никелирование	9	50x45x2	1,5	3700	90	0,20
19	Осталивание	10	60x60x3	3,0	4300	50	0,25
20	Цинкование	14	35x60x2	3,0	5650	75	0,20
21	Хромирование	9	20x60x2	2,5	3800	60	0,15
22	Цинкование	10	50x70x3	2,0	4100	65	0,15
23	Никелирование	8	50x70x3	2,0	3200	70	0,20
24	Осталивание	8	60x70x2	3,5	3150	75	0,20
25	Хромирование	14	30x60x2	3,5	5620	85	0,15

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. Задача расчета.
2. Исходные данные для расчета.
3. Где применяют гальванические покрытия?
4. Как получают гальванические покрытия?
5. Какие процессы протекают на аноде и катоде?
6. Как определяют суммарное время обработки всех деталей?
7. Как определяют силу тока ванны и напряжение на ней?
8. По каким параметрам выбирают источник питания установок для нанесения гальванических покрытий?

## Лабораторное занятие № 1

### Исследование установок обработки электрическим током влажных кормовых материалов

*Цель работы:* изучить устройство и принцип действия установок для обработки кормовых материалов электрическим током.

#### *Задачи работы:*

1. Изучить классификацию, устройство установок для обработки кормовых материалов электрическим током, назначение каждого ее элемента, конструктивное исполнение рабочих камер и существующие источники их питания.
2. Исследовать влияние температуры обработки и модуля увлажнения на удельную электрическую проводимость кормового материала.
3. Определить зависимость времени обработки от напряженности электрического поля при модуле увлажнения, соответствующего максимальному значению удельной электрической проводимости.

**Общие сведения.** Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3, 9], изучить классификацию, устройство установок для обработки кормовых материалов электрическим током, конструктивное исполнение рабочих камер процессы. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

#### *Задание для самостоятельной подготовки*

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе

#### **Методика выполнения работы**

1. Изучить классификацию, устройство установки для обработки кормовых материалов электрическим током, назначение каждого ее элемента, конструктивное исполнение рабочих камер и существующие источники их питания по настоящему лабораторному практикуму и конспекту лекций.

Экспериментальная установка (рис. ЛЗ.1.1) состоит из рабочей камеры  $EK$ , автотрансформатора  $TV$ , приборов измерения напряжения  $pV$ , тока  $pA$  и температуры.

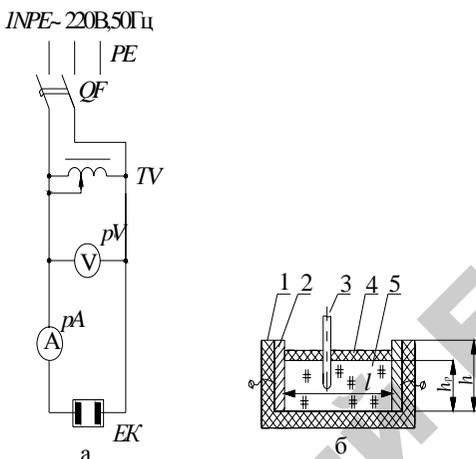


Рис. ЛЗ.1.1. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки (а) и рабочей камеры (б):

- 1 – корпус; 2 – электроды; 3 – датчик температуры; 4 – уплотнитель;  
5 – обрабатываемый кормовой материал;  $l$  – межэлектродное расстояние;  
 $h$  – высота электрода;  $h_p$  – рабочая высота электрода

2. Определить зависимость удельной электрической проводимости кормового материала  $\gamma_t$ , указанного преподавателем, от температуры при различных модулях увлажнения  $W$ . Для этого необходимо:

2.1. Путем взвешивания определить массу кормового материала  $m_m$ .

2.2. Приняв модуль увлажнения  $W = 1$ , по формуле  $W = m_p/m_m$ , где  $m_p$  – масса вносимого раствора, кг;  $m_m$  – масса сухого кормового материала, кг, определить массу вносимого раствора  $m_p$ .

2.3. Измерить высоту электрода  $h$ , межэлектродное расстояние  $l$  и ширину электрода  $b$ .

2.4. Тщательно перемешать кормовую массу с раствором в специальной емкости (не в рабочей камере!), полученную массу поместить в рабочую камеру.

2.5. Уплотнить кормовую массу (давление  $p = 25$  кПа), установить датчик температуры в отверстие уплотняющей крышки рабочей камеры и измерить рабочую высоту электрода  $h_p$  (м).

2.6. Установив автотрансформатором напряжение  $U = 120$  В, подать напряжение на рабочую камеру. Начиная с  $20$  °С через каждые  $10$  °С, определять величину тока и температуру. Результаты занести в табл. ЛЗ.1.1.

Таблица ЛЗ.1.1

Зависимость удельной электрической проводимости от температуры при различных модулях увлажнения

Температура обработки $t$ , °С	Ток $I$ , А	Напряжение $U$ , В	Напряженность электрического поля $E$ , В/м	Удельная электрическая проводимость $\gamma_t$ , См/м
$W = 1,0$				
20				
30				
40				
...				
80				
$W = 0,8$				
20				
...				
80				
$W = 0,7$				
20				
...				
80				
$W = 0,6$				
20				
...				
80				

2.7. Определить напряженность электрического поля  $E$  (В/м) и удельную электрическую проводимость  $\gamma_t$  (См/м). Напряженность электрического поля:  $E = U/l$ .

Удельную электрическую проводимость определить методом амперметра-вольтметра по формуле

$$\gamma_t = I/(Ubh_p) = I/(Ebh_p).$$

Аналогично определить удельную электрическую проводимость при модуле увлажнения  $W = 0,8; 0,7; 0,6$ . Построить графические зависимости  $\gamma_t = f(t)$  при различных модулях увлажнения и  $\gamma_t = f(W)$  при  $t = 80^\circ\text{C}$ , по которой определить модуль увлажнения, при котором  $\gamma_t$  будет максимальная.

3. Определить зависимость времени обработки  $\tau$  от напряженности электрического поля при модуле увлажнения  $W$ , соответствующем максимальному значению удельной электрической проводимости.

Подготовку и обработку кормового материала производят по методике, изложенной в п. 2. Конечную температуру обработки принять равной  $80^\circ\text{C}$ . Напряженность электрического поля определяют по формуле  $E = U/l$ , автотрансформатором изменяя напряжение в пределах 120; 110; 100 В. Результаты записать в табл. ЛЗ.1.2. По результатам исследований построить графическую зависимость  $\tau = f(E)$ .

Таблица ЛЗ.1.2

Зависимость времени обработки от напряженности электрического поля при  $t = 80^\circ\text{C}$

Напряжение $U$ , В	120	110	100
Напряженность электрического поля $E$ , В/м			
Время обработки $\tau$ , с			

### **Содержание отчета:**

1. Цель и задачи работы.
2. Таблицы с результатами исследований.
3. Графические зависимости  $\gamma_t = f(t)$ ,  $\gamma_t = f(W)$ ,  $\tau = f(E)$ .

### **Контрольные вопросы:**

1. Какие преимущества имеют электротехнологические методы обработки кормовых материалов?
2. Какая классификация установок обработки электрическим током кормовых материалов существует?

3. Какие имеются основные элементы установки обработки электрическим током кормовых материалов и их назначение?

4. Что используют в качестве источников питания установок обработки электрическим током кормовых материалов?

5. Какие основные параметры обработки установок обработки электрическим током кормовых материалов?

## **Лабораторное занятие № 2**

### **Исследование процессов электролиза водных растворов электролитов**

*Цель работы:* исследовать процессы электролиза водных растворов электролитов, изучить устройство, принцип действия электролизеров.

#### ***Задачи работы:***

1. Изучить законы электролиза.
2. Изучить процессы, проходящие на электродах, при электролизе водных растворов электролитов.
3. Изучить устройство, принцип действия электролизеров.
4. Осуществить процесс электролиза воды в электролизере «Невотон».
5. Определить удельную электрическую проводимость воды при электролизе.
6. Исследовать зависимость выхода по току и скорости электролиза от количества электричества.

***Общие сведения.*** Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3, 9], изучить устройство, принцип действия электролизеров, процессы, проходящие на электродах. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

#### ***Задание для самостоятельной подготовки***

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

## Методика выполнения работы

Экспериментальная установка (рис. ЛЗ.2.1) включает электролизер, служащий для обогащения воды ионами серебра, приборы измерения тока  $pA$  и напряжения  $pV$ .

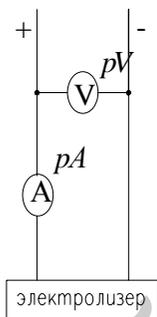


Рис. ЛЗ.2.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

В верхней части корпуса 1 (рис. ЛЗ.2.2) расположена панель управления 2 (рис. ЛЗ.2.3) и электрический блок микропроцессора.

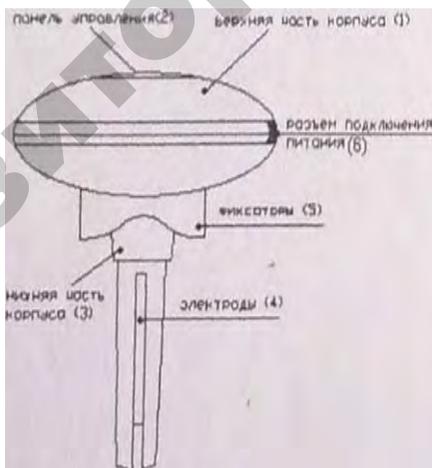


Рис. ЛЗ.2.2. Общий вид электролизера

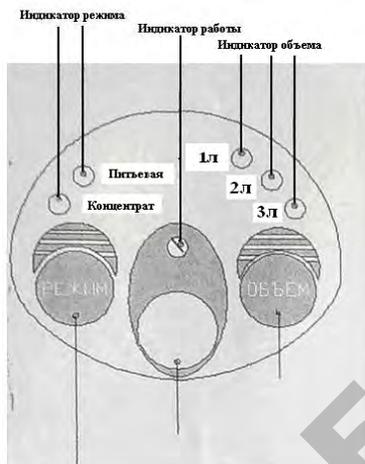


Рис. ЛЗ.2.3. Панель управления электролизера

В нижней трубчатой части размещены три изогнутых ребра 5, фиксирующие электролизер на горловине стандартной стеклянной банки, и электроды 4: один изготовлен из чистого серебра (Ср 999,9), другой – из нержавеющей стали. На стыке верхней и нижней частей имеется разъем 6 для подключения блока питания.

На панели управления (рис. ЛЗ.2.3) размещены кнопки:

- «Режим», устанавливающая концентрацию раствора «Питьевая»–«Концентрат»;
- «Объем», для выбора объема обрабатываемой жидкости (1 л, 2 л, 3 л) в режиме «Питьевая». В режиме «Концентрат» программа электролизера не позволяет выбрать объем;
- «Пуск/Стоп», для включения и отключения электролизера.

Выборный режим отображается свечением соответствующего индикатора.

Банку заполняют водой до указанного уровня и устанавливают на нее электролизер. При этом электроды должны полностью находиться в воде. На панели управления выбирают режим «Концентрат» и кнопкой «Пуск/Стоп» производят включение. Окончание процесса происходит автоматически, о чем сигнализирует мигающий индикатор работы и звуковой сигнал, раздающийся каждые 10 с. Отключение осуществляют также кнопкой «Пуск/Стоп».

При работе электролизера каждые 5 мин измеряют силу тока  $I$  и напряжение  $U$  в цепи. Показания электрических приборов заносят в табл. ЛЗ.2.1.

Таблица ЛЗ.2.1

Результаты экспериментальных исследований

Время работы $t, c$	Сила тока $I, 10^{-3} A$	Напряжение $U, B$	Количество электричества $Q, Кл$	Масса серебра		Удельная эл. проводимость $\gamma, См/м$	Концентрация ионов серебра $C, г/л$	Выход по току $\kappa_{вт}, \%$	Скорость электролиза $\nu, 10^{-6} г/с$
				фактическая $m_{\phi}, г$	теоретическая $m_{т}, г$				
300									
600									
900									
1200									

Определяют удельную электрическую проводимость  $\gamma$ :

$$\gamma = (I/U)k,$$

где  $k = 22,2$  – постоянная ячейки.

По графику  $\gamma = f(C)$  определяют концентрацию ионов серебра  $C$  в воде (рис. ЛЗ.2.4). Данные заносят в табл. ЛЗ.2.1. Рассчитывают фактически полученную массу серебра по формуле

$$m_{\phi} = C V,$$

где  $V$  – объем воды, л.

Определяют:

- теоретическую массу серебра  $m_{т} = \alpha It$  (для серебра  $\alpha = 1,118 \cdot 10^{-3} г/Кл$ );
- выход по току  $\kappa_{вт} = (m_{\phi}/m_{т}) \cdot 100 \%$  ;
- скорость электролиза  $\nu = \alpha I \kappa_{вт}$ .

Результат расчета заносят в табл. ЛЗ.2.1, строят графические зависимости  $\kappa_{вт} = f(Q)$ ,  $\nu = f(Q)$ .

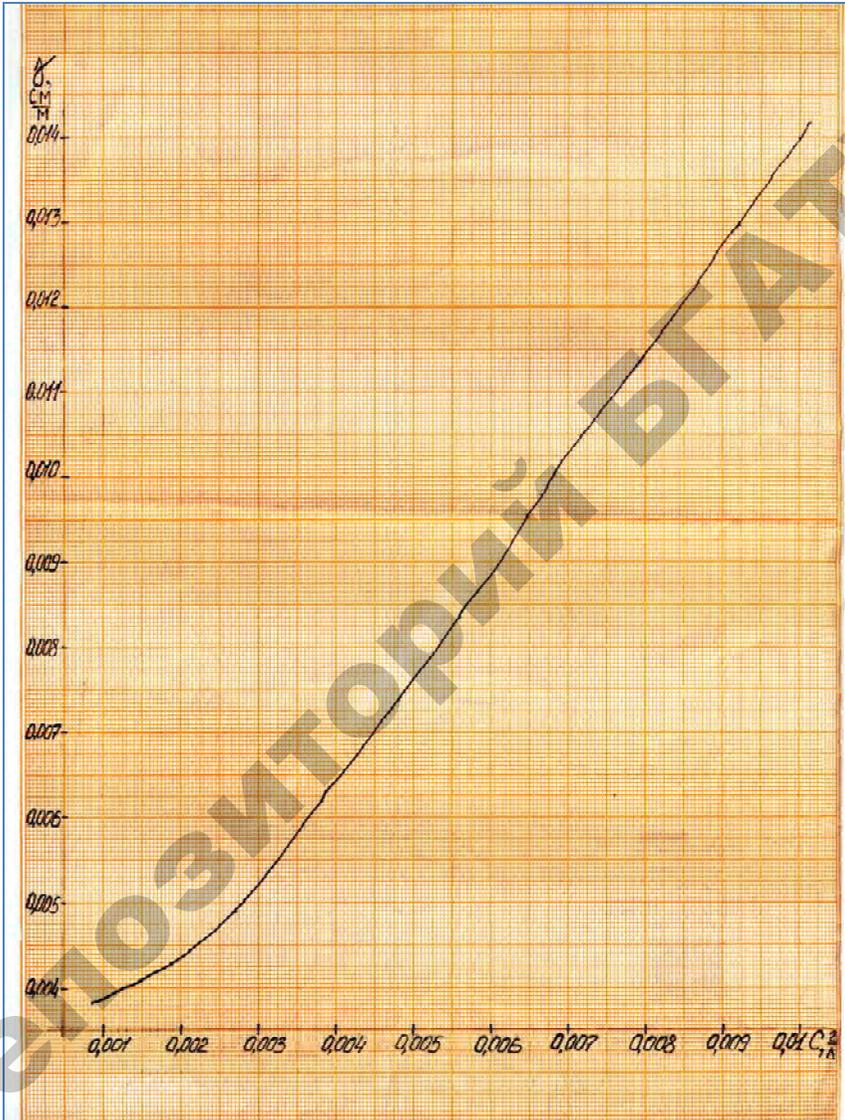


Рис. ЛЗ.2.4. Зависимость удельной электрической проводимости воды от концентрации ионов серебра

### ***Содержание отчета:***

1. Цель, задачи работы.
2. Таблица с результатами исследований.
3. Графические зависимости  $\kappa_{вт} = f(Q)$ ,  $v = f(Q)$ .
4. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что такое электролиз, какими законами описывается?
2. Какие процессы проходят на электродах при электролизе водных растворов?
3. Каковы устройство и принцип действия электролизеров?
4. Какие источники питания применяют для электролизеров?
5. Опишите методику определения выхода по току.
6. Как рассчитать скорость электролиза?
7. Где применяют электролизеры?

## **Лабораторное занятие № 3**

### **Исследование установки дозированного высева семян**

*Цель работы:* изучить назначение, устройство и принцип действия установки дозированного высева семян, экспериментально получить ее эксплуатационные характеристики.

#### ***Задачи работы:***

1. Изучить воздействие электрического поля на движущийся поток семян.
2. Ознакомиться с конструкцией и принципом работы установки дозированного высева семян.
3. Исследовать зависимость напряжения запирающего потока от величины зазора между электродами.
4. Определить зависимости расхода семян от напряженности электрического поля и величины зазора между электродами.

***Общие сведения.*** Используя теоретический материал главы 1 и литературу [3, 9], изучить устройство, принцип действия установки

дозированного высева семян. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

### **Задание для самостоятельной подготовки**

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

### **Методика выполнения работы**

1. Изучить электрическую схему и конструкцию установки дозированного высева семян (рис. ЛЗ.3.1).

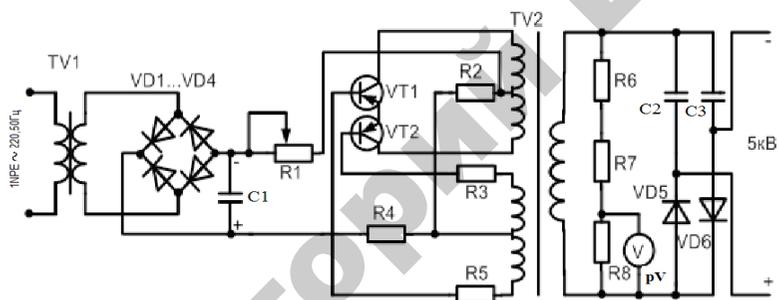


Рис. ЛЗ.3.1. Принципиальная электрическая схема установки дозированного высева семян

**Внимание!** Источник питания установки для дозированного высева семян – высоковольтный, поэтому при работе с ним нужно соблюдать следующие правила техники безопасности:

- аппарат должен быть надежно заземлен через клемму «земля»;
- при отключении аппарата выходные высоковольтные цепи нужно надежно заземлить, так как в схеме используются высоковольтные конденсаторы, которые являются накопителями энергии и требуют разрядки во избежание поражения электрическим током;
- переключать пределы измерений приборов, аппаратов и элементов схемы можно только при отключенном источнике питания;
- все работы при включенном высоком напряжении выполняются только с разрешения преподавателя.

2. Регулируя зазор между электродами  $\Delta$  при постоянном напряжении  $U_3$  (по указанию преподавателя) определить расход сыпучего материала при свободном истечении опытным путем и теоретически по  $U_3 = E_3\Delta$ , где  $E_3$  – средняя напряженность запирающего поля, равная 700–800 кВ/м для переменного тока и 500–600 кВ/м для постоянного тока. Результаты свести в табл. ЛЗ.3.1.

Таблица ЛЗ.3.1

Зависимость расхода сыпучего материала от зазора между электродами

Зазор между электродами, $10^{-3}$ м	2	3	4	5	6
Площадь сечения проходного отверстия, $10^{-6}$ м <sup>2</sup>					
Расход сыпучего материала при свободном истечении, $10^{-3}$ кг/с					

3. Изменяя рабочее напряжение, при постоянном зазоре  $\Delta = 3 \cdot 10^{-3}$  м, определить расход сыпучего материала опытным путем и теоретически по  $Q = Q_0 \left( 1 - \frac{U}{U_3} \right)$ ,

$$Q = Q_0 \left( 1 - \frac{U}{U_3} \right),$$

где  $Q_0$  – расход сыпучего материала при отсутствии электрического поля ( $U = 0$ );

$U$  – напряжение, приложенное к электродам;

$U_3$  – напряжение запирающего потока ( $Q = 0$ ).

Результаты записать в табл. ЛЗ.3.2.

Таблица ЛЗ.3.2

Зависимость расхода сыпучего материала  
от напряженности электрического поля

Рабочее напряжение, кВ	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Напряженность электрического поля, кВ/м							
Расход сыпучего материала, $10^{-3}$ кг/с							

**Содержание отчета:**

1. Цель и задачи работы.
2. Таблицы с результатами исследований.
3. Графические зависимости  $Q_0(\Delta)$ ,  $Q(E)$ .

**Контрольные вопросы:**

1. Какое действие оказывает электрическое поле на семена сельскохозяйственных культур?
2. Каковы конструкция и принцип работы установки для дозированного высева семян?
3. Где применяют установки для дозированного высева семян?
4. В чем состоит работа принципиальной электрической схемы установки для дозированного высева семян?

## 2. ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### 2.1. Особенности импульсного использования энергии

Увеличение энергии, выделяемой в объекте воздействия при непрерывном ее подводе, сопряжено со значительным ростом мощностей источников питания. В этом случае при некоторых пороговых или критических значениях параметров невозможно реализовать процесс.

Электроимпульсные технологические процессы характеризуются прерывистым подводом энергии с определенной длительностью, частотой и скважностью. Благодаря концентрации мощности при импульсном подводе энергии можно интенсифицировать многие процессы, снизить их энергоемкость, а в некоторых случаях получить такие результаты, которые недостижимы при традиционных методах. С помощью современных электротехнических средств создают импульсы тока или напряжения, которые непосредственно в объекте могут преобразовываться в механическую, магнитную, оптическую, химическую и другие виды энергии.

Технологические процессы, основанные на использовании импульсного воздействия, в том числе высоковольтных разрядов в различных средах, применяют для обработки сельскохозяйственного сырья и материалов (например, очистки и стерилизации), управления поведением животных, при электрофизической обработке металлов, разрушении, дроблении и измельчении материалов и т. п.

Эффективность воздействия зависит не только от амплитудных значений мощности, тока и напряжения, но и их изменения во времени, т. е. от формы импульсов и их периодичности. Импульсы формируют с помощью генераторов, преобразующих исходный постоянный или переменный ток в импульсный требуемых параметров или непрерывно подводимую неэлектрическую энергию в прерывистую электрическую.

## 2.2. Генераторы электрических импульсов и их параметры

Методы генерирования силовых импульсов условно разделяют на непосредственные, путем инвертирования, формирования (изменения формы кривой) и суммирования или компенсации.

К устройствам с непосредственным генерированием относят электромашинные и статические электромагнитные генераторы симметричных униполярных импульсов на магнитонасыщенных элементах, основанные на одноступенчатом преобразовании исходных видов энергии в импульсную.

Системы генерирования импульсов делят на подключаемые параллельно нагрузке (релаксационные, электромашинные и др.), последовательно с ней (генераторы с прерывателями и ключами) и комбинированные.

По характеру влияния нагрузки на генератор и его реакции на нагрузку можно выделить *независимые* и *зависимые генераторы импульсов*. У *независимых* амплитуда, длительность, полярность, частота и форма импульсов не зависят от состояния нагрузки во время работы, у *зависимых* эти параметры определяются не только генератором, но и нагрузкой.

Первыми широко применяемыми генераторами были релаксационные. Они просты по устройству и эксплуатации, и поэтому используются в сельскохозяйственном производстве. Название обусловлено зависимостью параметров импульсов от состояния межэлектродного промежутка, процесса его деионизации. Различают  $RC$ -,  $RLC$ -,  $RCL$ -,  $CL$ -,  $LC$ -,  $CC$ -генераторы. Все они содержат зарядную и разрядную цепи.

Основные параметры генераторов импульсов определяются технологическими условиями. Это параметры импульсов (амплитуда токов разряда, энергия и средняя мощность импульса, количество электричества в нем, периодичность повторения, скважность), а также напряжение питания, мощность генератора, напряжение в начале разряда.

Схема простейшего независимого релаксационного генератора  $RC$  типа представлена на рис. 2.1.

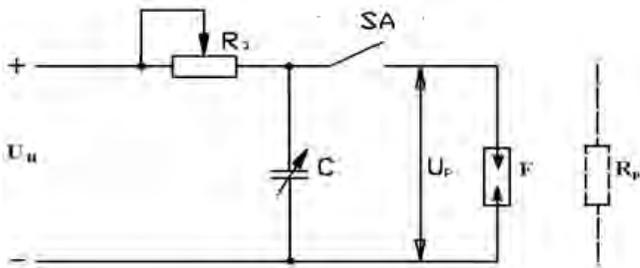


Рис. 2.1. Принципиальная схема простейшего релаксационного генератора импульсов  $RC$ :  
 $R_3$  – сопротивление зарядной цепи;  $C$  – конденсатор;  $F$  – разрядник;  
 $R_p$  – сопротивление разрядной цепи;  $SA$  – коммутирующее устройство

Генератор питается от источника постоянного тока и содержит зарядную и разрядную цепь. Зарядная цепь включает сопротивление  $R_3$  и конденсатор  $C$ , разрядная – конденсатор  $C$ , коммутирующее устройство  $SA$  и разрядник  $F$ . В конденсаторе  $C$  происходит периодическое накопление электрического заряда с последующим разрядом на сопротивление  $R_p$  при срабатывании коммутирующего устройства  $SA$  (рис. 2.2).

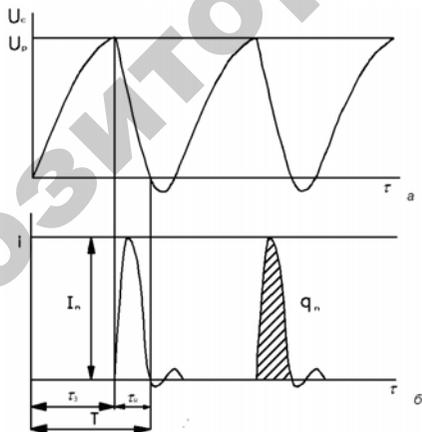


Рис. 2.2. Графики изменения напряжения на конденсаторе (а) и импульсов тока в разрядной цепи (б)

В период заряда напряжение на конденсаторе (см. рис. 2.1) возрастает по экспоненциальному закону:

$$U_c = U_n (1 - e^{-\tau/(R_3C)}), \quad (2.1)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение, В;

$\tau$  – время от начала разряда, с;

$R_3$  – сопротивление зарядной цепи, Ом.

За время заряда  $\tau_3$  напряжение на конденсаторе достигает значения

$$U_p = U_n (1 - e^{-\tau_3/(R_3C)}). \quad (2.2)$$

Прологарифмировав выражение (2.2), получим время заряда конденсатора:

$$\tau_3 = R_3 C \ln(U_p / (U_n - U_p)) = R_3 C \ln(1 / (1 - \alpha)). \quad (2.3)$$

При разряде напряжение на конденсаторе также изменяется по экспоненте

$$U_c = U_p (1 - e^{-\tau/(R_pC)}), \quad (2.4)$$

где  $R_p$  – сопротивление разрядной цепи, Ом.

Величину  $T_p = R_p C$  называют *постоянной времени разряда*,  $T_3 = R_3 C$  – *постоянной времени заряда*.

Ток разряда (ток импульса) конденсатора:

$$i = \frac{U_c}{R_p} e^{-\tau/(R_pC)} = I_m e^{-\tau/(R_pC)}. \quad (2.5)$$

Количество электричества в импульсе

$$\begin{aligned} q &= \int_0^{\tau_n} i d\tau = \int_0^{\tau_n} I_m e^{-\tau/(R_pC)} d\tau = I_m R_p C (1 - e^{-\tau_n/R_pC}) = \\ &= I_m T_p (1 - e^{-\tau_n/R_pC}). \end{aligned} \quad (2.6)$$

В начале разряда напряжение на конденсаторе  $U_c = U_p$ , поэтому заряд конденсатора

$$q_c = C U_p,$$

тогда емкость конденсатора

$$C = q_c / U_p. \quad (2.7)$$

Основными параметрами генераторов импульсов (ГИ) являются:

– энергия импульса  $W$ , Дж:

$$W = \frac{1}{2} C U_p^2, \quad (2.8)$$

где  $C$  – емкость конденсатора, Ф;

$U_p$  – напряжение разряда, В;

– количество электричества в импульсе (сила импульса)  $q_n$ , Кл:

$$q_n = \int_0^{\tau_n} i(\tau) d\tau, \quad (2.9)$$

где  $i(\tau)$  – изменение тока импульса во времени;

$\tau_n$  – продолжительность импульса, с;

– амплитудное значение тока разряда  $I_m$ , А:

$$I_m = \frac{U_p}{R_p}, \quad (2.10)$$

где  $R_p$  – сопротивление разрядной цепи, Ом;

– период колебаний  $T$ , с:

$$T = \frac{1}{f}; \quad (2.11)$$

– частота следования импульсов  $f$ , Гц:

$$f = \frac{1}{\tau_3 + \tau_n} \approx \frac{1}{\tau_3} = \frac{1}{RC \ln \frac{U_H}{U_H - U_p}}, \quad (2.12)$$

где  $\tau_3$  – время зарядки конденсатора, с;  
 $R$  – сопротивление зарядной цепи, Ом;  
 $U_n$  – напряжение источника питания, В;

– скважность импульсов  $S$ :

$$S = \frac{T}{\tau_n}. \quad (2.13)$$

### 2.3. Электрические изгороди

*Электрические изгороди* (ЭИ) применяют для загонной пастбищ скота, ограждения летних лагерей, управления поведением животных и др.

Применение электрических изгородей основано на биологическом действии электрического тока, который, проходя через тело животного, вызывает раздражение нервов и мышц, неприятное ощущение электрического «удара». В результате у животных через некоторое время вырабатывается условный рефлекс боязни прикосновения к ограждающей проволоке.

Электрическая изгородь включает в себя генератор импульсов и собственно изгородь, в состав которой входят опорные стойки с изоляторами и токоведущая линия.

Стойки обычно располагают через 10–20 м, токоведущую линию выполняют из стальной оцинкованной проволоки диаметром 1,2–2,0 мм или токопроводящих шнуров на синтетической основе. Линия может быть одно- или многопроволочной, высота подвеса – 30–90 см (в зависимости от вида и возраста животных). Преимущества ЭИ по сравнению с обычными ограждениями: затраты материалов ниже, время на сооружение и ремонт значительно меньше.

Электрические импульсы должны отвечать определенным зоотехническим требованиям, обеспечивающим безопасность здоровья животных и эффективность работы (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Рекомендуемые параметры генераторов импульсов

Параметры	Требования	
	по условиям эффективности работы	условиям безопасности
1. Амплитудное значение напряжение на изгороди, кВ	Не менее 2	2–10
2. Амплитудное значение тока, мА	Не регламентировано	Не более 150
3. Частота импульсов, мин <sup>-1</sup>	Не более 120	Не менее 60
4. Количество электричества в импульсе, мКл	3	Не более 2,5
5. Длительность импульсов, с	Не регламентировано	Не более 0,1
6. Перерывы между импульсами, с	Не регламентировано	Не менее 0,7

Для ЭИ обычно применяют RC-генераторы как наиболее простые и легкоуправляемые. Они могут быть с индуктивным и емкостным выходом.

В генераторах с индуктивным выходом на накопительном конденсаторе при заряде создается низкое напряжение, затем через коммутирующее устройство он разряжается на первичную обмотку повышающего трансформатора.

Импульс высокого напряжения, индуцируемый во вторичной обмотке трансформатора, поступает на токоведущую линию (ТВЛ) изгороди. К этому типу относят генераторы изгородей ИЭ-200, ЭК-1М, «Импульс», ГИЭ-1 и др.

В генераторах с емкостным выходом на накопительном конденсаторе создается высокое напряжение; затем через коммутирующее устройство он разряжается непосредственно на ТВЛ изгороди. Примером может служить генератор EZK10 «Gerberus» (Германия).

Генераторы, как правило, могут работать в двух режимах: автоколебательном (импульсы поступают на ТВЛ непрерывно) и

ждушем (они подаются только при прикосновении животных к ТВЛ). При работе в ждущем режиме можно существенно продлить срок службы автономных источников питания.

Принципиальная электрическая схема генератора ИЭ-200 показана на рис. 2.3.

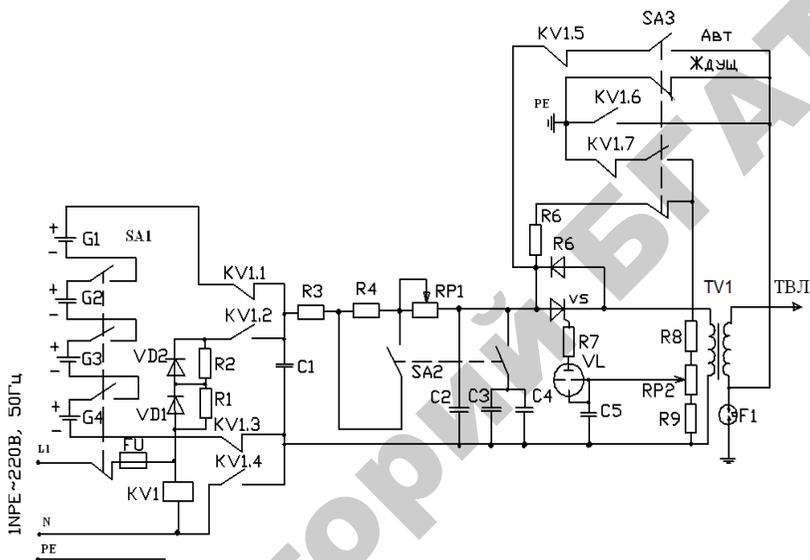


Рис. 2.3. Принципиальная электрическая схема генератора импульсов ИЭ-200

Питание генератора осуществляют либо от сети переменного тока 220 В через выпрямитель, включающий диоды  $VD1$ ,  $VD2$ , сопротивления  $R1$ ,  $R2$ , конденсатор  $C1$ , либо от батареи сухих элементов  $G1$ – $G4$  (12 В). Включение производят выключателем  $SA1$ . Генератор работает в двух режимах: автоматическом и ждущем. Режим работы задают переключателем  $SA3$ : верхнее положение – автоматический режим, нижнее – ждущий. Частоту и силу импульсов изменяют величиной емкости конденсаторов  $C2$ – $C4$  и резисторами  $R4$ ,  $RP1$ ,  $RP2$ .

Автоматический режим: при включении  $SA1$  происходит зарядка конденсатора  $C2$  (или  $C2$ ,  $C3$ ,  $C4$  при включенном  $SA2$ ).

Одновременно напряжение от источника питания подается через резистор  $R6$  и нижний (размыкающий) контакт  $SA3$  на делитель напряжения на резисторах  $R8$ ,  $RP2$ ,  $R9$ . С делителя снимается часть напряжения для зарядки конденсатора  $C5$ . По мере зарядки  $C5$  на нем возрастает напряжение до тех пор, пока не достигнет величины зажигания тиратрона  $VL$ . При открытии тиратрона конденсатор  $C5$  разряжается через  $VL$  и ограничивающий резистор  $R7$  на управляющий электрод тиристора  $VS$ , последний открывается, и конденсатор  $C2$  разряжается через первичную обмотку повышающего трансформатора  $TV1$ , вызывая во вторичной обмотке импульс высокого напряжения. Вторичная обмотка заземлена через разрядник  $F1$ , и при прикосновении к проволоке ограждения животное попадает под напряжение и получает «электрический удар».

Ждущий режим: включают после «привыкания» животного к изгороди, выработки у него условного рефлекса боязни изгороди. Напряжение от источника питания (только батарея сухих элементов  $G1-G4$ ) подается через верхний (замыкающий) контакт  $SA3$  на вторичную обмотку трансформатора и через нее на ТВЛ изгороди. При прикосновении животного к ТВЛ возникает ток величиной  $0,1$  мА, протекающий по цепи: источник питания–замыкающий контакт  $SA3$ –вторичная обмотка трансформатора  $TV1$ –ТВЛ–тело животного–земля–резисторы  $R8$ ,  $RP2$ ,  $R9$ .

