

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов
высшего образования по энергетическим специальностям*

Минск
БГАТУ
2014

УДК 621.36(075.8)

ББК 22.33я7

Э46

Авторы:

доктор технических наук, профессор Е. М. Заяц,
кандидат технических наук, профессор В. А. Карасенко,
кандидат технических наук, доцент А. Н. Баран,
кандидат технических наук, доцент В. С. Корко,
кандидат технических наук, доцент И. Б. Дубодел,
кандидат технических наук, доцент П. В. Кардашов

Рецензенты:

кафедра электроснабжения УО «Гомельский государственный
технический университет им. П. О. Сухого»;
доктор технических наук, профессор *М. А. Короткевич*

Электротермия : учебное пособие / Е. М. Заяц [и др.]. –
Э46 Минск : БГАТУ, 2014 – 344 с.
ISBN 978-985-519-654-0.

Изложена информация о современном состоянии и перспективах развития электротермии, сконцентрированы и отображены материалы, позволяющие всесторонне проанализировать эффективность эксплуатации электротермических установок, используемых в сельскохозяйственном производстве. Выводы по результатам анализа и рекомендации по совершенствованию установок предложены в форме размышлений, которые помогут обучающимся сформировать собственное мнение о состоянии электротермического оборудования и путях его модернизации в условиях конкретного хозяйства.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельскохозяйственного производства.

УДК 621.36(075.8)

ББК 22.33я7

ISBN 978-985-519-654-0

© БГАТУ, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ	11
1.1. Электротермия, электротермические процессы и установки, области применения в отраслях сельскохозяйственного производства	11
1.2. Термины и определения	12
1.3. Современное состояние и тенденции развития электротермии	13
Контрольные вопросы	16
2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	17
2.1. Способы электрического нагрева и классификация электротермического оборудования	17
2.2. Задачи и содержание расчета электротермического оборудования	21
2.3. Основы теплового расчета электротермического оборудования	22
2.4. Элементы кинетики нагрева	31
2.5. Расчет мощности и основных энергетических и конструктивных параметров электротермического оборудования	35
Контрольные вопросы	42
Практическое занятие 1	
Тепловой расчет электротермического оборудования	42
3. РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ	45
3.1. Прямой электрический нагрев	45
3.1.1. Физические основы и способы резистивного электрического нагрева	45
3.1.2. Электрическое сопротивление проводников 1-го и 2-го рода	48
3.1.3. Электроконтактный нагрев	51
3.1.4. Расчет параметров и выбор источника питания для электроконтактного нагрева	53
3.1.5. Электродный нагрев. Электродные системы, их параметры и расчет	55

Контрольные вопросы	60
Практическое занятие 2	
Расчет электродных систем	61
Лабораторное занятие 1	
Измерение и коррекция удельного электрического сопротивления воды	64
3.2. Элементный электрический нагрев	67
3.2.1. Классификация элементных нагревателей	67
3.2.2. Материалы для нагревательных элементов	69
3.2.3. Трубчатые, протяженные, поверхностно-распределенные нагреватели	74
3.2.4. Выбор элементных электрических нагревателей	86
3.2.5. Расчет элементных электрических нагревателей	89
Контрольные вопросы	95
Практическое занятие 3	
Расчет элементных электрических нагревателей	96
Практическое занятие 4	
Выбор и проверочный расчет трубчатых электрических нагревателей	101
Лабораторное занятие 2	
Исследование элементных электрических нагревателей	103
3.3. Электрообогрев помещений, массивов, материалов и устройств	106
3.3.1. Электрокалориферы, электрокалориферные установки, конвекторы	106
3.3.2. Установки активного вентилирования и сушки сельскохозяйственных материалов	116
3.3.3. Устройства электрообогрева массивов	124
3.3.4. Устройства электрообогрева трубопроводов, резервуаров, водостоков	139
Контрольные вопросы	141
Практическое занятие 5	
Выбор и проверочный расчет электрокалориферных установок	142

Практическое занятие 6	
Расчет массивов	144
Лабораторное занятие 3	
Исследование электрокалориферных установок	149
Лабораторное занятие 4	
Исследование установок локального электрообогрева	153
3.4. Электрические устройства нагрева воды и получения пара	156
3.4.1. Области применения и классификация	156
3.4.2. Элементные водонагреватели	157
3.4.3. Электродные водонагреватели и парогенераторы	165
3.4.4. Электрокотельные. Установки с аккумулированием теплоты	174
3.4.5. Выбор электрических водонагревателей и парогенераторов. Особенности эксплуатации	182
Контрольные вопросы	190
Лабораторное занятие 5	
Исследование элементных водонагревателей	191
Лабораторное занятие 6	
Исследование электродных водонагревателей	193
3.5. Электрические печи и ванны	197
3.5.1. Области применения и классификация	197
3.5.2. Электрические нагревательные печи, соляные, мас- ляные, щелочные ванны	197
3.5.3. Расчет электрических печей	203
Контрольные вопросы	207
Практическое занятие 7	
Расчет электрической отопительной аккумуляционной печи	207
4. ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАГРЕВ	210
4.1. Свойства и характеристики электрической дуги	210
4.2. Условия устойчивого горения дуги	214
4.3. Источники питания электрической дуги и их классификация	216
4.4. Выбор источника питания для ручной дуговой сварки ..	229
Контрольные вопросы	232
Практическое занятие 8	

Выбор источника питания сварочной дуги для ручной сварки	233
Лабораторное занятие 7	
Исследование электросварочного оборудования.....	235
5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ	
И ОХЛАЖДЕНИЕ	239
5.1. Физические основы термоэлектрического нагрева	
и охлаждения	239
5.2. Принцип устройства термоэлектрической батареи	241
5.3. Энергетические характеристики термоэлектрического	
трансформатора	243
5.4. Термоэлектрические тепловые насосы и холодильники.	246
Контрольные вопросы.....	89
Лабораторное занятие 8	
Исследование термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24.....	250
6. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ	255
6.1. Особенности и области применения	255
6.2. Физические основы индукционного нагрева	260
6.3. Приближенный расчет индукторов	264
6.4. Выбор установок индукционного нагрева	271
Контрольные вопросы.....	272
Лабораторное занятие 9	
Исследование установки индукционного нагрева	275
7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ	281
7.1. Особенности и области применения	281
7.2. Физические основы диэлектрического нагрева	282
7.3. Выбор установок диэлектрического нагрева.....	286
7.4. Проверочный расчет рабочего конденсатора	287
Контрольные вопросы	289
Практическое занятие 10	
Выбор установки диэлектрического нагрева	
и проверочный расчет рабочего конденсатора	290
Лабораторное занятие 10	
Исследование установки диэлектрического нагрева	292
8. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК	
ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО	
НАГРЕВА	297
8.1. Классификация источников питания.....	297
8.2. Особенности эксплуатации установок.....	297

8.3.Машинные и статические преобразователи, ламповые генераторы, магнетроны.....	299
Контрольные вопросы	309
9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВИДЫ НАГРЕВА	310
9.1. Общая характеристика	310
9.2. Электронно-лучевой , ионный, лазерный нагрев	310
9.3. Источники питания установок	318
Контрольные вопросы	319
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	320
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	321

ПРЕДИСЛОВИЕ

В зависимости от вида применяемой энергии, характера протекающих процессов, действующих сил различают электротехнологии, биотехнологии, химические и другие технологии.

Электротехнологии – область науки и техники, изучающая теорию и способы выполнения производственных процессов путем непосредственного воздействия на обрабатываемую среду с комплексным или преимущественным использованием технологических свойств и проявлений электромагнитного поля (термических, электрофизических, электрохимических, биологических) для целенаправленного преобразования (или изменения свойств) веществ.

В настоящее время «Электротехнологии» – одна из важнейших профилирующих дисциплин, изучаемых студентами энергетических специальностей. Ее освоение базируется на знаниях, полученных при изучении ряда общеобразовательных (математики, физики, химии, теоретических основ электротехники, теплотехники) и специальных дисциплин (основ автоматики, электроники, вычислительной техники, светотехники).

Технологические процессы, связанные с преобразованием электрической энергии в тепловую и ее использованием, объединяют термином «электротермия», а процессы, в которых электрическая энергия применяется непосредственно или с предварительным преобразованием в механическую или химическую, – понятием «электрофизико-химические технологии».

В разделе «электротермия» изучают основы теории и расчета электротермического оборудования, способы и устройства электрического нагрева различных видов (резистивного, электродугового, термоэлектрического, индукционного, диэлектрического, сверхвысокочастотного и др.) и их использование в электротермических технологиях (нагрева воды и получения пара, нагрева воздуха, электрообогрева помещений, массивов, различных материалов, устройств).

Большим преимуществом электротеплоснабжения является то, что от одного энергетического ввода (электрического) можно получить все виды энергии, в которых нуждается потребитель: механическую, лучистую, тепловую и электрическую.

Электронагревательные установки (ЭНУ) по сравнению с топливными обладают существенными преимуществами, к основным из них относятся следующие:

1) высокие санитарно-гигиенические условия и возможность проведения процессов на более высоком техническом уровне;

2) высокая точность поддержания температуры и возможность полной автоматизации процессов с использованием одного и того же вида энергии как для основного процесса нагрева, так и для автоматизации;

3) возможность получения равномерного и избирательного нагрева материалов (для некоторых видов электрического нагрева);

4) отсутствие необходимости в специальных котельных, трубопроводах, бойлерах, складских помещениях для топлива, транспортировке топлива и золы и вследствие этого в большинстве случаев меньшие капитальные затраты на потребительские электронагревательные установки по сравнению с топливными;

5) меньшая потребность в производственных площадях, возможность установки в любом месте;

6) постоянная готовность к действию;

7) меньшая пожарная опасность, что особенно важно в условиях сельского хозяйства.

В разделе «Электрофизико-химические технологии» рассматривают 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 электричества: 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 сельскохозяйственном производстве широко используют электрические изгороди для животных, ионизаторы воздуха в животноводческих и других помещениях, электрические сепараторы семян и зерна, электроаэрозольные установки, элек-

трофильтры воздуха, установки магнитной очистки семян и кормов, электрообеззараживания навоза, почвы, предпосевной и предпосадочной обработки семенного и посадочного материалов. При ремонте машин применяют различные способы электрообработки металлов, восстановления, упрочнения, очистки деталей.

Электротехнологии – наиболее интенсивно развивающееся направление использования электроэнергии в сельскохозяйственном производстве, благодаря чему открываются большие возможности в создании высокоэффективных энергосберегающих технологий.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИИ

1.1. Электротермия, электротермические процессы и установки, области их применения в отраслях сельскохозяйственного производства

Электротермия изучает физические основы и количественные закономерности преобразования электрической энергии в тепловую и методы ее рационального использования в сельскохозяйственном производстве.

Электротермическое оборудование по основным областям применения условно можно разделить на три группы.

Основу первой группы составляет оборудование, связанное непосредственно с производством, переработкой и хранением продуктов растениеводства и животноводства. К этой группе относятся:

- установки нагрева воды и получения пара (электрические водонагреватели, парогенераторы, водогрейные котлы);

- установки для создания микроклимата в производственных помещениях (электрокалориферные установки, отопительные печи, установки локального обогрева и т. п.);

- оборудование хранилищ продуктов растениеводства и животноводства (кондиционеры, обогреватели и т. п.);

- оборудование тепловой обработки сельскохозяйственных материалов (запарники кормов, сушилки и т. п.).

Все электротермические процессы – низкотемпературные (до 150 °С). Это, в основном, оборудование специального сельскохозяйственного назначения.

Вторая группа включает электротермическое оборудование, связанное с эксплуатацией и ремонтом сельскохозяйственной техники:

- оборудование для электрической сварки;

- высокочастотные установки диэлектрического и индукционного нагрева;

установки лазерного, плазменного, ионного нагрева и т. п.

Большинство электротермических процессов – высокотемпературные (свыше 200 °С). Это оборудование общепромышленного назначения.

К третьей группе относится электротермическое оборудование коммунально-бытовой, социальной сфер обслуживания сельского населения. Используется большая номенклатура бытовых электронагревательных устройств и приборов.

1.2. Термины и определения

В электротермии сложилась определенная, узаконенная (ГОСТ 16382-87 (2005), система терминов и определений. Она несет отпечаток особенностей промышленного производства, где электротермия начала развиваться раньше, чем в других отраслях народного хозяйства. Однако ее основные принципы и приводимые ниже понятия справедливы и для других сфер применения электротермического оборудования.