Конденсатор  $C5$  заряжается. Образуется импульс высокого напряжения в последовательности, изложенной выше, поступающий в линию до тех пор, пока животное касается проволоки. Импульсы в ТВЛ появляются через  $0,2$  с.

Работа генератора импульсов ГИЭ-1 (рис. 2.4) основана на изменении сопротивления между ТВЛ и землей. Источником питания генератора служат батарея сухих элементов  $GB1-GB12$ , аккумуляторная батарея  $12$  В или сеть переменного тока  $220$  В, избираемых переключателем  $SA1$ . ГИЭ-1 содержит следующие блоки: блок питания  $A1$  (батарея  $GB1-GB12$  или трансформатор  $TV1$  и выпрямитель  $UZ1$ ); стабилизатор напряжения  $A2$  (стабилитрон  $VD3$ , транзисторы  $VT2$ ,  $VT4$ ,  $VT5$ , резистор  $R6$ ); преобразователь постоянного напряжения  $A3$  (резисторы  $R13$ ,  $R14$ , конденсатор  $C5$ , транзисторы  $VT8$ ,  $VT9$ ,

трансформатор  $TV2$ , выпрямитель  $UZ2$ ); емкостной накопитель энергии  $A4$  (конденсаторы  $C7, C8$ ); пороговое устройство  $A5$  (транзисторы  $VT1, VT3$ ); исполнительный элемент  $A6$  (транзисторы  $VT6, VT7$ ). Режим работы задают переключателем  $SA2$  (верхнее положение – автоматический, нижнее – ждущий).

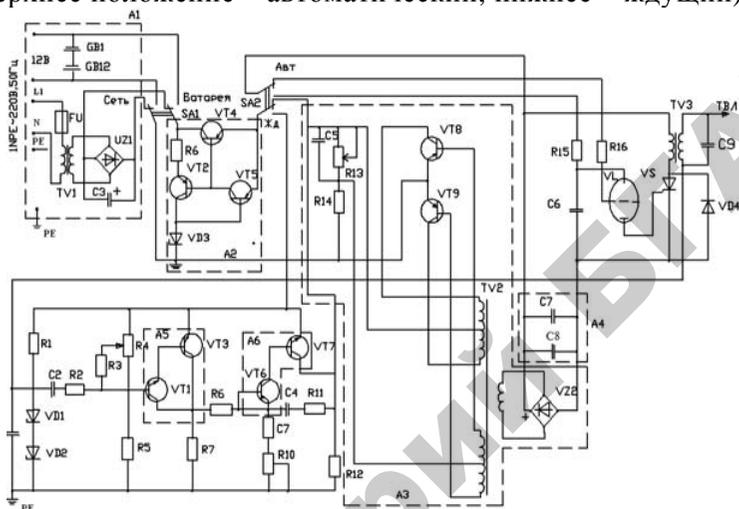


Рис. 2.4. Принципиальная электрическая схема генератора импульсов ГЭИ-1:  
 $A1$  – блок питания;  $A2$  – стабилизатор напряжения;  $A3$  – преобразователь постоянного напряжения;  $A4$  – емкостной накопитель энергии;  $A5$  – пороговое устройство;  $A6$  – исполнительный элемент

Автоматический режим: напряжение с выхода стабилизатора  $A2$  подается в преобразователь постоянного напряжения  $A3$ , и через выпрямитель заряжается емкостной накопитель энергии  $A4$ . Одновременно происходит зарядка конденсатора  $C6$  через резистор  $R16$ . При достижении напряжения на  $C6$  значения напряжения открытия тиратрона  $VL$  последний открывается, и конденсатор  $C6$  разряжается через тиратрон  $VL$  на управляющий электрод тиристора  $VS$ . Тиристор открывается, емкостной накопитель разряжается на первичную обмотку повышающего высоковольтного трансформатора  $TV3$ , во вторичной обмотке которого возникает импульс, поступающий в ТВЛ электроизго-

рода (один вывод вторичной обмотки соединен с ТВЛ, другой – заземлен через цепочку стабилитронов *VD1* и *VD2*).

Ждущий режим: с выхода стабилизатора так называемое дежурное напряжение порядка 7 В подается через резистор *R1* и вторичную обмотку трансформатора *TV3* на ТВЛ изгороди. При контакте животного с ТВЛ сопротивление между ТВЛ и землей резко изменяется, что приводит к появлению напряжения между ТВЛ и землей и формированию сигнала, поступающего на вход порогового устройства *A5*, которое усиливает поступающий сигнал и передает его на исполнительный элемент *A6* (несимметричный мультивибратор). Через цепочку коллектор–эмиттер выходного транзистора *VT7* подается напряжение от стабилизатора к преобразователю постоянного напряжения.

Далее схема работает как в автоматическом режиме. Конденсатор *C9*, включенный параллельно вторичной обмотке трансформатора *TV3*, служит для повышения КПД генератора импульсов. Шунтирующий диод *VD4* защищает тиристор от обратного перенапряжения при переходном процессе во время разрядки накопителя. Стабилитроны *VD1*, *VD2* защищают устройство обнаружения контакта животного с ТВЛ от попадания высоковольтного импульса. В ждущем режиме эти стабилитроны создают разрыв в цепи и не влияют на формирование сигнала, возникающего при прикосновении животного к ТВЛ. При появлении высоковольтного импульса в ТВЛ стабилитроны *VD1* и *VD2* проводят ток, замыкая на землю один из выводов вторичной обмотки трансформатора *TV3*. При этом на вход устройства обнаружения контакта животного с ТВЛ попадает только напряжение стабилизации, возникающее на стабилитронах.

Генератор «Импульс» (рис. 2.5) включает источник питания *A1*, состоящий из батареи солнечных элементов типа БС-4 и конденсатора *C1*; блокинг-генератора *A2* (транзистор *VT1*, трансформатор *TV1*), преобразующего постоянное напряжение в переменное; выпрямителя с удвоением напряжения *A3* (диоды *VD1*, *VD2*, конденсаторы *C2*, *C3*), накопительного конденсатора *C4*, диносторов *VD3*, *VD4*, высоковольтного трансформатора *TV2*.

Переменное напряжение, получаемое от блокинг-генератора, преобразуется в постоянное выпрямителем, от которого проис-

ходит зарядка конденсатора  $C4$  до тех пор, пока напряжение на нем не превысит напряжение пробоя диодисторов. При пробое последних конденсатор  $C4$  разряжается через диодисторы на первичную обмотку высоковольтного трансформатора, во вторичной обмотке которого индуцируется импульс высокого напряжения, подаваемый на ТВЛ изгороди. После разрядки конденсатора диодисторы восстанавливаются, начинается новый процесс зарядки  $C4$ , цикл повторяется.

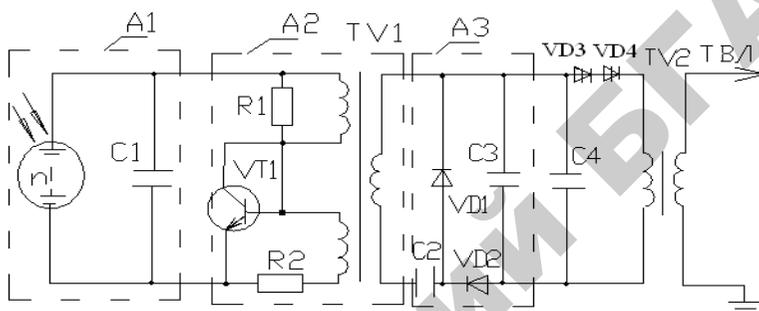


Рис. 2.5. Принципиальная электрическая схема генератора «Импульс»:  
 A1 – источник питания; A2 – блокинг-генератор;  
 A3 – выпрямитель с удвоением напряжения

При эксплуатации ЭИ следует соблюдать определенные правила безопасности:

- на ТВЛ в хорошо видимых местах должны быть установлены предупредительные плакаты «Опасно! Электрическая изгородь»;
- допускаются к эксплуатации только исправные электроизгороди заводского изготовления;
- запрещается подвеска ТВЛ электроизгородей на опоры высокого и низкого напряжения линий электропередачи, линий связи;
- электроизгороди устанавливаются от ЛЭП высокого напряжения на расстоянии не менее 10 м;
- к обслуживанию электроизгородей допускаются лица, прошедшие инструктаж, ознакомленные с устройством, принципом

действия и правилами обслуживания; текущий ремонт может производить только электрик, имеющий группу ТБ не ниже 3;

– не допускается обслуживание и ремонт электроизгородей во время грозы;

– запрещается касаться руками ТВЛ электроизгородей.

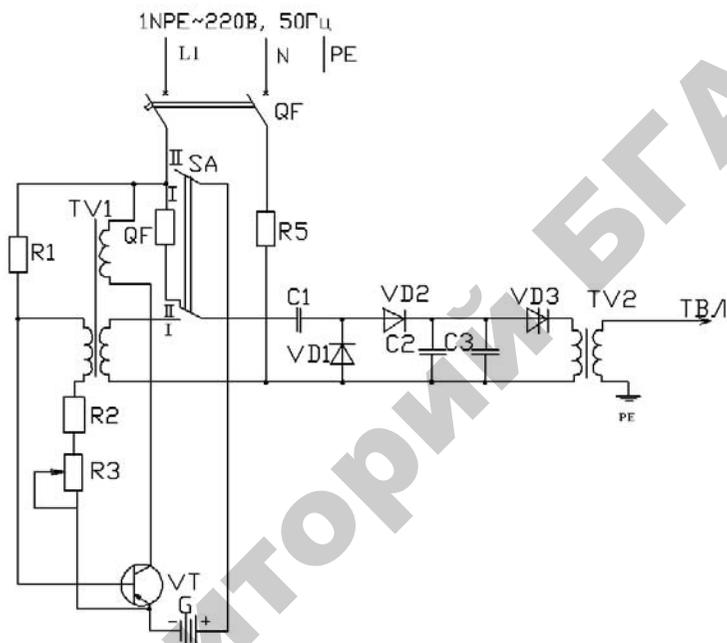


Рис. 2.6. Принципиальная электрическая схема генератора импульсов ИЭ-4

Генератор импульсов ИЭ-4 (рис. 2.6) работает аналогично генератору «Импульс».

## 2.4. Электроимпульсная обработка растительного сырья

Электроимпульсную обработку растительного сырья производят с различными технологическими целями: для ускорения одновременного дозревания на корню семян подсолнечника и ли-

стве табака; повышения эффективности извлечения сока из плодового сырья; интенсификации сушки различных растительных материалов; борьбы с сорняками и т. д.

При импульсном воздействии на растительную ткань происходит повреждение клеточных мембран и вытекание клеточного сока, что приводит к ускорению сушки или гибели растения.

При уборке подсолнечника по традиционной технологии из-за неодновременного созревания и высыхания семян потери урожая составляют до 20 %. Предварительная электроимпульсная обработка позволяет исключить указанные недостатки.

Стебли с помощью делителей, не задевая электроды, направляют в межэлектродное пространство. При прохождении стебля между электродами изменяется напряженность электрического поля, что приводит к искровому пробое. Растительные клетки разрушаются, образуется специфический тромб, прекращающий приток воды к семянке и отток питательных веществ из нее к вегетативным органам растения, благодаря чему период дозревания и высыхания семян сокращается, а их масличность увеличивается.

В обработанном сечении стебля через 1,5–3 ч образуется темный поясок шириной 10–15 мм, который постепенно темнеет и сжимает стебель. В результате потери устойчивости, стебель под тяжестью корзины сгибается и свешивается вниз. Часть растения, расположенная выше места обработки, быстро высыхает. Нижняя часть остается зеленой и может быть убрана на силос.

Через 5–10 дней после обработки влажность семян снижается до 11–13 %, и подсолнечник убирается комбайнированием.

Сушку сена производят с целью снижения затрат путем частичного удаления влаги. Зеленую массу перед сушкой подвергают электроимпульсной обработке, что приводит к повреждению клеток и вытеканию клеточного сока.

Наиболее применяема и эффективна установка, представленная на рис. 2.7.

Зеленая масса из загрузочного бункера 5 по транспортеру 1 попадает под диэлектрический барьер 4, на котором закреплены электроды 3, где подвергается обработке. Напряжение воздейст-

вия составляет 20 кВ, энергия импульса – 50 Дж, энергоемкость – 0,5 кВт/т.

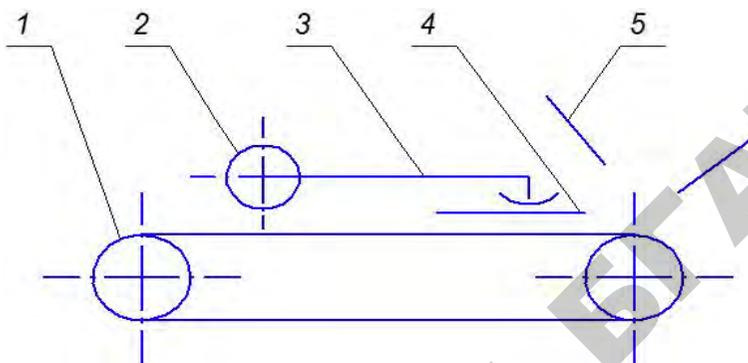


Рис. 2.7. Схема установки транспортерного типа электроимпульсной обработки растительного сырья:

- 1 – транспортер;
- 2 – барабан с электродами;
- 3 – электроды;
- 4 – диэлектрический барьер;
- 5 – загрузочный бункер

Применение электроимпульсной обработки для *уничтожения сорняков* можно рассматривать как альтернативу традиционным способам: использование экологически чистых технологий; возможность избирательного уничтожения очагов сорных растений, уничтожение вместе с сорняками вредителей и возбудителей заболеваний культурных растений, обитающих в почвенно-корневой структуре сорных трав.

Установку обычно монтируют на тракторе, от вала отбора мощности которого приводят во вращение генератор напряжения. Высокое напряжение подводят к сорнякам по горизонтальной штанге, вынесенной в полевую зону. Второй полюс источника питания подключают к рабочему органу трактора, перемещающегося в почве. Сорняки, которые выше культурных растений, при контакте со штангой подвергаются воздействию электрического тока и через 2–3 дня засыхают.

Электрические параметры электроимпульсных установок уничтожения сорняков представлены в табл. 2.2 [1].

Таблица 2.2

Значения электрических параметров для уничтожения сорняков

Характеристика, параметр	Ед. измерения	Вид сорняка				
		осот розовый	осот полевой	вьюнок полевой	молокан татарский	молодой чай лозный
Емкость разрядного контура	нФ	3,95				
Напряжение на емкости	кВ	20				
Индуктивность контура	мкГн	100–110				
Энергия импульса	Дж	0,79				
Число импульсов на одно растение	шт.	152	203	254	101	1013
Длительность импульса	мкс	125				
Энергия, затрачиваемая на уничтожение одного сорняка	Дж	120	160	200	80	800
Частота следования импульсов при скорости движения 4 км/ч	Гц	338	451	564	374	1608
Длительность обработки одного растения	с	0,41	0,41	0,41	0,25	0,57
Расход электроэнергии на 1 га (≈ 10 тыс. сорняков)	кВт·ч	3,3	4,44	5,6	2,22	22,2
Мощность источника питания при ширине захвата 6,2 м	кВт	2,36	2,92	3,94	1,95	12,11



Рис. 2.8. Принципиальная схема электроимпульсной обработки сорняков (дачный вариант):

*ИП* – источник питания 12 В (аккумуляторная батарея); *ППН* – повышающий преобразователь напряжения постоянного в переменное (до 220 В); *ВЧП* – высокочастотный преобразователь напряжения; *ИВН* – источник высокого напряжения

Принципиальная схема установки электроимпульсной обработки сорняков (дачный вариант) представлена на рис 2.8.

## 2.5. Электрогидравлические технологии

Работа электрогидравлических установок основана на электрогидравлическом эффекте (ЭГЭ) – способе непосредственного преобразования электрической энергии в механическую путем электрического разряда в жидкости. Этот процесс сопровождается ударными волнами, ультразвуковыми колебаниями, кавитационными явлениями, а также инфракрасным, ультрафиолетовым излучениями и ионизацией жидкости.

Для получения ЭГЭ, как правило, применяют релаксационные генераторы (рис. 2.9).

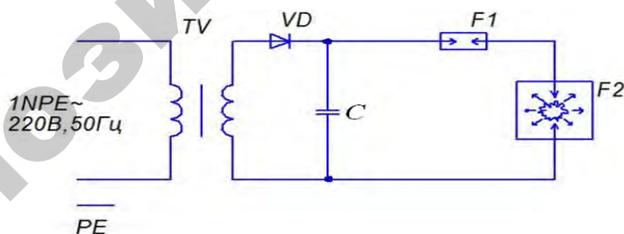


Рис. 2.9. Принципиальная схема генератора импульсов электрогидравлической установки:

*TV* – повышающий трансформатор; *VD* – выпрямительный диод; *F1* – воздушный разрядник; *F2* – рабочий межэлектродный промежуток в жидкости

При подаче напряжения заряжается конденсатор  $C$  до напряжения пробоя воздушного разрядника  $F1$ . Происходит его пробой, и высокое напряжение (0,5–70 кВ) прикладывается к рабочему промежутку. Возникает разряд. Стадии возникновения разряда (рис. 2.10):

- ионизация жидкости, образование канала разряда;
- разряд: выделение энергии в канале разряда, ток достигает сотен тысяч ампер, температура – 10 000 °С;
- разогрев, испарение жидкости создают давление в зоне разряда до 1500 МПа. Возникает ударная волна: прямая – при расширении и обратная – при сжатии. Волны сжатия и расширения, чередуясь между собой, вызывают интенсивные кавитационные процессы.

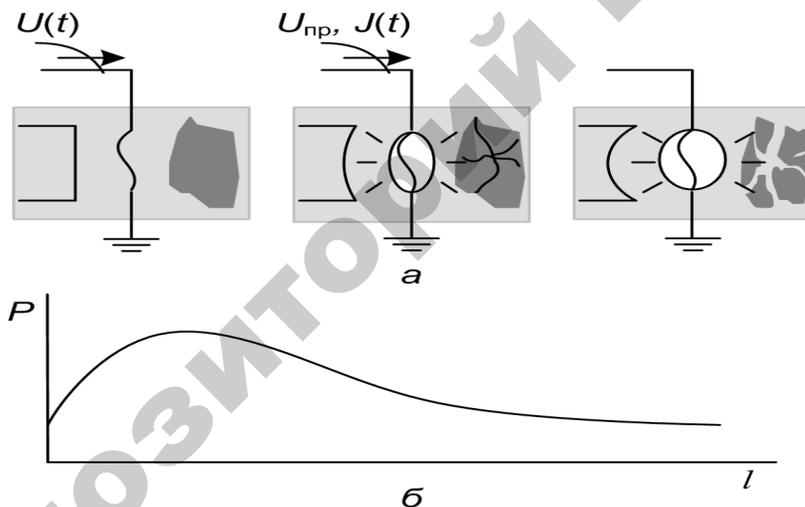


Рис. 2.10. Схема электрогидравлического процесса (а) и зависимость давления  $P$  от расстояния до канала разряда  $l$  (б)

Энергия, выделяющаяся в канале разряда, расходуется на механическую работу расширения и сжатия жидкости (около 50 %), а также нагрев, ионизацию, диссоциацию, возбуждение частиц жидкости.

При расчете электрогидравлических установок находят межэлектродное расстояние, мощности разрядной цепи и потребляемую от выпрямителя, емкость накопительного конденсатора, напряжение питания выпрямителя при известном (зарядном) давлении на объект воздействия, определяемом технологическими требованиями.

Применение ЭГЭ перспективно в самых различных областях, промышленности и сельского хозяйства: дроблении материалов, обеззараживании сред, сварке, ремонте двигателей автомобилей и т. д. Отдельные технологические процессы уже используют на производстве, другие находятся в стадии разработки.

Электрогидравлическая технология обеспечивает безосколочное разрушение камней размером в несколько кубометров, поскольку валуны иногда невозможно вывезти за пределы поля и их приходится разрушать на месте. В валуне сверлят отверстие-шурф диаметром 25 мм и длиной 500 мм. Шурф заливают водой и в него устанавливают «взрыватель», представляющий собой два изолированных провода, оголенные концы которого установлены на заданном расстоянии. «Взрыватель» подключают к генератору импульсов. При подаче напряжения возникает ударная волна, формирующая трещину. Происходит разрушение камня.

Для реализации данного способа разработаны передвижные установки «Вулкан» и ЭГУРН. Установка ЭГУРН содержит генератор импульсов, пульт управления, двигатель внутреннего сгорания с генератором переменного тока, два электро- или пневмоперфоратора с компрессором ДК-9. Напряжение – 6 кВ, энергия импульса – 150 кДж, расход электроэнергии – 0,2 кВт·ч/м<sup>3</sup>, установленная мощность – 10 кВт·А.

При электрогидравлическом дроблении исходное сырье погружается в воду и разрушается ударной волной. На рис. 2.11 представлена схема электрогидравлической дробилки для получения щебня с распределением по двум фракциям.

Под воздействием ударной волны горная масса, загружаемая на решетку, разрушается, и готовый щебень проваливается на решетку 6, проходя через которую, опускается на наклонное сито 7. Мелкий щебень проходит через него на конвейер мелкой фракции 8, а крупный, скатываясь по ситу, попадает на конвейер крупной

фракции 9. Конденсаторы 2, разрядники 3 и рабочие электроды 4 окружены высоковольтным защитным кожухом 10. Фундамента для своей установки дробилка не требует.

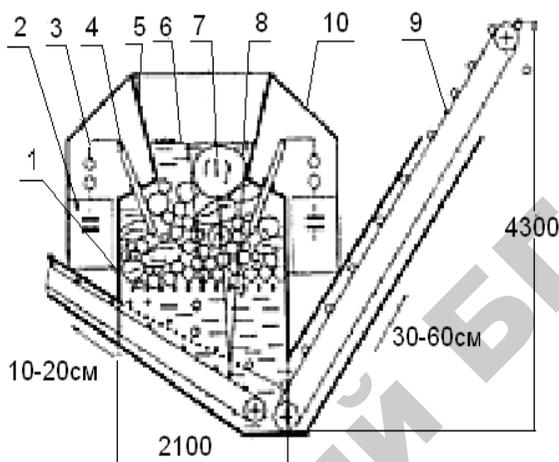


Рис. 2.11. Электрогидравлическая дробилка:

1 – корпус; 2 – конденсаторы; 3 – разрядники; 4 – электроды; 5 – загрузочный бункер; 6 – решетка; 7 – сито; 8 – конвейер мелкой фракции; 9 – конвейер крупной фракции; 10 – высоковольтный защитный кожух

Производительность дробилок зависит от требуемого размера готового щебня и почти не зависит от размеров и прочности исходного сырья. Она прямо пропорциональна энергии импульса (энергии, запасаемой в конденсаторе) и частоте их следования. Напряжение – 50–70 кВ, энергия импульса – 2 кДж, расход электроэнергии – 2–6 кВт·ч/т. Источник питания может быть скомпонован в едином агрегате с дробилкой. Но лучше располагать источник отдельно рядом с подстанцией и соединять его с дробилкой легким недорогим высоковольтным кабелем.

Фильтры водозаборных скважин в процессе работы заиливаются, в результате чего их производительность падает, поэтому зачастую такие скважины приходится закрывать. Электрогидравлическая обработка фильтра разрядным устройством, опущенным в скважину, осуществляет

его очистку. При этом производительность увеличивается в 2,5–3 раза. Для очистки фильтров водяных скважин используют генератор импульсов со следующими параметрами: энергия импульса – 7,35 кДж, напряжение до 70 кВ, емкость конденсаторной батареи – 3 мкФ. Установку монтируют на базе автомобиля.

Электрогидравлическое обеззараживание основано на уничтожении в жидкости (вода, стоки) болезнетворных бактерий. Электрогидравлически обработанная вода сохраняет свою бактерицидность в течение суток.

Процесс обеззараживания характеризуется эмпирическим соотношением

$$N/N_0 = e^{-bn}, \quad (2.14)$$

где  $N$  и  $N_0$  – концентрации бактерий: после  $n$  разрядов и исходная;  
 $b$  – коэффициент эффективности обеззараживания.

## 2.6. Электроэрозионная обработка металлов

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) основана на расплавлении и испарении металла импульсами электрического тока, возникающими между двумя электродами, одним из которых является обрабатываемая деталь, а другим – электрод-инструмент.

Схема установки электроэрозионной обработки представлена на рис. 2.12. При подаче напряжения от генератора импульсов 1 (рис. 2.12, а) на электрод-инструмент 2 и обрабатываемую деталь 3 происходит электрический пробой рабочей среды, находящейся в межэлектродном пространстве, с образованием канала разряда 6. Благодаря высокой концентрации тепловой энергии, металл в точке разряда 5 плавится и испаряется. Одновременно испаряется рабочая среда, окружая канал разряда газообразными продуктами распада 7 (газовым пузырем).

В результате развивающихся в канале разряда и газовом пузыре значительных динамических сил капли расплавленного металла 4 выбрасываются за пределы зоны разряда в рабочую среду, окружающую электроды, и застывают в ней, образуя каплеобразные частицы, которые выносятся течением рабочей среды из межэлек-

тродного промежутка, а обрабатываемая деталь принимает форму электрода (рис. 2.12, б).

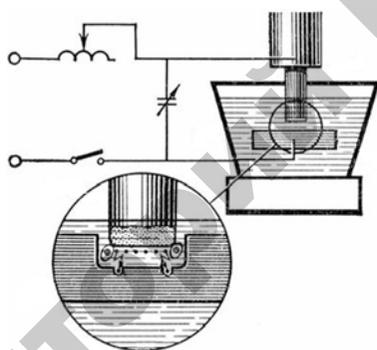
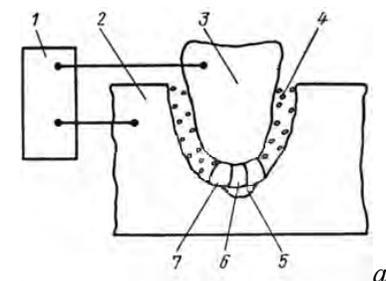


Рис. 2.12. Схема установки электроэрозионной обработки:

- 1 – генератор импульсов; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – электрод-инструмент;
- 4 – капли расплавленного металла; 5 – точка разряда; 6 – канал разряда;
- 7 – газовый пузырь

Материалы, из которых изготавливается электрод-инструмент, должны иметь высокую эрозионную стойкость. Наиболее часто применяют медь М1, М2; латунь ЛС-62; алюминий и его сплавы Д1, Ал3, Ал5; чугун. Кроме того, используются специальные материалы, созданные для этой цели: углеродитированный материал марки ЭЭГ и вольфрамомедные композиционные металлокерамические сплавы. В ряде случаев применяется чистый вольфрам в виде проката, проволоки и ленты [2].

В качестве рабочей жидкости, обеспечивающей оптимальные режимы обработки, наиболее широкое распространение получили низкомолекулярные углеводородистые жидкости различной вязкости; вода и, в незначительной степени, кремнийорганические жидкости, а также водные растворы двухатомных спиртов.

Различают следующие способы электроэрозионной обработки: электроискровой, электроимпульсный и электроконтактный.

*Электроискровая обработка* основана на использовании искрового разряда. Характеризуется высокой температурой в канале разряда (до 10 000 °С), относительно короткими импульсами ( $10^{-5}$ – $10^{-7}$  с), поэтому воздействие каждого импульса на поверхность материала невелико. Метод позволяет получить качественную поверхность, но не обладает достаточной производительностью. Кроме того, при этом методе износ инструмента относительно велик и может достигать 100 % от объема снятого материала. Электроискровые режимы используют при обработке твердых сплавов, труднообрабатываемых металлов и сплавов, тантала, молибдена, вольфрама и т. д.; обрабатывают сквозные и глубокие отверстия любого поперечного сечения, отверстия с криволинейными осями; используя проволочные и ленточные электроды, вырезают детали из листовых заготовок; нарезают зубья и резьбы; шлифуют и клеймят детали.

Источником питания в установках электроискровой обработки служат RC-генераторы (рис. 2.13).

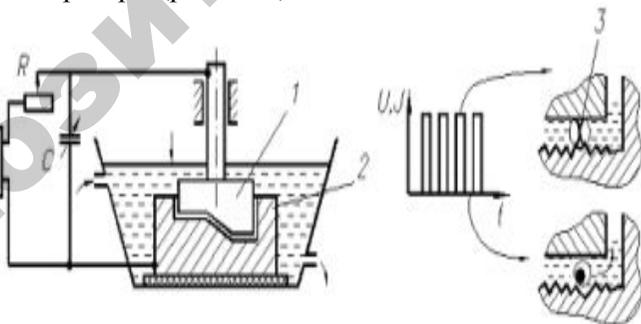


Рис. 2.13. Схема установки и форма импульсов напряжения электроискровой обработки:

1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – микровыступ

Электроимпульсная обработка основана на использовании импульсов дугового разряда. В отличие от искрового, дуговой разряд имеет температуру ниже ( $4000\text{--}5000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), что позволяет увеличивать длительность импульсов ( $0,5\text{--}10,0\text{ с}$ ), уменьшать промежутки между ними. В связи с этим при электроимпульсных режимах катод соединяется с обрабатываемой деталью (обратная полярность), что обеспечивает более высокую производительность (в  $8\text{--}10$  раз) и меньший, чем при электроискровых режимах, износ инструмента ( $0,05\text{--}0,3\%$  от объема снятого материала). Электроимпульсный метод используют для предварительной обработки заготовок сложнопрофильных деталей (штампы, турбины, лопатки и т. д.), изготовленных из труднообрабатываемых сплавов и сталей. Схема установки и форма импульсов напряжения электроимпульсной обработки представлена на рис. 2.14.

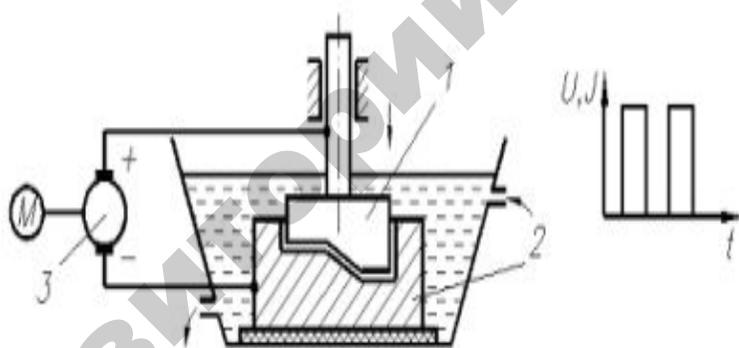


Рис.2.14. Схема установки и форма импульсов напряжения электроимпульсной обработки:

1 – электрод-инструмент; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – источник питания

Источником питания в установках электроимпульсной обработки служат электромашинные генераторы.

При электроконтактной обработке импульсы тока формируются непосредственно при соприкосновении неровностей электрода и обрабатываемой детали (рис. 2.15).

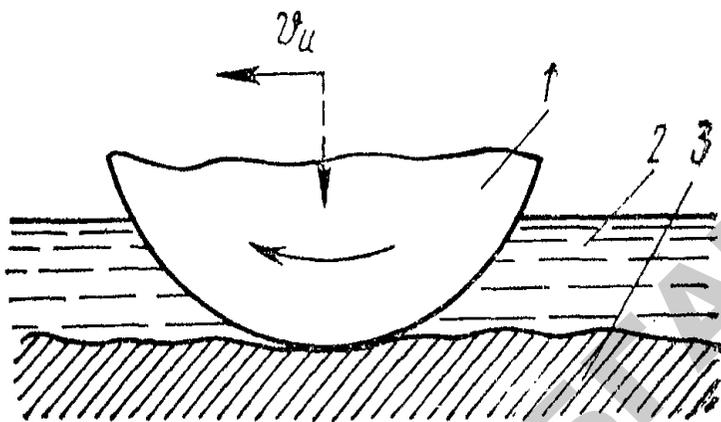


Рис. 2.15. Схема электроконтактной обработки:

1 – электрод-инструмент; 2 – рабочая среда; 3 – обрабатываемое изделие

Поверхности электрода-инструмента 1 и обрабатываемого изделия 3 не являются идеально гладкими – на них имеются неровности. При вращении электрода-инструмента выступы приближаются к заготовке вплоть до контакта. На определенном расстоянии между электродами происходит разряд, переходящий в дуговой и вызывающий расплавление металла. Процесс этот кратковременный, поскольку за счет вращения электрода-инструмента выступ на его поверхности удаляется от заготовки и разряд в среде диэлектрика быстро затухает.

При этом методе длительность и частота импульсов тока будут зависеть от формы и числа выступов на наружной поверхности инструмента и от скорости его вращения. Вращающийся электрод-инструмент сам регулирует параметры импульсов, поэтому не требуется специального генератора, а используется постоянный или переменный ток низкого напряжения. Электроконтактную обработку проводят при прямой полярности.

При протекании процесса в воздушной среде возникают более длительные дуговые разряды, чем в жидкости, так как после контакта между инструментом и заготовкой дуга может гореть довольно длительное время. При этом расплавленный металл может дос-

тигать противоположащей поверхности и там застывать, т. е. могут протекать одновременно два процесса – размерный съем и наращивание металла.

Производительность процесса и качество получаемой поверхности при электроэрозионной обработке определяются параметрами электрических импульсов – их длительностью, частотой следования и энергией.

Энергия импульса, Дж:

$$W = \int_0^{\tau_{и}} UI \, dt, \quad (2.15)$$

где  $I$  – сила тока, А;

$U$  – напряжение пробоя, В;

$\tau_{и}$  – время импульса, с.

В первом приближении энергию  $W$  можно рассчитывать по средним значениям силы тока и напряжения:

$$W = I_{cp} U_{cp} \tau_{и}. \quad (2.16)$$

Среднее значение напряжения пробоя  $U_{cp} = (0,5-0,75)U_0$ , где  $U_0$  – напряжение холостого хода при разомкнутых электродах, которое принимают при электроискровой обработке  $U_0 = 40-180$  В, электроимпульсной –  $U_0 = 18-36$  В, электроконтактной обработке в жидкой среде  $U_0 = 18-40$  В, в воздухе  $U_0 = 3-12$  В.

Среднюю силу тока определяют через ее значение  $I_k$  при коротком замыкании электродов:  $I_{cp} = (0,5-0,75) I_k$ , и выбирают в зависимости от обрабатываемого материала и требуемой шероховатости поверхности. Например, для стали при черновой обработке  $I_k = 20-120$  А, при чистовой обработке  $I_k = 0,5-5,0$  А, для твердых сплавов  $I_k = 0,05-0,20$  А.

Длительность импульсов  $\tau_{и}$  также зависит от обрабатываемого материала и шероховатости поверхности: для черновой обработки сталей  $\tau_{и} = 200-10^5$  мкс, для чистовой обработки  $\tau_{и} = 5-200$  мкс. Для твердых сплавов длительность импульса еще на 2–3 порядка ниже.

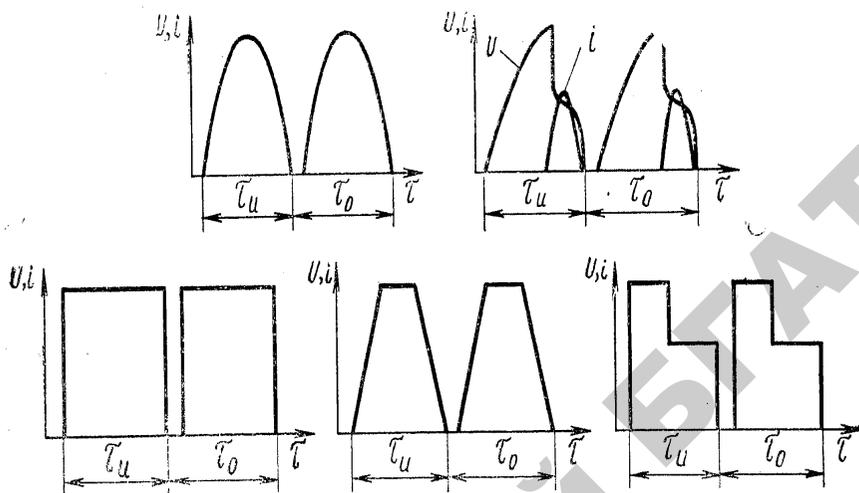


Рис. 2.16. Формы импульсов напряжения при электроэрозионной обработке

При электроэрозионной обработке используются импульсы различной формы (рис. 2.16), но одной полярности (униполярные).