Электрический нагрев (электронагрев) – процесс преобразования электрической энергии в тепловую для дальнейшего использования.

Электротермический процесс – технологический процесс тепловых воздействий на загрузку при помощи электронагрева. Под загрузкой понимают объект тепловой обработки в электротермическом оборудовании.

Электротермическое оборудование (ЭТО) – комплекс технологического оборудования и устройств для выполнения электротермического процесса.

Электрод печь – часть электротермического оборудования, в которой электротермический процесс осуществляется в закрытом рабочем пространстве (рабочей камере). В сельскохозяйственном производстве в эту категорию, помимо собственно электрод печей (нагревательных, сушильных, отопительных и др.), входят электрические водонагреватели, электрод котлы, электрод калориферные установки и другое оборудование.

Электротермическое устройство – оборудование без рабочей камеры, предназначенное для преобразования электрической энергии в тепловую.

Электротермическая установка – совокупность электротермического и другого технологического оборудования вместе с соору-

жениями и коммуникациями, обеспечивающими проведение электротермического процесса.

1.3. Современное состояние и тенденции развития

Большая часть общего энергетического баланса сельскохозяйственного производства приходится на долю тепловой энергии (более 60 %, а в животноводстве – до 90 %). Поэтому рациональное теплоснабжение является важной экономической задачей, в решении которой необходимо учитывать особенности сельскохозяйственных предприятий как объектов теплоснабжения. Главная особенность – рассредоточенность потребителей и низкая плотность тепловых нагрузок. Поэтому в сельском хозяйстве распространены небольшие топливные котельные, имеющие следующие недостатки: существенные транспортные расходы на доставку топлива, вывоз золы и шлака; потери топлива при транспортировке и хранении; значительные затраты ручного труда на обслуживание маломощных топливных установок (зачастую не поддающихся полной автоматизации); низкий коэффициент полезного действия, менее 0,3 (в том числе из-за плохих теплораспределительных сетей). Вторая особенность сельскохозяйственных потребителей теплоты – большая неравномерность тепловой нагрузки (максимальный коэффициент использования составляет 0,25–0,65). Это приводит к перерасходу топлива в периоды провалов тепловой нагрузки. Еще одной особенностью сельскохозяйственных потребителей является то, что объектами производства служат животные, птицы и растения, которые нуждаются в оптимальном температурно-влажностном режиме, а часто и в определенном микроклимате. Отклонение температуры от оптимальной или необеспечение таких требований, как влажность воздуха, газовый состав и т. д., отрицательно сказываются на протекании большинства их жизненных процессов.

Указанные особенности сельскохозяйственных предприятий и обусловленные ими трудности теплоснабжения привели к поискам других источников тепловой энергии, в том числе с использованием электрической энергии.

При использовании электрической энергии предоставляются возможности:

автоматизировать технологические процессы, за счет чего в 1,5–2,5 раза сократить количество персонала, обслуживающего тепловые установки и сети; на 20–25 % снизить энергозатраты;

за счет более высокой точности поддержания температурно-влажностного режима в помещениях увеличить продуктивность и сохранность животных и птиц, снизить расходы кормов;

повысить технический уровень производства, производительность и культуру труда рабочих и персонала;

увеличить надежность системы теплоснабжения;

снизить загрязнение окружающей среды или хотя бы сохранить экологию в конкретном рассматриваемом месте;

иметь постоянную готовность электронагревательной установки (ЭНУ) к работе.

При использовании электроэнергии для получения теплоты не понадобится сооружение котельной, наружных тепловых сетей, складских топливных помещений и газоочистных устройств.

Экономический эффект от использования ЭНУ. Раньше считалось, что электронагрев обуславливает перерасход энергетических ресурсов из-за потерь при двукратном преобразовании энергии топлива (сначала в электрическую на электростанции, а затем в тепловую в электротермической установке). Однако в результате всесторонних научных исследований и практического опыта выявлена экономия первичных энергетических ресурсов при электронагреве.

Расчеты показывают, что применение ЭНУ для молочных ферм с поголовьем 200–400 коров, свинарников-откормочников – до 6 тыс. голов, весенних теплиц – до 1 га и других объектов по затратам экономичнее тепловых установок, работающих на каменном угле.

Электронагрев не только экономически оправдан, но и рационален при местном обогреве животных и птицы, при обогреве в парниках и теплицах и т. д. ЭНУ легко поддаются автоматизации, просты по конструкции и надежны в эксплуатации. Их коэффициент полезного действия достаточно высок.

Главные составляющие эффективности при использовании электронагрева – снижение капитальных вложений, уменьшение фонда зарплаты при сокращении обслуживающего персонала и экономия энергоресурсов.

Следует отметить, что широкое применение электроэнергии для электрификации процессов в сельскохозяйственном производстве сдерживается отсутствием резервных мощностей на селе, малой пропускной способностью сельских электрических сетей, а также ограниченной номенклатурой электротермического оборудования.

В то же время из практики передовых хозяйств известно, что электрический нагрев может быть с успехом применен во многих процессах сельскохозяйственного производства.

Примеры применения электронагрева: в овцеводстве – для подогрева воды при поении овец, обсушки новорожденных ягнят, получения горячей воды, расходуемой на технические цели, создания искусственного микроклимата в кошарах, в бассейнах для купания животных, а также в ряде других технологических процессов; в молочном животноводстве – для электронагрева воды в моечных помещениях, на доильных площадках, в системах автопоения, душевых установках; запаривания сочных кормов и картофеля, подготовки концентрированных и силосования грубых кормов; пастеризации молока; обработки молочной посуды, частей доильной установки и танков, обогрева пола и воздуха помещений, обсушки животных подогретым воздухом; подогрева обрат и молока для выпойки телят; в птицеводстве – для инкубации, отопления и вентиляции птичников, подогрева воды и т. д.; в растениеводстве открытого грунта — для яровизации картофеля, теплового протравливания семян на селекционных станциях, сушки плодов, овощей, хлопка, активного вентилирования сена с подогревом воздуха; в растениеводстве защищенного грунта — для обогрева воздуха и грунта в парниках и теплицах при выращивании овощей, табака, хлопка, сеянцев цветов, черенков плодовых культур, для обеззараживания почвы и т. д.

Электронагрев используют в сельскохозяйственных мастерских, а также для бытовых нужд сельского населения (отопления жилых помещений, получения горячей воды, приготовления пищи и т. д.).

Помимо перечисленных процессов в сельском хозяйстве используют различные электрофизические и электрохимические методы, основанные на электрических и магнитных явлениях. Это позволяет использовать не только тепловое действие электрического тока, но и другие его технологические свойства: механическое (без использования электродвигателей); химическое (получение химических реагентов и ускорение химических реакций при обработке продуктов и кормов); биологическое (управление поведением животных, подавление или стимулирование жизнедеятельности микрофлоры и микрофауны). Можно говорить также об электролитических процессах, используемых в ремонтном производстве и других областях.

Благодаря методам электротехнологии в сельскохозяйственном производстве стали возможными многие современные технологические процессы. Так, в животноводстве, растениеводстве и птицеводстве используют ионизаторы и электрофильтры воздуха, установки для электрообеззараживания навоза и почвы, электрические сепараторы и электростимуляторы семян и зерна. Применяют различные импульсные генераторы в установках электроэрозионной и электрохимической обработки металлов, в электрических изгородях, в установках с использованием электрогидравлического удара. Используют установки для ультразвуковой и магнитной обработки материалов, специальные парогенераторы и плазмотроны и т. п.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте электротермию как науку и область техники.
2. Дайте определения терминам «электротермический нагрев (электронагрев)», «электротермический процесс», «электротермическое оборудование», «электротермическая установка», «электропечь», «электротермическое устройство».
3. Опишите современное состояние электротехнологии в сельскохозяйственном производстве.
4. Каковы перспективы развития электротехнологии в сельскохозяйственном производстве?
5. Перечислите энергосберегающие технологии, применяющиеся в сельскохозяйственном производстве.
6. Назовите альтернативные источники энергии в сельскохозяйственном производстве.
7. Приведите примеры применения электронагрева в сельскохозяйственном производстве.

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. Способы электрического нагрева и классификация электротермического оборудования

Электронагрев применим для любых материалов и сред. Практически не ограничены его возможности по скорости и температуре нагрева, вплоть до плавления и испарения самых тугоплавких материалов, а также тонкого регулирования процессов. Однако, в зависимости от класса нагреваемых материалов (проводники, полупроводники, диэлектрики), их физических свойств, цели нагрева, технологических, экономических и других требований, для выполнения электротермических процессов применяют различное электротермическое оборудование, которое отличается большим разнообразием.

Различают следующие способы электронагрева.

Резистивный электрический нагрев – электронагрев за счет электрического сопротивления электронагревателя или загрузки.

Дуговой нагрев – электронагрев загрузки электрической дугой.

Индукционный нагрев – электронагрев электропроводящей загрузки электромагнитной индукцией. (Под электропроводящей загрузкой понимаются металлы – материалы, имеющие электронную проводимость.)

Диэлектрический нагрев – электронагрев неэлектропроводящей загрузки токами смещения при поляризации, а также проводников II рода, имеющих ионную проводимость.

Электронно-лучевой нагрев – электронагрев загрузки сфокусированным электронным лучом в вакууме.

Лазерный нагрев – электронагрев в результате последовательного преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения и затем в тепловую в облучаемой загрузке.

Ионный нагрев – электронагрев потоком ионов, образованным электрическим разрядом в вакууме.

Плазменный нагрев – электронагрев стабилизированным высокотемпературным ионизированным газом, образующим плазму.

Различают плазменно-дуговой нагрев, при котором тела нагреваются факелом плазмы, образуемым при продувании газа через дуговой разряд, и плазменно-индукционный нагрев, когда для получения плазмы используют высокочастотное магнитное поле.

Инфракрасный нагрев – электронагрев инфракрасным излучением при условии, что излучательные спектральные характеристики излучателя соответствуют поглощательным характеристикам нагреваемой загрузки.

Каждый из этих способов электронагрева, в принципе, может быть прямым и косвенным. При прямом электронагреве теплота выделяется в загрузке, включенной в электрическую цепь, при косвенном – теплота выделяется в электронагревателе и передается загрузке теплообменом. Смешанный электронагрев сочетает два и более видов электронагрева.

Термоэлектрический нагрев – нагрев сред теплотой Пельтье, переносимой электрическим током термоэлектрической батареи от источника, имеющего температуру более низкую, чем температура потребителя.

В основе классификации электротермического оборудования лежит способ электронагрева – способ преобразования электрической энергии в тепловую.

Классификация электротермического оборудования по способам электронагрева приведена в табл. 2.1.

Другими классификационными признаками служат:

технологическое назначение (электрические водонагреватели, электрокалориферы, отопительные печи и т. д.);

принцип нагрева (прямой, косвенный);

конструктивное исполнение (периодического действия, непрерывного);

род тока (постоянный, переменный) или частота (низкая, промышленная, средняя, высокая и сверхвысокая);

способ теплопередачи (установки кондуктивного, конвективного, лучистого, смешанного нагрева);

рабочая температура (низко-, средне-, высокотемпературные установки);

производительность или вместимость;

электрическая мощность;

питающее напряжение (низковольтные, высоковольтные установки).

Таблица 2.1

Классификация электротермического оборудования по способам электронагрева

Вид электротермического оборудования	Основные области применения в сельскохозяйственном и ремонтном производстве, машиностроении	Примеры оборудования
1	2	3
Электropечи	Нагрев воздуха, воды, почвы, сушка и тепловая обработка сельскохозяйственных материалов и кормов, приготовление пищи, нагрев, плавка, сварка металлов	Электрокалориферные установки, отопительные печи, электрические водонагреватели и котлы, установки для сушки и активного вентилирования зерна, сена, бытовые электронагревательные приборы. Электрические печи сопротивления ремонтного производства: нагревательные, плавильные, соляные, щелочные и масляные ванны
Дуговые электropечи	Электросварка, резка, наплавка металлов, металлизация	Сварочные трансформаторы, выпрямители, генераторы, металлизаторы
Индукционные электropечи	Поверхностная закалка металлических деталей, нагрев под термообработку и пластическую деформацию, косвенный нагрев воды, обогрев трубопроводов	Индукционные закалочные и нагревательные установки средней и высокой частоты, индукционные водонагреватели промышленной частоты

Продолжение табл. 2.1

1	2	3
Диэлектрические электропечи	Нагрев диэлектриков и полупроводников, комбинированная высокочастотная конвективная сушка зерна, стерилизация продуктов, приготовление пищи	Установки диэлектрического нагрева пресспорошков, резин, дерева, консервной продукции, сушилки семян селекционных центров, СВЧ-печи для приготовления пищи
Электронно-лучевые печи	Термообработка, плавка и сварка тугоплавких и химически активных металлов в вакууме	Электронные плавильные нагревательные и сварочные установки
Лазерные электропечи	Резка, сварка, поверхностная закалка металлов, нанесение покрытий, предпосевная обработка семян, селекционная работа	Установки лазерной технологии в машиностроении и ремонтном производстве, установки предпосевной обработки семян, прединкубационной обработки яиц
Ионные электропечи	Химико-термическая обработка металлов	Установки ионно-плазменного азотирования, цементации, поверхностного покрытия металлов
Плазменные электропечи	Плавка, резка, термообработка металлов и сплавов	Дуговые и высокочастотные плазмотроны

1	2	3
Электropечи инфракрасного нагрева	Локальный электрообогрев молдняка животных и птицы, сушка материалов, обработка кормов, семян	Установки инфракрасного обогрева животных и птицы, сушилки, пастеризаторы молока, микронизаторы зерна
Термоэлектрические устройства	Подогрев воздуха, воды, жидких кормов	Термоэлектрические тепловые насосы, теплохолодильные установки

2.2. Задачи и содержание расчета электротермического оборудования

Электротермическое оборудование совмещает функции приемников электрического тока и источников теплоты, поэтому оно характеризуется соответствующими как электрическими, так и тепловыми параметрами. При расчете определяют оптимальные значения этих параметров, обеспечивающие наилучшие технологические, эксплуатационные и экономические показатели.

Исходными данными для расчета служат технологические условия нагрева: назначение оборудования, его производительность (емкость), температурные режимы, скорость (время) нагрева и др.

В зависимости от цели различают конструктивный (проектный) расчет, расчет по выбору оборудования, проверочный расчет.

Конструктивный расчет выполняют при проектировании оборудования. Цель расчета – определение тепловых, электрических и размерных параметров, по которым можно было бы изготовить оборудование.

Расчет по выбору оборудования производят пользователи. По результатам расчета выбирают оборудование по паспортным данным, приводимым в каталогах, и оформляют заказ на приобретение.

Проверочный расчет применяют к готовым изделиям, выпускаемым промышленностью. Цель расчета – проверка возможности использования данного оборудования в конкретных условиях экс-

платации. Необходимость в проверочном расчете возникает при отсутствии паспортных данных на изделие, а так же если условия использования отличаются от указанных в паспорте, при модернизации и т. п.

Конструктивный и проверочный расчеты выполняют по одним и тем же расчетным соотношениям. Полный расчет включает тепловой, электрический, механический и гидравлический расчеты. В данном курсе рассматриваются только тепловой и электрический расчеты.

Тепловой расчет электротермического оборудования состоит в определении тепловой мощности, температуры отдельных элементов конструкции, теплового КПД, расчете тепловой изоляции и др. Эти общие тепловые параметры характерны для всех видов оборудования, независимо от назначения, устройства и способа электронагрева.

При расчете электрических нагревателей основная задача теплового расчета – определение их термического сопротивления и удельной поверхностной мощности. Тепловой расчет основан на решении уравнения теплового баланса электротермического процесса с использованием законов теории теплопередачи.

Электрический расчет состоит в выборе питающего напряжения и частоты тока, в разработке электрической схемы и способа регулирования мощности, в определении электрического КПД и коэффициента мощности. При электрическом расчете нагревателей основная задача – определение их геометрических размеров.

2.3. Основы теплового расчета электротермического оборудования

Работа электротермического оборудования связана со сложными процессами переноса теплоты от тепловыделяющих элементов к нагреваемой среде, по конструкциям оборудования, в окружающую среду и т. д. Тепловые потоки на своем пути преодолевают термическое сопротивление этих элементов, составляющих тепловую цепь. Аналогично электрическому сопротивлению току в электрических цепях, термическое сопротивление тепловому потоку в тепловых цепях определяется формой составляющих их тел, физическими свойствами, температурой, условиями окружающей среды и другими па-

раметрами. Подобно тому, как расчет электрических цепей состоит в определении токов в элементах цепей, сопротивления элементов, падения напряжения и т. д., тепловой расчет электротермических устройств заключается в определении тепловых потоков, термических сопротивлений, температурных перепадов и т. д. Решение подобных задач, в большинстве своем сложных и разнообразных, подробно рассматривается в курсах теории теплопередачи.

В электротермическом оборудовании теплота передается всеми видами теплообмена: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность – процесс передачи теплоты в неравномерно нагретом теле или непосредственно соприкасающихся телах. В наиболее чистом виде теплопроводность проявляется внутри твердых монокристаллических тел или в очень тонких неподвижных слоях жидкости или газа. Теплота передается лишь при наличии разности температур между частями тела, системами тел и т. д., т. е. в температурном поле – совокупности мгновенных значений температуры во всех точках тела или системы тел. В общем случае аналитическое выражение для температурного поля имеет вид

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

Если температура точек тела не изменяется во времени, то температурное поле называют *стационарным*, в ином случае – *нестационарным*.

Основная характеристика температурного поля – градиент температуры, т. е. вектор, численно равный частной производной от температуры по нормали к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры:

$$\text{grad}t = -\partial t / \partial n.$$

Простейший случай теплопроводности – передача теплоты через однородную и изотропную плоскую стенку достаточно большой площадью поверхности A , м^2 , по сравнению с ее толщиной δ , м , при постоянной (не зависящей от температуры) теплопроводности материала стенки λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Пусть заданы неизменные во времени температуры поверхностей стенки t_{c1} и t_{c2} (рис. 2.1, а). На основании гипотезы Фурье поверхностная плотность теплового потока φ , Вт/м, передаваемого через стенку перпендикулярно ее плоскости,

$$\varphi = \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} = \frac{\Delta t}{R_\lambda}. \quad (2.1)$$

Термическое сопротивление теплопроводности однослойной плоской стенки, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2/\text{Вт}$,

$$R_\lambda = \delta/\lambda. \quad (2.2)$$

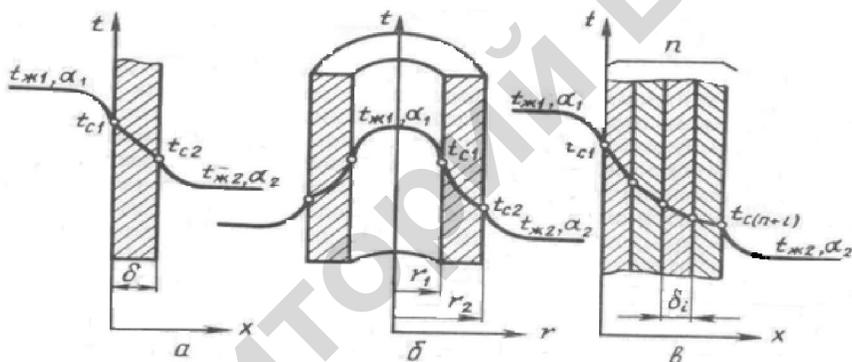


Рис. 2.1. Теплопередача через стенки:
а – плоскую однослойную; б – цилиндрическую; в – многослойную

Для многослойной плоской стенки из n слоев (наружные ограждения электрических водонагревателей, котлов, печей и др., рис. 2.1, в) плотность теплового потока

$$\varphi = \frac{t_{c1} - t_{c(n+1)}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^{i=n} R_{\lambda i}}, \quad (2.3)$$

где t_{c1} , $t_{c(n+1)}$ – температуры наружных поверхностей многослойной стенки, °С.

Полное (суммарное) термическое сопротивление многослойной стенки

$$R_{\lambda i} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (2.4)$$

Для однослойной цилиндрической протяженной стенки с внутренним диаметром $2r_1$ и наружным $2r_2$ (рис. 2.1, б) линейная плотность теплового потока, Вт/м,

$$\varphi_l = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\Delta t}{R_\lambda}, \quad (2.5)$$

где t_{c1} , t_{c2} – температуры внутренней и наружной поверхностей стенки.

Линейное термическое сопротивление теплопроводности цилиндрической стенки, °С· м/Вт,

$$R_\lambda = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (2.6)$$

Форму цилиндрической стенки имеют оболочка и наполнитель трубчатых электронагревателей, изоляция нагревательных проводов и др.

Выражения (2.1), (2.3), (2.5) внешне напоминают закон Ома для электрической цепи: $I = \frac{U}{R}$. Только в первом случае вместо разности электрических потенциалов U имеется в виду разность температурных потенциалов Δt , а вместо электрического сопротивления

тела R термическое сопротивление R_λ теплопроводности. Эта аналогия имеет глубокие физические корни и нередко используется для решения различных задач по теплопередаче методами теории электрических цепей.

Конвекция – процесс переноса теплоты текущей жидкостью или газом из области с одной температурой в область с другой температурой. Конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и потоком жидкости или газа называют *конвективной теплоотдачей*. Различают теплоотдачу при вынужденном движении жидкости или газа (вынужденная конвекция) и свободном движении (естественная конвекция).

Плотность теплового потока φ , Вт/м², передаваемого от поверхности тела, имеющей среднюю температуру t_c , к жидкости (газу), температура которой вдали от тела $t_{ж}$, или в обратном направлении, в простейшем случае определяют по формуле Ньютона – Рихмана

$$\varphi = \alpha(t_c - t_{ж}) = \Delta t / R_\alpha, \quad (2.7)$$

где α – средний от поверхности тела коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); $\Delta t = (t_c - t_{ж})$ – температурный напор от стенки к жидкости.

Термическое сопротивление конвекции, °C·м²/Вт,

$$R_\alpha = 1/\alpha. \quad (2.8)$$

Процессы конвективного теплообмена весьма сложны. Они зависят от физических свойств жидкости (газа), ее скорости, температуры тела и жидкости, формы и размеров тела и других факторов и описываются полуэмпирическими критериальными зависимостями

$$Nu = f(\text{Pr}, \text{Gr}, \text{Re}, l_1/l_0, l_2/l_0); \quad (2.9)$$

критерий Нуссельта

$$\text{Nu} = \alpha l_0 / \lambda_{\text{ж}},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); l_0 – характерный размер тела, м; l_1, l_2 – другие размеры тела; $\lambda_{\text{ж}}$ – теплопроводность жидкости, Вт/(м·°С);
критерий Прандтля

$$\text{Pr} = \nu / a,$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с; a – температуропроводность, м²/с;
критерий Грасгофа

$$\text{Gr} = g l_0^3 \beta \Delta t / \nu^2,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения, 1/°С; Δt – разность между температурами стенки и жидкости, °С;
критерий (число) Рейнольдса

$$\text{Re} = w l_0 / \nu,$$

где w – скорость жидкости или газа, м/с.

Для различных по форме тел и условий теплообмена (свободная или вынужденная конвекция и т. д.) зависимость (2.9) конкретизируют и из нее находят коэффициент теплоотдачи α .

Теплоотдачу на вертикальных плоских или цилиндрических поверхностях при свободном ламинарном движении жидкости или газа (настенные электрообогревательные панели, поверхности радиаторов, наружные поверхности водонагревателей, котлов, печей) описывают критериальным уравнением

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,63(\text{Gr}, \text{Pr})_{\text{ж}}^{0,25} \varepsilon_t, \quad (2.10)$$

где $\varepsilon_t = (\text{Pr}_ж/\text{Pr}_c)^{0,25}$ – поправка на изменение физических свойств в зависимости от температуры; для газов $\varepsilon_t = 1$. Индексы «ж» и «с» относятся соответственно к жидкости (газу) и поверхности.

Из выражения (2.10) находят средний коэффициент теплоотдачи. Для воздушной среды

$$\alpha = 0,63 \left[g\beta\Delta t l^3 / (va) \right]^{0,25} \lambda_{ж} / l_0. \quad (2.11)$$

Определяющим размером l_0 в формуле (2.11) служит высота вертикальной поверхности или диаметр трубы. Физические свойства жидкости принимают по ее температуре за пределами движущегося слоя.