**Контрольные вопросы:**

1. В чем заключается особенность электроимпульсных технологий?
2. Где применяют электроимпульсные технологии?
3. В чем состоит принцип действия релаксационных генераторов импульсов?
4. Как уменьшить частоту импульсов  $RC$ -генератора?
5. Каково назначение генераторов электрических импульсов?
6. Перечислите параметры генераторов импульсов.
7. Выполните приближенный расчет  $RC$ -генератора: частота импульсов – 1 Гц, энергия импульса – 1 Дж, сопротивление разрядной цепи пренебрежительно мало, степень зарядки конденсаторов – 0,9, напряжение питания – 220 В.
8. Для чего служат электрические изгороди?

9. Какие требования предъявляют к генераторам импульсов электрических изгородей?

10. Объясните физическую природу и перечислите основные действующие факторы электрогидравлического эффекта.

11. Где применяют электрогидравлические установки?

12. Какова классификация электроэрозионной обработки металлов?

13. Перечислите основные параметры электроэрозионной обработки металлов.

14. Где применяют установки электроэрозионной обработки металлов?

## **Практическое занятие № 5**

### **Расчет генераторов импульсов**

*Задача занятия:* определить структуру электрической схемы, выбрать элементную базу, определить параметры электрической схемы генератора импульсов.

### ***Задание самостоятельной подготовки***

Используя теоретический материал главы 2 и литературу [3], изучить методику расчета генераторов импульсов для электрических изгородей, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

### ***Индивидуальные задания***

**Задача 5.1.** Рассчитать преобразователь напряжения ([3], рис. 16.2, а). Остальные исходные данные приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Исходные данные к задаче 5.1

№ варианта	Параметры															
	1	2	3	4	5	6	транзистора VT					трансформатора TV1				
							Тип	$U_{кбм},$ В	$I_{км},$ А	$I_{бм},$ А	$U_{кн},$ В	$U_{бзн},$ В	Материал сердечника	$B_{м},$ Тл	$\eta,$ о.е.	$T_c$ с
12	12	10	14	10	10	12	МП26Б	70	0,4	0,015	1,0	1,2	0,7	0,75	0,0025	
340	300	310	320	330	340	320	МП25А	60	0,4	0,02	0,5	1,2	0,8	0,7	0,0033	
0,0016	0,001	0,00065	0,0012	0,0015	0,0015	0,0012	МП25Б	60	0,4	0,02	0,5	1,2	0,65	0,7	0,0031	
0,55	0,3	0,2	0,4	0,5	0,5	0,4	МП26А	70	0,4	0,015	0,5	1,2	0,85	0,6	0,0029	
360	400	300	320	340	340	320	МП25	60	0,4	0,02	0,5	1,2	0,61	0,7	0,0028	
МП25	МП26Б	МП25А	МП25Б	МП26А	МП25	МП26А	МП25	60	0,4	0,02	0,5	1,2	0,6	0,7	0,0028	
60	70	60	60	70	60	70	60	70	60	70	60	70	60	70	60	
0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
0,02	0,015	0,02	0,02	0,015	0,02	0,015	0,02	0,015	0,02	0,015	0,02	0,015	0,02	0,015	0,02	
0,7	1,0	0,5	0,5	0,5	0,7	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	
Электротехническая сталь																
0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,6	
0,61	0,75	0,7	0,65	0,6	0,61	0,75	0,7	0,65	0,6	0,61	0,75	0,7	0,65	0,6	0,61	
0,0028	0,0025	0,0033	0,0031	0,0029	0,0028	0,0025	0,0033	0,0031	0,0029	0,0028	0,0025	0,0033	0,0031	0,0029	0,0028	

Продолжение табл. 5.1

12	11	10	9	8	7	6	1
14	12	10	14	12	10	14	2
300	290	300	310	280	290	350	3
0,0017	0,0012	0,0014	0,00097	0,0007	0,00086	0,0017	4
0,5	0,35	0,4	0,3	0,2	0,25	0,6	5
300	500	480	460	440	420	380	6
МП26	МП26	МП25	МП26А	МП25Б	МП25А	МП26	7
100	100	60	70	60	60	100	8
0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	9
0,015	0,015	0,02	0,015	0,02	0,02	0,015	10
0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5	0,7	11
1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	12
0,65	0,6	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	14
0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	15
0,0033	0,002	0,0021	0,0022	0,0023	0,0024	0,0026	16

Продолжение табл. 5.1

19	18	17	16	15	14	13	1
10	14	12	10	14	12	10	2
320	280	320	340	330	310	280	3
0,0009	0,0014	0,0016	0,0006	0,0014	0,0013	0,001	4
0,3	0,4	0,5	0,2	0,45	0,4	0,3	5
440	420	400	380	360	340	320	6
МП26А	МП26А	МП26	МП25	МП26	МП25Б	МП26А	7
70	70	100	60	100	60	70	8
0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	9
0,015	0,015	0,015	0,02	0,015	0,02	0,015	10
0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	11
1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	12
13							
0,65	0,6	0,75	0,7	0,8	0,75	0,7	14
0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,7	0,69	15
0,0023	0,0024	0,0025	0,0026	0,0028	0,0029	0,0031	16

25	24	23	22	21	20	1
10	14	12	10	14	12	2
350	300	350	360	290	330	3
0,0016	0,002	0,0018	0,0019	0,0014	0,0015	4
0,55	0,6	0,65	0,7	0,4	0,5	5
400	440	500	480	400	460	6
МП25А	МП26А	МП25	МП26	МП26	МП25Б	7
60	70	60	100	100	60	8
0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,4	9
0,02	0,015	0,02	0,015	0,015	0,02	10
0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,5	11
1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	12
0,8	0,6	0,85	0,8	0,75	0,7	14
0,7	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	15
0,0025	0,0023	0,002	0,0021	0,0025	0,0022	16

**Задача 5.2.** Рассчитать генератор импульсов ([3], рис. 16.3). Напряжение на входе генератора равно напряжению на выходе преобразователя. Остальные исходные данные приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Исходные данные к задаче 5.2

№ варианта	Частота импульсов $f_0$ , Гц	Амплитудное напряжение импульса $U$ , кВ	Количество электричества в импульсе $q$ , мкКл	Длительность импульса $\tau$ ,	Параметры													
					диода VD					тиристора VS								
					Тип	$U_{обр.}$ В	$I_{пр.}$ А	$U_{пр.}$ В	$R_{э.пр.}$ Ом	Тип	$U_{В.ма.}$ В	$I_{пр.т.}$ А	$U_{пр}$ В	$I_{в.кл.}$ А	$I_{выкл.}$ А	$\tau_{вкл.}$ $10^{-6}$ с	$\tau_{выкл.}$ $10^{-6}$ с	$R_{т.пр.}$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1...2	10	3,0	0,1	Д226Б	400	0,3	1,0	3,3	КН102И	150	0,2	1,5	0,005	0,015	0,5	40	7,5
2	1,0	2	2,0	0,09	Д7Е	350	0,3	0,5	1,7	2У101Д	150	0,3	1,3	0,0075	0,015	2,0	35	4,4
3	1,1	3	2,1	0,08	КД11056	400	0,3	1,0	3,3	КУ101Е	150	0,3	1,3	0,0075	0,015	2,0	35	4,4
4	1,2	4	2,2	0,07	Д226Б	400	0,3	1,0	3,3	КН102Ж	120	0,2	1,5	0,005	0,015	0,5	40	7,5
5	1,3	5	2,3	0,06	Д226	400	0,3	1,0	3,3	КН102Д	80	0,2	1,5	0,005	0,015	0,5	40	7,5

Продолжение табл. 5.2

12	11	10	9	8	7	6	1
2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	2
3	2	10	9	8	7	6	3
2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,4	4
0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,05	5
Д209	Д208	Д7Е	Д226	Д226А	Д7Д	Д210	6
400	300	350	400	300	300	500	7
0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	8
1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	9
10	10	1,7	3,3	3,3	1,7	10	10
КН102Ж	2У101Д	КУ101Е	КН102И	КН102Ж	КУ101Е	КН102И	11
120	150	150	150	120	150	150	12
0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	13
1,5	1,3	1,3	1,5	1,5	1,3	1,5	14
0,005	0,0075	0,0075	0,005	0,005	0,0075	0,005	15
0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	16
0,5	2,0	2,0	0,5	0,5	2,0	0,5	17
40	35	35	40	40	35	40	18
7,5	4,4	4,4	7,5	7,5	4,4	7,5	19

Продолжение табл. 5.2

19	18	17	16	15	14	13	1
1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
10	9	8	7	6	5	4	3
2,5	2,0	2,2	2,4	2,0	2,2	2,1	4
0,1	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	5
Д209	Д226В	КД11056	Д209	Д226	Д226Б	Д226В	6
400	300	400	400	400	400	300	7
0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	8
0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9
10	3,3	3,3	10	3,3	3,3	3,3	10
2У101Д	КУ101Е	КН102И	КН102Ж	2У101Д	КУ101Е	КН102И	11
150	150	150	120	150	150	150	12
0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	13
1,3	1,3	1,5	1,5	1,3	1,3	1,5	14
0,0075	0,0075	0,005	0,005	0,0075	0,0075	0,005	15
0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	16
2,0	2,0	0,5	0,5	2,0	2,0	0,5	17
35	35	40	40	35	35	40	18
4,4	4,4	7,5	7,5	4,4	4,4	7,5	19

25	24	23	22	21	20	1
1,3	1,4	1,5	1,0	1,1	1,2	2
8	7	6	5	4	3	3
2,3	2,0	2,5	2,4	2,3	2,2	4
0,1	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	5
Д226Б	Д226В	Д226	Д210	Д208	Д7Е	6
400	300	400	500	300	350	7
0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,3	8
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	9
3,3	3,3	3,3	10	10	1,7	10
КН102И	КН102Ж	2У101Д	КУ101Е	КН102И	КН102Ж	11
150	120	150	150	150	120	12
0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	13
1,5	1,5	1,3	1,3	1,5	1,5	14
0,005	0,005	0,0075	0,0075	0,005	0,005	15
0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	16
0,5	0,5	2,0	2,0	0,5	0,5	17
40	40	35	35	40	40	18
7,5	7,5	4,4	4,4	7,5	7,5	19

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета генераторов импульсов?
3. Перечислите основные элементы релаксационного генератора импульсов.
4. Перечислите основные параметры генераторов импульсов.
5. Как определяют амплитудное значение тока и количество электричества в импульсе?
6. Как определяют частоту следования и период импульсов?
7. Как определяют энергию импульса и среднюю мощность конденсаторов?
8. Что такое скавжность импульса?

**Лабораторное занятие № 4**

**Исследование генераторов импульсов  
для электрических изгородей**

*Цель работы:* изучить устройство и работу генераторов импульсов, определить основные параметры импульсов.

**Задачи работы:**

1. Изучить назначение, устройство, принципиальные электрические схемы генераторов импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4.
2. Определить электрические и энергетические параметры импульсов, освоить способы регулирования частоты, силы импульсов генераторов ИЭ-200, «Импульс».
3. Опробовать работу генераторов ГИЭ-1, ИЭ-4 в автоматическом режиме.

**Общие сведения.** Используя теоретический материал главы 2 и литературу [3, 9], изучить устройство и работу генераторов импульсов. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

### Задание для самостоятельной подготовки

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

### Методика выполнения работы

1. Изучить назначение, устройство, принципиальные электрические схемы генераторов импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4 по образцам, установленным в лаборатории, и рекомендуемой литературе.

2. Определить амплитудное значение тока  $I_m$ , количество электричества в импульсе  $q_n$ , частоту  $f$  и период  $T$  следования импульсов, скважность  $S$  для генератора ИЭ-200.

Для этого включить последовательно автоматический выключатель QF на стенде, осциллограф тумблером «Сеть» (рис. ЛЗ.4.1). При появлении на экране горизонтальной светящейся линии включить генератор ИЭ-200, устанавливая переключатель SA1 в положение I.

Настроить генератор на работу с силой импульса «Меньше» и минимальной, а затем – с максимальной частотой, определяя частоту следования импульсов  $f$  при помощи осциллографа. Результаты представить в виде табл. ЛЗ.4.1.

Таблица ЛЗ.4.1

Параметры импульсов генератора ИЭ-200

Положение переключателя «Сила импульса»	Частота, Гц		Амплитудное значение тока $I_m$ , мА	Количество электричества в импульсе $q_n$ , мКл	Период колебаний, $T$ , с	Скважность импульса $S$
	$f_{\min}$	$f_{\max}$				
«Меньше»						
«Больше»						

Зарисовать с экрана осциллографа кривую импульса тока, предварительно определив масштаб изображения импульса на экране с помощью переключателей «Время» и «Напряжение». При определении масштаба напряжения учесть сопротивление делителя напряжения ( $R1 : R2 = 100$ ), через который подключен осциллограф.

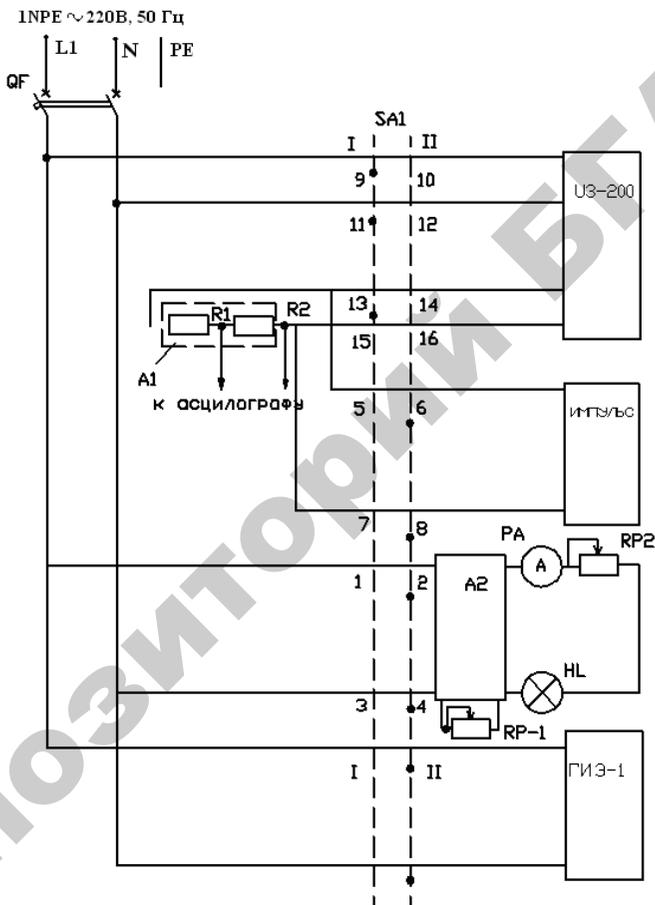


Рис. ЛЗ.4.1. Электрическая схема экспериментальной установки:  
*A1* – делитель напряжения; *A2* – тиристорный регулятор напряжения;  
*RP-1* – задатчик тока

Произвести аналогичные исследования, настроив генератор на работу с силой импульса «Больше». Результаты занести в табл. ЛЗ.4.1.

По кривым импульса тока рассчитать параметры импульсов:

– амплитудное значение тока  $I_m$ . В расчетах принять  $R_p$  равным сопротивлению входа осциллографа,  $U_p$  – амплитудному значению напряжения;

– количество электричества в импульсе  $q_n$  вычисляют графически, интегрированием площади, ограниченной кривой импульса тока и осью абсцисс (ось времени). Упрощенно можно определить по формуле:

$$q_n = \frac{U_p}{R_p} \tau_n;$$

– период колебаний  $T$ ;

– скважность импульса  $S$ .

3. Получить зависимость частоты  $f$  следования импульсов от освещенности  $E$  приемника фотоэлектрического преобразователя генератора «Импульс», включая его в работу переключателем SA1 в положение II (рис. ЛЗ.4.1). Освещенность изменить задатчиком RP-1, устанавливая ток 1,2–1,8 А. Результаты представить в виде табл. ЛЗ.4.2. Построить графическую зависимость частоты импульсов  $f$  от освещенности  $E$ .

Таблица ЛЗ.4.2

Зависимость частоты  $f$  следования импульсов от освещенности  $E$  генератора «Импульс»

Ток $I$ , А	1,8	1,6	1,4	1,2
Освещенность $E$ , лк	220	150	110	80
Частота импульсов $f$ , Гц				

4. Опробовать работу генераторов ГИЭ-1, ИЭ-4 в автоматическом режиме.

**Содержание отчета:**

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальная электрическая схема релаксационного генератора импульсов  $RC$ .
3. Таблица результатов исследований.
4. Рассчитанные параметры генератора ИЭ-200.
5. Графическая зависимость частоты импульса  $f$  от освещенности  $E$ .
6. Выводы по работе.

**Контрольные вопросы:**

1. Каковы назначение, устройство и область применения ГИ в сельскохозяйственном производстве?
2. В чем состоит принцип работы простейшего релаксационного генератора импульсов типа  $RC$ ?
3. Поясните работу принципиальных электрических схем генераторов импульсов ИЭ-200, ГИЭ-1, «Импульс», ИЭ-4.
4. Как регулируют частоту и силу импульса?
5. Какие основные параметры ГИ и импульсов?

### 3. ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

#### 3.1. Физические процессы в электрических полях с заряженными частицами

*Электронно-ионные технологии* – это область электротехнологии, основанная на воздействии электрического поля на заряженные частицы с целью придания им упорядоченного движения. Процессы электронно-ионных технологий состоят из следующих стадий: подача материала, зарядка его частиц, движение заряженных частиц в электрическом поле, получение готового продукта.

##### 3.1.1. Способы зарядки частиц

При зарядке частицам сообщают избыточный свободный электрический заряд. Основные способы зарядки: ионная (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. Наиболее часто 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 малыми 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» (рис. 3.1, б). 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.

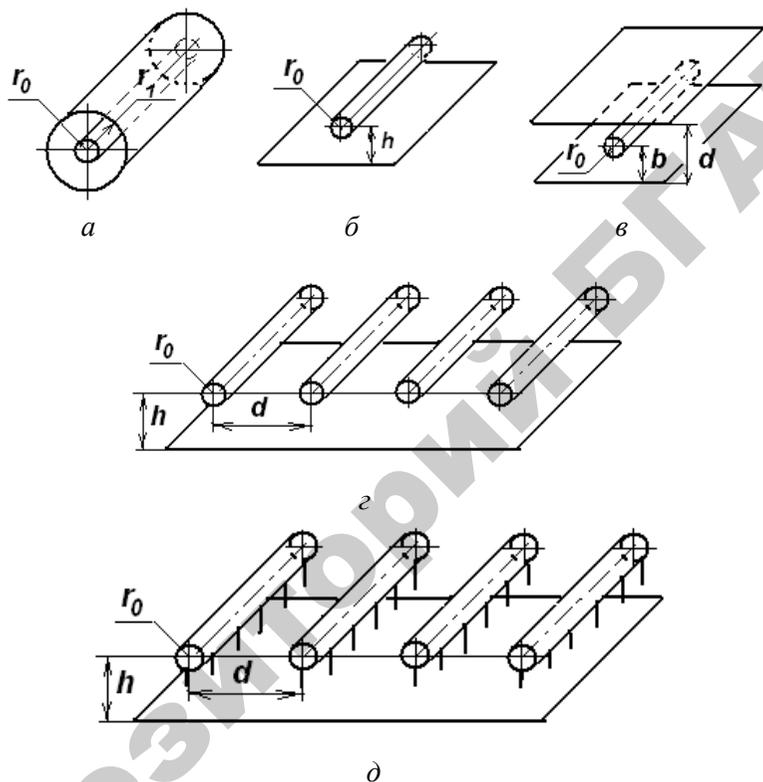


Рис. 3.1. Некоторые системы электродов для создания поля коронного разряда: а – провод по оси цилиндра; б – провод–плоскость; в – провод между двумя плоскостями; г – ряд проводов–плоскость; д – ряд стержней с иглами–плоскость

В остальной части межэлектродного промежутка напряженность электрического поля недостаточна для того, чтобы поддерживать процесс ионизации. Возникающий разряд и называют коронным.

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

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

где  $\delta = 289 \cdot 10^{-5} \frac{P}{T}$  – 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  $I_\ell$  – удельная (на единицу длины коронирующего провода) сила тока, А/м;

$k$  – подвижность ионов, м/(В·с);

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;

$G$  – функция напряженности и геометрических параметров принятой системы электродов, В<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>.

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

$$E = D\sqrt{I_1/(2\pi\epsilon_0 k)}; \quad (3.4)$$

$$\rho = L\sqrt{I_1\epsilon_0/(2\pi k)}, \quad (3.5)$$

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. 3.1, а):

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

$$D = 1; \quad L = \frac{1}{r},$$

где  $r$  – текущий радиус, м.

Для системы «провод–плоскость» (см. рис. 3.1, б)

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

$$D = 2,5; \quad L = \sqrt{\frac{3,525}{xh}},$$

где  $x$  – 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 электронно-ионной технологии, имеют форму, близкую к двухосному эллипсоиду. Для таких частиц (рис. 3.2) предельный заряд можно рассчитать по формулам:

– при ориентации большой осью вдоль поля:

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

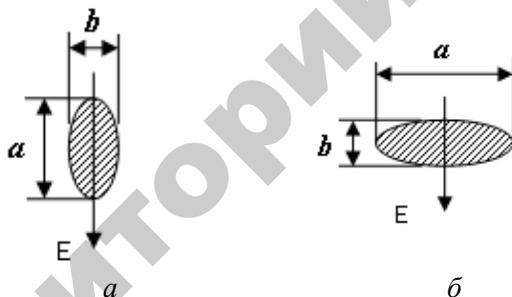


Рис. 3.2. Ориентация семени большой осью вдоль поля (а) и поперек поля (б)

– при ориентации большой осью поперек поля:

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

где  $a$  и  $b$  – большая и малая оси эллипсоида, м;

$\epsilon_a$  и  $\epsilon_r$  – 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. 3.3).

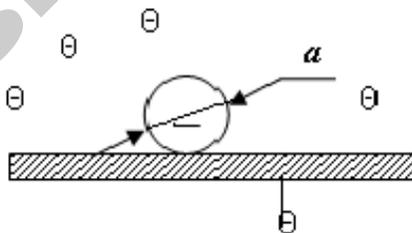


Рис. 3.3. Схема контактной зарядки

Для проводящей сферической частицы диаметром  $a$ , при условии отсутствия переходного контактного сопротивления, предельный заряд

$$Q_{\max 2} = \frac{\pi^3}{6} \varepsilon_0 a^2 E. \quad (3.9)$$

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 некоронирующем электроде в поле коронного разряда. Тогда она одновременно заряжается ионами, движущимися от коронирующего электрода, и контактным способом – от некоронирующего.

При комбинированной 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 некоронирующим электродом может совпадать со знаком его потенциала.

Предельный заряд частицы

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

где  $Q_{\max 1}$  – предельный заряд эллипсоида в поле коронного разряда;

$\mu_{\kappa}$  – коэффициент, зависящий от размеров и электрофизических свойств частицы в поле коронного разряда:

$$\mu_{\kappa} = \frac{2\tau\beta + 1 - \sqrt{1 + 4\tau\beta(1 + Q_{\max 2}/Q_{\max 1})}}{2\tau\beta}, \quad (3.11)$$

где  $\tau$  – постоянная времени зарядки частицы на электроде, с;  
 $\beta = \rho_3 k / 4\epsilon_0$  – параметр короны;  
 $k$  – подвижность ионов, м/(В·с).

Для эллипсоида, ориентированного большой осью вдоль поля:

$$\tau = \frac{\epsilon_0 (d_a \epsilon_r + 1 - d_a)}{d_a \gamma}, \quad (3.12)$$

где  $\gamma$  – 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.

### 3.1.2. 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 сила, 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.

$$\text{Электрическая сила } F_k = EQ. \quad (3.13)$$

При нахождении частицы в поле коронного разряда силу  $F_k$  рассчитывают в следующей последовательности:

- определяют начальную напряженность короны  $E_0$  по формуле (3.1);
- начальное напряжение короны  $U_0$  – по формуле (3.2);
- удельную силу тока  $I_\ell$  – 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 (3.13).

В аппаратах электронно-ионной технологии 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.

*Сила зеркального отображения* (действующая между зарядом частицы и проводящей плоскостью). Точечный заряд  $Q$  (рис. 3.4) наводит (индуцирует) на плоскости противоположный по знаку заряд  $-Q$ . Между этими зарядами возникает сила, которую называют силой зеркального отображения.

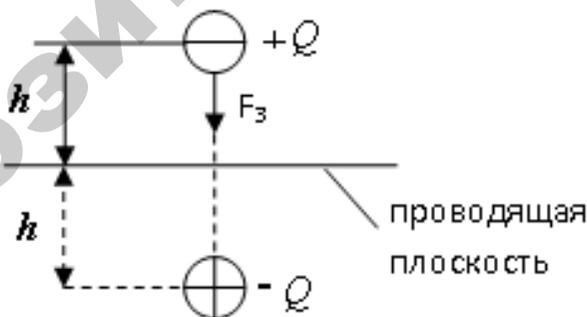


Рис. 3.4. Схема иллюстрации силы зеркального отображения

Ее можно определить по закону Кулона как силу взаимодействия двух точечных разноименных зарядов, расположенных на расстоянии  $2h$  один от другого:

$$F_3 = -\frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 (2h)^2}. \quad (3.14)$$

Знак « $\rightarrow$ » обозначает, что сила направлена в сторону электрода.

*Пондеромоторная сила* (действующая на заряженную частицу в неоднородном электрическом поле). Частица в электрическом поле поляризуется, на ней возникают разноименные поляризационные заряды  $+q$  и  $-q$  (рис. 3.5).

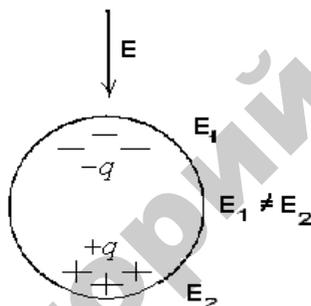


Рис. 3.5. Поляризованная частица в неоднородном электрическом поле в воздушной среде

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  $E_2$  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.

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

$$F_n = \frac{\pi \epsilon_0 a^3}{2} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} E \operatorname{grad} E . \quad (3.15)$$

*Ориентирующий момент.* Если большая ось вытянутой частицы, расположенной в электрическом поле, составляет некоторый угол  $\beta$  с направлением вектора напряженности  $E$ , то силы, действующие со стороны поля на разноименные поляризационные заряды частицы (рис. 3.6, *a*), создают вращающийся момент

$$M_s = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 V_s \Phi(K_\phi, \epsilon) \sin 2\gamma , \quad (3.16)$$

где  $V_s$  – объем частицы,  $\text{м}^3$ ;

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

$\Phi_1$  – коэффициент деполяризации;

$\gamma$  – угол, дополняющий угол  $\beta$  до  $90^\circ$ .

Под действием вращающего момента частица стремится сориентироваться длинной осью вдоль линий поля (рис. 3.6, *б*).

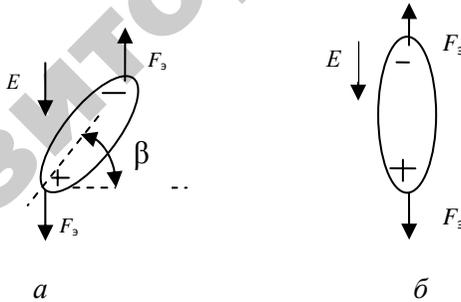


Рис. 3.6. Ориентация вытянутой частицы в электрическом поле в воздушной среде:  
*a* – частица в произвольном положении; *б* – частица, сориентированная силами поля в устойчивое положение

Движение частиц в электрическом поле определяется равнодействующей сил, а также аэродинамическими свойствами среды.

### 3.2. Электрические сепараторы зерна и семян

Проблема повышения качества посевного материала всегда стоит очень остро, так как от этого зависит эффективность всего последующего агротехнического процесса. При посеве некондиционных семян зерновых их всхожесть составляет 60–70 %, а реально – всего 25–30 %. Поэтому для отбора лучших, полноценных зерен их подвергают предварительной очистке.

*Классификация признаков и машин.* Существует множество семяочистительных машин, работа которых основана на разделении зерносмесей по механическим признакам – размеру зерновок, их массе, форме, парусности. Однако для высококачественного разделения этого недостаточно. Целый ряд семян сорняков имеют те же внешние признаки, что и семена культурных растений, например: семена пшеницы – семена овсяга, семена куколя и семена ржаного костра; семена льна – семена плевела льняного.

Наиболее качественное разделение (сортировка) зерновых смесей достигается, когда используется не только механические, но и электрические признаки (факторы) сортирования. К ним относят: электрическую проводимость вещества зерна, диэлектрические свойства, поляризуемость в электрическом поле, способность воспринимать и сохранять электрический заряд и др. Электрические свойства отдельных зерновок зависят от их физических свойств (плотности, влажности, степени зрелости), биологического состояния и других факторов. 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 разделять их.

Совокупность физико-механических и электрических свойств частиц, определяющая возможность их разделения в электрическом поле, называется *признаком делимости* (критерием разделения), который 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*. Их классифицируют *по виду электрического поля* – электростатические, коронные, с переменным полем и комбинированные; *по способу зарядки* частиц – ионной зарядки, электродной (контактной) зарядки, зарядки поляризацией (диэлектрические), зарядки трением (трибоэлектрические), комбинированные; *по конструкции* – камерные, барабанные, транспортерные, решетчатые и др.

*Коронные сепараторы.* В коронных сепараторах зарядка частиц осуществляется в поле короны. По конструктивному исполнению коронные сепараторы могут быть: камерные, барабанные, транспортерные. Коронный сепаратор *барабанного* типа представлен на рис. 3.7. Техническая характеристика его приведена в прилож. 2.

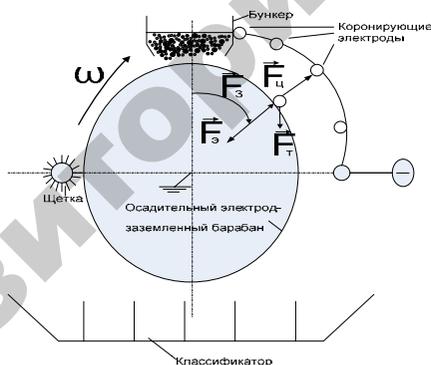


Рис. 3.7. Коронный сепаратор барабанного типа

Коронирующие электроды представляют собой систему тонких (0,2–0,3 мм) проволок, расположенных на одинаковом расстоянии от осадительного электрода-барабана.

Частицы поступают на вращающийся барабан с нулевой скоростью, получают заряд, находясь на некоронирующем электроде

(комбинированная зарядка). Предельный заряд для частиц, расположенных длинной осью поперек поля:

$$Q = \frac{\pi \varepsilon_a abE}{1 + (\varepsilon_r - 1) d_B} \mu_k, \quad (3.17)$$

где  $\mu_k$  – коэффициент остаточного заряда, учитывающий стекание заряда с частицы на барабан;

$a, b$  – большая и малая оси зерновки.

На заряженную частицу, находящуюся на барабане, действуют силы:

– сила тяжести  $F_T = mg$ ; (3.18)

– центробежная сила  $F_{ц} = mv^2/R_6$ , (3.19)

где  $m$  – масса частицы, кг;

$v$  – линейная скорость барабана, м/с;

$R_6$  – радиус барабана, м;

– электрическая сила  $F_3 = QE$ , (3.20)

где  $Q$  – заряд частицы, Кл;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

– сила зеркального отображения

$$F_3 = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0(2h)^2}, \quad (3.21)$$

где  $h$  – расстояние от заряда до проводящей поверхности, м. Для зерновки принимают  $h = b/4$ , тогда

$$F_3 = \frac{Q^2}{\pi\varepsilon_0 b^2}. \quad (3.22)$$

Условие отрыва частицы от барабана в зоне коронного разряда  
 $F_3 + F_3 + F_T \cos \alpha - F_{ц} = 0$ , откуда

$$\cos \alpha = \frac{F_{ц} - F_3 - F_3}{F_T}. \quad (3.23)$$

Коронные сепараторы барабанного типа применяют для окончательной очистки семян зерновых, овощных культур, трав.

Коронный *транспортный сепаратор* (рис. 3.8) аналогичен барабанному и отличается лишь тем, что зоны зарядки и разрядки частиц намного длиннее.

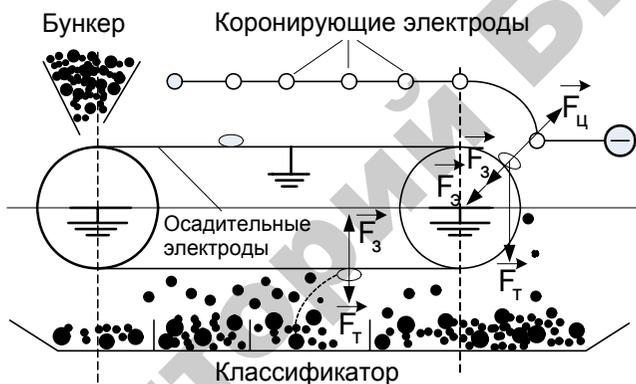


Рис. 3.8. Коронный транспортный сепаратор

В зоне зарядки скорости частиц и транспортной ленты становятся равными, и они получают предельный заряд. В результате частицы сбивают одна другую значительно реже. Благодаря этому качество разделения семян выше, чем в коронном барабанном сепараторе. Кроме того, в широкой зоне можно более качественно разделять семена в зависимости от их электрических свойств.

Транспортный сепаратор используют для очистки и сортирования семян зерновых, технических культур и трав, сепарации круп, отделения проса при рушении.

Для очистки семян рекомендуется применять транспортёрную ленту из металлической фильтровальной сетки, стальной ленты толщиной 0,2–0,3 мм или специальной электропроводящей ткани (типа ЭП или ПЭН). При сортировании семян можно использовать транспортёрную ленту из непроводящего материала (бельтинга, технической резины и др.), укладывая под нее заземленный металлический лист.

Коронный сепаратор типа «горка» (рис. 3.9) разработан на базе обычной семяочистительной «горки», представляющей собой замкнутое наклонное полотно, на которое подают семенную смесь для очистки от примесей, отличающихся формой и состоянием поверхности (например, для очистки семян сахарной свеклы от стеблей и листьев).

Основной недостаток таких устройств – низкая производительность.

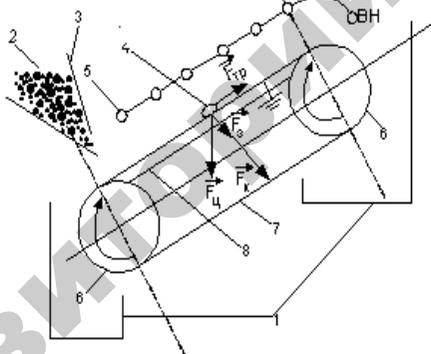


Рис. 3.9. Коронный сепаратор «горка»:

- 1 – приемный бункер; 2 – зерновая смесь; 3 – загрузочный бункер; 4 – семя;
- 5 – коронирующие электроды; 6 – барабан; 7 – лента транспортера;
- 8 – некоронирующий электрод

Коронный камерный сепаратор (рис. 3.10) имеет загрузочный бункер, на выходе из которого семена получают заряд, падают вниз под действием силы тяжести  $F_T$  и одновременно смещаются по горизонтали под действием силы электрического поля  $F_Э$ . В зави-

симости от соотношения этих сил семена попадают в различные секции классификатора семян.

Наилучшие результаты в камерном сепараторе получают при очистке семян зерновых культур от легких примесей (пыли, половы, мелкой соломы, легких семян сорняков), и особенно при очистке и сортировании по плотности и размеру семян трав и табака.



Рис. 3.10. Коронный сепаратор камерного типа

*Диэлектрические сепараторы* имеют принцип действия, основанный на проявлении пондеромоторных сил вследствие поляризации частиц в неоднородном электрическом поле.

На частицы сыпучих материалов, помещенных на рабочий орган диэлектрического сепаратора (рис. 3.11), могут действовать ponderomotorные силы, обусловленные свободными зарядами частиц  $F_k$ , смещенными поляризованными зарядами  $F_{\Pi}$  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.

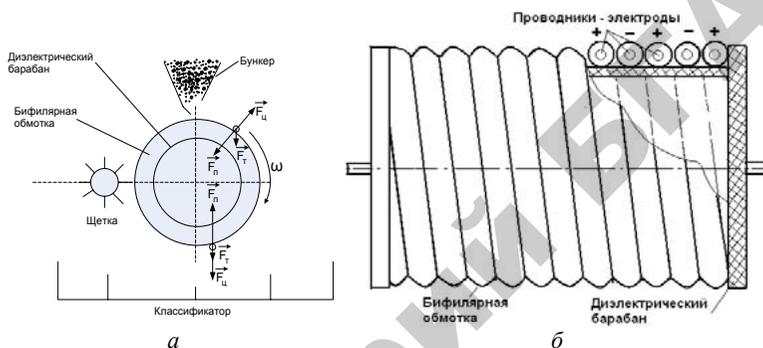


Рис. 3.11. Диэлектрический сепаратор:  
 а – устройство; б – фрагмент барабана

В зависимости от знака заряда электрода, около которого находится частица, последняя будет либо притягиваться к нему, либо отталкиваться. Если объемную плотность свободных зарядов частицы обозначить  $\rho$ , то эту силу можно рассчитать по следующей формуле:

$$F_k = \int \rho E dV, \quad (3.24)$$

где  $\rho$  – объемная плотность свободных зарядов, кг/м<sup>3</sup>;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$V$  – объем частицы, м<sup>3</sup>.

Как видно из формулы (3.24), сила  $F_k$  зависит от напряженности электрического поля и от количества свободных зарядов, определяемого способом их приобретения, электрическими свойствами

частицы и ее качеством (диэлектрической проницаемостью, электропроводностью).

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:

$$p = Ql, \quad (3.25)$$

где  $Q$  – заряд, Кл;

$l$  – смещение зарядов, м.

Смещенные заряды приобретают заряд, обратный по знаку внешнему полю. Взаимодействие смещенных зарядов частиц с внешним электрическим полем ведет к появлению силы  $F_{\pi}$ :

$$F_{\pi} = \frac{1}{2} \int_v E^2 \text{grad} \epsilon_a dV = \int_v \bar{p} \text{grad} E dV, \quad (3.26)$$

где  $\text{grad} \epsilon_a$  и  $\text{grad} E$  – градиенты, учитывающие неоднородность диэлектрической проницаемости и напряженности электрического поля в частице;  $n$  – число диполей в единице объема,  $1/\text{м}^3$ ;

$\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость частицы, Ф/м;

$\bar{p}$  – электрический момент поляризованной молекулы зерна, Кл·м.

Сила  $F_{\pi}$  стремится переместить частицу в зону с большей напряженностью электрического поля или прижать ее к поверхности электродов (при относительной диэлектрической проницаемости частицы  $\epsilon > 1$ ). Анализ формул (3.25, 3.26) показывает, что сила  $F_{\pi}$  зависит не только от напряженности электрического поля, но и от его неоднородности, поляризуемости частиц (семян), а последняя – от их биохимического состава.

В диэлектрических сепараторах (рис. 3.11), реализующих этот принцип разделения частиц, на поверхности диэлектрического барабана уложена бифилярная обмотка (проводники-электроды). Переменное напряжение до 5–10 кВ промышленной частоты

подается на два входных конца обмотки, а два других остаются разомкнутыми. В такой обмотке соседние провода представляют собой разноименно заряженные и изолированные один от другого электроды (знаки «+» и «-» на рис. 3.11 условно показывают знаки потенциала жил в некоторый произвольно выбранный момент времени), которые создают неоднородное электрическое поле, действующее на семя с силой  $F_{\text{п}}$ . Угол отрыва семян от вращающегося барабана определяется соотношением сил  $F_{\text{п}}$ ,  $F_{\text{т}}$  и  $F_{\text{ц}}$ . Семя оторвется от рабочего органа и попадет в секцию классификатора, если его вес окажется больше суммы сил, удерживающей его.

При сортировании семян овощных культур сепаратор работает с подачей 70–230 кг/ч (на 1 м длины барабана).

При очистке и сортировке семян в электрических сепараторах на семена действуют не только силы поля, но и оказываются электрофизические воздействия: поверхностное обеззараживание, возбуждение жизнедеятельности семян за счет поляризации.

Эффективность проявляется за счет повышения всхожести на 10 %, повышения урожайности до 20 %, повышения содержания в зерне белка на 0,5–1,2 %.

### **3.3. Предпосевная обработка семенных материалов в электрическом поле**

Обработка семян в электрическом поле ускоряет рост и развитие растений, повышает их продуктивность. Усиление процессов жизнедеятельности связано с ускорением биохимических процессов обмена веществ за счет изменения биопотенциала живой клетки. Под действием электрического тока обработанные семена поглощают больше воды и набухают, что приводит к сохранению запасенных питательных веществ не только в начале прорастания, но и в последующие дни. В течение всего срока прорастания в обработанных семенах содержится больше моносахаров, чем у необработанных. Это способствует более интенсивному прохождению синтетических процессов, связанных с ростом клеток, синтезом белка, построением клеточных стенок.

Применение электрического поля при обработке в значительной степени помогает почти без ядохимикатов защищать семена от болезнетворных микроорганизмов, снижает их концентрацию в почве и улучшает качество продукции растениеводства и экологию. В настоящее время разработаны технологии предпосевной обработки семян постоянным током, токами промышленной и высокой частоты.

Способ предпосевной обработки семян электрическим током промышленной частоты заключается в том, что семена помещают в конденсатор, между обкладками которого создается поле напряженностью 100–400 кВ/м. Длительность обработки семян различных культур 20–180 с. Применение способа повышает урожайность зерновых культур на 10–15 %, зеленой массы кукурузы – до 25 %, качество получаемой продукции улучшается.

Большое распространение также получила электрообработывающая машина транспортерного типа с электрическим полем коронного разряда. Она оказывает стимулирующее действие, сортирует и может быть вмонтирована в зерноочистительный агрегат.

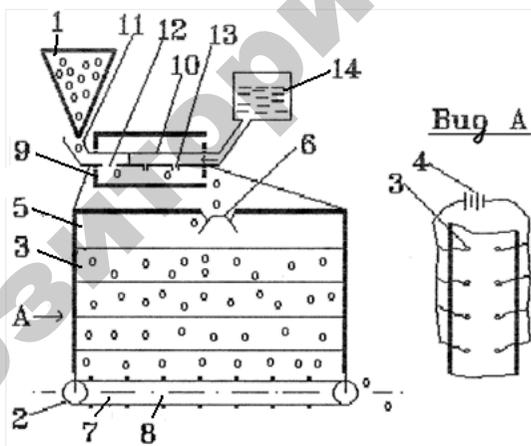


Рис. 3.12. Установка обработки семян электрическим током:

1 – загрузочный бункер; 2 – транспортер; 3 – электроды; 4 – источник питания; 5 – рабочая камера; 6 – разбрасыватель семян; 7 – транспортерная лента; 8 – выступы транспортерной ленты; 9 – вращающийся барабан; 10 – полая ось барабана; 11 – воронка для семян; 12 – выпускное окно; 13 – форсунка; 14 – резервуар с водой

Установка обработки семян (рис 3.12), основанная на использовании электрического поля низкого напряжения, работает следующим образом. Семена (например, яровой пшеницы) загружают в бункер 1 и через воронку 11 и выпускное окно 12 падают в барабан 9. Вода из форсунки 13 нагнетается в барабан 9, увлажняя семена. Количество воды составляет 4–5 л на 1 т семян. За счет вращения барабана 9 происходит перемешивание зерновой массы, она постепенно выходит из барабана и падает на разбрасыватель 6 семян. Происходит заполнение камеры 5, и увлажненные семена располагаются между электродами 3, на которые из источника питания 4 подают напряжение 30 В. После истечения времени обработки (2–3 мин) включается транспортер 2, и лента 7 выступами 8 забирает семена из камеры 5.

### 3.4. Электроаэрозольные технологии

*Аэрозольные системы* состоят из твердых или жидких частиц размером примерно от 1 нм до долей миллиметра, взвешенных в газообразной среде.

При переводе веществ и материалов в аэрозольное состояние площадь их поверхности в расчете на единицу массы значительно увеличивается, поэтому аэрозоли обладают высокой физико-химической активностью.

В сельском хозяйстве аэрозоли используют для борьбы с вредителями и болезнями культурных растений (обработка ядохимикатами растений и семян), дезинфекции и дезинсекции помещений, профилактики и лечения животных и птиц, покраски изделий при ремонте и др.

Для электроаэрозольной обработки предназначены *аэрозольные генераторы*, состоящие из распылителя с зарядным устройством и источника высокого напряжения. В таких генераторах применяют в основном три способа зарядки аэрозольных частиц: ионную, зарядку на электроде в электрическом поле и индукционную.

В генераторах с ионной зарядкой струя аэрозоля, созданная обычным распылителем, проходит через зарядное устройство с униполярным коронным разрядом. Зарядка частиц на электроде в электрическом поле происходит одновременно с образованием аэрозоля и в том же пространстве. Например, в распылителе РПУ 10 (рис. 3.13) частицы получают заряд при контактировании пылегазовой смеси с электродом 6; подачу смеси регулируют рассекателем 1 и иглой 9.

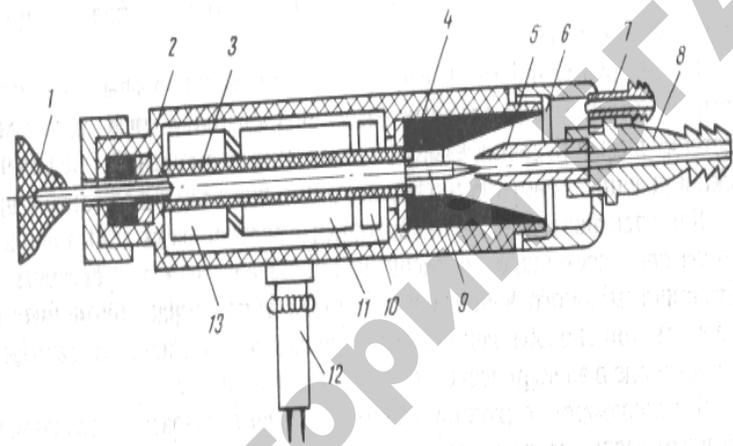


Рис. 3.13. Распылитель РПУ-10 с контактной зарядкой частиц:

1 – сменный рассекатель; 2 – корпус распылителя; 3 – канал; 4 – диэлектрический конус; 5 – трубка; 6 – перфорированный электрод; 7 и 8 – штуцеры подачи чистого воздуха и пылегазовой смеси; 9 – игла; 10 – ограничительный резистор; 11 – блок умножения и выпрямления напряжения; 12 – разъем; 13 – трансформатор

В форсунке (рис. 3.14) индукционная зарядка происходит, когда смесь проходит через электрод 1. Воздух и пестициды подаются по каналам 5 и 4.

Существуют и дисковые центробежные электрораспылители, обеспечивающие высокую дисперсность частиц, что особенно важно при внесении ядохимикатов и лекарственных препаратов.

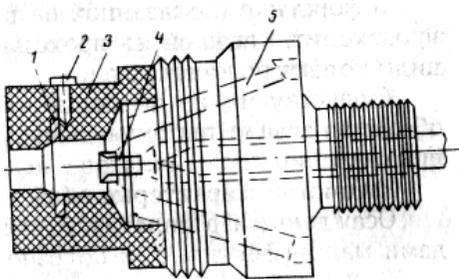


Рис. 3.14. Форсунка для зарядки и распыления пестицидов индукционным методом:

- 1 – электрод, на котором есть потенциал; 2 – контактный стержень; 3 – форсунка;
- 4 и 5 – каналы для пестицидов и воздуха

*Осаждение аэрозолей ядохимикатов на растения* обычными методами малоэффективно, и полезное использование веществ не превышает 20–30 %, качество обработки невысокое, остаются необработанными поверхности листьев, обращенные к земле и т. п.

Принцип осаждения в электрическом поле состоит в том, что частицы аэрозоля, подаваемого через распылитель, получают заряд. Двигаясь в электрическом поле, возникающем между электродом-распылителем и растениями, имеющими потенциал Земли, частицы с униполярным зарядом взаимно отталкиваются. В результате происходит электрическое рассеяние, облако золь увеличивается и равномерно покрывает растения. Так как силовые линии наиболее сгущены около предметов, выступающих над землей, эффективность осаждения повышается. В результате потери вещества снижаются на 20–30 % и качество обработки улучшается. Вследствие рассеяния и действия зеркальных сил количество ядохимикатов, осажденных на нижней стороне растений, возрастает в 5–20 раз. Так как Земля имеет отрицательный потенциал относительно окружающего пространства, электрод распылителя чаще подключают к положительному полюсу источника высокого напряжения. Наиболее эффективного осаждения достигают при напряжении поля 1–35 кВ и потребляемой мощности около 50 Вт.

При покраске изделий сжатым воздухом теряется до 50 % краски, а в электрическом поле потери не превышают 10 %, причем качество обработки существенно повышается.

Наиболее распространены электромеханические и пневматические распылители. Электромеханические центробежные распылители выполняют в виде дисков, чаш или грибков, которые приводят во вращение с частотой  $15\text{--}25\text{ с}^{-1}$  ( $900\text{--}1500\text{ мин}^{-1}$ ) с помощью электродвигателей. Такой распылитель представляет собой электрод отрицательной полярности с высоким потенциалом. Частицы краски заряжают контактным способом и распыляют под действием центробежной силы и силы отталкивания одноименных зарядов (распылителя и частицы). На коронирующие электроды подают отрицательный потенциал  $80\text{--}140\text{ кВ}$ , а обрабатываемое изделие заземляют. Попадая в электрическое поле, частицы краски приобретают отрицательный заряд и движутся вдоль линий поля к заземленному изделию.

### **3.5. Электронно-ионные технологии ионизации, озонирования и очистки воздуха**

Ионное состояние атмосферы характеризуют ее электрическими свойствами, содержанием электризованных частиц в воздухе. Различают следующие группы электризованных частиц в воздухе:

- легкие отрицательные и положительные ионы – заряженные молекулы газов;
- тяжелые ионы – твердые или жидкие частицы, на поверхности которых адсорбируются легкие ионы;
- псевдоаэроионы – наэлектризованные твердые или жидкие частицы;
- аэрозоли – группы тяжелых аэроионов.

Легкие и тяжелые ионы отличаются подвижностью, концентрацией, действием на живые организмы. Благотворное влияние оказывают легкие отрицательные ионы, интенсифицирующие обменные процессы, снижающие микробную загрязненность и содержание пыли в воздухе, что положительно влияет на продук-

тивность животных и птицы в целом. Тяжелые ионы и избыток концентрации легких ионов действуют угнетающе.

Концентрация ионов в воздухе и продолжительность их воздействия зависят от вида и возраста животных и птицы (прилож. 3). Реальная концентрация отрицательных ионов в помещении составляет примерно  $(7-15)10^{11}$  ион/м<sup>3</sup>. Поэтому рекомендуемое содержание ионов может быть создано только искусственной ионизацией.

Искусственная ионизация воздуха – это придание молекулам кислорода отрицательного заряда. Существуют разные способы ионизации (электрический, радиоактивным и ультрафиолетовым излучением, термоэлектронный и др.). Наиболее распространена ионизация в поле коронного разряда. Вследствие ударной ионизации возникающие свободные ионы и электроны во внешней области короны в среднем через  $2 \cdot 10^5$  столкновений с молекулами воздуха за время  $10^{-6}$  с присоединяются к нейтральным молекулам кислорода, образуя отрицательные ионы  $O_2^-$ .

Ионизаторы – устройства, ионизирующие воздух, – состоят из источника питания постоянного тока высокого напряжения и разрядного устройства (рис. 3.15).

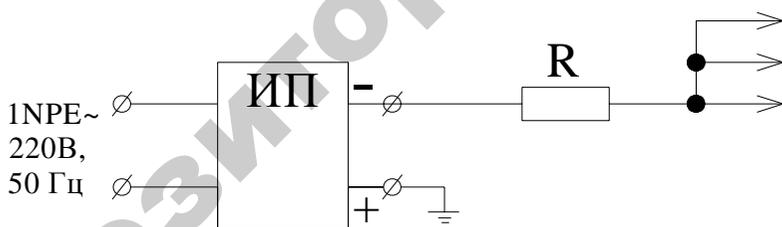


Рис. 3.15. Конструктивная схема ионизатора воздуха

Источник питания (ИП) должен обеспечивать напряжение 10–15 кВ при мощности 3–5 Вт. Резистор  $R$  служит для ограничения тока разрядной линии до величины безопасной для человека (до 0,4 мА), также защищает источник питания от коротких замыканий. Сопротивление резистора 20–50 МОм, мощность – 10 Вт.

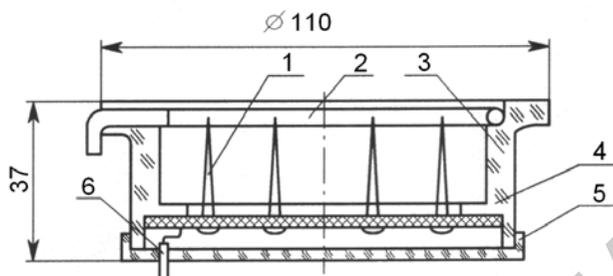


Рис. 3.16. Игольчатый электроразрядник:

1 – игла швейная № 3; 2 – провод экранирующий; 3 – корпус; 4 – основание для крепления игл; 5 – крышка изоляционная; 6 – провод токоподводящий

Исполнение разрядных устройств зависит от размеров помещения и вида животных. Наиболее распространены устройства игольчатого (рис. 3.16) и проволочного (рис. 3.17) типа.

В качестве проволочных устройств применяют провода с хлопчатобумажной изоляцией типа ПБД, ПВБД с диаметром жилы 1,5–2,0 мм. Коронирующим электродом в этом случае служат ворсинки оплетки. Разрядные устройства располагают на высоте 2,5–3,0 м в зоне содержания животных или птицы.

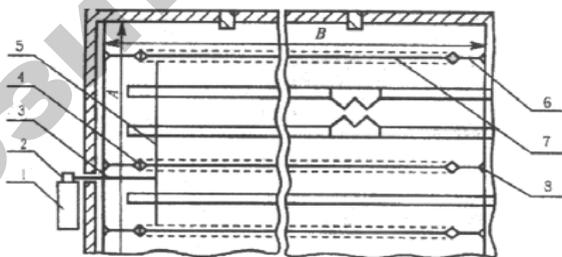


Рис. 3.17. Схема размещения аэроионизационной установки в животноводческом помещении:

1 – щит силовой; 2 – блок питания аэроионизатора; 3, 5 – кабель РК-75-17-21, соединяющий блок питания с разрядной линией; 4 – изоляторы; 6 – трос; 7 – линия разрядная (провод ПБД1×2); 8 – устройство натяжное

*Расчет ионизатора воздуха.* Задача расчета состоит в определении размеров разрядного устройства, напряжения и мощности источника питания. Исходными данными являются вид, возраст и способ содержания животных или птицы, рекомендуемая концентрация отрицательных ионов и др. Расчет ведут в следующей последовательности.

По виду и возрасту животных определяют концентрацию ионов в помещении (прилож. 3), принимают конструктивное исполнение разрядного устройства, расчетную схему (прилож. 4) и определяют напряжение зажигания короны  $U_3$  (прилож. 4) и напряжение, необходимое для создания требуемой концентрации ионов:

$$U_p = U_3 + \frac{ne}{4\epsilon_0} R^2 \text{ или } U_p = U_3 + \frac{ne}{4\epsilon_0} h^2, \quad (3.27)$$

где  $n$  – концентрация отрицательных ионов в помещении, ион/м<sup>3</sup> (прилож. 3);

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд иона, принят равным заряду электрона;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная.

Рассчитывают ток ( $i$ ,  $I$ ) разрядного устройства, А/м или А (прилож. 4). Ток на единицу длины провода в 100–150 раз больше тока ворсинки (для разрядного устройства, выполненного из провода ПБД1×2).

Определяют поток ионов воздуха, ион/м·с или ион/с:

$$N_i = i/e; \quad N_I = I/e. \quad (3.28)$$

Находят длину разрядной линии  $l_i$  или количество разрядных игл  $k_n$ , приняв среднюю продолжительность жизни иона  $\tau = 10$  с:

$$l_i = nV/(N_i \tau), \quad k_n = nV/(N_I \tau), \quad (3.29)$$

где  $V$  – объем помещения, м<sup>3</sup>.

Определяют ток разрядной линии  $I_{pi}$  или разрядных игл  $I_{pl}$ :

$$I_{pi} = il_i, \quad I_{pl} = k_n I. \quad (3.30)$$

Находят мощность разрядной линии и источника питания:

$$P_p = k_3 I_{pl} U_p, \quad P_p = k_3 I_{pl} U_p, \quad (3.31)$$

$$P_u = P_p / \eta, \quad (3.32)$$

где  $k_3 = 1,1-1,2$  – коэффициент, учитывающий понижение напряжения в сети;

$\eta = 0,1-0,2$  – КПД источника питания и линии, соединяющей источник с разрядным устройством.

*Электрофильтры* предназначены для очистки воздуха от механических загрязнений (пыли, дыма), бактерий, жидких частиц, а также для улавливания ценных частиц металлов (Ag, Zn, Cu и др.). По сравнению с другими, электрофильтры обладают высокой степенью очистки (до 99 %), улавливают частицы в широком диапазоне размеров (от сотен до долей микрона), имеют низкое аэродинамическое сопротивление, в них возможно сочетание с ионизацией воздуха. Важнейшее значение имеет электрофилтрация в животноводческих и, особенно, в птицеводческих помещениях. На птицефабриках запыленность воздуха достигает  $50 \text{ г/м}^3$ , а наличие бактерий – до 600 тыс. бакт./ $\text{м}^3$ . При использовании электрофильтра улавливается более 90 % пыли с диаметром частиц более 1 мкм и до 80 % микроорганизмов при подаче воздуха до  $400 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Электрофильтры бывают трубчатые и пластинчатые. Трубчатые электрофильтры (рис. 3.18) – это аппараты с вертикальным потоком газа.

Очистка происходит в поле униполярного отрицательного коронного разряда. Заряженные частицы движутся к осадительному электроду и оседают на нем. Слой пыли удаляется встряхиванием.

Пластинчатые электрофильтры (рис. 3.19) конструктивно проще трубчатых. В них осадительные электроды выполнены в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Пластины могут располагаться как вертикально, так и горизонтально в зависимости от направления воздуха.

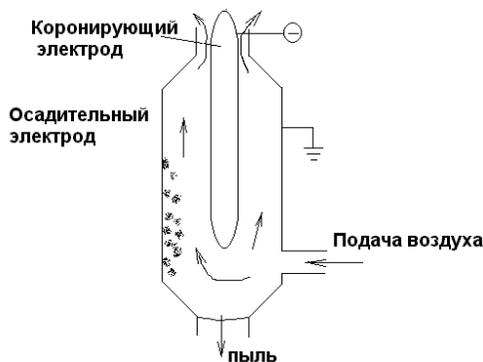


Рис. 3.18. Трубчатый электрофильтр

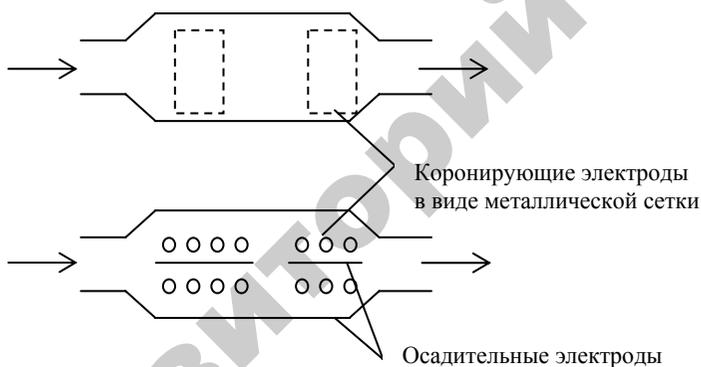


Рис. 3.19. Пластинчатый электрофильтр

Различают одно- и двухзонные фильтры (рис. 3.20). У однозонных зоны зарядки и осаждения совмещены, у двухзонных разнесены в пространстве.

В двухзонных фильтрах напряжение питания электродов 6–15 кВ, потребляемая мощность – 10–30 Вт при подаче воздуха 1000 м<sup>3</sup>/ч, скорость воздуха в сечении фильтра – 2 м/с, аэродинами-

ческое сопротивление фильтра – 10–50 Па, степень очистки от пыли – 90–95 %, микроорганизмов – 80–85 %.

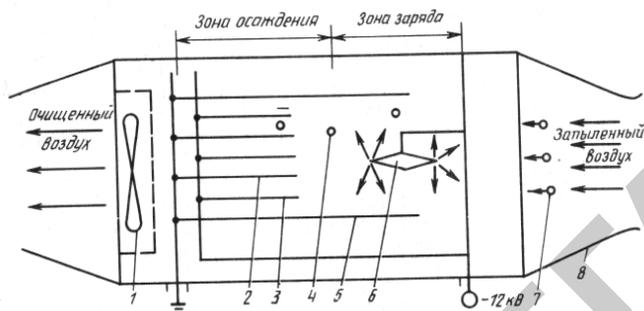


Рис. 3.20. Двухзонный электрофильтр:

1 – вентилятор; 2 и 3 – пластины заземленная и с потенциалом; 4 и 7 – заряженная и нейтральная частицы пыли; 5 – заземленная плоскость; 6 – коронирующие электроды; 8 – входной патрубок

Основной характеристикой электрофильтров является степень очистки газа (КПД фильтра)

$$\eta_{\phi} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1} = 1 - \frac{Z_2}{Z_1}, \quad (3.33)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – содержание пыли в газе до и после поступления в электрофильтр, мг/м<sup>3</sup>.

Степень очистки связана с конструктивными и электрическими параметрами электрофильтра:

$$\eta_{\phi} = 1 - \exp\left(-\frac{\chi v_{oc} S}{w}\right), \quad (3.34)$$

где  $v_{oc}$  – скорость движения частиц к осадительному электроду, м/с; для пластинчатых фильтров  $v_{oc} = B_{\kappa} E_{oc}$ ;

$B_{\kappa} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  – подвижность частицы с учетом поправок;

$E_{oc}$  – напряженность электрического поля у осадительного электрода, В/м;

$S$  – его площадь,  $\text{м}^2$ ;

$w$  – подача газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\chi = 1,1-1,3$  – поправочный коэффициент.

Из формулы (3.34) следует, что степень очистки возрастает с увеличением скорости дрейфа загрязненных частиц и площади осадительных электродов и уменьшается с увеличением подачи воздуха.

Установка электроочистки и ионизации воздуха УОВ-1 (рис. 3.21) сочетает электрофильтрацию и ионизацию воздуха. Предназначена для использования в птицеводческих и животноводческих помещениях.

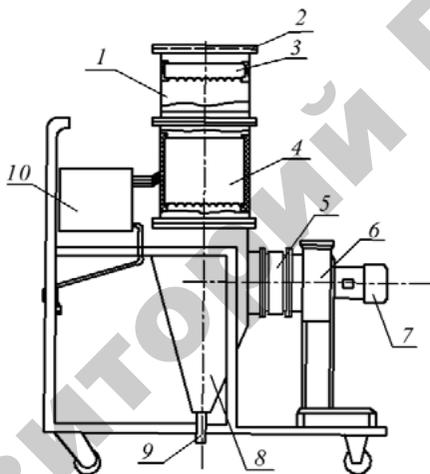


Рис. 3.21. Установка электроочистки и ионизации воздуха УОВ-1:

1 – электрофильтр-аэроионизатор; 2 – сетка защитная; 3 – пластина секции заряжающей; 4 – пластина осадительной секции; 5 – вставка виброгасительная; 6 – воздуховод нагнетательный; 7 – электропривод вентилятора; 8 – пылеуловитель; 9 – патрубок удаления пыли; 10 – блок управления и питания

Запыленный воздух из помещения проходит между заряжающими и осадительными пластинами фильтра, очищается и поступает опять в помещение. Частицы пыли получают заряд в заряжающей секции и оседают на электродах осадительной

секции. Пыль удаляют с пластин путем их периодической мойки водой из шланга.

Нижние кромки стальных электродов выполнены в виде острых зубьев, провоцирующих коронный разряд, в поле которого происходит ионизация воздуха.

Установку размещают или в помещении, где очищают воздух, или в подсобном помещении, в котором желательно иметь водопровод для промывки фильтра один раз в две недели и слив загрязненной воды.

***Контрольные вопросы:***

1. Что такое электронно-ионная технология?
2. Где применяют установки электронно-ионной технологии?
3. Какие существуют способы зарядки частиц? Объясните физическую природу процессов.
4. Какие силы действуют на сферическую заряженную частицу в неоднородном электрическом поле в воздухе?
5. Что такое коронный разряд?
6. Объясните физическую природу процесса возникновения коронного разряда.
7. Какая система электродов предпочтительнее для получения коронного разряда: две параллельные плоскости; плоскость и тонкая проволока; плоскость и барабан; два барабана?
8. В чем различие процессов механического и электрического разделения зерновых смесей?
9. Как классифицируют электрические сепараторы?
10. Объясните устройство и принцип действия диэлектрических сепараторов.
11. Объясните устройство и принцип действия коронных сепараторов.
12. На каком сепараторе более качественное разделение зерновой массы: барабанном или транспортерном?
13. Каково условие удержание семени на поверхности вращающегося барабана диэлектрического сепаратора?
14. Какие силы действуют на семя, находящееся на поверхности вращающегося барабана диэлектрического сепаратора?

15. Как изменяется относительная диэлектрическая проницаемость семян с ростом их влажности?
16. В каких технологических процессах применяют электроаэрозоли?
17. Каким способом сообщают заряд аэрозолям?
18. Что такое аэроион?
19. Перечислите основные элементы установки для ионизации воздуха.
20. Перечислите типы разрядных устройств.
21. Объясните принцип работы электрического фильтра для очистки воздуха.

## **Практическое занятие № 6**

### **Расчет электрического ионизатора воздуха**

*Задача занятия:* определить размеры разрядного устройства, напряжение и мощность источника питания, выбрать элементы схемы умножения напряжения (трансформатор, конденсаторы, диоды, резисторы).

### ***Задание для самостоятельной подготовки***

Используя теоретический материал главы 3 и литературу [3], изучить методику расчета электрического ионизатора воздуха, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

### ***Индивидуальные задания***

**Задача 6.1.** Рассчитать проволочный ионизатор воздуха. Разрядное устройство выполнено проводом ПБД 1×2. Расчетная схема расположения коронирующих электродов соответствует позиции 3 в прилож. 4. Радиус коронирующего электрода равен радиусу ворсинок хлопчатобумажной оплетки провода, подвижность аэроионов  $k = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.6.1.

Таблица ПЗ.6.1

Исходные данные к задаче б.1

№ варианта	Вид животных (птицы)	Концентрация отрицательных аэроионов $n$ , $10^{11}$ ион/м <sup>3</sup>	Продолжительность ионизации, ч	Расчетная высота помещения $H$ , м	Высота подвеса провода $h$ , м	Радиус коронирующего электрода $r$ , $10^{-5}$ м	Размеры помещения, м
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Телята до 1 мес.	2,0	6–8	5,0	2,8	3,0	16×35
2	Коровы	2,5	5–8	5,6	3,1	3,5	18×50
3	Быки-производители	3,0	8–10	6,0	3,5	3,0	21×68
4	Поросята	4,0	0,5	4,3	2,5	3,5	21×32
5	Свиньи	5,0	0,5	4,6	2,7	3,0	20×35
6	Цыплята	0,25	3	4,8	2,9	3,5	16×25
7	Птица	0,5	0,5–4,0	5,7	3,0	3,0	18×27
8	Бройлеры	0,65	2	5,5	3,1	3,5	16×31
9	Куры-несушки	1,5	4–12	5,9	3,4	3,0	18×29
10	Телята до 1 мес.	2,0	6–8	5,2	3,0	3,5	18×57
11	Коровы	2,5	5–8	4,0	3,0	3,0	18×9
12	Быки-производители	3,0	8–10	5,8	3,2	3,5	68×18
13	Поросята	4,0	0,5	4,9	2,7	3,0	18×52
14	Свиньи	5,0	0,5	5,9	3,4	3,5	6×21
15	Цыплята	0,25	3,0	5,0	2,7	3,0	12×18
16	Птица	1,0	0,5–4,0	5,8	3,2	3,5	12×20
17	Бройлеры	0,65	2	4,7	2,9	3,0	9×26

Окончание табл. ПЗ.6.1

1	2	3	4	5	6	7	8
18	Куры-несушки	2,0	4–12	5,5	3,2	3,5	12×12
19	Телята до 1 мес.	2,0	6–8	5,1	2,9	3,2	12×24
20	Коровы	2,5	5–8	3,0	2,6	3,4	9×72
21	Быки-производители	3,0	8–10	5,5	3,0	3,2	12×76
22	Поросята	4,0	0,5	4,7	2,9	3,4	24×18
23	Свиньи	5,0	0,5	5,6	3,1	3,2	12×32
24	Цыплята	0,25	3	4,9	2,7	3,4	9×24
25	Куры-несушки	2,2	4–12	5,5	2,8	3,2	16×36

**Задача 6.2.** Рассчитать игольчатый ионизатор воздуха. Расчетная схема расположения коронирующих электродов соответствует позиции 4 в прилож. 4. Исходные данные приведены в табл. ПЗ.6.1. Радиус закругления иглы  $r_3$  принять из табл. ПЗ.6.2

Таблица ПЗ.6.2

Радиус закругления иглы $r_3$													
$r_3, 10^{-5}$ м	3,5	3,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,5
№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$r_3, 10^{-5}$ м	3,0	3,5	3,0	3,5	3,0	3,4	3,2	3,4	3,2	3,4	3,2	3,4	
№ варианта	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	

**Задача 6.3.** Рассчитать несимметричный выпрямитель с восьмикратным умножением напряжения. Напряжение  $U_p$  и ток  $I_p$  на разрядной линии принять по расчетам задачи 6.1. Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения  $S = 0,1$ ; частота переменного тока  $f = 50$  Гц. Вторичное сопротивление трансформатора с нагрузкой:

$$R_{2н} = U_p / I_{д},$$

где  $I_{д} = 4 \cdot 10^{-3}$  А – допустимое значение силы тока.

### ***Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:***

1. В чем состоит задача расчета?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета электрического ионизатора воздуха?
3. Перечислите типы разрядных устройств.
4. Чем отличаются расчет ионизаторов воздуха с различными схемами расположения коронирующих электродов?
5. Как определяют мощность разрядного устройства и источника питания установки ионизации воздуха?
6. Какие параметры определяют при расчете несимметричного выпрямителя с умножением напряжения?
7. Определить, во сколько раз увеличится напряжение на выходе несимметричного выпрямителя с умножением напряжения, если число конденсаторов равно 4.

### **Практическое занятие № 7**

#### **Расчет установки аэрозольной обработки птицы**

*Задача занятия:* определить радиус и заряд аэрозольной частицы, их концентрацию в помещении, объемный расход аэрозоля, ток генератора и частоту вращения распыливающего диска.

#### ***Задание для самостоятельной подготовки***

Используя теоретический материал главы 3 и литературу [3], изучить методику расчета установки аэрозольной обработки птицы, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

#### ***Индивидуальные задания***

**Задача 7.1.** Рассчитать параметры процесса и установки для электроаэрозольной обработки птицы. Динамическая вязкость жидкости  $\eta_{ж} = 1,6 \cdot 10^{-3}$  Па · с. Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.7.1.