Аналогично рассчитывают коэффициент теплоотдачи для поперечного обтекания пучков труб с поперечными ребрами (оробренные трубчатые электронагреватели в электрокалориферных установках) при их «шахматной» компоновке:

$$\alpha = 0,213 \frac{\lambda}{S_p^{0,35}} \text{Pr}^{0,35} \left(\frac{d}{S_p} \right)^{0,54} \left(\frac{h_p}{S_p} \right)^{0,14} \left(\frac{w}{v} \right)^{0,65}, \quad (2.12)$$

где d – наружный диаметр несущей трубы, м; h_p – высота ребра, м; S_p – шаг ребра, м.

Для других случаев теплоотдачи расчетные формулы приводят в справочной литературе.

Перенос теплоты от одной среды (жидкости или газа) к другой через разделяющую их однослойную или многослойную стенку любой формы называют *теплопередачей*. Такой процесс сопровождается конвективной теплоотдачей на обеих поверхностях стенки и теплопроводностью через стенку.

Пусть заданы толщина δ_i каждого из n слоев многослойной стенки и их теплопроводность λ_i , температура сред $t_{жс1}$, $t_{жс2}$ и коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 по обеим сторонам стенки (рис. 2.1, в). Если условия теплопередачи не изменяются вдоль поверх-

ности стенки, то при равенстве площадей поверхности теплообмена по обеим сторонам стенки, плотность теплового потока φ , Вт/м², от одной среды ($t_{ж1}$) к другой ($t_{ж2}$), направленного перпендикулярно плоскости стенки, определяют по формуле

$$\varphi = (t_{ж1} - t_{ж2}) / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{R_T} = k(t_{ж1} - t_{ж2}). \quad (2.13)$$

Полное термическое сопротивление от горячей среды к холодной, °С· м²/Вт,

$$R_T = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.14)$$

Величина, обратная R_T , называется *коэффициентом теплопередачи*.

$$k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (2.15)$$

При известной величине φ температуру поверхностей стенки определяют по следующим формулам:

$$t_{c1} = t_{ж1} - \frac{\varphi}{\alpha_1}; \quad t_{c2} = t_{ж2} + \frac{\varphi}{\alpha_2}. \quad (2.16)$$

Излучение – процесс переноса теплоты от одного тела к другому посредством электромагнитных волн через разделяющую тела (прозрачную для волн) среду. Обычно наблюдается сложный теплообмен, сочетающий излучение и конвекцию. С повышением температуры интенсивность теплопередачи излучением возрастает быстрее, чем конвекцией, и становится особенно заметной при температуре

поверхности выше 500 °С. Плотность E , Вт/м², потока излучения с поверхности абсолютно черного тела определяют, используя основной закон излучения Стефана – Больцмана:

$$E = \sigma T^4 = 5,67 \left(T/100 \right)^4, \quad (2.17)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана; T – температура излучающей поверхности, К.

Закон Стефана – Больцмана лежит в основе расчета лучистого теплообмена. Для идеализированного случая теплообмена излучением между двумя «серыми» параллельными плоскостями, размеры которых значительно превышают расстояние между ними, и при отсутствии тепловых потерь плотность теплового потока ϕ , Вт/м², передаваемого от излучателя, имеющего температуру T_1 , к нагреваемому телу с температурой T_2 , определяют по формуле

$$\phi = 5,67 c_{\text{пр}} \left[\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right] = \frac{\Delta t}{R_c}, \quad (2.18)$$

где $\Delta t = (t_2 - t_1)$; $t_1 = (T_1 - 273)$; $t_2 = (T_2 - 273)$.

Приведенная излучательная способность, Вт/(м²·К⁴),

$$c_{\text{пр}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}, \quad (2.19)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты тел, участвующих в теплообмене.

Термическое сопротивление излучению, °С·м²/Вт,

$$R_c = \frac{t_1 - t_2}{5,67 c_{\text{пр}} \left[\left(T_1/100 \right)^4 - \left(T_2/100 \right)^4 \right]}. \quad (2.20)$$

В реальных устройствах величина ϕ отличается от вычисленной по формуле (2.18) для идеального случая из-за сложности поверхностей участвующих в теплообмене тел и непрерывного обмена

энергией между ними. В технических расчетах это учитывают введением в выражение (2.18) эмпирических поправочных коэффициентов, полученных для конкретных условий теплообмена.

2.4. Элементы кинетики нагрева

Кинетика нагрева – это зависимость температуры от времени нагрева. Рассмотрим простейший случай нестационарного процесса – нагрев однородного, изотропного тела, имеющего бесконечную теплопроводность. Последнее позволяет исключить необходимость рассмотрения изменения температурного поля в пространстве. Положим, далее, что в процессе нагрева изменяется только температура t тела, а его физические параметры, температура окружающей среды и условия теплообмена остаются неизменными.

Уравнение теплового баланса за время dt :

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3, \quad (2.21)$$

где dQ_1 , dQ_2 , dQ_3 – количество теплоты, подводимой к телу за время dt , идущей на изменение энтальпии тела, отдаваемой в окружающую среду.

Составляющие теплового баланса:

$$dQ_1 = P d\tau; \quad dQ_2 = m c dt; \quad dQ_3 = k(t - t_0) A d\tau,$$

где P – мощность, подводимая к телу, Вт; m – масса тела, кг; c – средняя за период нагрева удельная теплоемкость тела, Дж/(кг·°C); dt – изменение температуры тела за время $d\tau$, °C; k – коэффициент теплопередачи от нагреваемого тела в окружающую среду, Вт/м²·°C; t_0 – температура окружающей среды, °C; A – площадь поверхности теплопередачи, м².

Тогда уравнение (2.21) можно представить в виде

$$P d\tau = m c dt + k(t - t_0) A d\tau, \quad (2.22)$$

или

$$mc \frac{dt}{(kA d\tau)} + t - [t_0 + P/(kA)] = 0. \quad (2.23)$$

Обозначим постоянную времени нагрева, с,

$$T = mc / kA, \quad (2.24)$$

установившуюся температуру тела (при $\frac{dt}{d\tau} = 0$)

$$t_y = t_0 + \frac{P}{kA}. \quad (2.25)$$

Тогда дифференциальное уравнение (2.23) можно записать в виде

$$T \frac{dt}{d\tau} + t - t_y = 0,$$

решение которого

$$t = t_n e^{-\tau/T} + t_y (1 - e^{-\tau/T}), \quad (2.26)$$

где t_n – температура тела в начальный момент времени (при $\tau = 0$).

Зависимость (2.26) – уравнение нагрева однородного изотропно-го тела. Графически оно представляет собой экспоненту (рис. 2.2), начинающуюся с температуры $t = t_n$ при $\tau = 0$ и асимптотически приближающуюся к установившемуся значению t_y при $\tau = \infty$. Практически уже при $\tau = (3-4)T$ наступает установившийся режим и $t = (0,95 - 0,98)t_y$.

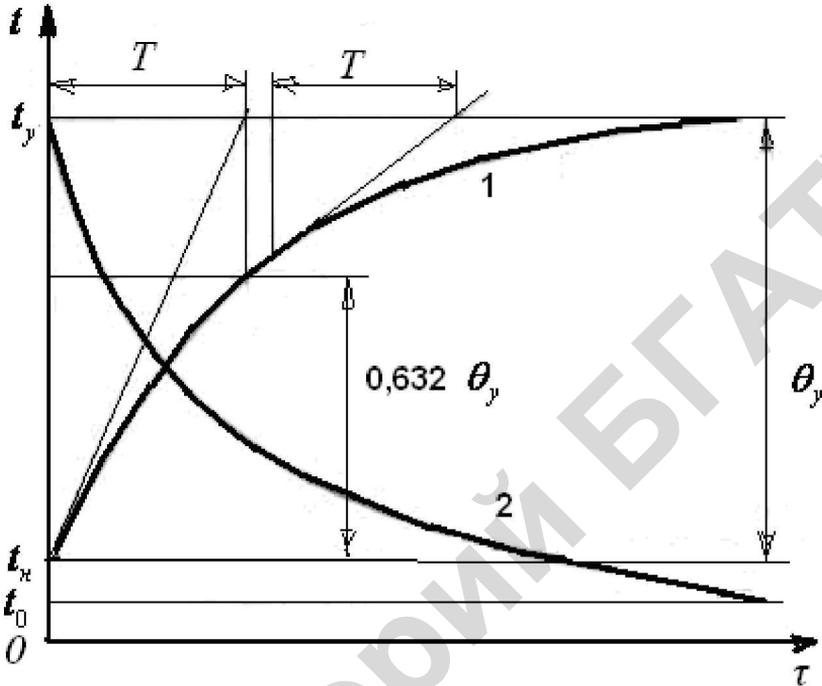


Рис. 2.2. Кривые нагрева (1) и охлаждения (2) однородного тела

Из уравнения (2.26) нетрудно получить выражение для определения времени нагрева тела до любой температуры t в промежутке от t_n до t_y :

$$\tau = T \ln \left[\frac{(t_y - t_n)}{(t_y - t)} \right]. \quad (2.27)$$

Обозначим через $\theta = (t - t_n)$, $\theta_y = (t_y - t_n)$ текущее и установившееся превышение температуры тела над его начальной температурой, тогда уравнение (2.26) можно представить в виде

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-\tau/T}). \quad (2.28)$$

Постоянная времени нагрева T численно равна отношению теплоемкости тела к его теплоотдающей способности, определяемой по формуле (2.24), и представляет собой время, в течение которого тело достигло бы установившейся температуры при адиабатном нагреве, т. е. без теплоотдачи в окружающую среду. При этих условиях температура тела изменялась бы во времени по прямой, в чем нетрудно убедиться, подставив в выражение (2.22) значение $k = 0$. На этом основано графическое определение постоянной времени T (рис. 2.2). Нетрудно также убедиться, например, из выражения (2.28), что при $\tau = T$ $\theta = 0,632\theta_y$.

Постоянная времени, как это видно из формулы (2.24), не зависит от мощности, подводимой к телу, а только от условий его теплообмена с окружающей средой.

Аналогично можно вывести уравнение охлаждения, приняв в формуле (2.22) $P = 0$:

$$t = t_y e^{-\tau/T} + t_0 \left(1 - e^{-\tau/T}\right), \quad (2.29)$$

или

$$\theta = \theta_y e^{-\tau/T}, \quad (2.30)$$

где $\theta_y = (t_y - t_0)$ – установившееся превышение температуры тела над температурой окружающей среды; T – постоянная времени охлаждения, которая в общем случае не равна постоянной времени нагрева.

Процессы нагрева сложных реальных объектов описываются дифференциальными уравнениями более высоких порядков (второго, третьего), которые не всегда можно решить простым способом. Кривые нагрева реальных объектов отличаются от показанных на рис. 2.2 в силу тех упрощений, которые были приняты при выводе уравнения (2.26). Однако общий принцип кинетики нагрева и характеризующие его параметры остаются неизменными.

Важная характеристика теплового процесса – скорость нагрева, которую можно получить, продифференцировав уравнение (2.26) по τ :

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{t_y - t_H}{T} e^{-\tau/T} = \frac{t - t_H}{T} \frac{e^{-\tau/T}}{1 - e^{-\tau/T}}. \quad (2.31)$$

Скорость нагрева ограничивается технологическими требованиями, например, исключением возможности порчи нагреваемых материалов, что особенно важно при тепловой обработке сельскохозяйственной продукции (сушка зерна, пастеризация молока, запаривание кормов).

2.5. Расчет мощности и основных энергетических и конструктивных параметров электротермического оборудования

Тепловую мощность оборудования находят, рассматривая энергетический баланс электротермического процесса. При нагреве, испарении или плавлении материалов общий вид баланса

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{пол}} + \Delta Q_T + \Delta Q_э, \quad (2.32)$$

где $Q_{\text{потр}}$ – энергия, потребляемая из сети, Дж; $Q_{\text{пол}}$ – полезная энергия, Дж; ΔQ_T – сумма тепловых потерь в окружающую среду, на нагрев конструкций и др., Дж; $\Delta Q_э$ – потери энергии в электрических элементах установки, Дж.

Энергия $Q_{\text{пол}}$ расходуется на изменение энтальпии материалов и не зависит от способа нагрева.

$$Q_{\text{пол}} = m(h_2 - h_1), \quad (2.33)$$

где m – масса нагреваемого материала, кг; h_1 и h_2 – начальная и конечная энтальпии материала, Дж/кг.