Таблица ПЗ.7.1

## Исходные данные к задаче 7.1

№ варианта	Число голов $N$ , тыс. гол.	Размеры помещения, м			Масса одной птицы $m$ , кг	Объем воздуха, вдыхаемого одной птицей $V$ , $10^{-6}$ м <sup>3</sup> /с	Число аэрозольных генераторов в помещении $n$ , шт.	Радиус распыляющего диска $R$ , м	Относительная диэлектрическая проницаемость		Толщина $10^{-3}$ м		Напряжение на распыляющем диске $U$ , кВ
		длина $A$	ширина $B$	высота $h$					диэлектрического слоя $\epsilon_1$	диэлектрического диска $\epsilon_2$	диэлектрического слоя $d_1$	диэлектрического диска $d_2$	
1	15	72	9	4,0	2,0	20	4	0,2	4,0	4,0	3,0	3,0	1,0
2	20	78	18	3,8	2,2	21	4	0,3	4,5	4,5	3,2	3,2	1,5
3	25	68	12	4,2	1,8	22	5	0,4	4,3	4,3	3,4	3,4	2,0
4	10	68	9	3,8	2,4	23	3	0,1	4,0	4,0	3,6	3,6	1,0
5	30	96	18	4,0	2,5	24	5	0,2	4,5	4,5	3,8	3,8	1,5
6	15	78	12	3,8	2,5	25	4	0,3	4,3	4,3	4,0	4,0	2,0
7	20	92	16	4,2	2,4	26	4	0,4	4,0	4,0	4,2	4,2	1,0
8	25	72	12	4,0	1,8	27	5	0,1	4,3	4,3	4,4	4,4	1,5
9	10	72	9	4,2	2,2	28	3	0,2	4,5	4,5	4,6	4,6	2,0
10	30	96	16	3,8	2,0	29	5	0,3	4,0	4,0	3,0	3,0	1,0
11	15	78	18	4,0	2,2	30	4	0,4	4,3	4,3	3,2	3,2	1,5
12	20	84	16	4,2	1,8	20	4	0,1	4,5	4,5	3,4	3,4	2,0
13	25	94	18	3,8	2,4	21	5	0,2	4,0	4,0	3,6	3,6	2,0
14	10	62	9	4,0	2,5	22	3	0,3	4,3	4,3	3,8	3,8	1,5
15	30	92	18	4,2	1,8	23	5	0,4	4,5	4,5	4,0	4,0	1,0
16	15	64	9	3,8	2,0	24	4	0,1	4,0	4,0	4,2	4,2	2,0
17	20	72	18	4,0	2,4	25	4	0,2	4,3	4,3	4,4	4,4	1,5
18	25	86	16	4,2	2,5	26	5	0,3	4,5	4,5	4,6	4,6	1,0
19	10	62	12	3,8	2,0	27	3	0,4	4,0	4,0	3,0	3,0	2,0
20	30	88	18	4,0	2,2	28	5	0,1	4,3	4,3	3,2	3,2	1,5
21	15	92	9	4,2	2,5	29	4	0,2	4,5	4,5	3,4	3,4	1,0
22	20	94	12	3,8	1,8	30	4	0,3	4,0	4,0	3,6	3,6	2,0
23	25	96	16	4,0	2,0	21	5	0,4	4,3	4,3	3,8	3,8	1,5
24	10	64	12	4,2	2,5	22	3	0,1	4,5	4,5	4,0	4,0	1,0
25	30	98	18	3,0	2,4	23	5	0,2	4,0	4,0	4,2	4,2	2,0

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета установки аэрозольной обработки птицы?
3. Что такое аэрозоли?
4. Для чего применяют аэрозольную обработку птицы?
5. Как определяют максимальный заряд частицы аэрозоля и их концентрацию в помещении?
6. Как определяют частоту вращения распыливающего диска?

**Лабораторное занятие № 5**

**Исследование диэлектрических сепараторов семян**

*Цель работы:* изучить устройство, принцип действия, электрическую схему диэлектрического сепаратора семян.

**Задачи работы:**

1. Усвоить физические основы разделения семян в электрическом поле диэлектрических сепараторов.
2. Изучить устройство, электрическую схему, принцип действия сепаратора СДЛ-1.
3. Произвести испытание сепаратора в работе и установить эффективность разделения семян.

**Общие сведения.** Используя теоретический материал главы 3 и литературу [3, 9], изучить устройство и принцип действия диэлектрического сепаратора семян. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

**Задание для самостоятельной подготовки**

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

## Методика выполнения работы

1. Пункты 1, 2 и 3 задач работы выполняют при подготовке к лабораторной работе, используя вышеизложенный материал. К работе допускаются студенты, изучившие физические основы разделения семян в диэлектрическом сепараторе, принцип устройства, электрическую схему сепаратора.

2. На рабочем месте изучить устройство сепаратора, правила техники безопасности, последовательность операций по его подготовке к работе, включению, регулированию режимов. Необходимо проверить целостность заземления корпуса сепаратора, наличие диэлектрического резинового коврика.

3. После проверки правил безопасности и обслуживания включить сепаратор в сеть и убедиться в исправной работе механизмов (подачи семян, регулирования напряжения на рабочем органе и др.). Установить положение заслонки бункера, обеспечивающее поступление семян на барабан равномерно в один слой.

4. Провести опыты по определению эффективности разделения семян в сепараторе в зависимости от напряженности электрического поля и числа повторностей обработки, для семян укропа. Напряженность поля изменяют, регулируя напряжение, подводимое к обмотке.

Исследования провести в следующей последовательности:

4.1. Смешать и взвесить всю партию семян, представленную в опытах, определить их суммарную массу и записать в табл. ЛЗ.5.1.

Таблица ЛЗ.5.1

Эффективность сепарирования семян  
в зависимости от напряжения на электродах

$U$ , кВ	Общая масса семян $m_{\Sigma}$ , г	Фракции						Степень очистки $C$
		I		II		III		
		$m_I$ , г	$\bar{m}_I$ , %	$m_{II}$ , г	$\bar{m}_{II}$ , %	$m_{III}$ , г	$\bar{m}_{III}$ , %	
0,2								
0,3								
0,4								
0,5								

4.2. Засыпать семена в бункер, обработать их, выполняя операции в последовательности, приведенной в [4];

4.3. После обработки отключить сепаратор, аккуратно собрать и взвесить семена каждой фракции ( $m_I$ ,  $m_{II}$ ,  $m_{III}$ ), их массу записать в табл. ЛЗ.5.1;

4.4. Смешать семена всех фракций, снова взвесить, установить новое значение напряжения на электродах, сепарировать, повторить все операции предыдущего пункта (и так для всех четырех значений напряжения на электродах);

4.5. Произвести трехкратную обработку семян при одном и том же напряжении на электродах 0,5 кВ. Первый раз обработать как в предыдущем случае, в последующем – только семена первой фракции, полученные при предшествующей обработке. Данные записывать в табл. ЛЗ.5.2.

Таблица ЛЗ.5.2

Эффективность сепарирования семян  
в зависимости от числа повторностей обработки

№ опыта	Общая масса семян $m_{\Sigma}$ , г	Фракции						Степень очистки $C$
		I		II		III		
		$m_I$ , г	$\bar{m}_I$ , %	$m_{II}$ , г	$\bar{m}_{II}$ , %	$m_{III}$ , г	$\bar{m}_{III}$ , %	
1								
2								
3								

Обработать результаты и определить:

1. Распределение семян (в %) по фракциям (классам) для каждого значения  $U$  на электродах. Для  $i$ -й фракции

$$\bar{m}_i = \frac{m_i}{m_{\Sigma}} \cdot 100.$$

2. Степень очистки  $C$  (в относительных единицах) для каждого значения  $U$ , которую упрощенно определить по качеству отсепарированных малоценных семян и примесей, считая семена первой фракции наиболее качественными:

$$C = \frac{m_{\Sigma} - m_1}{m_{\Sigma}}$$

В реальных условиях степень очистки определяют по массе 1000 отсепарированных семян по сравнению с массой 1000 семян до очистки.

3. Построить графические зависимости:

– степени очистки от напряжения на электродах  $C = f(U)$  по данным табл. ЛЗ.5.1;

– степени очистки от числа повторностей обработки  $C = f(n)$  по данным табл. ЛЗ.5.2.

#### ***Содержание отчета:***

1. Цель и задачи работы.
2. Технологическая и электрическая схемы сепаратора.
3. Таблицы наблюдений и вычислений.
4. Графические зависимости.
5. Выводы по работе.

#### ***Контрольные вопросы:***

1. В чем состоит отличие электрических сепараторов семян от механических?
2. Какова природа механических сил электрического поля, действующих на семена в диэлектрическом сепараторе?
3. Опишите технологический процесс в сепараторе СДЛ-1, условие удержания семени на барабане сепаратора.
4. Каково устройство и принцип работы сепаратора СДЛ-1?
6. Опишите работу принципиальной электрической схемы сепаратора СДЛ-1.

## Лабораторное занятие № 6

### Исследование установок очистки и ионизации воздуха

*Цель работы:* изучить устройство и принцип действия установок электроочистки и ионизации воздуха.

#### *Задачи работы:*

1. Изучить действие электрических полей на заряженные частицы, способы зарядки частиц и ионизации воздуха.
2. Изучить устройство и принцип работы установок электроочистки и ионизации воздуха.
3. Исследовать влияние напряженности электрического поля на величину заряда частицы и степень очистки воздуха. Определить мощность фильтра, диапазон регулирования напряжения на электродах, расход энергии на очистку воздуха.
4. Определить зависимость потока аэроионов от напряжения на разрядной линии, мощность установки и расход энергии на ионизацию воздуха.

*Общие сведения.* Используя теоретический материал главы 3 и литературу [3, 9], изучить устройство и принцип действия установок электроочистки и ионизации воздуха. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

#### *Задание для самостоятельной подготовки*

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

#### **Методика выполнения работы**

1. Изучить действие электрического поля на заряженные частицы в воздухе, способы зарядки частиц и молекул кислорода. Знать факторы, влияющие на заряд частицы и действующие

на нее силы. Уметь определить напряжение, необходимое для получения требуемой степени очистки газов или создания необходимой концентрации аэроионов в воздухе.

2. Изучить на лабораторном оборудовании устройство и принцип работы установок. Измерить конструктивные параметры установки очистки и ионизации воздуха УОВ-1 и электрического ионизатора, необходимые для дальнейших расчетов (табл. ЛЗ.б.1).

Таблица ЛЗ.б.1

Конструктивные и технологические параметры установки УОВ-1

Установка очистки воздуха				Ионизатор воздуха		
$S_1,$ м <sup>2</sup>	$n_3,$ шт.	$d,$ м	$\omega,$ м/с	$R_1,$ м	$R_2,$ м	$L,$ м

*Примечания:*  $S$  – площадь электрода осадительной секции, м<sup>2</sup>;  $n_3$  – число электродов осадительной секции, шт.;  $d$  – расстояние между электродами в осадительной секции, м;  $\omega = 1200$  м<sup>3</sup>/ч – подача воздуха;  $R_1, R_2$  – радиус кривизны коронирующего и осадительного электродов, м.

Радиус коронирующего электрода  $R_1$  принять равным радиусу волокон хлопчатобумажной оплетки разрядного провода. Замерить микрометром. Радиус осадительного электрода  $R_2$  принять равным высоте подвеса разрядной линии.

3. Определить влияние напряженности электростатического поля  $E$  на степень очистки воздуха и величину заряда частицы  $q_{cp}$  расчетным методом по формулам:

$$i = \frac{8\pi\epsilon_0 kU(U - U_i)}{R_2^2 \ln R_2 / R_1}, \quad \eta = 1 - \exp(-\chi v_{oc} S / \omega),$$

$$E_i = 3,04 \cdot 10^6 (\delta + 0,0311\sqrt{\delta R_1}).$$

Принять  $B_n = 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/(В·с),  $\epsilon_q = 2-6$ ,  $a = (1-4) \cdot 10^{-6}$  м. Значения  $\eta$  и  $q_{cp}$  найти для 3-4 значений  $E$ . Напряжение на электродах регулировать в диапазоне от  $U_{min}$  до  $U_{max}$  резистором  $R_4$ .

Мощность фильтра (Вт)  $P = U I$ , где  $U, I$  – напряжение и ток фильтра.

Расход энергии на фильтрацию воздуха (Дж/м<sup>3</sup>):

$$W = \frac{P}{\omega}.$$

Результаты расчетов представить в виде табл. ЛЗ.6.2.

Таблица ЛЗ.6.2

Зависимость степени очистки воздуха от напряженности электрического поля

$U$ , В	$I$ , А	$E$ , В/м	$q_{\text{ср.}}$ , Кл	$v_{\text{ос.}}$ , м/с	$\eta$ , о.е.	$P$ , Вт	$W$ , Дж/м <sup>3</sup>
------------	------------	--------------	--------------------------	---------------------------	------------------	-------------	----------------------------

3. Зависимость потока  $N$  аэроионов от напряжения на разрядной линии  $U$ , мощность  $P$  аэроионизатора и расход энергии  $W$  определить расчетным и экспериментальным методами, используя зави-

симости  $i = \frac{8\pi\epsilon_0 kU(U - U_i)}{R_2^2 \ln R_2 / R_1}$ ,  $I = il$ . Результаты расчетов запи-

сать в табл. ЛЗ.6.3.

Таблица ЛЗ.6.3

Зависимость потока аэроионов, мощности и расхода на ионизацию от напряжения на разрядной линии

$U$ , В	$I$ , А	$i$ , А/м	$N$ , ион/м	$n$ , ион/м <sup>3</sup>	$P$ , Вт	$W$ , Дж/м <sup>3</sup>	$l_p$ , м
------------	------------	--------------	----------------	-----------------------------	-------------	----------------------------	--------------

Примечания:  $I$  – ток разрядной линии, А;  $i$  – разрядный ток на единицу длины линии, А/м;  $n = Ni_p/V$  – средняя концентрация аэроионов в помещении объемом  $V$ , ион/м<sup>3</sup>;  $P = UI$  – мощность аэроионизатора, Вт;  $W = Pt/V$  – расход энергии на ионизацию воздуха, Дж/м<sup>3</sup>. Расчетная длина разрядной линии в помещении:

$$l_p = \frac{n_p V_{\Pi}}{N},$$

где  $n_p$  – рекомендуемая концентрация аэроионов в помещении, ион/м<sup>3</sup>, принять из прилож. 3;

$V_{\Pi}$  – объем помещения, м<sup>3</sup>.

Напряжение на разрядной линии в помещении определить по формулам:

$$E_i = 3,04 \cdot 10^6 \left( \delta + 0,0311 \sqrt{\delta R_1} \right), U_i = 303 \cdot 10^3 \left( 1 + \frac{0,0298}{\sqrt{R_1}} \right) R_1 \ln \frac{R_2}{R_1},$$

$$U = U_i + \frac{neR_2^2}{4\epsilon_0}.$$

#### **Содержание отчета:**

1. Цель, задачи работы.
  2. Таблицы с результатами исследований.
  3. Графические зависимости  $\eta$ ,  $q_{\text{ср}}(E)$ ;  $N$ ,  $n(U)$ .
  4. Мощность и расход энергии на фильтрацию и аэроионизацию.
- Расчетные значения  $l_p$  и  $U_0$  для разрядной линии в помещении.
5. Выводы по задачам и результатам работ.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какие способы зарядки частиц существуют?
2. Какие силы действуют на заряженные частицы в электрическом поле?
3. В чем заключаются физические основы электрофильтрации и ионизации воздуха?
4. Каковы устройство и принцип работы установки УОВ-1?
5. Опишите работу принципиальной электрической схемы управления УОВ-1, схемы умножения напряжения.

## 4. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### 4.1. Природа и технологические свойства ультразвука

*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 сжатия и разрежения, распространяющиеся в 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 распространяются во все стороны в виде волн.

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 в момент времени  $\tau$  смещение частицы

$$b = B \sin \omega \tau, \quad (4.1)$$

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  $\lambda$ , 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

$$v = \frac{db}{d\tau} = B\omega \cos \omega\tau. \quad (4.2)$$

Максимальное значение скорости

$$v_{\max} = \omega B = 2\pi f B. \quad (4.3)$$

Ускорение частицы

$$a = \frac{dv}{d\tau} = \frac{d^2b}{d\tau^2} = -\omega^2 B \sin \omega\tau = -b\omega^2. \quad (4.4)$$

Максимальное значение ускорения

$$a_{\max} = B\omega^2. \quad (4.5)$$

Давление ( $\text{Н/м}^2$ ), создаваемое ультразвуковыми колебаниями в среде с плотностью  $\rho$  ( $\text{кг/м}^3$ ) и скоростью ультразвука  $c$  ( $\text{м/с}$ ):

$$p = \nu\rho c = \omega\rho c B \cos \omega\tau. \quad (4.6)$$

Амплитуда давления

$$p_{\max} = \omega\rho c B = B\omega z_a. \quad (4.7)$$

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

Интенсивностью или силой ультразвуковых колебаний называют мощность, приходящуюся на единицу поверхности площад-

ки, перпендикулярной направлению распространения звуковых колебаний.

Для синусоидальной бегущей волны интенсивность ультразвука выражается следующей зависимостью:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{pv}{2} = \frac{v^2 \rho c}{2} = \frac{p^2}{2z_a}. \quad (4.8)$$

Интенсивность, применяемая в ультразвуковой технике, колеблется в широких пределах, начиная с сотен ватт до сотен и тысяч киловатт на  $1 \text{ м}^2$ .

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

$$P = IS. \quad (4.9)$$

Среда, в которой 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 пр. При этом поглощение всегда растет с увеличением частоты колебаний.

Затухание амплитуды смещения в плоской волне может быть выражено

$$B = B_0 e^{-\alpha l}, \quad (4.10)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов;

$\alpha$  – коэффициент затухания, зависящий от свойства среды,  $\text{м}^{-1}$ ;

$l$  – расстояние, пройденное волной,  $\text{м}$ .

Если на некотором расстоянии  $l_1$  от излучателя измерить амплитуду колебания  $B_1$ , а на расстоянии  $l_2$  – амплитуду  $B_2$ , то значе-

ние коэффициента затухания (поглощения) может быть определено по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_2 - l_1} \ln \frac{B_1}{B_2}. \quad (4.11)$$

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

$$\alpha_{\text{ж}} = \alpha' f^2, \quad (4.12)$$

а для твердых тел

$$\alpha_m = \alpha' f, \quad (4.13)$$

где  $\alpha'$  – 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

$$I = I_0 e^{-2\alpha l}. \quad (4.14)$$

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.

Основными эффектами ультразвуковых колебаний являются механические, акустические, термические и биологические.

*Механические* проявления наблюдают в газообразных и жидких средах. К ним относят переменное давление, кавитацию, поверхностное трение, коагуляцию, дегазацию, диспергирование и т. д.

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

*Термические* проявления состоят в том, что среда, в которой происходит распространение колебаний, поглощает часть энергии колебаний, которые преобразуются в тепловую и нагревают среду, а также расходуется на изменение структуры вещества.

*Биологические* эффекты связаны с изменениями протекания 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 разряжения и их захлопывания во время фазы сжатия, сопровождающийся возникновением местных больших мгновенных давлений, приводящих к механическим разрушениям поверхности твердого тела, находящегося вблизи мест захлопывания. При прохождении фазы волны, создающей разряжение, 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 т. п., прочность ослаблена. Во время фазы сжатия эти маленькие полости – кавитационные пузырьки – захлопываются, что сопровождается 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. В табл. 4.1 приведены значения интенсивности ультразвука, при которой возникает кавитация, в зависимости от частоты ультразвуковых колебаний.

Таблица 4.1

Значения частоты и интенсивности ультразвука для создания кавитации

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

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

*Диспергирование* заключается в 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 технологические процессы – ультразвуковая пайка, ультразвуковая очистка, обработка твердых хрупких материалов и др.

*Разделение частиц в неоднородных суспензиях* возможно на основании того, что в ультразвуковом поле 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 ультразвука.

*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 [5, 6] 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.

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 ультразвуковой волны через жидкость 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 приводят к взаимному трению твердых частиц, движущихся 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 по-

верхности 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.

## **4.2. Основные элементы ультразвуковых установок**

Существующее ультразвуковое технологическое оборудование различной мощности, степени сложности и назначения, базируется на общих принципах работы и сходно по своей структуре.

На рис. 4.1 представлена структурная схема ультразвукового технологического аппарата, который состоит из сетевого источника питания, транзисторного усилителя (инвертора), задающего генератора ультразвуковой частоты, устройства контроля и управления, устройства согласования, колебательной системы (преобразователя и концентратора), технологической среды.

*Ультразвуковые электронные генераторы* предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока промышленной частоты в электрическую энергию ультразвуковой частоты. В настоящее время генераторы выполняются на полупроводниковых приборах – транзисторах и тиристорах. Применение тиристорных инверторов ограничено из-за низких частотных свойств тиристоров и сложности схемы управления.

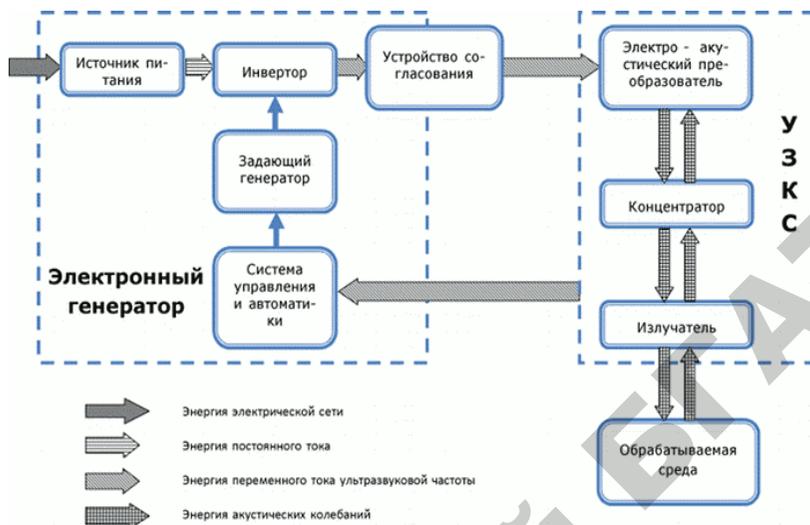


Рис. 4.1. Структурная схема ультразвукового технологического аппарата

Наиболее широко в настоящее время применяются ультразвуковые генераторы на транзисторах. Так как параметры транзисторов непрерывно улучшаются, они являются наиболее перспективными приборами и для новых разработок ультразвуковых генераторов.

По схемному решению генераторы могут быть с независимым возбуждением, с самовозбуждением, с электрической или акустической автоподстройкой частоты. Наиболее распространены генераторы с независимым возбуждением. Чаще всего они многокаскадны: генератор вырабатывает электрические колебания ультразвуковой частоты, обеспечивая заданную форму тока и напряжения, последующие каскады усиливают сигнал до необходимой мощности. Принципиальная электрическая схема такого генератора представлена на рис. 4.2.

Включение установки производят выключателем SA. Напряжение от трансформатора TV1 подается через диод VD1 на задающий генератор, собранный на транзисторе VT1 по схеме с индуктивной обратной связью и колебательным контуром.

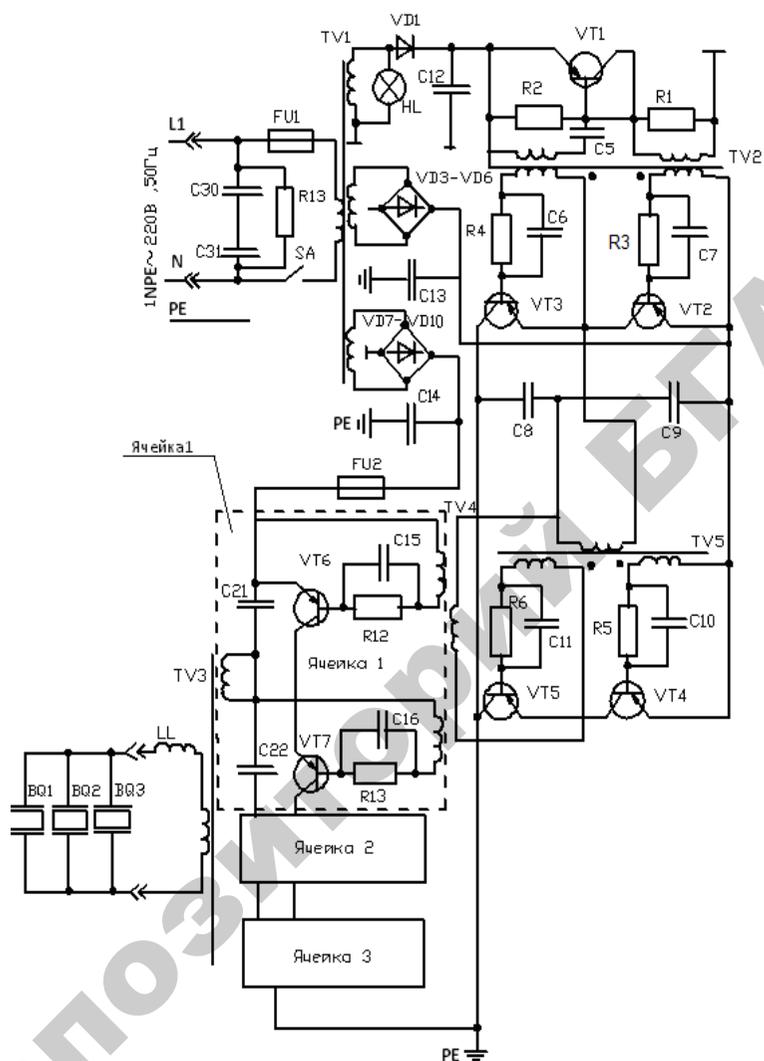


Рис. 4.2. Принципиальная электрическая схема генератора УЗУ-0,25

Электрические колебания ультразвуковой частоты, возникающие в задающем генераторе, подаются на вход предварительного усилителя мощности трансформатором  $TV2$ .

Предварительный усилитель мощности состоит из двух ступеней, одна из которых собрана на транзисторах  $VT2$ ,  $VT3$ , вторая – на транзисторах  $VT4$ ,  $VT5$ . Обе ступени предварительного усиления мощности собраны по последовательно-двухтактной схеме, работающей в режиме переключения. Ключевой режим работы транзисторов позволяет получить достаточно высокий КПД.

Цепи баз транзисторов первой и второй ступеней усиления мощности подключены к отдельным, включенным встречно обмоткам возбуждения  $TV2$ ,  $TV5$ . Это обеспечивает двухтактную работу транзисторов, т. е. поочередное включение.

Автоматическое смещение транзисторов обеспечивается резисторами  $R3$ – $R6$  и конденсаторами  $C6$ ,  $C7$  и  $C10$ ,  $C11$ , включенными в цепь базы каждого транзистора.

Переменное напряжение возбуждения подается на базу через конденсаторы  $C6$ ,  $C7$  и  $C10$ ,  $C11$ , а постоянная составляющая базового тока, проходя через резисторы  $R3$ – $R6$ , создает на них падение напряжения, обеспечивающее надежное открывание и закрывание транзисторов.

Вторая ступень усилителя мощности состоит из трех ячеек, каждая из которых собрана на двух транзисторах, работающих в режиме переключения. Возбуждение от предварительного усилителя мощности подается на каждый транзистор с отдельной обмотки трансформатора  $TV4$ , причем в каждой ячейке эти напряжения противофазны. С трансформаторных ячеек переменное напряжение подается на обмотки трансформатора  $TV3$ , где происходит сложение мощностей, и с выходной обмотки трансформатора напряжение подается на пьезоэлектрические преобразователи  $BQ1$ – $BQ3$ . Так как транзисторы работают в режиме переключения, то выходное напряжение имеет прямоугольную форму, содержащую гармоники. Для выделения 1-й гармоники напряжения на преобразователе к выходной обмотке трансформатора  $TV3$  последовательно с преобразователем включена катушка  $LL$ , индуктивность которой рассчитана таким образом, что с собственной емкостью преобразователя

она составляет колебательный контур, настроенный на 1-ю гармонику напряжения. Это позволяет получить на нагрузке синусоидальное напряжение, не меняя энергетически выгодного режима транзисторов.

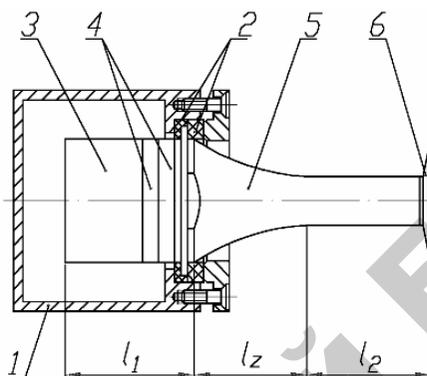


Рис. 4.3. Конструктивная схема полуволновой ультразвуковой колебательной системы:

1 – корпус; 2 – опора; 3 – отражающая металлическая накладка; 4 – преобразователь; 5 – излучающая накладка-концентратор; 6 – рабочий инструмент;  $l_1$  – длина цилиндрического участка отражающей накладки с пьезоэлементами;  $l_z$  – длина участка переменного сечения (радиальный переход);  $l_2$  – длина излучающего цилиндрического участка концентратора

Ультразвуковая колебательная система (УЗКС) представляет собой устройство, обеспечивающее преобразование энергии электрических колебаний, поступающих от генератора, в упругие колебания резонансной колебательной системы и ввод сформированных колебаний в обрабатываемые технологические среды. УЗКС является основным узлом любого технологического оборудования, поскольку обеспечивает не только формирование ультразвуковых колебаний, но и их усиление до величин, необходимых для реализации различных технологических процессов. УЗКС технологического назначения (рис. 4.3) состоит из преобразователя 4, отражающей накладки 3, концентратора 5, рабочего инструмента 6 с излучающей поверхностью.

Преобразователи служат для преобразования электрической энергии ультразвуковой частоты в ультразвук и бывают магнито-стрикционные и пьезоэлектрические.

Работа пьезоэлектрических преобразователей основана на использовании обратного пьезоэлектрического эффекта, состоящего в том, что при внесении кристаллов некоторых материалов в переменное электрическое поле так, чтобы силовые линии совпадали с пьезометрической осью кристалла, последний будет сжиматься или растягиваться, т. е. изменит свои геометрические размеры.

Наиболее часто встречающаяся конструкция пьезоэлектрического преобразователя представлена на рис.4.4.

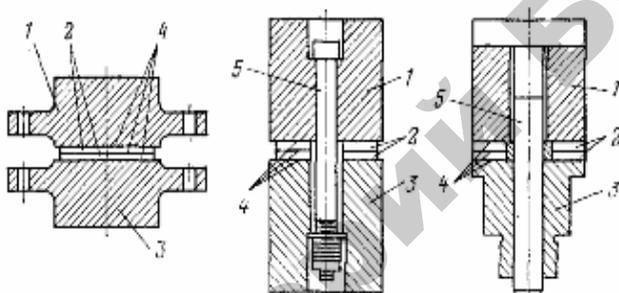


Рис. 4.4. Конструкции составных пакетных пьезоэлектрических преобразователей:

1 – излучающая накладка; 2 – пьезокерамические пластины; 3 – отражающая накладка; 4 – электроды; 5 – крепежный болт

Пьезоэлектрические преобразователи используются для формирования ультразвуковых колебаний в жидких, твердых и газообразных средах. Рабочие частоты от 20 кГц до 1000 кГц. Этот вид преобразователей получил наибольшее распространение, практически вытеснив из практики все остальные преобразователи.

Активным элементом преобразователя является пьезоэлемент (пьезокерамический диск) (рис. 4.5), находящийся между согласующим слоем и демпфером. Два электрода на верхней и нижней поверхности диска соединены с генератором [7].

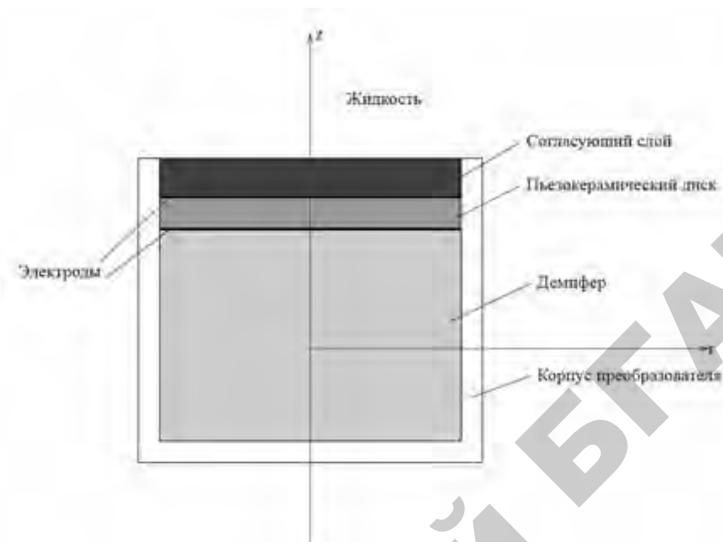


Рис. 4.5. Конструкция пьезоэлектрического преобразователя

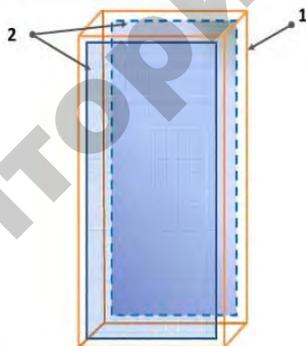


Рис. 4.6. Пьезоэлемент:

1 – пластина из пьезоэлектрика; 2 – электроды из проводящего материала, наложенные на грани пластины

Пьезоэлемент представляет собой пьезоэлектрик определенных размеров, геометрической формы и ориентации относительно основных кристаллографических осей (или направления поляризации

в случае пьезокерамики), имеющий проводящие обкладки (электроды) (рис. 4.6).

В качестве материалов для преобразователей используются более 150 различных материалов, обладающих пьезоэффектом. Наибольшее распространение получили кварц и пьезокерамический искусственный материал на основе титаната бария с добавлением титаната свинца и циркония (рис. 4.7).

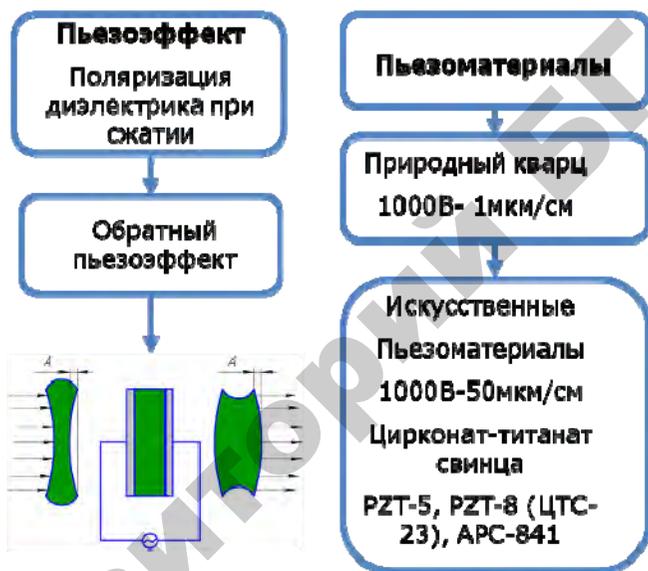


Рис. 4.7. Материалы для пьезоэлектрических преобразователей

Оптимальная частота пьезоэлектрических преобразователя, Гц:

$$f = \frac{K}{d}, \quad (4.15)$$

где  $K$  – постоянная излучателя: для кварца – 2280 Гц·м, сегнетовой соли – 1540 Гц·м, титаната бария – 2200 Гц·м;

$d$  – толщина пьезопластины, м.

Интенсивность ультразвуковых колебаний, генерируемых пьезоэлектрическими излучателями при одностороннем излучении, Вт/м<sup>2</sup>:

$$I = \frac{K_n f^2 U^2}{\rho c}, \quad (4.16)$$

где  $K_n$  – коэффициент, учитывающий свойства пьезоэлектрического излучателя: для кварца –  $1,44 \cdot 10^{-8}$  Вт·Н·с<sup>3</sup>/(В<sup>2</sup>·м<sup>5</sup>), сегнетовой соли –  $5,4 \cdot 10^{-6}$  Вт·Н·с<sup>3</sup>/(В<sup>2</sup>·м<sup>5</sup>), титаната бария –  $1,44 \cdot 10^{-4}$  Вт·Н·с<sup>3</sup>/(В<sup>2</sup>·м<sup>5</sup>);

$U$  – напряжение возбуждения, В;

$\rho c$  – акустическое сопротивление среды, Н·с/м<sup>3</sup>.