Если в процессе нагрева удельная теплоемкость материала c , Дж/(кг·°С), изменяется мало, то расчет упрощают и ведут по изменению температуры материала от начальной t_1 до конечной t_2 :

$$Q_{\text{пол}} = mc(t_2 - t_1). \quad (2.34)$$

Аналогично выражению (2.32) выглядит баланс мощностей (рис. 2.3):

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{пол}} + \Delta P_{\text{T}} + \Delta P_{\text{Э}}. \quad (2.35)$$

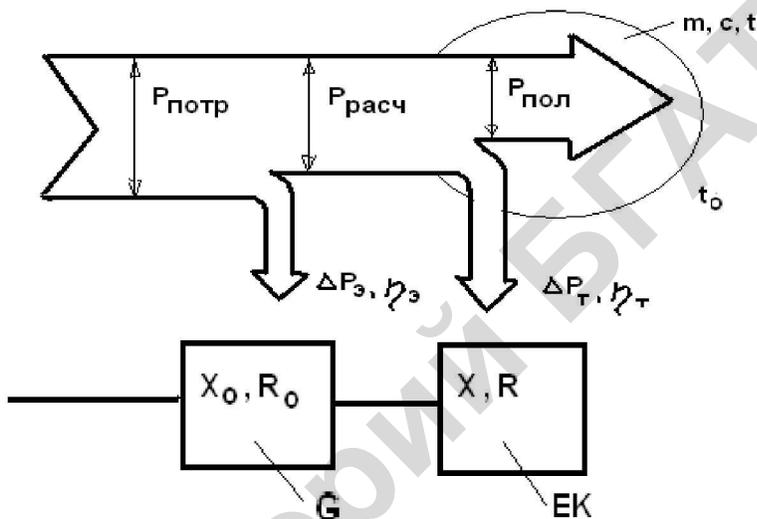


Рис. 2.3. Энергетическая диаграмма электротермической установки:
 ЕК – электротермическое оборудование (печь); G – источник питания

Полезную мощность $P_{\text{пол}}$ можно рассчитать по упрощенным формулам.

Для установок *периодического действия* (нестационарные тепловые процессы) средняя полезная мощность за время τ :
 при нагреве материалов

$$P_{\text{пол}} = m(h_2 - h_1) / \tau = mc(t_2 - t_1) / \tau; \quad (2.36)$$

при плавлении и испарении материалов

$$P_{\text{пол}} = m(h_2 - h_1) / \tau = m[c(t_2 - t_1) + q] / \tau, \quad (2.37)$$

где t_2 и q – температура и удельная теплота фазового превращения, °С и Дж/кг.

Для установок *непрерывного действия* производительностью m_τ , кг/с (стационарные тепловые процессы):
при нагреве

$$P_{\text{пол}} = m_\tau(h_2 - h_1) = m_\tau c(t_2 - t_1); \quad (2.38)$$

при плавлении и испарении

$$P_{\text{пол}} = m_\tau(h_2 - h_1) = m_\tau [c(t_2 - t_1) + q]. \quad (2.39)$$

Расчетная (выделяемая) мощность $P_{\text{расч}}$ помимо полезной включает тепловые потери ΔP_T , которые в технических расчетах учитывают тепловым КПД η_T :

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{пол}} + \Delta P_T = P_{\text{пол}}/\eta_T. \quad (2.40)$$

Мощность $P_{\text{потр}}$, потребляемая установкой из сети, больше расчетной на величину потерь в электрических элементах установки ΔP_ε (токопроводах, источниках питания и др.). Эти потери учитывают электрическим КПД η_ε :

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{расч}} + \Delta P_\varepsilon = P_{\text{расч}}/\eta_\varepsilon = P_{\text{пол}}/(\eta_T \eta_\varepsilon) = P_{\text{пол}}/\eta, \quad (2.41)$$

где $\eta = \eta_T \eta_\varepsilon$ – общий КПД установки.

Установленная мощность $P_{\text{уст}}$ должна быть больше потребляемой:

$$P_{\text{уст}} = k_3 P_{\text{потр}} = k_3 P_{\text{потр}}/\eta, \quad (2.42)$$

где $k_3 = 1,1-1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий необходимость увеличения мощности из-за возможного снижения питающего напряжения, старения нагревателей и др.

При проектировании объектов мощность $P_{\text{уст}}$ электротермических установок определяют по удельному расходу электроэнергии на нагрев:

$$P_{\text{уст}} = m_\tau a,$$

где a – удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг, кВт·ч/м³ и т. п.

Номинальная мощность – мощность, развиваемая установкой при номинальных параметрах работы (питающем напряжении, частоте тока, сопротивлении нагревателей и др.) и указываемая на заводском щитке и в паспорте установки. Для электротермического оборудования номинальная мощность обычно соответствует их полезной мощности.

Энергетическими параметрами электротермического оборудования служат тепловой КПД η_T , электрический КПД η_E и коэффициент мощности $\cos\phi$.

Общие выражения для η_T и η_E вытекают из формул (2.40) и (2.41):

$$\eta_T = P_{\text{пол}}/P_{\text{расч}} = P_{\text{пол}}/(P_{\text{пол}} + \Delta P_T) = P_{\text{пол}}/(P_{\text{пол}} + \Delta P_K + \Delta P_C), \quad (2.43)$$

где ΔP_K и ΔP_C – потери на нагрев конструкций и окружающей среды, Вт;

$$\eta_E = P_{\text{расч}}/P_{\text{потр}} = P_{\text{расч}}/(P_{\text{расч}} + \Delta P_E) = (P_{\text{пол}} + \Delta P_T)/(P_{\text{пол}} + \Delta P_T + \Delta P_E). \quad (2.44)$$

Потери ΔP_K находят по формуле (2.36) для каждого элемента конструкции и затем суммируют их, а потери ΔP_C определяют по формуле теплопередачи (2.13). Тепловой КПД η_T возрастает с увеличением скорости нагрева. В установках длительного нагрева для повышения КПД применяют тепловую изоляцию, снижая тем самым потери теплоты. В быстродействующих установках потери значительно меньше и теплоизоляция менее эффективна. Значение η_T возрастает с уменьшением удельной площади ограждающей поверхности.

$$A_{\text{уд}} = \sum A_i/V,$$

где $\sum A_i$ – суммарная площадь теплообогреваемых поверхностей; V – объем рабочей камеры.

Оборудование большей вместимости (производительности) имеет при прочих равных условиях и более высокий КПД. С повышением температуры t величина η_T снижается, поэтому (если в этом нет необходимости) не следует завышать рабочую температуру.

Ориентировочные значения теплового КПД для некоторых ЭНУ сельскохозяйственного применения приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Ориентировочные значения теплового КПД для некоторых ЭНУ сельскохозяйственного назначения

Электронагревательные установки	Значения теплового КПД η_{Γ}
Электрические водонагреватели-термосы	0,85 – 0,95
Проточные элементные водонагреватели	0,95 – 0,98
Электродные водогрейные и паровые котлы	0,78 – 0,96
Электрические калориферы	0,85 – 1,0
Электрические печи сопротивления	0,70 – 0,90
Электросварочные установки	0,50 – 0,95
Высокочастотные установки	0,80 – 0,90
Бытовые электроприборы	0,60 – 0,80

Потери в электрических элементах установки (подводящих проводах, нагревательных трансформаторах, преобразователях частоты и др.) учитываются электрическим КПД $\eta_{\text{э}}$, который для каждого элемента или установки в целом определяют методами, рассматриваемыми в соответствующих курсах по электрооборудованию.

Простейшие выражения для $\eta_{\text{э}}$ и $\cos\varphi$ установки, включающей источник питания G с активным R_0 и реактивным X_0 сопротивлениями и оборудование (печь) EK с параметрами R и X (рис. 2.3), имеют вид:

$$\eta_{\text{э}} = 1 / (1 + R_0 / R);$$

$$\cos \varphi = 1 / \sqrt{1 + [(X + X_0) / (R + R_0)]^2}.$$

Как видно, величина $\eta_{\text{э}}$ уменьшается с увеличением активного сопротивления R_0 , а $\cos\varphi$ – с возрастанием суммарного реактивного сопротивления $(X_0 + X)$. При питании установок непосредственно от сети короткими токопроводами $R_0 = 0$, $X_0 = 0$ и $\eta_{\text{э}} = 1$.

Расчет конструктивных размеров и выбор тепловой изоляции.

В ходе теплового расчета предварительно разрабатывается эскизный проект, и намечаются основные размеры установки. При этом руководствуются типом и назначением установки, ее вместимостью, производительностью и т. п.

Форму и внутренние размеры рабочего пространства устанавливают, исходя из условий размещения нагреваемого материала, нагревателей, приборов контроля и измерения. При этом принимаются во внимание соображения механической прочности, удобства обслуживания. Во всех случаях следует стремиться к тому, чтобы установка имела минимальную удельную ограждающую поверхность.

При уменьшении $A_{уд}$ снижается расход конструктивных материалов и уменьшаются потери теплоты. Наименьшую удельную ограждающую поверхность имеют шар ($4,8 \text{ м}^{-1}$), цилиндр ($5,5 \text{ м}^{-1}$) с двумя днищами при отношении высоты к диаметру, равном единице, куб (6 м^{-1}).

При предварительной разработке формы широко используют имеющийся инженерный и практический опыт по проектированию нагревательного оборудования аналогичного назначения.

Тепловая изоляция установок снижает потери энергии в окружающую среду и, следовательно, годовые издержки производства.

Расчету тепловой изоляции предшествует ее выбор. Вид изоляции определяется характером установки, температурными режимами, окружающей средой (сухая, влажная), ее температурой, санитарно-гигиеническими условиями.

Изоляция должна обладать достаточной механической прочностью, противостоять высоким температурам, иметь низкую гигроскопичность. Для удовлетворения этих требований иногда прибегают к многослойной изоляции. Слои, прилегающие к зоне высоких температур, выполняют из огнестойкого материала (огнеупоры, асбест), затем используют более эффективный по теплоизоляционным свойствам материал (минеральная вата, стекловолокно, дерево и др.).

Особое внимание уделяется выбору изоляции для установок в сырых помещениях и при низких температурах окружающей среды. В этих условиях существует опасность насыщения изоляции влагой, вследствие чего теряются теплоизоляционные качества.

После выбора типа тепловой изоляции задача расчета сводится к определению оптимальной ее толщины. Увеличение толщины снижает потери энергии и, соответственно, издержки затрат $I_{э}$, но при этом возрастают расходы на изоляцию – капитальные вложения $K_{и}$ (рис. 2.4).

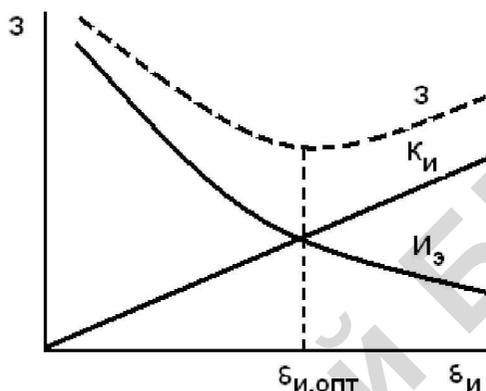


Рис. 2.4. Зависимость приведенных затрат на тепловую изоляцию от ее толщины

Следовательно, расчет изоляции является типовой технико-экономической задачей по определению минимума удельных приведенных затрат.

Толщину изоляции корпуса электронагревательной установки можно определить по формуле

$$\delta_{и} = R_{и} \sqrt{\frac{\tau S_{э} (t_{н} - t_{с})}{S_{и} (A + E_{н}) \lambda_{и}}},$$

где τ – продолжительность работы установки за год, сут; $S_{э}$, $S_{и}$ – стоимость электроэнергии, руб./Дж, и теплоизоляции, руб./м³; $\lambda_{и}$ – теплопроводность изоляции, Вт/(м·°C); α – коэффициент теплоотдачи от поверхности установки к воздуху, Вт/(м²·°C); A – годовые амортизационные отчисления, о.е.; $t_{н}$, $t_{с}$ – температуры наружной и внутренней стенок, °C; $R_{и}$ – термическое сопротивление материала изоляции, м²·°C/Вт; $E_{н}$ – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений, о.е.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные способы электрического нагрева.
2. Дайте классификацию электротермического оборудования.
3. Приведите назначение основных видов расчета электротермического оборудования.
4. Назовите основные законы теплопередачи, используемые в электротермическом оборудовании.
5. Объясните принцип расчета тепловой изоляции.
6. Приведите формулы для определения полезной мощности при нагреве, плавлении и испарении материалов для установок периодического и непрерывного действия.
7. Приведите формулы для определения расчетной, потребляемой и установленной мощностей.
8. Перечислите факторы, влияющие на тепловой КПД, электрический КПД, коэффициент мощности.
9. Приведите уравнение нагрева однородного изотропного тела.
10. Укажите постоянную времени нагрева и способы ее определения.
11. Определите мощность батареи отопления площадью 2 м^2 с температурой $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура воздуха в помещении составляет $20 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент теплопередачи равен $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.
12. Определите мощность дистиллятора воды производительностью $1 \text{ кг}/\text{ч}$. Начальная температура воды составляет $10 \text{ }^\circ\text{C}$, удельная теплота парообразования – $2300 \text{ кДж}/\text{кг}$.
13. Определите время нагрева воды массой 100 кг с $10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $90 \text{ }^\circ\text{C}$ электрическим водонагревателем мощностью 10 кВт .

Практическое занятие 1

Тепловой расчет электротермического оборудования

Задача занятия. Определить тепловую мощность электротермического оборудования, геометрические размеры, толщину тепловой изоляции, тепловой КПД и др.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе, литературе [3], изучить методику теплового расчета электротермичес-

кого оборудования, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 1.1. Рассчитать полезную, расчетную, потребляемую и установленную мощности для нагрева однородного изотропного материала, постоянную времени нагрева и текущее значение температуры нагреваемого материала, толщину изоляции корпуса нагревательной установки. В качестве изоляции принять стекловату теплопроводностью $\lambda_{\text{н}} = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, стоимостью $S_{\text{н}} = 250\,000 \text{ руб.}/\text{м}^3$. Стоимость электроэнергии $S_{\text{э}} = 33\,000 \text{ руб.}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$, годовые амортизационные отчисления $A = 0,14$, нормативный коэффициент эффективности капиталовложений $E_{\text{н}} = 0,15$, средневзвешенный тепловой КПД $\eta_{\text{T}} = 0,9$, электрический КПД $\eta_{\text{Т}} = 0,85$, температура окружающей среды $t_{\text{с}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица ПЗ.1.1

Исходные данные к задаче 1.1

Номер варианта	Масса материала m , кг	Температура, $^\circ\text{C}$		Время нагрева τ , с	Вид нагреваемого материала	Форма емкости	Коэффициент теплоотдачи k , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$
		начальная t_1	конечная t_2				
1	200	10	90	3600	вода	цилиндр	30
2	200	8	88	3600	молоко	цилиндр	30
3	200	5	70	3600	тех. жир	куб	30
4	200	6	76	3600	вода	куб	30
5	200	8	88	3600	меласса	цилиндр	30
6	300	10	90	5400	молоко	цилиндр	35
7	300	8	73	5400	вода	цилиндр	35
8	300	5	65	5400	молоко	куб	35
9	300	6	71	5400	меласса	куб	35
10	300	7	87	4800	вода	куб	40

Окончание табл. ПЗ.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
11	400	10	90	4800	вода	цилиндр	40
12	400	12	92	4800	молоко	цилиндр	40
13	400	8	98	4800	молоко	цилиндр	40
14	400	6	96	4800	меласса	куб	40
15	400	4	84	4800	меласса	куб	45
16	250	10	80	3600	вода	куб	45
17	250	8	78	3600	меласса	цилиндр	45
18	250	6	66	3600	молоко	цилиндр	45
19	250	4	64	3600	молоко	цилиндр	45
20	250	5	75	3600	меласса	куб	50
21	350	10	80	4200	вода	куб	60
22	350	8	88	4200	вода	куб	55
23	350	6	96	4200	молоко	цилиндр	45
24	350	4	84	4200	молоко	куб	40
25	350	5	85	4200	меласса	цилиндр	35

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Термическое сопротивление при теплопередаче через плоскую однослойную стенку.
2. Термическое сопротивление при теплопередаче конвекцией.
3. Физический смысл коэффициента теплопередачи.
4. Термическое сопротивление при теплопередаче излучением.
5. Полезная, расчетная, потребляемая, установленная и номинальная мощности ЭТО.
6. Тепловой и электрический КПД.
7. Понятие постоянной времени нагрева.

3. РЕЗИСТИВНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

3.1. Прямой электрический нагрев

3.1.1. Физические основы и способы резистивного электрического нагрева

Свободный заряд e в проводнике, к которому приложено электрическое поле напряженностью E , испытывает действие силы

$$\bar{F}_i = e\bar{E} \quad (3.1)$$

и приобретает ускорение

$$\bar{a}_i = \frac{\bar{F}_i}{m}, \quad (3.2)$$

где m – масса заряда, кг.

За время свободного пробега τ_i заряд с начальной скоростью $\mathcal{G}_{ин}$ приобретает дополнительную скорость

$$\mathcal{G}_{ид} = \mathcal{G}_{ин} - \bar{a}_i\tau_i = \bar{\mathcal{G}}_{ин} - \frac{e\bar{E}}{m}\tau_i. \quad (3.3)$$

Кинетическая энергия заряда возрастает:

$$W = \frac{1}{2} m \left(\bar{\mathcal{G}}_{ид}^2 - \bar{\mathcal{G}}_{ин}^2 \right) = -e\bar{E}\bar{\mathcal{G}}_{ин}^2 \tau_i + \frac{e^2 E^2 \tau_i^2}{2m}. \quad (3.4)$$

Учитывая, что скорости движения зарядов по направлениям в отсутствие электрического поля распределены случайно, можно принять

$$-e\bar{E}\sum\bar{g}_{ин}^2\tau_i = 0. \quad (3.5)$$

Тогда увеличение кинетической энергии n частиц в единице объема проводника

$$W = \frac{ne^2}{m}E^2\tau^2, \quad (3.6)$$

где τ – средняя продолжительность свободного пробега заряда, с.

Приняв во внимание, что удельная электрическая проводимость материала проводника,

$$\gamma = \frac{ne^2}{m}\tau, \quad (3.7)$$

тогда электрическая мощность, преобразующаяся в теплоту в единице объема этого проводника,

$$P = \gamma E^2. \quad (3.8)$$

В элементе проводника объемом dV

$$dP = \gamma E^2 dV \quad \text{или} \quad dP = \rho j^2 dV, \quad (3.9)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом·м; j – плотность тока в проводнике, А/м².

Чтобы определить мощность, выделяющуюся в проводнике, необходимо проинтегрировать

$$P = \iiint \rho j^2 dV \quad \text{или} \quad P = \iiint \bar{j}\bar{E}dV. \quad (3.10)$$

Рассмотрим тонкую трубку тока сечением S и длиной l от точки A до точки B . Мощность, рассеянная в этой трубке,

$$\int_A^B \bar{j} \bar{E} d\bar{S} d\bar{l}. \quad (3.11)$$

Так как плотность тока по сечению трубки одинакова, т. е.

$$\bar{j} d\bar{S} = \bar{j}_1 d\bar{S}_1,$$

интеграл (3.11) становится

$$\bar{j}_1 d\bar{S}_1 \int_A^B \bar{E} d\bar{l} = \bar{j}_1 d\bar{S}_1 (U_A - U_B).$$

Применительно к сумме трубок тока

$$P = \iint_{S_1} (U_A - U_B) \bar{j}_1 d\bar{S}_1 = (U_A - U_B) I$$

и окончательно, так как $U_A - U_B = IR$, то

$$P = I^2 R \quad \text{или} \quad P = \frac{U^2}{R}. \quad (3.12)$$

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной (3.8) и интегральной (3.12) форме показывает, что электрическая мощность, преобразованная в теплоту при протекании тока в проводнике пропорциональна квадрату напряжения и обратно пропорциональна сопротивлению проводника. Энергия электрического поля расходуется на увеличение скорости движения свободных зарядов, которые взаимодействуют с другими элементарными частицами, увеличивают скорость их колебательного движения и, следовательно, температуру проводника в целом.

3.1.2. Электрическое сопротивление проводников 1-го и 2-го рода

Электрическое сопротивление проводников I рода. Сопротивление проводника постоянному току называют *омическим* и определяют по формуле

$$R_o = \rho l / S . \quad (3.13)$$

Сопротивление безиндуктивных металлических проводников переменному току называют *активным*. Оно больше омического вследствие поверхностного эффекта:

$$R_a = k_{\Pi} \rho l / S , \quad (3.14)$$

где $k_{\Pi} = R_a / R_o$ – коэффициент поверхностного эффекта.

Поверхностный эффект проявляется в уменьшении плотности тока от поверхности в глубь проводника вследствие затухания падающей на проводник электромагнитной волны. Коэффициент k_{Π} представляет собой сложную функцию физических свойств материала, размеров проводника и частоты тока. Он заметно проявляется лишь при высоких частотах. На промышленной частоте его влияние на немагнитные материалы незначительно и им пренебрегают, принимая $k_{\Pi} = 1$.

У ферромагнитных материалов, имеющих высокую магнитную проницаемость, глубина проникновения токов гораздо меньше, чем у немагнитных. Вследствие этого у ферромагнитных материалов поверхностный эффект заметно проявляется даже на промышленной частоте.

В приближенных расчетах величину k_{Π} определяют по эмпирическим зависимостям. Для малоуглеродистых сталей

$$k_{\Pi} = 1 + 0,84 \epsilon_s^4 . \quad (3.15)$$

Безразмерный параметр

$$\epsilon_s = \delta k, \quad (3.16)$$

где k – коэффициент затухания волны; $\delta = S/\Pi$ – толщина проводника любой формы поперечного сечения, м; S и Π – площадь поверхности сечения и его периметр, м², м; для цилиндрического проводника $\delta = (\pi d^2/4)/(\pi d) = d/4$; для ленты толщиной a и шириной b при $b/a < 0$ $\delta = ab/[2(a+b)]$.

Из анализа зависимости (3.15) следует, что при $\epsilon_s < 0,6$ можно принять $k_{\Pi} \approx 1$.

Удельное сопротивление ρ материалов – функция их температуры. Зависимость $\rho(t)$ называется *температурной характеристикой* сопротивления материалов. У металлов величина ρ , как правило, возрастает с повышением температуры t и для любого значения t определяется формулой

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots), \quad (3.17)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление проводника при 20 °С; α , β , γ – постоянные коэффициенты; $\theta = (t - 20)$ – превышение температуры проводника более 20 °С.

В практических расчетах ограничиваются первыми двумя членами ряда (3.17), принимая

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + \alpha\theta). \quad (3.18)$$

Величина α , °С⁻¹, называемая температурным коэффициентом сопротивления, – одна из важных физических характеристик проводника.

Электрическое сопротивление проводников II рода. К проводникам II рода относят водные растворы кислот, солей, щелочей, а также различные жидкие и влагосодержащие материалы (молоко, влажные корма, почва).

Дистиллированная вода имеет удельное электрическое сопротивление порядка 10^4 Ом·м и практически не проводит электрический ток, а химически чистая вода является хорошим диэлектриком. «Обычная» вода содержит в растворенном виде соли и другие химические соединения, молекулы которых диссоциируют в воде на ионы, сообщая ей ионную (электролитическую) проводимость. Удельное электрическое сопротивление воды зависит от концентрации солей и приближенно может быть определено по эмпирической формуле

$$\rho_{20} = 8 \cdot 10^3 / C,$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление проводника при 20°C , Ом·м; C – суммарная концентрация солей, мг/л.

Атмосферная вода содержит растворенных солей не более 50 мг/л, воды рек – 500–600 мг/л, подземные воды – от 100 мг/л до нескольких граммов на литр. Наиболее часто встречающиеся значения ρ_{20} для воды находятся в диапазоне 10–30 См·м.

Электрическое сопротивление проводников II рода существенно зависит от температуры. С ее возрастанием увеличиваются степень диссоциации молекул солей на ионы и их подвижность, вследствие чего проводимость повышается, а сопротивление снижается. Для любой температуры t до начала заметного парообразования удельная электрическая проводимость воды, Ом·м⁻¹, определяется линейной зависимостью

$$\gamma_t = \gamma_{20} [1 + \alpha(t - 20)],$$

где γ_{20} – удельная проводимость воды при 20°C ; α – температурный коэффициент проводимости, равный $0,025$ – $0,035^\circ\text{C}^{-1}$.

В технических расчетах обычно пользуются не проводимостью, а удельным сопротивлением

$$\rho_t = 1 / \gamma_t = \rho_{20} / [1 + \alpha(t - 20)] \quad (3.19)$$

и его упрощенной зависимостью $\rho(t)$, принимая $\alpha = 0,025^\circ\text{C}^{-1}$. Тогда выражение (3.19) примет вид

$$\rho_t = 40\rho_{20} / (t + 20). \quad (3.20)$$

В диапазоне температур 20–100 °С удельное сопротивление воды возрастает в 3–5 раз, во столько же раз изменяется мощность, потребляемая из сети. Это один из существенных недостатков электродного нагрева, приводящий к завышению сечения питающих проводов и усложняющий расчет установок.