Мощность, потребляемая пьезоэлектрическим излучателем для возбуждения акустических колебаний, Вт:

$$P_v = \frac{P_a}{\eta_a} = \frac{IS}{\eta_a}, \quad (4.17)$$

где  $S$  – площадь поверхности, излучающая акустические колебания, м<sup>2</sup>;

$\eta_a$  – электроакустический КПД, равный для излучателей из кварца 0,6–0,8, из титаната бария – 0,5–0,7.

Мощность пьезокерамических преобразователей ограничена значениями допустимой напряженности электрического поля и механической прочности. Напряжение питания 50–400 В для пьезокерамики и 2–20 кВ – для кварца, интенсивность ультразвука – 100 кВт/м<sup>2</sup>, КПД – 40–70 %.

Прямой *магнитострикционный эффект* – изменение размеров (деформация ферромагнетика) при изменении окружающего магнитного поля – положен в основу работы магнитострикционных преобразователей, или магнитострикторов. Магнитострикционные

преобразователи используются для возбуждения колебаний в жидких и твердых телах (рис. 4.8).

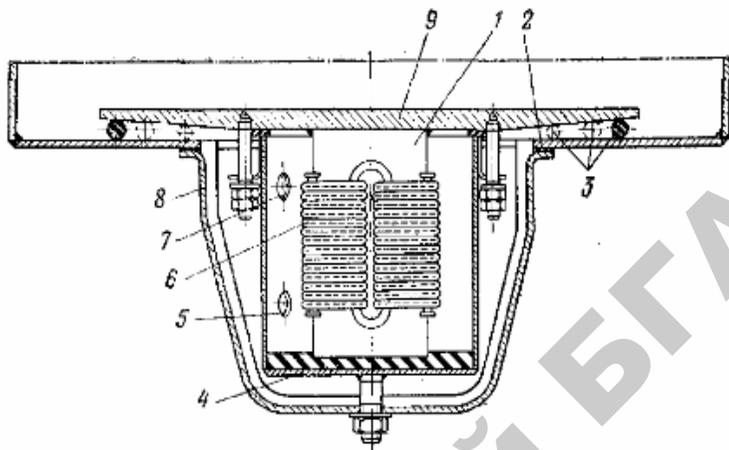


Рис. 4.8. Плоский магнитострикционный преобразователь:

1 – пакет пластин пермендюра; 2 – прокладка; 3 – уплотнения; 4 – бачок для охлаждения; 5 – вход для воды; 6 – обмотка пакета; 7 – слив воды; 8 – кронштейн; 9 – диафрагма

Рабочие частоты магнитострикционных преобразователей до 100 кГц. Основным недостатком является необходимость водяного охлаждения, поскольку магнитострикционные материалы характеризуются низкой температурой Кюри, температурой потери магнитострикционных свойств материалом.

Для изготовления магнитострикционных преобразователей применяются пермендюр, никель и железоалюминиевые сплавы – альферы. Наиболее высоким магнитострикционным эффектом обладает сплав платины с железом, но из-за большой стоимости этот сплав практически не применяется. Чаще магнитострикционные преобразователи делают из тонких листов, склеенных между собой. Толщина пластин обычно выбирается 0,1–0,3 мм. На сердечник, собранный из тонких листов, накладывается обмотка. Выполняют магнитострикционные преобразователи стержневой или кольцевой формы (рис. 4.9).

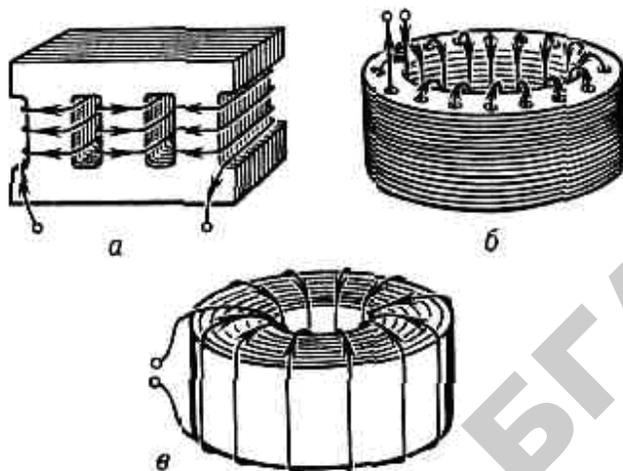


Рис. 4.9. Преобразователи из металлических магнитоэлектрических материалов с сердечниками стержневой (а) и кольцевой (б, в) формы

По сравнению с пьезоэлектрическими, магнитоэлектрические преобразователи имеют преимущества потому, что у них большие величины относительных деформаций ( $\Delta l/l = 10^{-3} - 10^{-5}$ , где  $\Delta l$  – абсолютное изменение размеров;  $l$  – начальный размер тела), большая механическая прочность, большой срок службы и они менее чувствительны к температурным воздействиям.

Мощность магнитоэлектрических преобразователей выше, чем пьезоэлектрических, но они более инерционные.

Во многих ультразвуковых промышленных установках, аппаратах и станках чаще применяются магнитоэлектрические преобразователи типа ПМС.

Для увеличения амплитуды относительной деформации  $\Delta l/l$  преобразователя помимо обмотки тока высокой (ультразвуковой) частоты выполняют обмотку подмагничивания, благодаря которой рабочий участок магнитоэлектрической кривой  $\Delta l/l(B)$  смещается в сторону наибольшего изменения длины преобразователя  $\Delta l$  (рис. 4.10).

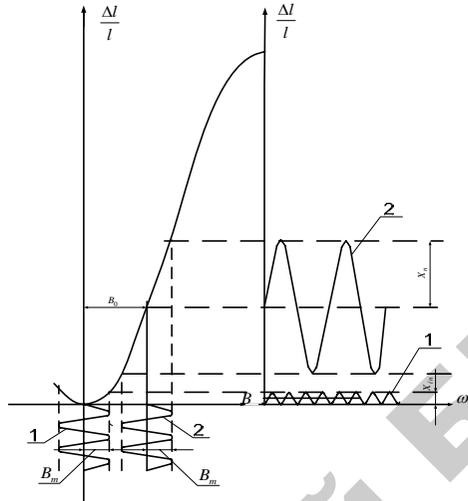


Рис. 4.10. Динамическая магнитострикционная кривая при возбуждении переменным током:  
1 – без подмагничивания; 2 – с подмагничиванием

Задача расчета магнитострикционного преобразователя состоит в восстановлении его обмотки и выборе к нему ультразвукового генератора.

Исходными данными являются размеры сердечника и его материал.

Последовательность расчета состоит в следующем. Определяют площадь поверхности излучения сердечника,  $m^2$ :

$$A_n = \left[ 1 + \frac{b_0(n-1)}{an} \right] A_c, \quad (4.18)$$

где  $n$  – число стержней сердечника;

$A_c$  – суммарная площадь сечения стержней,  $m^2$ .

При количестве стержней  $n > 3$  ширина крайних стержней составляет половину ширины каждого из остальных стержней.

Находят электрическую мощность генератора, подводимую к преобразователю:

$$P_{\text{в}} = p_s A_{\text{и}}, \quad (4.19)$$

где  $p_s$  – допустимая удельная электрическая мощность для данного материала сердечника, Вт/м<sup>2</sup> (прилож. 5).

Рассчитывают резонансную частоту (частоту ультразвука). Для пакета из прямоугольных пластин:

$$f = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 + b/(2h))}}, \quad (4.20)$$

где  $E$  – модуль Юнга, Па;

$\rho$  – плотность материала пластин, кг/м<sup>3</sup>;

$b, h$  – размерные параметры пакета (рис. 4.11).

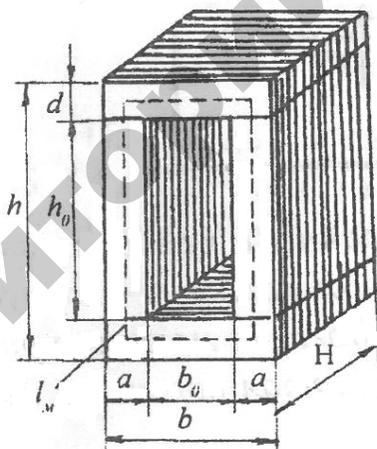


Рис. 4.11. Формы и размеры двухстержневого пакета магнитоstrictionного преобразователя ПМС:

$a, h_0$  – ширина и активная длина магнитоstrictionных стержней;  $b_0$  – ширина окна;  $h, b, H$  – высота, ширина и толщина пакета;  $a$  – ширина накладки,  $l_m$  – длина средней линии магнитного поля в пакете

По выходной мощности  $P_B$  и частоте  $f$  выбирают ультразвуковой генератор из числа выпускаемых промышленностью (прилож. 6).

Определяют силу тока обмотки возбуждения

$$I_B = P_B / U_B \cos\phi, \quad (4.21)$$

где  $U_B$  – напряжение обмотки возбуждения, которое выбирают в зависимости от выходной мощности генератора:

$P_B$ , кВт	до 0,16	0,25–0,63	1,0–1,6	2,5 и более
$U_B$ , В	55	110	220	440

Коэффициент мощности преобразователей  $\cos\phi$  принимают при пакете из никеля 0,8–0,9; из сплава К49Ф2 – 0,3–0,6.

Рассчитывают число витков обмотки

$$\omega = U_B / (4,44 f B S_{ст}), \quad (4.22)$$

где  $B$  – магнитная индукция, принимаемая по кривой намагничивания  $B = f(H)$  материала сердечника, близкая к значению индукции насыщения  $B_s$ , Тл (прилож. 5);

$S_{ст}$  – площадь поверхности поперечного сечения стержня, м<sup>2</sup>.

Находят силу тока подмагничивания (поляризации), А:

$$I_0 = 0,8 H_0 l_M / (1,4 \omega), \quad (4.23)$$

где  $H_0$  – напряженность магнитного поля подмагничивания, выбираемая по кривой  $\Delta l/l = f(H)$  для желаемой амплитуды колебаний, А/м. Рекомендуемые значения  $H_0$  приведены в прилож. 5;

$l_M$  – средняя длина магнитных силовых линий, м.

Для двухстержневого преобразователя (см. рис. 4.11)

$$l_M = 2(h_0 + d + b - a). \quad (4.24)$$

Определяют суммарную силу тока в совмещенной обмотке преобразователя

$$I = \sqrt{I_B^2 + I_0^2}. \quad (4.25)$$

Рассчитывают площадь поперечного сечения жилы обмоточного провода, м<sup>2</sup>:

$$S_{\text{пр}} = I/j_{\text{доп}}, \quad (4.26)$$

где  $j_{\text{доп}}$  – допустимая плотность тока, А/м<sup>2</sup>. Для провода с медной жилой  $j_{\text{доп}} = 2,5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.

*Концентраторы* обеспечивают передачу сформированных колебаний от преобразователей к инструментам и ввод колебаний в обрабатываемые технологические среды. Концентраторы являются механическими трансформаторами скоростей или смещений и представляют собой стержни переменного сечения, в которых плотность энергии колебаний распределена неравномерно по длине. На малом выходном сечении скорость понижается, следовательно, амплитуда смещения получается значительно больше, чем на большом входном сечении стержня.

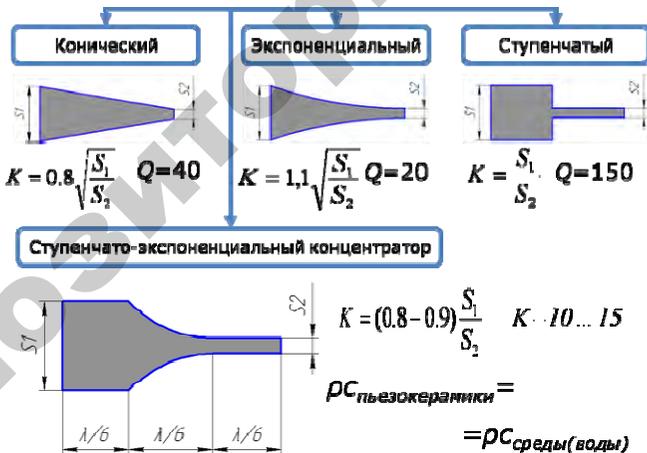


Рис. 4.12. Типы ультразвуковых концентраторов:  
 $K$  – коэффициент усиления;  $Q$  – добротность

Концентраторы разделяются по форме на конусные, экспоненциальные, катеноидальные, ступенчатые и ампульные. Применяют также сложные составные концентраторы. Некоторые типы концентраторов представлены на рис. 4.12.

### **4.3. Применение ультразвука в измерительной технике и дефектоскопии**

*Ультразвуковая дефектоскопия* – поиск дефектов (раковины, трещины, расслоения и т. п.) в материале изделия путем излучения и принятия ультразвуковых колебаний, отраженных от внутренних дефектов, и дальнейшего анализа их амплитуды, времени прихода, формы и других характеристик с помощью специального оборудования – ультразвукового дефектоскопа. Является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля. Наиболее часто используются частоты от 0,5 до 10 МГц.

Применяют следующие методы ультразвуковой дефектоскопии: эхо-метод, теневой, зеркально-теневой, эхо-зеркальный и эхо-теневой. *Эхо-метод* (рис. 4.13, *а*) основан на отражении ультразвуковых колебаний с амплитудой пропорциональной площади дефекта. Этим методом контролируют поковки, штамповки, прокат, термообработанное литье, пластмассы, измеряют толщину металлов и оценивают структуру материалов, используют для контроля сварных соединений. Чувствительность эхо-метода высокая: 0,5 мм<sup>2</sup> на глубине 100 мм. Недостатком эхо-метода является сравнительно низкая помехоустойчивость.

*Теневой и зеркально-теневой* методы основаны на уменьшении амплитуды ультразвуковых колебаний вследствие наличия дефекта на их пути (рис. 4.13, *б, в*). Чем крупнее дефект, тем слабее прошедший к приемнику сигнал. В теневом методе (рис. 4.13, *б*), в отличие от зеркально-теневого (рис. 4.13, *в*), ультразвуковой луч идет прямо от генератора к приемнику через контролируемый металл. Методы применяют в основном для контроля проката малой и средней толщины, некоторых резиновых изделий (покрышек колес), для исследования упругих свойств стеклопластиков, бетона, графита и т. д.

Методы имеют высокую помехоустойчивость и слабую зависимость амплитуды от угла ориентации дефекта. Однако обладают малой точностью оценки координат дефектов.

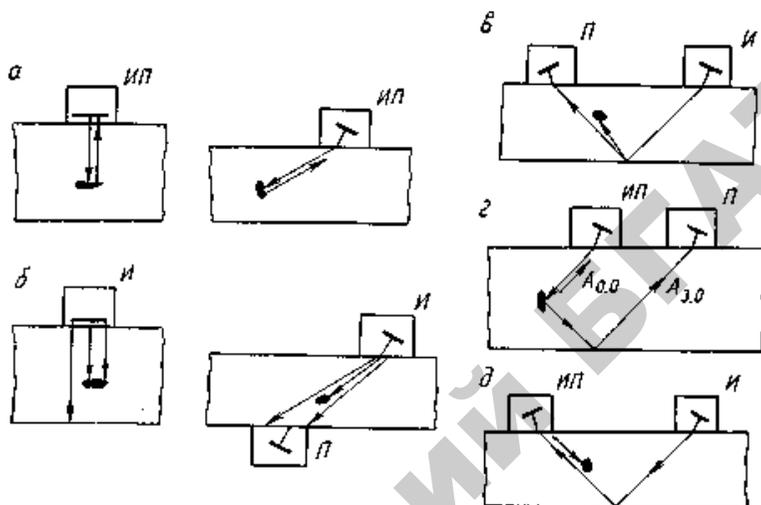


Рис. 4.13. Схемы использования основных методов ультразвукового контроля:  
 а – эхо-метод; б – теневой; в – зеркально-теневой; г – эхо-зеркальный;  
 д – эхо-теневой

Эхо-зеркальный метод (рис. 4.13, г) основан на сравнении амплитуд обратно-отраженного и зеркально-отраженного сигналов от дефекта. Основное преимущество эхо-зеркального метода – высокая выявляемость плоскостных дефектов и возможность оценки их формы. Его применяют только для металлов толщиной более 40 мм.

Иногда используется эхо-теневой метод. В этом случае о наличии дефекта судят одновременно по эхо-импульсу от дефекта и по ослаблению однажды отраженного донного сигнала (рис. 4.13, д). Метод применяют при механизированном контроле сварных стыков труб. Он дает большую вероятность обнаружения дефектов и возможность оценки их характера, а также позволяет вести контроль качества акустического контакта при наличии сложной многоканальной аппаратуры.

Ультразвуковые дефектоскопы (УД) классифицируют: по методу контроля (с применением эхо-метода; теневые; зеркально-теневые и т. д.); режиму излучения (импульсные, теневые); области применения (общего назначения УД и специализированные УДС); функциональным возможностям (обнаружение дефектов, измерение глубины их залегания, определение площади, размеров дефектов и т. п.).

Наибольшее распространение получили дефектоскопы серий УДЗ-103, УДЗ-204, УД2-70, предназначенные для контроля продукции на наличие сплошности и однородности материалов, полуфабрикатов, готовых изделий и сварных соединений, для измерения глубины и координат их залегания, измерения отношений амплитуд сигналов от дефектов; «УИУ-СКАНЕР» – для контроля металлов, полиэтилена, пластмасс, керамики.

#### **4.4. Ультразвуковые технологии мойки и очистки**

Современная техника предъявляет повышенные требования к качеству очистки и мойки технологических поверхностей. Некачественная очистка отрицательно сказывается на надежности и долговечности деталей механизмов, что ускоряет износ, ухудшает адгезию защитных и других функциональных покрытий.

Применение ультразвука дает возможность быстро удалять с поверхности различные виды загрязнений; очищать детали сложной формы, имеющие труднодоступные полости и каналы; применять различные моющие средства; проводить процессы очистки и мойки при комнатной температуре или умеренном нагревании. Схема ультразвуковой моечной установки приведена на рис. 4.14.

Ультразвуковые волны, распространяющиеся в моющем растворе от источника излучения, оказывают на поверхность очищаемой детали давление, обусловленное кавитационными явлениями. Кавитация проявляется в разрывах жидкости под действием звуковой волны с образованием мелких пузырьков (50–500 мкм), заполненных парами моющей жидкости. Часть пузырьков после кратковременного

существования (20–50 мкс) захлопывается, создавая при этом местные гидравлические удары, достигающие давления в сотни атмосфер.

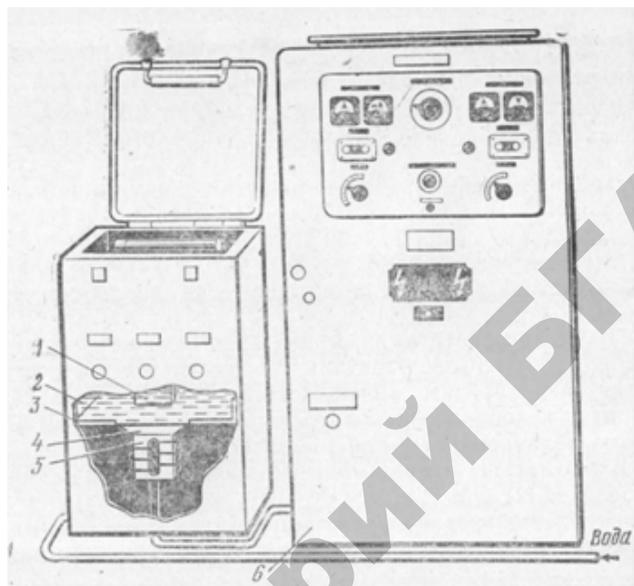


Рис. 4.14. Схема ультразвуковой моечной установки:

1 – кассета с очищаемыми деталями; 2 – моющий раствор; 3 – ванна; 4 – мембрана; 5 – магнитострикционный преобразователь; 6 – ультразвуковой генератор

Под действием этого давления происходит разрушение загрязнений. Другая часть пузырьков не захлопывается, а под действием ультразвукового поля интенсивно пульсирует и перемещается вместе с гидродинамическими потоками, способствуя интенсификации очистки.

Механизм очистки зависит от вида загрязнения (твердое или жидкое) и вида моющей среды (прилож. 7, 8). Так, при очистке твердых загрязнений в водной среде загрязнения разрушаются силами, возникающими при захлопывании пузырьков. При очистке в растворителе или в водной среде растворимых или вязких загрязнений наиболее важной является циркуляция жидкости, большую роль в которой

играют незахлопывающиеся пульсирующие пузырьки. Основными факторами, определяющими процесс очистки, являются: частота и интенсивность ультразвуковых колебаний, свойства и температура очищающей жидкости, расположение очищаемых деталей в ультразвуковом поле.

Частота ультразвуковых колебаний определяет интенсивность захлопываний кавитационных пузырьков. Чем ниже частота, тем больше интенсивность каждого отдельного акта захлопывания, так как при низкой частоте пузырек имеет больше времени для формирования и достигает большей величины. Кроме того, при низких частотах звуковая волна имеет большую глубину проникновения, что особенно выгодно при очистке сложных деталей, имеющих отверстия и каналы. Под воздействием низкочастотных ультразвуковых колебаний возможна вибрация самих деталей, что также способствует очистке. Однако при частотах ниже 20 кГц звук становится слышимым. Пронзительный шум и свист, сопровождающие работу ультразвуковых установок на этих частотах, неприятны для слуха человека и оказывают болезненное воздействие. Поэтому частоты 20–25 кГц являются наиболее приемлемыми для очистки.

От мощности звуковой волны зависит количество кавитаций, возникающих в объеме жидкости. Хорошее качество очистки для частот 20–50 кГц в водных растворах достигается при плотности ультразвуковой энергии 2–3 Вт/см<sup>2</sup>, а при использовании растворителей – 1–2 Вт/см<sup>2</sup>.

Эффективность ультразвуковой очистки и мойки зависит также от физико-химических свойств моющей среды (поверхностное натяжение, упругость паров, вязкость) и ее температуры (прилож. 7, 8). Водные растворы моющих средств в связи с низким давлением пара имеют лучшие кавитационные свойства, чем различные органические растворители. Кавитационные процессы в водных растворах наиболее интенсивно происходят при температуре 40–70 °С. Для моющих средств на основе хлорированных углеводородов и нефтяных растворителей наиболее благоприятные условия для кавитации создаются соответственно при температуре 30–50 и 20–40 °С. Увеличение температуры в большинстве случаев нецелесообразно, так как с ее повы-

шением возрастает давление паров и газов в кавитационных пузырьках и уменьшается сила гидравлических ударов при их захлопывании.

Расположение деталей в ультразвуковом поле также влияет на эффективность очистки. Интенсивнее очищаются те поверхности деталей, которые расположены ближе и обращены к излучателю. Обычно детали загружаются в решетчатый контейнер, изготовленный из проволочной сетки или перфорированного листового материала. В этой связи следует отметить целесообразное использование излучателей с фокусирующими системами.

Промышленностью выпускаются установки для ультразвуковой очистки в основном двух моделей – УЗВ и УЗУ, которые предназначены для мойки и очистки узлов и деталей из металлических и неметаллических материалов от различных видов загрязнений (прилож. 9). Для очистки и мойки мелких изделий, имеющих скрытые «карманы», глубокие, сложной формы каналы малого диаметра применяют установки УЗУМИ (рис. 4.15; прилож. 10).



*а*



*б*

*Рис. 4.15.* Внешний вид установок ультразвуковой очистки и мойки:  
*а* – УЗУМИ-05; *б* – УЗУМИ-2

Схема конвейерной установки для ультразвуковой очистки деталей представлена на рис. 4.16.

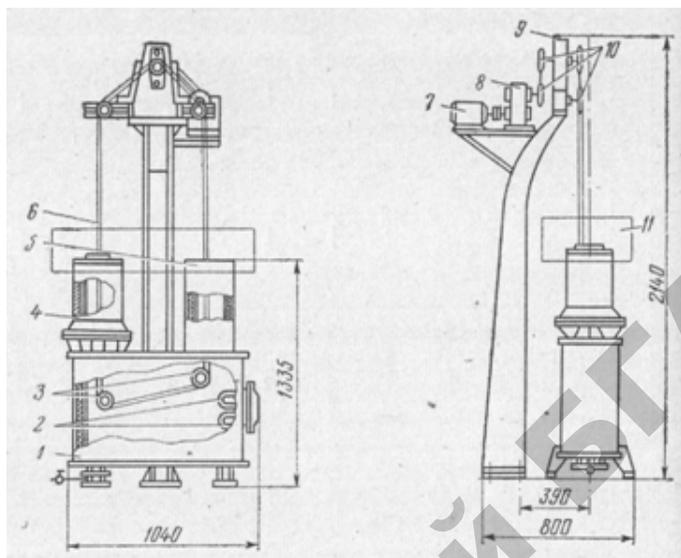


Рис. 4.16. Схема конвейерной установки для ультразвуковой очистки деталей: 1 – ванна; 2 – электронагреватели; 3 – направляющие ролики; 4 – преобразователь ЦМС-8; 5 – выравнивающий цилиндр; 6 – цепь конвейера; 7 – электродвигатель; 8 – редуктор; 9 – натяжное устройство; 10 – ведущие, направляющие и натяжные звездочки; 11 – накопитель

Установка состоит из ванны, накопителя деталей, транспортирующего устройства, машинного генератора и пульта управления. Моющая ванна емкостью 250 л сварена из листовой стали и имеет двойные стенки с теплоизолирующим слоем. Днище ванны имеет уклон, в конце которого установлен патрубок с вентилем для удаления отработанного раствора и донного шлама. Магнитострикционный преобразователь ЦМС-8 заключен в герметичный кожух и охлаждается проточной водой. Для нагрева моющего раствора в ванне установлены три электронагревателя общей мощностью 3 кВт. К соединительным планкам цепи транспортера прикреплены кронштейны из полосовой стали для подвешивания на них деталей. Для питания магнитострикционного преобразователя служит машинный генератор типа ВПЧ 30/2000.

Детали диаметром до 140 мм, подлежащие очистке, навешивают на цепь транспортера и после его включения входят в ванну с раствором. При прохождении деталей через раствор их загрязнения набухают и частично отмываются благодаря активности моющей среды. Далее при прохождении деталей через цилиндр магнитострикционного преобразователя происходит их окончательная очистка.

#### **4.5. Ультразвуковые технологии пайки, сварки, обработки материалов**

Ультразвуковую сварку применяют для соединения различных металлов, которые обычными методами не соединяются. Наиболее легко свариваются пластичные металлы (алюминий, медь и их сплавы, серебро, никель и т. п.) как между собою, так и с твердыми малопластичными материалами. Металлические детали могут свариваться с керамикой, стеклом, полупроводниковыми материалами (кремний, германий).

Успешно свариваются тугоплавкие металлы: вольфрам, ниобий, тантал, цирконий, молибден. Можно сваривать заготовки через прослойку из третьего металла, например, сталь со сталью через алюминий, а также заготовки, покрытые оксидами, лаками, полимерами и т. п. Ультразвуковую сварку используют также для соединения пластмасс.

Ультразвуковая сварка происходит под действием трения, вызванного микроскопическим возвратно-поступательным перемещением частиц на трущихся поверхностях. Соединяемые элементы располагают на малом расстоянии друг к другу, причем один из них надежно закрепляют. После этого сварочный аппарат создает механическое давление на второй, подвижный контакт и формирует поток ультразвуковой энергии. Колебательные движения соединяемых деталей приводят к удалению неоднородностей и оксидных пленок с их поверхностей (рис. 4.17).

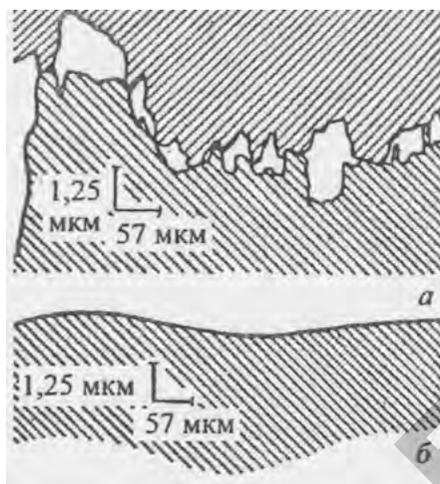


Рис. 4.17. Профиль поверхности:  
*а* – двух собранных медных деталей перед ультразвуковой сваркой;  
*б* – нижней детали после воздействия ультразвука

Поверхности раздела кристаллов сближаются на атомное расстояние, что приводит к сильному притяжению поверхностных атомов и созданию сварного соединения без нагрева металлов до температуры плавления [8].

При этом не требуется применения расходных материалов, таких как припой или соединительные проводники. Исключается также технологический этап покрытия или очистки поверхности.

Размеры ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) подбирают так, чтобы в зоне сварки амплитуда колебаний была максимальной (кривая упругих колебаний, рис. 4.18).

Типовые УЗКС для ультразвуковой сварки металлов приведены на рис. 4.19.

*Ультразвуковая сварка* в зависимости от формы сварочного наконечника может быть точечной, шовной или кольцевой.

Технические характеристики некоторых сварочных машин приведены в прилож. 11, 12.

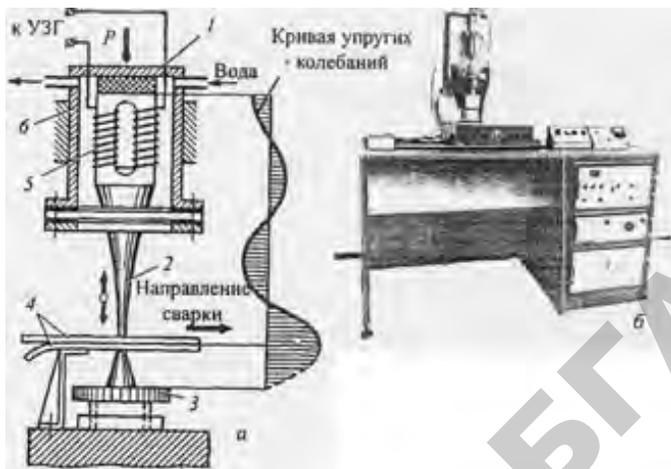


Рис. 4.18. Схема ультразвуковой сварки:  
 1 – акустический узел; 2 – инструмент; 3 – регулировочный винт опоры;  
 4 – свариваемые детали; 5 – преобразователь; 6 – кожа;  
 УЗГ – ультразвуковой генератор

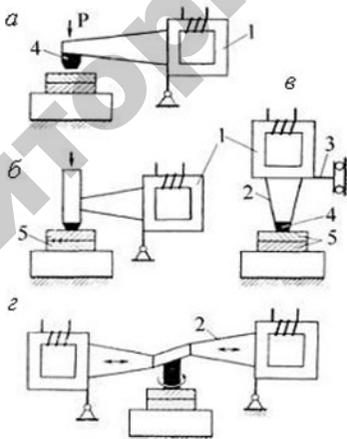


Рис. 4.19. Схемы типовых колебательных систем:  
 а – продольная; б – продольно-поперечная; в – продольно-вертикальная;  
 г – крутильная; 1 – преобразователь; 2 – концентратор; 3 – акустическая развязка;  
 4 – сварочный наконечник; 5 – свариваемые детали

Ультразвуковую пайку применяют чаще всего при соединении алюминия и его сплавов, а так же других высокоокисляемых и труднопаяемых металлов (ковр, никель и пр.). Это двухэтапный процесс, состоящий из предварительного лужения паяемых поверхностей и собственно пайки.

При ультразвуковой пайке (рис. 4.20) колебания инструмента 2 возбуждают кавитационные явления в расплавленном припое 3. В результате в зоне соединения происходит разрушение окисной пленки 1 и отделение загрязнений. Соединяемые поверхности деталей 4 очищаются от них, поэтому пайка интенсифицируется. Так как разрушение окисной пленки происходит локально, инструменты при пайке перемещают по всей длине соединения.

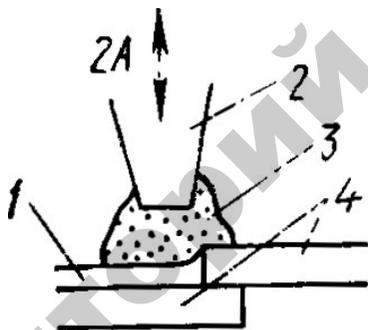


Рис. 4.20. Схема ультразвуковой пайки (сила тока – 2 А):

1 – окисная пленка; 2 – инструмент; 3 – припой; 4 – соединяемые детали

Ультразвуковое лужение выполняют с помощью ультразвуковых паяльников или в специальных ультразвуковых ваннах. При лужении (рис. 4.21) ультразвуковые колебания сообщают ванне 4 с припоем 3, куда погружают обрабатываемую деталь 2. Ванну соединяют с концентратором б. Плавление припоя осуществляют нагревателем 5. В результате тех же, что и при пайке, явлений окисные пленки 1 разрушаются и всплывают на поверхность припоя. При ультразвуковом лужении отпадает необходимость в применении флюсов.

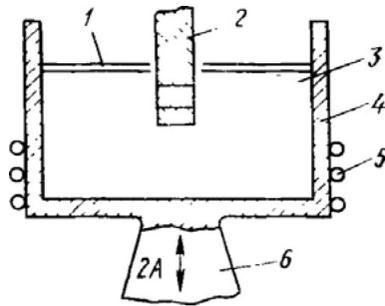


Рис. 4.21. Схема ультразвукового лужения (сила тока – 2 А):  
 1 – окисная пленка; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – припой; 4 – ванна лужения;  
 5 – нагреватели; 6 – концентратор

Пять деталей после лужения ультразвуковым способом следует не позднее чем через 15 дней с момента лужения.

На эффективность ультразвуковой пайки и лужения при определенной амплитуде колебаний и частоте в большей мере оказывает влияние время обработки и величина зазора между рабочим торцом инструмента и обрабатываемой поверхностью. Зазор составляет обычно 0,2–2,5 мм, время обработки – 15–30 с.

*Ультразвуковое резание* используют для чистовой, точной обработки наружных, внутренних, торцевых и плоских поверхностей; сверления, точения, фрезерования; нарезания, накатывания внутренней резьбы.

Ультразвуковые колебания передают на режущую кромку инструмента, что в значительной мере снижает усилие резания (в 5–8 раз), улучшает сход стружки, препятствует налипанию на режущую кромку, повышает стойкость инструмента (приблизительно в 2 раза) и качество изготавливаемых изделий (рис. 4.22).

*Ультразвуковая упрочняюще-финишная обработка (УЗУФО)* применяется для финишной обработки наружных, внутренних, торцевых, плоских, фасонных поверхностей и осуществляют путем прижатия колеблющегося торца излучателя к поверхности обрабатываемого изделия, совершающего вращательное или возвратно-поступательное движение.

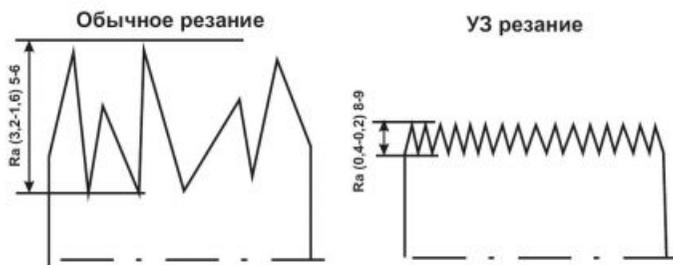


Рис. 4.22. Вид среза изделия при различных методах резки

Применение технологии УЗУФО позволяет исключить во многих случаях операцию шлифования, полностью – ручные доводочные операции абразивными шкурками и пастами, а в некоторых случаях – термообработку. При этом износостойкость деталей, обработанных УЗУФО, в 2–3 раза выше, чем после шлифования; класс чистоты увеличивается до 10–12.

#### 4.6. Применение ультразвука в сельском хозяйстве

В сельском хозяйстве ультразвук применяют для обработки семян, пастеризации и гомогенизации молока, стерилизации почвы и т. п.