Удельное сопротивление воды подчиняется зависимости (3.20) только до наступления заметного парообразования, интенсивность которого зависит от давления и плотности тока на электродах. Пар не является проводником тока, и поэтому при парообразовании удельное сопротивление воды возрастает. В расчетах это учитывается коэффициентом β , зависящим от давления и плотности тока:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{в}}\beta = \rho_{\text{в}}\alpha e^{kj}, \quad (3.21)$$

где $\rho_{\text{см}}$ – удельное сопротивление смеси «вода – пар»; $\rho_{\text{в}}$ – удельное сопротивление воды без заметного парообразования; α – постоянная, равная для воды 0,925; k – величина, зависящая от давления в котле (для сельскохозяйственных парообразователей можно принять $k = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{А}$); j – плотность тока на электродах, $\text{А}/\text{м}^2$.

При нормальном давлении влияние парообразования сказывается при температуре выше 75 °С. Для паровых котлов коэффициент β достигает значения 1,5.

3.1.3. Электроконтактный нагрев

Электроконтактный нагрев деталей простой формы (валов, осей, лент) (рис. 3.1) используют при их термической и механической обработке. Деталь (заготовку) включают в электрическую цепь и нагревают протекающим по ней электрическим током. Так как сопротивление детали мало, то, согласно уравнению (3.12), для нагрева необходим ток большой силы, который подводят к ней при помощи массивных медных или бронзовых зажимов (контактов). В установках непрерывного действия ток подводится к заготовке с помощью полужидкостных или жидкостных контактов.

Нагревать деталь можно постоянным или переменным током, однако практически применяется только переменный ток, так как необходимые для нагрева токи в сотни и тысячи ампер при напря-

жении от десятых долей Вольт до 24 В могут быть наиболее просто получены лишь при помощи трансформаторов переменного тока. Трудность подвода тока к детали – один из существенных недостатков контактного нагрева. Зажимы должны иметь хороший контакт с деталью. В промышленных установках для этого применяют пневмо- и гидроприводы, для снижения температуры в контактах их делают водоохлаждаемыми.

Преимущества электроконтактного нагрева деталей: высокая скорость нагрева (10–40 °С/с), что позволяет получать структуру металла более высокого качества, чем при нагреве в печах, значительно меньшее (в 9–10 раз) окисление и угар металла и др. Однако таким способом можно нагревать тела простой формы, и для этого требуются специальные нагревательные трансформаторы на большие вторичные токи.

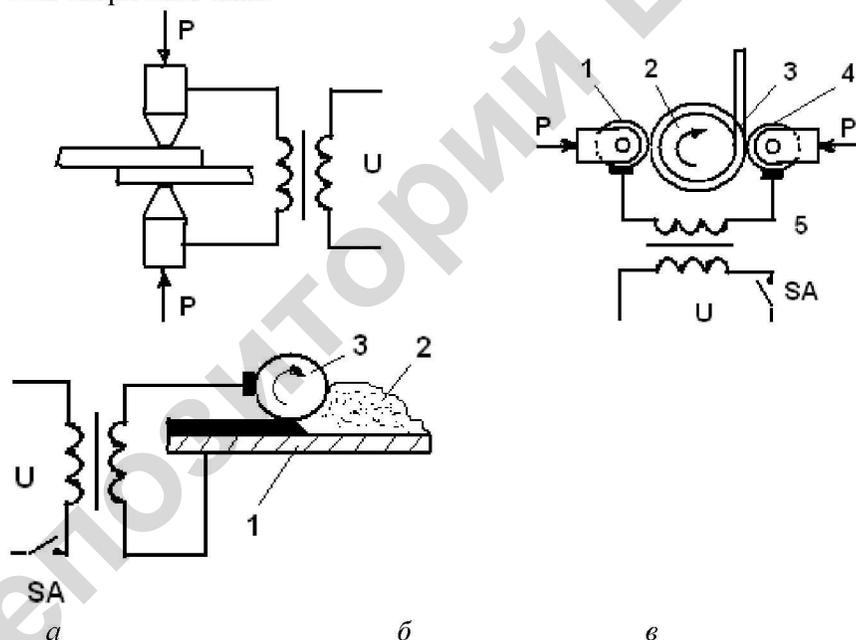


Рис. 3.1. Схемы электроконтактного нагрева:
a – при сварке; *б* – при наплавке (приварке); *в* – при припекании;
SA – прерыватель; *P* – давление на электроды

Электроконтактную сварку (рис. 3.1, а) применяют для создания неразъемного соединения металлических деталей путем прямого электронагрева мест соприкосновения до пластического состояния и механического сдавливания (осадки). Переходное сопротивление в месте соприкосновения значительно превышает сопротивление свариваемых деталей. Поэтому сами детали от тока нагреваются очень мало, тогда как в стыках выделяется большое количество теплоты.

Существует три разновидности контактной сварки: стыковая, точечная и роликовая (шовная). Контактная сварка отличается высокой экономичностью и получила большое распространение в машиностроении и ремонтном производстве.

Электроконтактную наплавку (приварку) (рис. 3.1, б) применяют для восстановления изношенных наружных и внутренних цилиндрических поверхностей. Деталь 2 укрепляют в центрах или патроне токарного станка и приводят во вращение с небольшой скоростью. Наплавку ведут присадочной проволокой 3, которой обвивают деталь и приваривают к ней электроконтактным способом. Приваривают импульсами тока $(5-20) \cdot 10^3$ А и при длительности процесса 0,04–0,08 с. Ток к детали и присадочной проволоке подводят от вторичной обмотки сварочного трансформатора 5 при помощи роликов 1 и 4, которые одновременно создают необходимое контактное давление между деталью и проволокой. Коммутацию осуществляют прерывателем SA в первичной обмотке трансформатора.

Электроконтактное припекание (рис. 3.1, в) применяют для нанесения порошковых покрытий с целью упрочнения деталей с плоской и цилиндрической поверхностями. Наносимая на поверхность детали 1 порошковая шихта 2 уплотняется катком-электродом 3 и одновременно нагревается током, протекающим через шихту между катком-электродом и упрочняемой поверхностью. Высокое качество покрытия достигается при импульсном режиме пропускания тока, осуществляемом прерывателем SA.

3.1.4. Расчет параметров и выбор источника питания для электроконтактного нагрева

Задача выбора. Определить значения расчетной длительной мощности и напряжения при электроконтактном нагреве и по ним выбрать понижающий трансформатор.

Расчетная длительная мощность трансформатора, ВА,

$$S = S_p / \sqrt{\text{ПВ}}. \quad (3.22)$$

Расчетная полная мощность трансформатора

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi}. \quad (3.23)$$

Повторность включения трансформатора

$$\text{ПВ} = \frac{\tau}{\tau + \tau_{\text{п}}}, \quad (3.24)$$

где τ – время нагрева, с; $\tau_{\text{п}} = (0,15-0,25)\tau$ – время паузы, затраченное на вспомогательные операции.

Время нагрева

$$\tau = \frac{m_l c (t_2 - t_1)}{p_l}, \quad (3.25)$$

где m_l – линейная масса заготовки, кг/м; p_l – допустимая линейная мощность при контактном электронагреве, Вт/м. Рекомендуют по условию равномерного распределения температуры по сечению нагреваемого тела принимать $(17-25)10^4$ Вт/м; c – средняя удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С).

Расчетная активная мощность трансформатора, Вт,

$$P_p = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau \eta}, \quad (3.26)$$

где m – масса нагреваемого тела (заготовки), кг; $\eta = \eta_{\text{э}} \eta_{\text{т}}$ – общий КПД нагревательной установки.

Средняя величина напряжения за время нагрева

$$U_{\text{cp}} = 70,7 \frac{l}{\eta \sqrt{\tau}}, \quad (3.27)$$

где l – длина нагреваемой части, м.

Средняя сила тока в заготовке (вторичной цепи трансформатора), А,

$$I_{\text{cp}} = \frac{S}{U_{\text{cp}}}. \quad (3.28)$$

Вторичное напряжение трансформатора

$$U_2 = U_{\text{cp}} + I_{\text{cp}} \sum R_i, \quad (3.29)$$

где $\sum R_i = (0,15-0,2) \cdot 10^{-4}$ Ом – суммарное сопротивление токоподводящих цепей.

По величине S и U_2 выбирают трансформатор для питания установки электроконтактного нагрева (прилож. 1).

3.1.5. Электродный нагрев. Электродные системы, их параметры и расчет

Устройства и области применения. Электродный способ применяют для нагрева проводников II рода: воды, молока, фруктовых и ягодных соков, сочных кормов, почвы, бетона. Материал помещают между электродами и нагревают электрическим током, протекающим по материалу от одного электрода к другому. Как и при электроконтактном нагреве, здесь происходит прямой нагрев – материал служит средой, в которой электрическая энергия преобразуется в тепловую. Электродный нагрев – наиболее простой и экономичный способ нагрева материалов, не требует специальных источников питания или нагревателей из дорогостоящих сплавов. Электроды подводят ток к нагреваемой среде и сами током практи-

чески не нагреваются, изготавливают их из недефицитных материалов, чаще всего из металлов, но они могут быть и неметаллическими (графитовыми, угольными). Во избежание электролиза для электродного нагрева используют только переменный ток. В сельском хозяйстве электродный нагрев широко распространен в электродных водонагревателях, водогрейных и паровых котлах, а также в процессах пастеризации и стерилизации жидких и влажных сред, тепловой обработки кормов. Проводимость влажных материалов обуславливается содержанием воды, поэтому в дальнейшем электродный нагрев рассматривается, главным образом, применительно к нагреву воды, но приводимые зависимости применимы и к нагреву других сред.

Электродная система – совокупность электродов, определенным образом связанных между собой и питающей сетью, предназначенных для подвода тока к нагреваемой среде.

Параметры электродных систем:

форма электродов (пластинчатые, коаксиально-цилиндрические, стержневые, кольцевые, изогнутые под углом 120° и др., рис. 3.2);
 число фаз (одно-, трехфазные);
 количество электродов
 схема соединений («звезда», «треугольник», рис. 3.3);
 материал электродов (сталь X18H80T, титан, реже графит, уголь);
 геометрический коэффициент электродной системы. Характеризует форму электрического поля в межэлектродном пространстве. Определяется исходя из формы электродов, их числа.

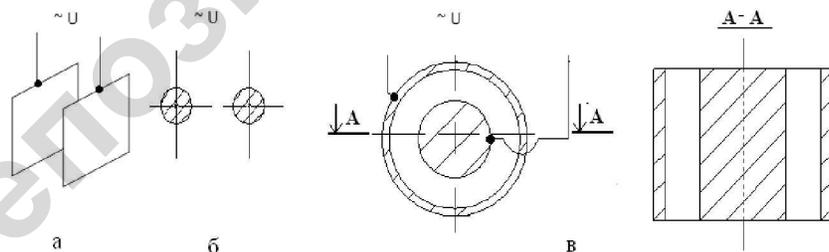


Рис. 3.2. Некоторые формы электродов:

a – пластинчатые; *б* – стержневые; *в* – коаксиально-цилиндрические

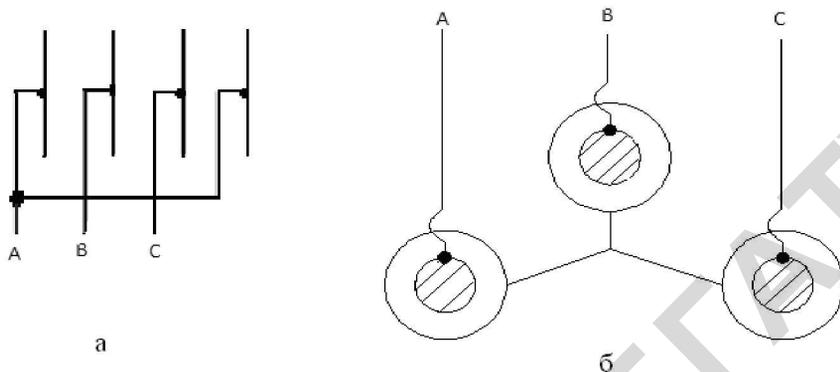


Рис. 3.3. Схемы соединения электродов:
a – «треугольник»; *б* – «звезда»

Для плоскопараллельной системы электродов (рис. 3.2, *a*) фазное сопротивление

$$R_{\Phi} = \frac{\rho_l l}{S} = \frac{\rho_l l}{bh}, \quad (3.30)$$

где l – межэлектродное расстояние, м; b – ширина электрода, м; h – высота электрода, м.