*Ультразвуковая обработка зерна и семян* перед посадкой интенсифицирует процесс прорастания, повышает урожайность различных культур в среднем на 20–40 % [9]. 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 %, количество стеблей от одного зерна также увеличивается на 25–30 % [9]. Механизм ультразвукового воздействия на зерна и семена до конца не исследован. Ясно только, что ультразвук способен стимулировать жизненные силы, заложенные природой в каждую сельскохозяйственную культуру. Экспериментальные исследования позволили установить, что ультразвуковое воздействие в большей или меньшей степени, но всегда положительно влияет на процесс прорастания зерен и семян и увеличивает

урожайность. Максимальное повышение урожайности отмечено у дынь – на 46 % [9]. Обработка семян огурцов перед посадкой приводит к тому, что междоузлия на взрослом растении (места образования плодов) формируются в полтора раза чаще, получаемые плоды отличаются от контрольных вкусом. Обработка семян томатов ультразвуком позволила установить, что после посадки кусты выросли сильнее, плодов образовалось больше, созрели они быстрее, чем контрольные. Анализ состава плодов показал, что обработанные ультразвуком томаты имели большее количество витаминов, чем контрольные.

Хорошие результаты были получены при обработке ультразвуком семян капусты, моркови, свеклы, лука. При обработке семян ультразвуком в них можно вносить необходимые микроэлементы, уничтожать возбудителей болезней и вредителей, активизировать ферменты. Так, например, ультразвуковая обработка семян редиса в растворе органических удобрений повышает урожайность не менее чем в 2 раза. При ультразвуковой обработке зерна и семян необходимо учитывать следующее. Обработка семян и зерен может осуществляться в воде или в водном растворе микроэлементов и удобрений. Обычно в качестве такого раствора используется водный раствор марганцовокислого калия. Признаком достаточной обработки может служить изменение цвета водного раствора марганцовокислого калия с розового на светло-желтый. При обработке семян в маленьких стеклянных объемах (менее 200 мл) время обработки должно быть уменьшено до 3 мин. При обработке зерна в больших объемах (например, в трехлитровых банках) допускается обрабатывать до 1 кг зерна, обеспечивая его перемешивание. В этом случае время обработки составляет 20 мин и перемешивание зерна осуществляется через каждые 1–2 мин. С помощью фитомиксера можно приготовить растворы и экстракты удобрений, в том числе экстракты дезинфицирующих веществ.

При пастеризации молока используют бактерицидное действие ультразвука, воздействующего на клетки и вызывая их раздробление.

Гомогенизация молока – раздробление под действием ультразвука жировых шариков. В таком состоянии молоко не отстаивается, лучше усваивается и сохраняется.

### **Контрольные вопросы:**

1. Что такое ультразвук?
2. Каковы природа и свойства ультразвука?
3. Объясните физическую сущность проявления ультразвука при прохождении через различные среды и приведите примеры его практического применения.
4. Перечислите основные элементы ультразвуковой установки, их назначение.
5. Какие типы преобразователей применяют в ультразвуковых установках?
6. В чем состоит магнитострикционный эффект?
7. В чем состоит обратный пьезоэлектрический эффект?
8. Для чего применяют подмагничивание при питании установок с магнитострикционными преобразователями?
9. В установке для очистки мелких деталей от металлических стружек вышла из строя обмотка преобразователя. Выполните расчеты для восстановления обмотки: площадь поверхности дна ванны –  $0,225 \text{ м}^2$ , частота ультразвука –  $22 \text{ кГц}$ , его интенсивность –  $0,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ , площадь излучающей поверхности –  $0,001 \text{ м}^2$ , поперечного сечения стержня –  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , напряжение питания обмотки –  $300 \text{ В}$ , индукция в режиме насыщения –  $1 \text{ Тл}$ , длина пакета по периметру –  $0,25 \text{ м}$ , напряженность магнитного поля при подмагничивании –  $400 \text{ А/м}$ .

## **Практическое занятие № 8**

### **Расчет обмотки магнитострикционного преобразователя и выбор ультразвукового генератора**

*Задача занятия:* восстановить параметры обмотки магнитострикционного преобразователя и выбрать к нему ультразвуковой генератор.

### Задание для самостоятельной подготовки

Используя теоретический материал главы 4 и литературу [3], изучить методику расчета обмотки магнитоstrictionного преобразователя, выбора ультразвукового генератора, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

### Индивидуальные задания

**Задача ПЗ.8.1.** Рассчитать обмотку магнитоstrictionного двухстержневого сердечника преобразователя моечной ванны ([1], рис. 19.2) и выбрать к нему ультразвуковой генератор. Остальные исходные данные приведены в табл. ПЗ.8.1.

Таблица ПЗ.8.1

Исходные данные к задаче ПЗ.8.1

№ варианта	Марка материала сердечника	Размеры пакета магнитоstrictionного преобразователя				
		Ширина стержней $a$ , $10^{-3}$ м	Активная длина стержня $h_0$ , $10^{-3}$ м	Ширина окна $b_0$ , $10^{-3}$ м	Толщина пакета $H$ , $10^{-3}$ м	Ширина накладки $d$ , $10^{-3}$ м
1	НП2	18	67	23	65	25
2	К49Ф2	15	68	35	65	20
3	К50Ф2	10	72	50	70	15
4	Ю12	16	77	43	75	21
5	НП2	18	83	44	80	23
6	К49Ф2	20	87	44	84	25
7	К50Ф2	22	91	44	88	27
8	Ю12	23	92	46	90	29
9	НП2	14	75	45	73	19
10	К49Ф2	21	88	43	86	26
11	К50Ф2	13	74	46	72	18
12	Ю12	10	63	40	60	14

№ варианта	Марка материала сердечника	Размеры пакета магнитострикционного преобразователя				
		Ширина стержней $a$ , $10^{-3}$ м	Активная длина стержня $h_0$ , $10^{-3}$ м	Ширина окна $b_0$ , $10^{-3}$ м	Толщина пакета $H$ , $10^{-3}$ м	Ширина накладки $d$ , $10^{-3}$ м
13	НП2	25	97	44	94	30
14	Ю12	26	94	40	92	31
15	К49Ф2	16	78	44	76	21
16	К50Ф2	12	64	38	62	17
17	НП2	11	67	42	64	16
18	Ю12	28	97	38	94	33
19	К49Ф2	24	85	34	82	28
20	К50Ф2	17	80	44	78	22
21	НП2	30	98	36	96	36
22	Ю12	21	89	45	87	26
23	К49Ф2	13	69	41	67	18
24	К50Ф2	19	77	36	74	24
25	НП2	10	71	48	68	16

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета обмотки магнитострикционного преобразователя?
3. Что такое ультразвук?
4. Для чего применяют подмагничивание магнитострикционного преобразователя?
5. Как определяют электрическую мощность генератора?
6. Как определяют частоту ультразвука?
7. По каким параметрам выбирают ультразвуковой генератор?

## Лабораторное занятие № 7

### Исследование ультразвуковых установок

*Цель работы:* изучить устройство, принцип действия, электрические схемы технологических ультразвуковых установок, приобрести навыки по их обслуживанию и испытанию.

#### *Задачи работы:*

1. Изучить природу, характеристики, технологические свойства, области применения ультразвука.
2. Изучить устройство, принцип действия, электрические схемы генераторов УЗГ-3-04 с ванной лужения УЗВЛ-0,4 и ультразвуковой установки УЗУ-0,25, приобрести навыки работы с ними.
3. Настроить генератор УЗГ-3-04 на оптимальный режим работы и определить основные энергетические параметры установки.
4. Исследовать интенсивность ультразвуковых колебаний в ванне установки УЗУ-0,25, провести опыты по некоторым технологическим проявлениям ультразвука.

*Общие сведения.* Используя теоретический материал главы 4 и литературу [3, 9], изучить устройство, принцип действия, электрические схемы технологических ультразвуковых установок. Методу исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

#### *Задание для самостоятельной подготовки*

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

#### **Методика выполнения работы**

Изучение электрических схем и конструкций установок, правил настройки и обслуживания, а также основных применений ультразвука производятся предварительно при подготовке к лабораторной работе по рекомендованной литературе и в соответствии с настоящими указаниями.

В данной работе ультразвуковой генератор УЗГ-3-04 укомплектован ванной лужения УЗВЛ-0,4 с магнитострикционным преобразователем, поэтому переключатель SA4 устанавливают в положение ВЛ. Припой помещают в ванночку, соединенную с магнитострикционным преобразователем. Припой плавят с помощью специального (встроенного в УЗВЛ-0,4) электрического нагревателя. В расплавленном припое возбуждаются ультразвуковые колебания, которые снимают окисные пленки со спаиваемых, например, алюминиевых деталей, и надежно их залуживают.

По условиям охраны труда работу с припоем в учебной лаборатории производить нельзя. Вместо припоя в ванночку помещают другой материал (по указанию преподавателя). Для проведения испытаний установка оборудована необходимыми приборами (рис. ЛЗ.7.1). Последовательность операций по вводу установки в работу такова. Посредством штепсельной вилки XS1 и шнура на генератор подают питание от сети 220 В, 50 Гц. Одновременно с включением вилки в сеть начинает работать электродвигатель М1 вентилятора.

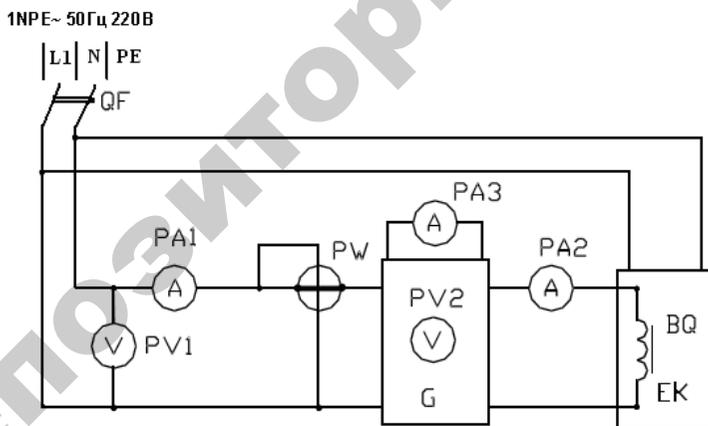


Рис. ЛЗ.7.1. Схема экспериментальной установки:

*G* – ультразвуковой генератор УЗГ-3-04; *EK* – ванна лужения УЗВЛ; *BQ* – обмотка магнитострикционного преобразователя

Выключателем SA1 подают напряжение накала и генераторной лампы VL1, о чем сигнализирует лампочка HL1 «Накал». Через 3–5 мин после включения накала кнопкой SB2 «Пуск» включают высокое напряжение. В исправном генераторе одновременно с включением высокого напряжения должны возникнуть колебания.

При работе с ванной лужения включение генератора в работу осуществляют выключателем «Колебания» на передней панели ванны. При этом переключатель SA3 (см. рис. ЛЗ.7.1) генератора переводят в положение «Д» (дистанционно).

Ручкой RP1 «Регулировка частоты» по минимуму выходного напряжения устанавливают частоту, соответствующую резонансной частоте преобразователя.

Ручкой SA2 «Регулировка напряжения» устанавливают выходное напряжение, контролируемое вольтметром PV2.

После окончания работы выключателем «Колебания» (или кнопкой SB1) выключают напряжение.

Спустя 5 минут после выключения накала генератор отключают от сети, а затем для разрядки конденсаторов C1 и C2 вилку питания замыкают накоротко.

Экспериментальные исследования проводят после выполнения пп. 1 и 2 пункта «Задачи работы».

#### ***А. Установка с генератором УЗГ-3-04 и ванной лужения УЗВЛ-0,4:***

1. Заполнить ванночку для припоя водой (50 г) или другим материалом по указанию преподавателя.

2. Выполнить все операции по вводу установки в работу в последовательности, приведенной выше. Ток подмагничивания (амперметр PA3) не должен превышать 8 А.

3. Включив установку, ручкой RP1 «Регулировка частоты» настраивают генератор на оптимальный режим, устанавливаемый по минимуму выходного напряжения. Параметры, соответствующие оптимальному режиму: силу входного тока  $I_1(PA1)$ , потребляемую мощность  $P_1(PW)$ , ток подмагничивания  $I_3(PA3)$ , входное напряжения  $U_2(PV2)$  и ток  $I_2(PA2)$  – заносят в табл. ЛЗ.7.1 для значений входного напряжения  $U_2$ , указанных ниже.

Энергетические характеристики установок с генератором УЗГ-3-04

Измерено									Вычислено				
$U_1$ , В	$P_1$ , Вт	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А	$U_2$ , В	$m$ , кг	$t_1$ , °С	$t_2$ , °С	$P_{ак}$ , Вт	$\cos\varphi$	$\eta_{ак}$	$\eta_c$	$\eta_y$

4. Для оптимального режима работы установить входное напряжение в 100, 140, 180, 220 В и при каждом из них обрабатывать («озвучивать») материал в течение 3–10 мин. Температуру обрабатываемого материала измерять термопарой или термометром (в последнем случае обязательно необходимо отключить ультразвуковые колебания).

5. По результатам измерений определить:

– приближенное значение акустической мощности  $P_{ак}$  преобразователя, полагая, что ультразвуковая энергия, поглощаемая в материале, преобразуется в тепловую:

$$P_{ак} = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau\eta_{п}},$$

где  $m$  – масса, кг;

$C$  – удельная теплоемкость материала, Дж/кг·°С;

$t_1, t_2$  – начальная и конечная температура материала, °С;

$\tau$  – время «озвучивания» материала, с;

$\eta_{п}$  – КПД преобразователя, который можно принять равным 0,54;

– коэффициент мощности установки:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1};$$

– мощность, потребляемую преобразователем, полагая, что в оптимальном режиме (при резонансе) сопротивление рабочего колебательного контура и, следовательно, его элемента ВQ (см. рис. ЛЗ.7.1) является активным. В этом случае:

$$P_2 = U_2 I_2;$$

– акустический КПД  $\eta_{\text{ак}}$ , КПД генератора  $\eta_{\text{г}}$  и КПД установки  $\eta_{\text{у}}$ :

$$\eta_{\text{ак}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_{\text{г}}}; \quad \eta_{\text{г}} = \frac{P_2}{P_1}; \quad \eta_{\text{у}} = \frac{P_{\text{ак}}}{P_1};$$

– построить графические зависимости вычисленных величин (табл. ЛЗ.7.1) в функции выходного напряжения  $U_2$ .

**Б. Установка УЗУ-0,25 используется для измерения интенсивности ультразвука и проведения демонстрационных опытов.**

Перед включением установки ванну заполняют измеренным количеством воды до уровня 120–130 мм. Включение генератора производят штепсельной вилкой и тумблером SA.

1. В течение  $\tau = 10\text{--}15$  мин «озвучить» воду, записав в табл. ЛЗ.7.2 ее массу  $m$ , объем  $V$ , начальную  $t_1$  и конечную  $t_2$  температуру. Плотность энергии (Дж/м<sup>3</sup>), поглощенной водой:

$$W = \frac{mC(t_2 - t_1)}{V},$$

где  $C = 4190$  Дж/(кг·°C) – удельная теплоемкость воды.

Интенсивность ультразвука

$$I = cW,$$

где  $c = 1495$  м/с – скорость ультразвука в воде.

Измерения и вычисления проделать с трехкратной повторностью (табл. ЛЗ.7.2), не меняя воду в ванночке.

Таблица ЛЗ.7.2

Плотность ультразвуковой энергии и интенсивность ультразвука в ванне установки УЗУ-0,25

Измерено					Вычислено	
$m$ , кг	$V$ , м <sup>3</sup>	$\tau$ , с	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$W$ , Дж/м <sup>3</sup>	$I$ , Вт/м <sup>2</sup>

2. С помощью трубки (капилляра) исследовать поле радиационного давления в ванне. Радиационное давление  $S$  складывается из звукового давления и эффекта взаимодействия ультразвука с невозмущенной средой (дно и стенки емкости, излучатели и пр.), оно пропорционально интенсивности ультразвука  $I$ :

$$I = \frac{1}{2} Sc = \frac{1}{2} \rho g h c ,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$h$  – высота уровня жидкости в капилляре над уровнем в ванне, м.

Эти зависимости используют как один из методов измерения интенсивности ультразвуковых колебаний в жидких средах.

3. Поместить в ванну пробирку, заполненную водой и трансформаторным маслом, и наблюдать явление смешивания жидкостей. Пробирку, заполненную маслом, несколько раз энергично встряхнуть, поместить в ванну и наблюдать эффект дегазации жидкости.

#### ***Содержание отчета:***

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальные электрические схемы установок УЗГ-3-04, УЗУ-0,25.
3. Результаты измерений и расчетов.
4. Графические зависимости  $P_{ак}$ ,  $\cos\phi$ ,  $\eta_{ак}$ ,  $\eta_{г}$ ,  $\eta_{у}$  в функции  $U_2$ .
5. Выводы по работе.

#### ***Контрольные вопросы:***

1. Каковы технологические свойства ультразвука и области его применения в сельскохозяйственном производстве?
2. Как определяют параметры ультразвукового поля?
3. Объясните физические принципы, на которых основаны ультразвуковые преобразователи.
4. Объясните работу принципиальной электрической схемы ультразвукового генератора УЗГ-3-04.
5. Объясните работу принципиальной электрической схемы ультразвуковой установки УЗУ-0,25.

## 5. МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

### 5.1. Технологические свойства и проявления магнитного поля

Основными характеристиками магнитного поля являются магнитная индукция, магнитный поток, магнитная проницаемость и напряженность магнитного поля.

Вместе магнитное и электрическое поля образуют электромагнитное поле, оказывающее определенное физико-химическое и биологическое воздействие на объекты.

Физико-химическое воздействие проявляется как деформация материалов, их перемещение в пространстве, изменение химических и физических свойств среды.

Биологическое воздействие магнитного поля обусловлено следующим. Объекты живой и неживой природы проходят эволюцию в естественном магнитном поле Земли. Изменение его величины оказывает влияние на живые организмы и растения. Напряженность магнитного поля в любой точке Земли можно разложить на две составляющие – горизонтальную и вертикальную. Горизонтальная составляющая на широте расположения нашей Республики составляет примерно 30 А/м, а вертикальная – изменяется от 0 (у экватора) до 53 А/м у магнитного полюса.

Искусственное магнитное поле имеет напряженность до  $10^7$ – $10^9$  А/м.

Исследованиями доказано [10] влияние естественных и искусственных магнитных полей на развитие живых объектов. Например, растения, корни которых расположены в направлении север–юг, растут и развиваются лучше.

Магнитные свойства вещества весьма сложны, и для их глубокого понимания необходим тщательный анализ строения атомов, их взаимодействий в молекулах, их столкновений в газах и их взаимного влияния в твердых телах и жидкостях. Природа этих явлений пока неясна. Однако магнитное поле широко используется для очистки семян и кормов, обработки воды, удаления металлических примесей, магнитоимпульсного формообразования.

## 5.2. Электромагнитные семяочистительные машины

Установки электромагнитной очистки семян просты по устройству и успешно используются для отделения семян сорняков с шероховатой поверхностью (повилика, плевел, подорожник, смолевка, василек, горчак розовый и пр.) 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 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 пр. Для лабораторных исследований изготавливают установки К295 с электромагнитами и СМЦ-0,4 с постоянными магнитами.

Технологическая схема установки ЭМС-1А (К590А) представлена на рис. 5.1.

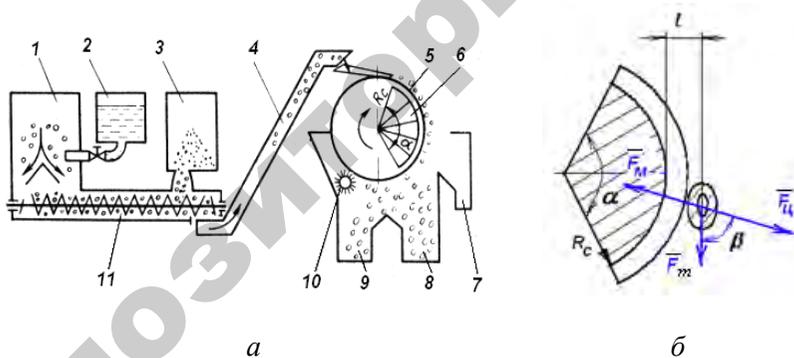


Рис. 5.1. Установка магнитной очистки семян:

*a* – технологическая схема; *б* – схема сил, действующих на семя с порошком в магнитном поле; 1, 2, 3 – бункеры 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 (рис. 5.1, б):

$$F_m \geq F_{ц} + F_t \cos \beta, \quad (5.1)$$

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

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

$m$  – масса семени с порошком, кг;

$v$  – линейная скорость частицы, м/с;

$R$  – радиус барабана, м;

$F_t = mg$  – сила тяжести, Н;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\beta$  – угол между направлениями центробежной силы и силы тяжести, град.

Сила магнитного поля

$$F_m = \mu_0 \chi m_{п} V H \text{grad} H, \quad (5.2)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;

$\chi$  – магнитная восприимчивость вещества порошка,  $\text{кг}^{-1}$ ;

$m_{\text{п}}$  – масса порошка на семени, кг;

$V$  – объем частицы с порошком,  $\text{м}^3$ ;

$H$  – 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 (5.1) и (5.2) напряженность магнитного поля

$$H = \sqrt{\frac{g \cos \beta + v^2}{\chi K \mu_0 l V}}, \quad (5.3)$$

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

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

$$\Phi = BS = \frac{\mu_0 H_0 \pi L R_c \alpha}{180}, \quad (5.4)$$

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

$\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;

$H_0$  – напряженность магнитного поля, А/м;

$S = \frac{\pi L R_c \alpha}{180}$  – площадь поверхности сечения магнитного сектора,  $\text{м}^2$ ;

$L$  – активная длина сектора, м;

$R_c$  – радиус магнитного сектора, м;

$\alpha$  – угол между его образующими, град.

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

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

$$F_{\kappa} = H_c R_c + \frac{k_p Bl}{\mu_0}, \quad (5.5)$$

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

$k_p$  – коэффициент рассеяния МДС,  $k_p = 1,05 - 2,50$ .

Число витков катушки и длина обмоточного провода, м:

$$W = \frac{F_{\kappa}}{I} = \frac{4F_{\kappa}}{\pi d^2 j_{\text{доп}}}; \quad l_{\text{пр}} = W \pi d_{\text{ср}}, \quad (5.6)$$

где  $I$  – сила тока, А;

$d$  – диаметр жилы обмоточного провода, м;

$j_{\text{доп}}$  – допустимая плотность тока, А/м<sup>2</sup>;

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

$h$  – высота катушки, м.

Активное сопротивление катушки в рабочем состоянии, Ом:

$$R = \rho_{20} \frac{4l_{\text{пр}}}{\pi d^2} [1 + \alpha_T (t - 20)], \quad (5.7)$$

где  $\rho_{20}$  – удельное электрическое сопротивление провода, Ом·м;

$\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления, °С<sup>-1</sup>.

Необходимое напряжение на зажимах катушки, В:

$$U_{\text{к}} = RI = R \frac{\pi d^2}{4} j_{\text{доп}}. \quad (5.8)$$

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 магнитное поле с высокой магнитной индукцией в межполюсном пространстве.

Наиболее просты в устройстве и экономичны *сепараторы с постоянными магнитами*, так как они не требуют дополнительной энергии для питания обмоток. Их используют, например, на хлебозаводах для очистки муки от ферропримесей. Суммарная подъемная сила магнитов в этих сепараторах, как правило, должна быть не менее 120 Н. В магнитном поле мука должна передвигаться тонким слоем, толщиной порядка 6–8 мм, со скоростью не более 0,5 м/с. Сепараторы с постоянными магнитами имеют и существенные недостатки: подъемная сила их невелика и ослабевает со временем из-за «старения» магнитов.

*Сепараторы с электромагнитами* обладают большей подъемной силой, которую можно регулировать током обмоток. На рис. 5.2 представлена схема электромагнитного сепаратора для сыпучих примесей.

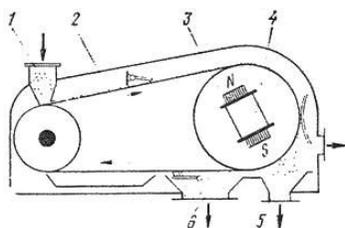


Рис. 5.2. Схема электромагнитного сепаратора для сыпучих примесей:  
 1 – приемный бункер; 2 – транспортер; 3 – барабан; 4 – электромагнит;  
 5 – разгрузочное отверстие; 6 – разгрузочное отверстие для ферропримесей

Сепарируемый материал подается в приемный бункер 1 и по транспортеру 2 движется к приводному барабану 3, изготовленному из немагнитного материала (латунь и т. п.). Барабан 3 вращается вокруг неподвижного электромагнита постоянного тока 4. Центробежная сила отбрасывает материал в разгрузочное отверстие 5, а ферропримеси под действием магнитного поля электромагнита 4 «прилипают» к ленте транспортера и отрываются от нее лишь после выхода из поля действия магнитов, попадая в разгрузочное отверстие для ферропримесей 6. Чем тоньше слой продукта на ленте транспортера, тем лучше осуществляется сепарация.

### 5.3. Установки магнитной обработки воды

При работе водонагревателей, парогенераторов, запарников котлов, двигателей внутреннего сгорания с водяным охлаждением на поверхности нагрева образуется накипь, что ухудшает теплоотдачу, снижает мощность энергетической установки и вызывает преждевременный выход ее из строя.

Для борьбы с накипеобразованием существует специальное оборудование «умягчения» воды, принцип действия которого основан на комплексном воздействии магнитного поля, генерируемого постоянными магнитами или электромагнитами, на растворенные в воде соли, что приводит к образованию многочисленных центров кристаллизации, состоящих из кристаллов практически одинакового размера.

В процессе магнитной обработки воды происходит смещение равновесия между структурными компонентами воды и гидратированными ионами, увеличение центров кристаллизации растворенных в воде солей в заданном объеме воды на микровключениях из дисперсных феррочастиц и изменение скорости коагуляции и седиментации дисперсных частиц в потоке жидкости. Появляющиеся центры кристаллизации неустойчивы и постоянно распадаются. Поэтому время между обработкой воды и ее нагревом не должно превышать 6–8 ч.

Эффективность магнитной обработки зависит от состава обрабатываемой воды, напряженности магнитного поля, скорости движения воды, продолжительности ее пребывания в магнитном поле и других факторов.

Наилучшие результаты магнитной обработки достигают при индукции магнитного поля 0,2–1,0 Тл, скорости течения воды 1–3 м/с.

Магнитная обработка воды помогает не только предотвращать выпадение накипеобразующих солей из воды, а также используется в других отраслях промышленности и сельского хозяйства. Так, при обработке цемента омагниченной водой увеличивается прочность изделий и их стойкость к агрессивным воздействиям окружающей среды [10]. В сельском хозяйстве пятичасовое замачивание семян в омагниченной воде заметно повышает урожай; полив омагниченной водой стимулирует на 15–20 % рост и урожайность сои, подсолнечника, кукурузы, помидоров [11]. Предполагается, что биологическая активность омагниченной воды связана с повышением проницаемости биологических мембран тканевых клеток за счет большей структурированности такой воды, т. к. под воздействием магнитного поля молекулы воды, представляющие собой диполи, ориентируются упорядоченно относительно полюсов магнита [12].

Выпускаемые промышленностью устройства магнитной обработки воды подразделяются на работающие на электромагнитях (соленоид с ферромагнетиком, генерирующий переменное магнитное поле) аппараты магнитной обработки воды (АМО) и использующие постоянные магниты гидромагнитные системы (ГМС), магнитные преобразователи (гидромультиполи) (МПВ, MWS, ММТ) и активаторы воды серий АМП, МПАВ, МВС, КЕМА быто-

вого и промышленного назначения. Тип устройств с постоянными магнитами конструктивно проще, дешевле в эксплуатации (избавляет от затрат на электропитание), может применяться во взрывоопасных местах. Электромагниты используют главным образом для больших протоков, их основное преимущество – возможность работы при высоких температурах.

На рис. 5.3 приведена схема устройства для омагничивания воды с двумя постоянными магнитами 3 цилиндрической формы. Вода протекает в зазоре 2 магнитопровода, образованного полым ферромагнитным сердечником 4, помещенным в корпус 1. Индукция магнитного поля составляет 0,5 Тл. Ширина зазора – 2 мм.

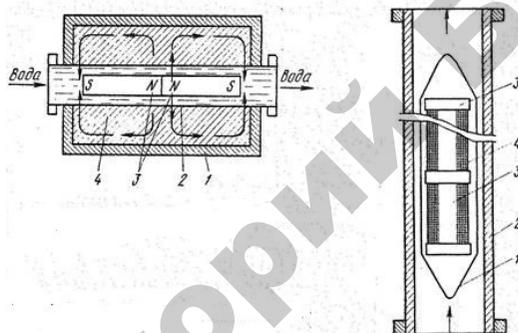


Рис. 5.3. Схема устройства для омагничивания воды:

1 – корпус; 2 – зазор магнитопровода; 3 – магниты; 4 – ферромагнитный сердечник

Большое распространение получили аппараты, оснащенные электромагнитами (рис. 5.4). Аппарат состоит из нескольких электромагнитов 3, вставленных в диамагнитный чехол 1, расположенный в железной трубе 2. В зазоре между трубой и корпусом, защищенным диамагнитным чехлом, протекает вода. Напряженность магнитного поля в этом зазоре 45 000–160 000 А/м.

Электромагниты состоят из трехобмоточной катушки и магнитопровода. Магнитное поле дважды пересекает поток воды в направлении, перпендикулярном ее движению. Электромагниты могут быть расположены как внутри, так и снаружи аппарата.

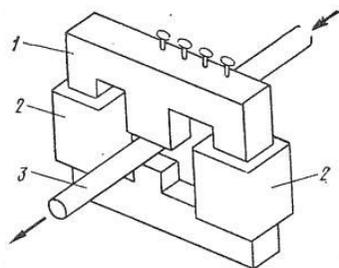


Рис. 5.4. Устройство для магнитной обработки водных систем:  
1 – диамагнитный чехол; 2 – железная труба; 3 – электромагнит

Требования, регламентирующие условия работы всех аппаратов магнитной обработки воды, следующие:

- подогрев воды – не выше 95 °С;
- содержание ионов железа  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  – не более 0,3 мг/л;
- суммарное содержание хлоридов и сульфатов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  ( $CaSO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $MgCl_2$ ) – не более 50 мг/л;
- карбонатная жесткость ( $Ca(HCO_3)_2$ ,  $Mg(HCO_3)_2$ ) – не выше 9 мг-экв/л;
- содержание в воде растворенного кислорода – не более 3 мг/л;
- скорость движения потока воды в аппарате – 1–3 м/с.

Технические характеристики аппаратов для магнитной обработки воды приведены в прилож. 14–16.

#### 5.4. Магнитно-импульсная обработка металлов

Магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ) основана на непосредственном преобразовании предварительно накопленной электрической энергии в механическую без промежуточных преобразователей.

Сущность МИОМ состоит в том, что запасенная в конденсаторах электрическая энергия передается на рабочий инструмент-индуктор, представляющий собой катушку-соленоид. В момент разряда по индуктору протекает импульсный ток в десятки и даже сотни килоампер в течение миллионных долей секунды. Вокруг индуктора возникает пере-

менное магнитное поле высокой напряженности, которое, по закону электромагнитной индукции, наводит в металлической заготовке вихревые токи, имеющие противоположное току в индукторе направление. Взаимодействие между противоположно направленными токами приводит к электродинамическому воздействию – возникновению механических сил отталкивания. Прочный индуктор остается неизменным, а заготовка, отталкиваясь от него, деформируется либо в соответствии с профилем поля, либо по оснастке – матрице, оправке, расположенной с противоположной стороны. В зависимости от формы индуктора (цилиндрический соленоид или плоская спираль Архимеда) различают схемы магнитно-импульсной обработки цилиндрических или плоских заготовок. При обработке трубчатых образцов возможны схемы деформирования «на обжим» и «на раздачу». Форма индуктора может быть и более сложной как по сечению, так и по образующей, что позволяет обработать заготовки овальной, конусной, прямоугольной и других конфигураций.

Достоинством МИОМ является относительная несложность оборудования и оснастки (по сравнению с механическими прессами и станками аналогичной производительности) и большая технологическая гибкость (отсутствие передаточной среды, возможность совместить формообразование с нагревом, возможность соединения различных материалов и т. п.).

Основными элементами установок для магнитно-импульсной обработки металлов являются трансформатор, высоковольтный выпрямитель, конденсаторная батарея и технологический блок, включающий рабочий индуктор и матрицу либо оправку (рис. 5.5).

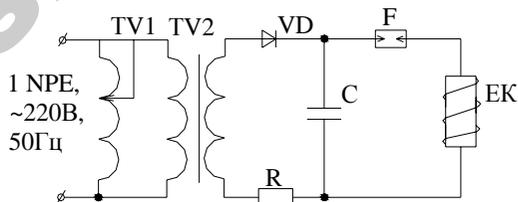


Рис. 5.5. Принципиальная схема магнитно-импульсной установки:  
 TV1 – автотрансформатор; TV2 – трансформатор; VD – выпрямитель;  
 C – конденсатор; F – разрядник; EK – индуктор; R – зарядное сопротивление

Генераторами импульсных токов в магнитно-импульсных установках являются малоиндуктивные емкостные накопители энергии. Зарядное напряжение накопителей обычно составляет 5–20 кВ.

Накопители комплектуются из импульсных конденсаторов. В установках с большой накапливаемой энергией конденсаторы объединяются в блоки, имеющие собственные коммутаторы разрядного тока. Блочный принцип построения накопителя позволяет достичь малых значений индуктивности и активного сопротивления разрядной цепи, избежать опасности взрыва конденсаторов в случае их повреждения в процессе зарядки. Внутренняя индуктивность разрядной цепи установки –  $10^{-8}$  Гн. В установках используют импульсные конденсаторы с бумажно-масляной изоляцией.

В качестве коммутаторов разрядного тока используют воздушные или вакуумные разрядники и игнитроны. В простейших установках применяют механические коммутаторы – двухэлектродные разрядники, срабатывающие при сближении электродов. Если требуется точно синхронизировать разряд с работой остального оборудования, например, измерительного оборудования, или обеспечить одновременную работу отдельных разрядников, используют управляемые разрядники – триаконы или игнитроны.

Накопитель заряжается от источника высокого постоянного напряжения, включающего в себя повышающий трансформатор, выпрямитель, защитные резисторы и устройства для регулирования зарядного напряжения и его измерения.

Индуктор или концентратор рассчитывают и изготавливают для каждого типа заготовки или технологической операции и заменяют при переходе на обработку другой детали. Индуктор при разрядах подвергается воздействию таких же электродинамических сил, что и заготовка. Кроме того, его изоляция испытывает электрические нагрузки. Поэтому обеспечение термической, механической и электрической стойкости индуктора является сложной технической задачей.

На рис. 5.6 показаны основные схемы магнитно-импульсного формоизменения.

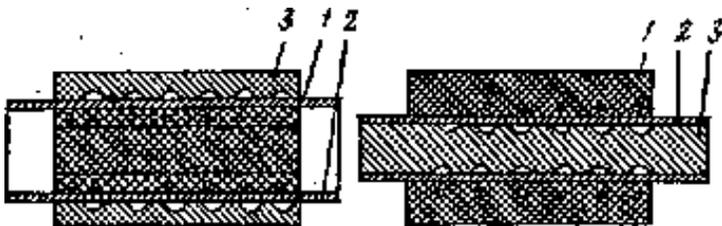


Рис. 5.6. Основные схемы магнитно-импульсного формоизменения:  
 1 – индуктор; 2 – заготовка; 3 – матрица (оправка)

Магнитно-импульсные установки характеризуются высокой производительностью, возможностью легкой автоматизации и механизации технологического процесса, широкими технологическими возможностями, отсутствием передаточной среды, простой и дешевой оснасткой, возможностью получения высоких давлений (до 108 Н/м без разрушения индуктора и до 109 Н/м – при использовании одноразового индуктора), простотой обслуживания. Магнитно-импульсная обработка позволяет выполнять технологические операции, неосуществимые другими методами, например, обработку давлением деталей, заключенных в герметические оболочки из пластмассы или стекла, напрессовку металлических деталей на хрупкие материалы из стекла или пластмассы.

Магнитно-импульсную обработку применяют для штамповки листовых и трубчатых заготовок толщиной до 5 мм, обработки заготовок из меди, алюминия, магния и их сплавов, получения биметаллических соединений, изготовления шарнирных соединений, сварки трубчатых заготовок, запрессовки труб в дисках, трубных досках, рифтовки, отбортовки, пуклевки, изготовления резьбы, рифления, калибровки, пробивки отверстий, вырубки, порезки и пр. К недостаткам метода и установок можно отнести трудность получения деталей с глубокой вытяжкой обрабатываемого материала; необходимость в промежуточных металлических прокладках-«спутниках» для металлов с низкой электропроводностью, ограниченность формы и геометрических размеров обрабатываемых заготовок для магнитно-импульсной обработки; низкую стойкость индукторов, особенно при обработке стальных заготовок.

Для магнитно-импульсной обработки металлов выпускают установки МИУ, техническая характеристика которых приведена в прилож. 13.

### ***Контрольные вопросы:***

1. В каких технологических процессах применяют установки магнитной обработки материалов?
2. Приведите технологическую схему и основы расчета рабочего органа установки для обработки семян льна.
3. Приведите технологическую схему установки для очистки стебельчатых кормов от металлических примесей.
4. Какие силы действуют при магнитной сепарации на семя, обработанное магнитным порошком и находящееся на вращающемся барабане?
5. Объясните принцип действия магнитных сепараторов.
6. Какова технология магнитной обработки воды?

### **Практическое занятие № 9**

#### **Расчет обмотки электромагнитного сектора семяочистительной машины**

*Задача занятия:* восстановить параметры обмотки электромагнитного сектора семяочистительной машины.

#### ***Задание для самостоятельной подготовки***

Используя теоретический материал главы 5 и литературу [3], изучить методику расчета обмотки электромагнитного сектора семяочистительной машины, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

#### ***Индивидуальные задания***

**Задача ПЗ.9.1.** Рассчитать обмотку электромагнитного сектора семяочистительной машины, расчетная схема которого приведена на рис. 20.2, а [3]. Частота вращения барабана –  $42 \text{ мин}^{-1}$ .

Таблица ПЗ.9.1

Исходные данные к задаче ПЗ.9.1

№ варианта	Состав смеси	Марка порошка с наполнителем	Размеры магнито-провода $10^{-3}$ , м		Диаметр вала $D$ , $10^{-3}$	Угол рабочей зоны сектора $\alpha$	Расстояние от поверхности барабана до поверхности сектора $\delta$ , $10^{-3}$ м	Радиус барабана $R$ , $10^{-3}$ м	Напряжение питания электромагнита $U$ , В
			ширина $b$	высота $h$					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Вика, свиной	ВХК-80, фосфоргипс	200	90	100	140	5	205	60
2	Вика, амброзия	ВХК-60, фосфоргипс	210	100	110	145	10	210	48
3	Клевер, повиллика	ВХК-40, фосфоргипс	220	110	120	150	15	215	42
4	Овес, овсюг	ВХК-80, мел	230	120	130	160	5	220	36
5	Клевер, амброзия	ВХК-60, мел	240	130	140	165	10	230	36
6	Пшеница, дикая редька	ВХК-40, мел	250	140	150	170	15	235	48
7	Пшеница, овсюг	ДХЗ-80, гипс полуводный	260	140	150	170	15	235	48

Продолжение табл. ПЗ.9.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	Клевер, свиной	ДХЗ-80, гипс безводный	270	130	140	145	10	205	60
9	Люцерна, повилика	ДХЗ-30, гипс безводный	280	120	130	150	5	210	60
10	Люцерна, плевел	ДХЗ-40, мел	290	110	120	160	15	215	36
11	Лен, репей	ГОМПЕРА	300	100	110	165	10	220	36
12	Лен, амброзия	ВХК-80, фосфоргипс	200	150	160	170	5	240	42
13	Лен, свиной	ВХК-60, фосфоргипс	210	160	170	140	5	255	42
14	Клевер, овсюг	ВХК-40, фосфоргипс	220	170	180	145	10	280	48
15	Пшеница, свиной	ВХК-80, мел	230	180	190	150	15	300	48
16	Пшеница, плевел	ВХК-60, мел	240	190	200	155	5	305	60

Окончание табл. ПЗ.9.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	Овес, дикая редька	ВХК-40, мел	250	90	100	160	10	200	36
18	Овес, плевел	ДХЗ-80, гипс полу- водный	260	100	110	165	15	205	42
19	Овес, репей	ДХЗ-80, гипс безводный	270	110	120	170	15	210	48
20	Люцер- на, овсюг	ДХЗ-40, гипс	280	120	130	140	10	215	60
21	Люцер- на, сви- норой	ДХЗ-40, мел	290	130	140	145	5	220	36
22	Вика, плевел	ГОМПЕРА	300	140	150	150	5	225	48
23	Вика, дикая редька	ВХК-80, фосфоргипс	200	160	170	155	10	270	60
24	Клевер, плевел	ВХК-60, фосфоргипс	210	130	140	160	5	210	48
25	Клевер, свино- рой	ВХК-40, фосфоргипс	220	120	130	165	10	215	42

**Вопросы для подготовки к защите выполненного задания:**

1. В чем состоит задача расчета?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета обмотки электромагнитного сектора семяочистительной машины?
3. Как определяют необходимую напряженность магнитного поля в рабочей зоне?
4. Как определяют суммарную МДС электромагнитного сектора?
5. Как определяют диаметр жилы обмоточного провода?
6. Как определяют число витков в катушке?
7. Для чего определяют температуру катушки и плотность тока обмоточного провода?
8. Сепарация смеси каких семян возможна при магнитной очистке?
9. Запишите условие удержания семени с магнитным порошком на вращающейся поверхности барабана электромагнитной семяочистительной машины.

**Лабораторное занятие № 8**

**Исследование установок  
электромагнитной обработки материалов**

*Цель работы:* изучить устройство, принцип действия, электрические схемы представленных в лаборатории установок магнитной обработки материалов, приобрести навыки по их обслуживанию.

**Задачи работы:**

1. Изучить параметры, характеризующие магнитное поле и определяющие его энергию, технологические свойства, механические действия (силы).
2. Ознакомиться с технологией магнитной очистки зерна, зернопродуктов, кормов, магнитной обработки воды, с устройством и принципом действия производственных установок.

3. Изучить технологию магнитной очистки семян, устройство, принцип действия, электрическую схему семяочистительной машины К-295, приобрести навыки ее обслуживания.

4. Провести экспериментальное исследование машины К-295 и установить зависимость эффективности ее работы от МДС магнитного отделителя.

**Общие сведения.** Используя теоретический материал главы 5 и литературу [3, 9], изучить устройство, принцип действия, электрические схемы установок магнитной обработки материалов. Методику исследования изучить по изложенному ниже материалу и литературе [4].

#### ***Задание для самостоятельной подготовки***

В соответствии с требованиями пункта «Содержание отчета» подготовить форму для отчета по лабораторной работе.

#### **Методика выполнения работы**

1. Пункты 1 и 2 выполняют при подготовке к занятиям, используя рекомендованную литературу.

2. Пункт 3 выполняют при подготовке к занятиям и на рабочем месте путем практического изучения устройства, его работы, электрических схем, правил обслуживания представленных в лаборатории установок. Зарисовывают технологическую схему процесса очистки семян и схему действующих на частицу сил, электрическую схему машины К-295, разрез аппарата магнитной обработки воды.

3. Экспериментальные исследования выполняют после усвоения порядка обслуживания машины, правил техники безопасности и получения разрешения преподавателя на включение.

Обработку смеси зерна с металломагнитными частицами проводят при различной МДС магнитного отделителя путем изменения силы тока  $I$ , подаваемого в катушку электромагнитного барабана

( $W_M = IN$ , где  $N$  – число витков катушки). При этом изменяется магнитная индукция  $B$  системы и, в соответствии с формулой

$$F_M = \frac{m_{\Pi}}{\rho} \frac{B}{\mu_0 \mu} \text{ grad} B, \text{ – величина магнитной силы } F_M, \text{ удерживающей}$$

щей металломагнитную частицу на поверхности барабана. В зависимости от величины силы  $F_M$  частицы попадают в ту или иную секцию классификатора фракции зерновой смеси 7. Силу тока в обмотке электромагнита регулируют автотрансформатором  $TV2$ .

Последовательность выполнения операций с машиной К-295:

1. Взвесить 100 г незасоренного зерна и 50 г металлических частиц, смешать их и высыпать в приемный бункер.

2. Отрегулировать зазор вибратора-питателя 2, обеспечивающий свободную подачу зерновой смеси в один слой.

3. С разрешения преподавателя включить машину, опробовать ее в работе, освоить операции обслуживания, подготовиться к проведению основных опытов.

4. Очистить машину от зерна и частиц, перемешать содержимое всех секций классификатора, взвесить смесь и данные внести в табл. ЛЗ.8.1.

Таблица ЛЗ.8.1

Влияние напряжения на сортировку семян

Режим обработки		Общая масса смеси, г	Распределение материала по классам				
U, В	I, А		I		II		
			г	%	г	%	

5. Установить автотрансформатором  $TV2$  силу тока, указанную преподавателем.

6. Засыпать смесь в бункер, включить машину и произвести очистку зерна от металлических частиц.

7. После обработки взвесить содержимое каждой секции классификатора и записать в табл. ЛЗ.8.1.

8. Повторить опыты при других значениях тока, указанных в табл. ЛЗ.8.1. После завершения опытов очистить машину, зерно и металлические частицы поместить в емкости для их хранения, убрать рабочее место.

Данные табл. ЛЗ.8.1 выразить в процентах от суммарной массы смеси до обработки ( $K_i$ , %) и построить зависимость  $K_i = f(I)$  для всех классов зерновой смеси.

***Содержание отчета:***

1. Цель и задачи работы.
2. Принцип устройства аппаратов магнитной очистки зерна.
3. Технологическая и электрическая схемы машины К-295.
4. Силы, действующие на частицу с порошком в магнитном поле.
5. Таблицы наблюдений и вычислений,
6. Графические зависимости.
7. Выводы по работе.

***Контрольные вопросы:***

1. В чем состоят технологические свойства магнитного поля?
2. В чем заключается принцип магнитной очистки зерна, зернопродуктов, кормов?
3. Опишите устройство, принцип действия и работу электрической схемы электромагнитной семяочистительной машины К-295.
4. Какие силы действуют на семя, покрытое магнитным порошком, в машинах магнитной очистки семян?
5. Объясните принцип и назначение магнитной обработки воды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бренина, Т. П. Свойства и параметры сорных растений как объектов электрической прополки / Т. П. Бренина [и др.]. – Волгоград : Станица-2, 2004. – 128 с.
2. Поляков, З. И. Электрофизические и электрохимические методы обработки : учеб. пособие для студентов-заочников / З. И. Поляков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск : ЮУрГУ, 2006. – 89 с.
3. Расчеты электротехнологического оборудования : учеб. пособие / Е. М. Заяц, В. А. Карасенко, И. Б. Дубодел ; под. ред. Е. М. Заяца. – Минск : Технопринт, 2001. – 238 с.
4. Электротехнологии : лаб. практикум / И. Б. Дубодел [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2012. – 148 с.
5. Акоюн, В. Б. Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами / В. Б. Акоюн, Ю. А. Ершов. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – 222 с.
6. Хмелев, В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев [и др.]. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2007. – 400 с.
7. Корко, В. С. Электрофизические методы стимуляции растительных объектов / В. С. Корко, Е. А. Городецкая. – Минск : БГАТУ, 2013. – 232 с.
8. Нефедов А. В. Сравнительный анализ физических методов обработки воды для уменьшения накипеобразования / А. В. Нефедов, Г. В. Ушаков // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 62–64.
9. Очков, В. Ф. Магнитная обработка воды: история и современное состояние / В. Ф. Очков // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 2. – С. 24–28.
10. 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.

11. Kocbach, J. Finite element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers / J. Kocbach, University of Bergen Department of Physics, Sept., 2000. – Bergen, 2000. – P. 12–14.

12. Espinosa, A. V. Soaking in water treated with electromagnetic fields for stimulation of germination in seeds of pawpaw (*Carica papaya* L.) / A. V. Espinosa, F. Rubio // Centro Agricola. – 1997. – V. 24. – № 1. – P. 36–40.

## **Приложения**

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

## Основные технические данные преобразователей

Марка	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Максимальное выходное напряжение, В	Выходная мощность, кВт	КПД	cos φ	Масса, кг
ВАК-100-12	100	12	13,2	1,32	0,78	0,83	135
ВАКР-100-12	100	12	13,2	1,32	0,78	0,83	145
ВАК-100-24	100	24	26,4	2,64	0,83	0,83	175
ВАК-100-36	100	36	39,6	3,96	0,83	0,83	250
ВАК-320-18	320	18	19,8	6,34	0,79	0,83	220
ВАКР-320-18	320	18	19,8	6,34	0,79	0,83	230
ВАК-630-12	630	12	13,2	8,32	0,82	0,84	250
ВАКР-630-12	630	12	13,2	8,32	0,82	0,84	260

## Техническая характеристика коронного сепаратора

Параметры сепаратора:

$R_6 = 100\text{--}200$  мм; радиус коронирующего электрода  $r_0 = 0,15\text{--}0,25$  м; расстояние между проволочками  $d = 75\text{--}125$  мм; расстояние от барабана  $h = 80\text{--}100$  мм. Напряжение коронирующих проволок – 20–50 кВ; частота вращения барабана  $\omega = 20\text{--}80$  об/мин; сила тока короны  $I = 0,1\text{--}1$  мА. Производительность сепаратора при длине барабана 1 м – 2,5–4,0 т/ч.

**Зоотехнические рекомендации по дозам и режимам  
ионизации воздуха в помещении**

Вид животных, птицы	Концентрация отрицательных аэроионов, $10^{11}$ ион/м <sup>3</sup>	Режим аэроионизации в течение суток
Телята до 1 мес.	2,0	Ежедневно по 6–8 ч
Коровы	2,5	В течение 15–20 дн. по 5–8 ч, перерыв на 15–20 дн., повтор
Быки-производители	3,0	В течение 2 мес. по 8–10 ч, перерыв на 20–30 дн., повтор
Поросята	4,0	В течение 3–4 нед. по 0,5 ч 2 раза в день, перерыв на 1 мес., повтор
Свиньи	5,0	В течение 3–4 нед. по 0,5 ч 2 раза в день, перерыв на 1 мес., повтор
Цыплята	0,25	Возраст 3–20 дн. – 1–2 ч, 20–40 дн. – 3 ч, 40–60 дн. – 4 ч
Птица	0,3–1,6	Возраст 60–80 сут. – от 0,5 до 4 ч, 80–100 дн. – от 5 до 10 ч. Чередование: 5 дн. – иониз., 5 дн. – перерыв
Бройлеры	0,65	3–18 сут. – 0,5 ч, 11–40 сут. – 2 ч, 40–65 сут. – 3 ч. 3 дня ионизация, 3 дня – пауза
Куры-несушки	1,5–2,5	Увеличение от 4 до 12 ч. Чередование: 1 мес. – ионизация, 1 мес. – перерыв
Инкубаторы	0,13	Круглосуточно 19 дн.

Схемы и формулы к расчету разрядных устройств ионизаторов воздуха

<p>Схема расположения коронных электродов</p>				<p>4. Игла-плоскость</p>
<p>1. Коаксиальные цилиндры</p> $U_3 = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r}}\right) r \ln\left(\frac{R}{r}\right)$	<p>2. Провод-плоскость</p> $U_3 = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r}}\right) r \ln\left(\frac{2h}{r}\right)$	<p>3. Провод между плоскостями</p> $U_3 = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r}}\right) r \ln\left(\frac{4h}{r}\right)$	$U_3 = 30,3 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{0,0298}{\sqrt{r_3}}\right) \times r_3 \ln\left(\frac{h}{r_3}\right)$	
<p>Напряжение зажигания короны, В, при атмосферном давлении 1,013·10<sup>5</sup> Па и 20 °С</p>	$i = \frac{8\pi\epsilon_0 k U_p (U_p - U_3)}{R^2 \ln(R/r)}, \text{ A/m}$	$i = \frac{\pi^2 \epsilon_0 k U_p (U_p - U_3)}{h^2 \ln(2h/r)}, \text{ A/m}$	$i = \frac{4\pi\epsilon_0 k U_p (U_p - U_3)}{2h^2 \ln(4h/\pi r)}, \text{ A}$	$i = \frac{1,54\epsilon_0 (1 + 0,042/h) U_p (U_p - U_3)}{h(1 - 1,5 \cdot 10^{-2} r_3)}, \text{ A}$

**Параметры некоторых магнестрикционных материалов**

Марка материала	Плотность $\rho$ , $10^3 \text{ кг/м}^3$	Модуль Юнга $E$ , $10^{11} \text{ Па}$	Индукция насыщения $B_s$ , Тл	Напряженность поля подмагничивания $H_0$ , $10^3 \text{ А/м}$	Допустимая удельная электрическая мощность $p_s$ , $10^4 \text{ Вт/м}^2$
Никель НП2	8,85	2,13	0,6	0,8–1,6	50
К49Ф2	8,1	2,05	2,0	1,6–2,4	70–75
К50Ф2	8,2	2,05	2,2	1,6–2,4	70–75
Ю12	6,7	1,58	1,3	0,6	30–35
Ю14	6,75	1,6	1,4	0,6	30–35

**Основные характеристики некоторых ультразвуковых генераторов**

Тип	Потребляемая мощность, кВт	Напряжение питания, В	Число фаз	Выходная мощность, кВт	Рабочая частота, кГц	Масса, кг
УЗГ1–0,25	0,4	220	1	0,25	18	20
УЗГ3–0,4	1,1	220	1	0,4	18–44	60
УЗГ5–1,6/22	4,0	220/380	3	1,6	18–22	260
УЗГ2–4М	6,0	380	3	4,5	18–22	250
УЗГ2–10	15,0	220/380	3	10	18–22	630

## Органические растворители, применяемые при ультразвуковой очистке

Растворитель	Взрываемость смесей	Предельная концентрация, г/м <sup>3</sup>	Температура, °С	Материал очищаемых деталей	Удаляемые загрязнения	Недостатки растворителя
Трихлорэтилен	Не взрывается	0,01	5–70	Все металлы, кроме алюминия	Мин. масла, парафин смолы, каучук, пасты	Разлагается в воде и при перегреве, токсичен
Четыреххлористый углерод	Не взрывается	0,02	5–70	Сталь	Мин. масла, парафин смолы, каучук, пасты	Разлагается, токсичен
Фреон-113	Не взрывается	0,8	5–70	Все металлы	То же	Высокая стоимость

**Состав водных моющих растворов и режимы ультразвуковой очистки  
в зависимости от материала изделий**

Компонент	Содержание, г/см <sup>3</sup>	Температура, °С	Материал очищаемых деталей	Загрязнения
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Едкий натр Сода кальцинированная Жидкое стекло Нитрит натрия Неионогенное ПАВ	20–30 10–20 20 5–10 0,5–1,5	60–80	Сталь	Жир, консервирующие смазки
Тринатрий- фосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	20–35 3 0,5–1,5	55–80	Сталь, медные сплавы, никель	Полировочные пасты, консервирующие и волоочильные смазки, минеральные масла
Сода кальцинированная Жидкое стекло Неионогенное ПАВ	15–20 8–10 3	55–80	То же	То же
Жидкое стекло Тринатрий- фосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	5–10 10–30 3 0,5–1,5	55–80	Сталь, медные сплавы, алюминий	Масла, жиры, густые смазки и полировочные пасты
Дистиллированная вода		45–55	Полимерные пленки	Механические загрязнения, пыль
Тринатрий- фосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол	30 3 1	60–70	Сталь	Прокатные смазки, закаты, плены, конгломерированные загрязнения

1	2	3	4	5
Жидкое стекло Неионогенное ПАВ	5	55–80	Алюминий, латунь	Полировочные пасты, сульфатрезол, эмульсол, стружка, масла, эмульсии олеиновой кислоты, флюсы
Тринатрий-фосфат или сода кальцинированная	3–5 5–10	85–95	Кремний, германий	Пищеиновый клей
Деионизированная вода		60–80	Кремний	Удаление абразивной суспензии
Тринатрий-фосфат Неионогенное ПАВ Сульфанол 25%-й раствор аммиака в воде	10 3 1 5	60–70	Пластмассы, золото, драгоценные камни	Пемза с веретенным маслом, полировочные пасты

Характеристики установок для ультразвуковой обработки

Тип	Мощность генератора, кВт		Рабочая частота, кГц	Число технологических позиций		Рабочий объем ванн, дм <sup>3</sup>	Габаритные размеры технологического устройства, мм	Очищаемые изделия и загрязнения
	потребляемая	выходящая		УЗ очистки	Всего			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
УЗУ-0,1	0,15	0,1	18	1	2	1	324×232×238	Мелкие детали со следами масла, пасты, наклеечных смол и т. д.
УЗУ-0,25	0,4	0,25	18	1	2	5	560×290×300	То же
УЗВ-0,4	1,1	0,4	18	1	1	14	450×340×400	Мелкие детали с жировыми и масляными загрязнениями
ВУЗ1-30	1,8	1,0	18	1	3	30	570×665×420	То же, очистка перед гальванопокрытием
Реут-0,01	0,15	0,1	33	1	1	–	260×160×210	То же, изделия зубопротезной техники
Хладон-0,1	6,4	4,5	22	1	1	50	1230×850×1270	Различные детали с механическими и жировыми загрязнениями

1	2	3	4	5	6	7	8	9
УЗВ-15М	6,4	4,5	22	1	1	42	720×655×970	Различные детали машиностроения (размеры подвесок в плане, мм: 300×300; 600×300; 900×300; 1200×300)
УЗВ-16М	6,4	4,5	22	1	1	82	900×752×970	
УЗВ-17М	18,0	10,0	22	1	1	128	1390×872×965	
УЗВ-18М	18,0	10,0	22	1	1	163	1700×872×965	
УЗУ4-1,6-0	3,2	1,6	18	2	2	–	1752×700×1075	Фильтроэлементы топливных, гидротопливных, пневмосистем; механические частицы, продукты осмоления и коксования (при регенерации)
УЗА10-1,6/18	3,0	1,6	18	1	1	–	1830×840×1550	То же и фильтропакеты
УЗУ13-25/16	40,0	25,0	16	1	2	350	1550×750×1250	Различные детали и узлы с размерами до 500×650×300 мм; со следами масла, смазки, пасты и т. д.
УЗУ6-100/16	40,0×4	25,0×4	16	1	3	4700	2200×2000×2000 (одной ванны)	Корпусные детали двигателей с размерами до 1900×900×1000 мм

Продолжение приложения 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
УЗУ4-0,25/18	0,4	0,25	18	1	3	2	1070×1150×1920	Миниатюрные реле в сборе
УЗУ3-0,25/18	0,4	0,25	18	1	5	1,5	1150×670×2025	Детали часов (при ремонте)
УЗУ1-6,3/18	10,0	6,3	18	2	5	2,5	1400×1350×2070	Детали, узлы и изделия из металлов, керамики и пластмасс (размеры подвески 290×160×35 мм)
УЗУ7-1,6/18	3,2	1,6	18	1	5	19	2500×1550×1900	Детали автономного производства со следами стружки и СОЖ (размеры подвесок, мм: диаметр 200×50, диаметр 350×50)
УЗУ10-10/18	19,5	10,0	18	2	5	-	2735×1960×2000	Лента толщиной 0,1–2,5 мм, шириной до 500 мм
УЗУ1-75/16	40,0×3	25,0×3	16	1	1	2500	6920×3660×3290	с трудноудаляемыми загрязнениями
УЗ-КОМПЛЕКТ УК-2	40,0×4	25,0×4	16	2	2	2500	10300×3660×3290	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ОТЛ-2	6,4	4,5	20	2	3	6	3000×1020×1418	Микроленты толщиной 10–20 мкм, шириной 0,7–2 мм со следами технологической смазки
УЗУ9-1,6/18	3,2	1,6	18	3	6	–	3500×700×1580	Микропровода, спирали и биспирали со следами волоочильной смазки
УЗУ12-25/16	40	25	16	3	6	–	11440×400×1150	Проволока диаметром 0,5–3,0 мм со следами волоочильной смазки
УЗУ6-40	40×2	25×2	16	2	6	5000	22300×8500×3500	Трубы с диаметром 12–20 мм, длиной 4–6 мм со следами смазки, ржавчины
УЗУ2-10-0	40	25	16	1	3	–	4400×3900×3500	Кольцевые планки длиной до 1185 мм, шириной до 120 мм и нитеразделители с конгломерированными загрязнениями

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЛЭФМО-3	3,2	1,6	22	1	4	-	1400×1600×900	Детали топливной аппаратуры
УЗВФ-1	6,4	4,5	22	1	3	-	1845×902×1005	Различные детали с жировыми и масляными загрязнениями. Детали РЭА и ПШМ с максимальными размерами, мм: 300×300; 140×100; 200×200
УЗВФ-2	0,8	0,4	22	1	2	-	606×400×563	
УЗВФ-3	0,8	0,4	22	1	2	-	1150×676×985	

## Характеристики установок УЗУМИ

Параметр	Тип установки		
	УЗУМИ-02	УЗУМИ-05	УЗУМИ-15
Напряжение сети, В	220	220	220
Частота сети, Гц	50	50	50
Мощность генератора, ВА: – потребляемая – выходная	180	100	750
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	38	32	38
Количество преобразователей, шт.	3	1	12
Рабочий объем камеры, л	2,7	1,0; 1,6; 2,5	28
Габариты рабочей камеры, мм	240×140×145	с объемом 1,0 л: 150×140×70 с объемом 1,6 л: 150×140×100 с объемом 2,5 л: 150×140×150	500×290×195
Габариты установки, мм	320×220×300	с объемом 1,0 л: 165×230×160 с объемом 1,6 л: 165×230×200 с объемом 2,5 л: 165×230×240	610×320×470
Время обработки, мин	1–27	30–40 – работа, 10–15 – пауза	1–27
Масса, кг	5	7	22

## Технические характеристики сварочных машин МТУ и КТУ

Показатель	МТУ-0,4	МТУ-1,5	КТУ-1,5	МТУ-4
Мощность, кВт	0,4	1,5	1,5	4,0
Частота, кГц	22	22	22	18
Усилие сжатия, кгс	6–60	15–150	15–120	50–550
Толщина свариваемых металлов (медь), мм	0,01–0,20	0,1–0,5	0,1–0,5	0,3–1,2
Масса машины, кг	76	82	80	105

*Примечание.* Производительность машин до 60 точек в минуту.

## Технические характеристики машин для сварки металлической фольги

Параметр	МШУ-0,63	МШУ-1,6	МШУ-4
Мощность колебательной системы, кВт	0,63	1,60	4,00
Рабочая частота, кГц	22	22	18
Сила сжатия, Н	500	1500	2500
Толщина (по алюминию) свариваемого металла, мм	0,2	0,5	0,8

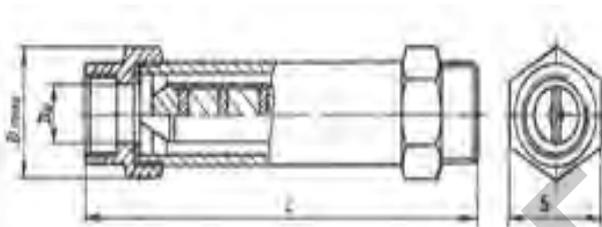
**Технические характеристики установок  
магнитно-импульсной обработки металлов**

Тип	Запасаемая энергия, кДж	Напряжения заряда, кВ	Частота разряда, кГц	Габаритные размеры, м	Масса, кг
МИУ-50	50	5–20	33–40	1,5×1,3×1,7	1200
МИУ-15	18	1–20	55	1,1×0,7×1,5	500
МИУ-10	10	1–20	55	0,8×0,9×1,2	350
МИУ-3	5	1–6	32	0,6×0,7×0,8	100
МИУ-1	1,25	1,0–7,5	70	0,65×0,36×0,5	50
ГИТ 5-30	15	12–32	30	1,8×2,5×1,3	1100

**Технические характеристики устройств  
магнитной обработки воды МВП**

Тип	Соединение		Производительность, м <sup>3</sup> /ч		
	DN	дюйм	миним.	норм.	макс.
МВП MWS Dy 8	20	3/4	0,08	0,4	0,7
МВП MWS Dy 10	15	1/2	0,1	0,5	0,9
МВП MWS Dy 8	15	1/2	0,15	1,0	2,0
МВП MWS Dy 8	15	1/2	0,2	1,35	2,5
МВП MWS Dy 8	20	3/4	0,5	2,25	4,0
МВП MWS Dy 8	25	1	1,0	4,0	7,0
МВП MWS Dy 8	32	1 1/4	1,8	5,9	10,0
МВП MWS Dy 8	40	1 1/2	2,5	7,75	13,0
МВП MWS Dy 8	50	2	3,5	11,7	20,0
МВП MWS Dy 8	65	2 1/2	5,0	20,0	35,0
МВП MWS Dy 8	80	3	8,0	26,5	45,0
МВП MWS Dy 8	100	4	12,0	51,0	90,0
МВП MWS Dy 8	125	5	20,0	85,0	170,0
МВП MWS Dy 8	150	6	30,0	130,0	260,0
МВП MWS Dy 8	200	8	55,0	215,0	435,0
МВП MWS Dy 8	250	10	100,0	400,0	700,0

**Технические характеристики аппаратов магнитной обработки воды  
на постоянных магнитах**



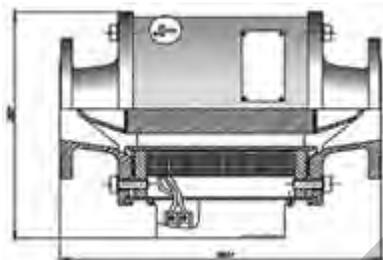
Основные характеристики:

- условный диаметр, мм: 10 ; 15; 20; 25; 32;
- номинальное давление, МПа: 1.

Параметр	Модель аппарата				
	АМП 10 РЦ	АМП 15 РЦ	АМП 20 РЦ	АМП 25 РЦ	АМП 32 РЦ
Амплитудное значение магнитной индукции ( $B_0$ ) на поверхности рабочей зоны, мТл	180				
Количество рабочих зон	5				
Номинальный расход воды, миним./норм./макс., м <sup>3</sup> /ч	0,15/0,5 /0,71	0,35/1,15 /1,65	0,65/1, 9/2,9	1,0/3, 0/4,5	1,6/4,8 /7,4
Диаметр условного прохода, мм	10	15	20	25	32
Соединение, дюйм	1/2	1/2	3/4	1	1 1/4

Параметр	Модель аппарата				
	АМП 10 РЦ	АМП 15 РЦ	АМП 20 РЦ	АМП 25 РЦ	АМП 32 РЦ
Рабочий температурный интервал эксплуатации, °С	5–120				
Размеры, L×D, мм	108×32	124×34	148×41	172×50	150×56
Масса, кг	0,5	0,75	0,8	1,2	1,8

**Технические характеристики аппаратов магнитной обработки воды  
на электромагнитах**



Основные характеристики:

- условный диаметр, мм: 80; 100; 200; 600;
- номинальное давление, МПа: 1,6.

Параметр	Модель аппарата			
	АМО-25УХЛ	АМО-100УХЛ	АМО-200УХЛ	АМО-600УХЛ
Напряжение, В	220			
Частота сети, Гц	60			
Производительность по обрабатываемой воде, м <sup>3</sup> /ч	25	100	200	600
Напряженность магнитного поля, кА/м	200			
Температура обрабатываемой воды, °С	60	40	50	70
Рабочее давление воды, МПа	1,6			
Потребляемая электромагнитом мощность, кВт	0,35	0,5	0,5	1,8
Габаритные размеры электромагнита, мм	260×410	440×835	520×950	755×1100

Параметр	Модель аппарата			
	АМО-25УХЛ	АМО-100УХЛ	АМО-200УХЛ	АМО-600УХЛ
Габаритные размеры блока питания, мм	250x350x250			
Масса электромагнита, кг	40	200	330	1000
Масса блока питания, кг	8			

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.....	4
1.1. Природные электрофизические факторы в жизнедеятельности биологических объектов.....	4
1.2. Классификация электрофизических и электрохимических методов обработки материалов, области применения.....	8
1.3. Электрофизикохимические явления в электролитических средах.....	10
1.4. Электромелиорация почв.....	16
1.5. Обработка в электрическом поле семян и растений.....	18
1.6. Электрохимические технологии обработки воды и растворов.....	24
1.7. Электротермохимические технологии обработки кормовых материалов.....	31
1.8. Электрохимические технологии обработки металлов.....	35
1.9. Применение электрического тока в ветеринарии и животноводстве.....	39
Контрольные вопросы.....	47
Практическое занятие № 1. Расчет параметров рабочей камеры установки обработки электрическим током влажных кормовых материалов.....	47
Практическое занятие № 2. Расчет электрокоагулятора белков.....	51
Практическое занятие № 3. Расчет электрического плазмолизатора растительного сырья.....	53
Практическое занятие № 4. Расчет и выбор оборудования для гальванических покрытий.....	55

Лабораторное занятие № 1.	
Исследование установок обработки электрическим током влажных кормовых материалов.....	58
Лабораторное занятие № 2.	
Исследование процессов электролиза водных растворов электролитов.....	62
Лабораторное занятие № 3.	
Исследование установки дозированного высева семян.....	67
<b>2. ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>71</b>
2.1. Особенности импульсного использования энергии.....	71
2.2. Генераторы электрических импульсов и их параметры.....	72
2.3. Электрические изгороди.....	76
2.4. Электроимпульсная обработка растительного сырья.....	83
2.5. Электрогидравлические технологии.....	87
2.6. Электроэрозионная обработка металлов.....	91
Контрольные вопросы.....	97
Практическое занятие № 5.	
Расчет генераторов импульсов.....	98
Лабораторное занятие № 4.	
Исследование генераторов импульсов для электрических изгородей.....	107
<b>3. ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>112</b>
3.1. Физические процессы в электрических полях с заряженными частицами.....	112
3.1.1. Способы зарядки частиц.....	112
3.1.2. Силы, действующие на частицу в электрическом поле.....	119
3.2. Электрические сепараторы зерна и семян.....	123
3.3. Предпосевная обработка семенных материалов в электрическом поле.....	131
3.4. Электроаэрозольные технологии.....	133
3.5. Электронно-ионные технологии ионизации, озонирования и очистки воздуха.....	136
Контрольные вопросы.....	144

Практическое занятие № 6.	
Расчет электрического ионизатора воздуха.....	145
Практическое занятие № 7.	
Расчет установки аэрозольной обработки птицы.....	148
Лабораторное занятие № 5.	
Исследование диэлектрических сепараторов семян.....	150
Лабораторное занятие № 6.	
Исследование установок очистки и ионизации воздуха.....	154
<b>4. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....</b>	<b>158</b>
4.1. Природа и технологические свойства ультразвука....	158
4.2. Основные элементы ультразвуковых установок.....	166
4.3. Применение ультразвука в измерительной технике и дефектоскопии.....	181
4.4. Ультразвуковые технологии мойки и очистки.....	183
4.5. Ультразвуковые технологии пайки, сварки, обработки материалов.....	188
4.6. Применение ультразвука в сельском хозяйстве.....	193
Контрольные вопросы.....	195
Практическое занятие № 8.	
Расчет обмотки магнитострикционного преобразователя и выбор ультразвукового генератора.....	195
Лабораторное занятие № 7.	
Исследование ультразвуковых установок.....	198
<b>5. МАГНИТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>204</b>
5.1. Технологические свойства и проявления магнитного поля.....	204
5.2. Электромагнитные семяочистительные машины.....	205
5.3. Установки магнитной обработки воды.....	210
5.4. Магнитно-импульсная обработка металлов.....	213
Контрольные вопросы.....	217
Практическое занятие № 9.	
Расчет обмотки электромагнитного сектора семяочистительной машины.....	217

Лабораторное занятие № 8.

Исследование установок

электромагнитной обработки материалов.....221

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....225

ПРИЛОЖЕНИЯ.....227

СОДЕРЖАНИЕ.....248

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

Учебное издание

**Дубодел** Иннеса Борисовна, **Заяц** Евгений Михайлович,  
**Кардашов** Павел Владимирович и др.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

*Пособие*

Ответственный за выпуск *В. П. Степанцов*  
Редактор *Т. В. Каркоцкая*  
Компьютерная верстка *Т. В. Каркоцкой*

Подписано в печать 30.12.2014 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 11,45. Тираж 70 экз. Заказ 336.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.