Обозначим $\frac{l}{b} = \kappa$ – геометрический коэффициент. Тогда фазное сопротивление

$$R_{\Phi} = \frac{\rho_l \kappa}{h}. \quad (3.31)$$

Поэтому для любой электродной системы

$$\kappa = \frac{R_{\Phi} h}{\rho}. \quad (3.32)$$

Для плоскопараллельной системы, состоящей из n электродов, геометрический коэффициент определяют по формуле

$$k = \frac{l}{b(n-1)}. \quad (3.33)$$

Для коаксиально-цилиндрической системы

$$k = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D}{d}, \quad (3.34)$$

где D – диаметр наружного электрода, м; d – диаметр внутреннего электрода, м.

Задача расчета электродных систем состоит в определении их геометрических размеров, при которых в нагреваемой среде выделяется требуемая мощность; в отдельных случаях – расчете изменения мощности и температуры в процессе нагрева.

Исходные данные: вид нагреваемого материала, масса материала m , продолжительность нагрева τ , температура t , тепло- и электрофизические характеристики материала, допустимые напряженность $E_{\text{доп}}$ и плотность тока $j_{\text{доп}}$, материал и конструктивное исполнение электродов и др.

Последовательность расчета. Определяют численные значения исходных данных, выбирают тип электродной системы.

Расчетная мощность электродной установки

$$P_{\text{расч}} = \frac{mc(t_2 - t_1)}{\tau \eta_{\text{T}}}, \quad (3.35)$$

где m – масса материала, кг; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С); t_1, t_2 – начальная и конечная температуры нагрева, °С; τ – продолжительность нагрева, с; η_{T} – тепловой КПД установки.

Расчет ведут на одну фазу или одну пару электродов. Мощность одной фазы

$$P_1 = P_{\text{расч}}/n, \quad (3.36)$$

где n – число фаз.

Межэлектродное расстояние

$$l = U/E_{\text{доп}}, \quad (3.37)$$

где U – напряжение, приложенное к электродам, В.

Принимают ширину b (для плоскопараллельной системы) или внутренний диаметр $d_{\text{в}}$ (для коаксиально-цилиндрической системы) электрода, стремясь к стандартным размерам труб или листов материала, из которого изготавливают электроды.

Диаметр наружного электрода $d_{\text{н}} = d_{\text{в}} + 2l$.

Геометрический коэффициент электродной системы определяют по формулам (3.33) для плоскопараллельной или (3.34) для коаксиально-цилиндрической электродной системы.

Длина электрода

$$h = \frac{40\rho_{20}m_{\text{ск}}}{3U^2\tau} \ln \frac{t_2 + 20}{t_1 + 20}. \quad (3.38)$$

Результаты расчета проверяют по значениям мощности и плотности тока. Мощность установки с расчетными размерами электродов

$$P = n \frac{U^2 h}{\rho_{\text{ср}} k}, \quad \text{или} \quad P = n \frac{U^2 h \gamma_{\text{ср}}}{k}. \quad (3.39)$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – среднее удельное сопротивление нагреваемого материала, Ом·м.

Мощность водонагревателя при расчетных размерах электродов P (она же средняя мощность) должна быть равна мощности $P_{\text{расч}}$.

Плотность тока на электродах j не должна превышать допустимую величину $J_{\text{доп}}$:

$$j = \frac{k_{\text{н}} U}{\rho_{t2} l} \quad \text{или} \quad j = \frac{k_{\text{н}} U}{\rho_{t2} k b}, \quad (3.40)$$

где $k_n = 1,1-1,4$ – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения плотности тока по поверхности электрода; ρ_{t2} – удельное сопротивление воды при конечной температуре t_2 , Ом·м.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные способы резистивного электрического нагрева.
2. Почему нагревается материал при протекании по нему электрического тока?
3. В чем сущность поверхностного эффекта?
4. Какие материалы относят к проводникам 1-го и 2-го рода?
5. В чем отличие активного сопротивления от омического?
6. Назовите области применения электроконтактного нагрева.
7. Перечислите параметры, по которым выбирают источник питания для электроконтактного нагрева.
8. Перечислите параметры электродных систем.
9. Что называют электродной системой?
10. Назовите области применения электродного нагрева.
11. Опишите задачу расчета электродных систем.
12. Определите межэлектродное расстояние пластинчатых электродов при удельном электрическом сопротивлении воды при 20 °С $20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, напряжение между электродами 220 В.
13. Приведите формулу температурной характеристики удельного электрического сопротивления воды.
14. Приведите формулу температурной характеристики удельного электрического сопротивления металлических проводников.
15. Охарактеризуйте допустимое значение напряженности электрического поля межэлектродного промежутка и плотность тока на электродах.
16. Перечислите способы регулирования мощности электродных систем.
17. В чем заключаются преимущества и недостатки электродного нагрева?
18. Изложите физический смысл геометрического коэффициента электродной системы.

Практическое занятие 2

Расчет электродных систем

Задача занятия. Определить геометрические размеры электродной системы, при которых в нагреваемой среде выделяется требуемая мощность.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и литературе [3], изучить методику расчета электродных систем, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 2.1. Рассчитать электродную систему водонагревателя. Напряжение питания 380/220 В. Тепловой КПД $\eta_r = 0,9$.

Таблица ПЗ.2.1

Исходные данные к задаче 2.1

Номер варианта	Производительность m_r , кг/ч	Удельное сопротивление воды при 20 °С	Температура нагрева, °С		Тип водонагревателя
			начальная t_1	конечная t_2	
1	2	3	4	5	6
1	0,03	20	10	80	ЭПЗ-100И2
2	0,02	20	10	75	КЭВ-0,4
3	0,025	20	10	70	КЭПР-0,4
4	0,015	20	8	65	КЭВ-6
5	0,015	15	8	60	ЭПЗ-100 И2
6	0,02	25	8	55	КЭВ-0,4
7	0,017	25	12	45	КЭПР-0,4
8	0.019	25	12	50	КЭВ-6
9	0,021	20	12	55	ЭПЗ-100 И2

Окончание табл. ПЗ.2.1

1	2	3	4	5	6
10	0,022	20	6	60	КЭВ-0,4
11	0,023	20	6	65	КЭПР-0,4
12	0,015	25	6	70	КЭВ-6
13	0,016	25	4	45	ЭПЗ-100 И2
14	0,017	30	4	60	КЭВ-0,4
15	0,018	30	4	55	КЭПР-0,4
16	0,019	30	4	55	КЭВ-6
17	0,021	30	12	50	ЭПЗ-100 И2
18	0,022	20	12	50	КЭВ-0,4
19	0,023	20	12	50	КЭПР-0,4
20	0,024	15	12	65	КЭВ-6
21	0,025	15	10	65	ЭПЗ-100 И2
22	0,026	20	10	65	КЭПР-0,4
23	0,027	20	10	65	КЭВ-0,4
24	0,028	25	8	70	КЭВ-6
25	0,029	30	8	70	ЭПЗ-100 И2

Задача 2.2. Определить изменение мощности водонагревателя, если действительное напряжение сети U_d и удельное сопротивление воды при 20 °С ρ_d отличаются от номинальных U_n и ρ_n , указанных в паспорте водонагревателя. Исходные данные принять по табл. ПЗ.2.1, ПЗ.2.2.

Исходные данные к задаче 2.2

Отношение $\rho_{\text{д}}/\rho_{\text{н}}$	Отношение $U_{\text{д}}/U_{\text{н}}$	Номер варианта
1,35	0,9	1
1,32	0,92	2
1,30	0,94	3
1,28	0,96	4
1,26	0,96	5
1,22	1,02	6
1,20	1,04	7
1,16	1,06	8
1,12	1,08	9
1,10	0,93	10
1,08	0,95	11
1,04	0,97	12
0,85	1,01	13
0,87	1,03	14
0,89	1,05	15
0,91	1,06	16
0,92	1,09	17
0,94	0,94	18
1,08	0,92	19
1,05	0,96	20
0,90	0,98	21
0,94	1,02	22
0,88	1,04	23
0,86	1,06	24
0,84	1,08	25

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Задача расчета электродных систем.
2. Исходные данные для расчета электродных систем.
3. Простейшие типы электродных систем, их параметры.
4. Задача проверочного расчета электродных систем.
5. Вывод формулы определения высоты электрода.
6. Определение допустимой напряженности электрического поля и допустимой плотности электрического тока с помощью удельного электрического сопротивления воды при 20 °С.
7. Определение геометрического коэффициента коаксиально-цилиндрической и плоскопараллельной системы электродов.

Лабораторное занятие 1

Измерение и коррекция удельного электрического сопротивления воды

Цель работы. Освоить методику экспериментального определения и коррекции удельного электрического сопротивления воды.

Задачи работы

1. Изучить по рекомендуемой литературе методы измерения удельного сопротивления проводников второго рода.
2. Измерить удельное сопротивление воды в диапазоне 15–100 °С, математически описать его температурную характеристику.
3. Рассчитать массу дистиллированной воды или соли, необходимую для коррекции измеренного удельного сопротивления воды до величины, указанной в паспорте электродного водонагревателя.

Общие сведения. Методику экспериментального определения и коррекции удельного электрического сопротивления воды изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание для самостоятельной подготовки

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

Методика выполнения работы

Экспериментальная установка состоит из измерительной ячейки *ЕК*, моста переменного тока $p\Omega$, приборов измерения тока, напряжения и температуры. Измеряют удельное сопротивление водопроводной воды с трехкратной повторностью.

1. Определяют постоянную измерительной ячейки. Для этого ячейку заполняют фикса́ном, мостом измеряют ее сопротивление и по формуле $k = \frac{R_{KCl}}{\rho_{KCl}}$ рассчитывают k . Удельная проводимость 0,1N раствора *KCl* дана на рис. ЛЗ.1.1.

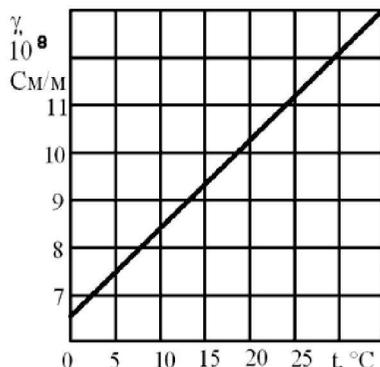


Рис. ЛЗ.1.1. Температурная зависимость удельной проводимости 0,1N раствора KCl

2. Измерительную ячейку промывают, а потом заполняют водой из водопровода до уровня сливного отверстия.

Мостом измеряют сопротивление, а термометром – температуру воды. Далее переключателем SA ячейку подключают к сетевому напряжению и измеряют силу тока и напряжение в цепи. Показания электрических приборов и термометра записывают в табл. ЛЗ.1.1.

Таблица ЛЗ.1.1

Результаты измерения удельного сопротивления воды

Измерено				Вычислено		
t, °C	U, В	I, А	R _м , Ом	ρ _м , Ом·м	ρ _{AB} , Ом·м	ρ _г , Ом·м

В результате протекания тока через воду ее температура увеличивается. После нагрева воды на каждые 5–10 °C записывают показания приборов, напряжение отключают, а выводы от электродов ячейки переключают на мост и измеряют сопротивление. Поочередные подключения ячейки к сети и к мосту продолжают до тех пор, пока температура воды не достигнет примерно 100 °C. По результатам измерений (табл. ЛЗ.1.1) по формулам $\rho_m = \frac{R}{k}$ и $\rho_{AB} = \frac{U}{I k}$ вы-

числяют удельное сопротивление воды.

Температурную характеристику удельного сопротивления воды рассчитывают по формуле $\rho_t = \frac{40\rho_{20}}{t + 20}$, приняв значение ρ_{20} из табл.

ЛЗ.1.1.

По результатам измерений (табл. ЛЗ.1.1) и вычислений строят графические зависимости $\rho_m, \rho_{AB}, \rho_t$ от температуры воды.

3. Определяют массу соли или дистиллята, необходимую для уменьшения или увеличения удельного сопротивления воды (табл. ЛЗ.1.1) до величины, соответствующей номинальному сопротивлению воды в электродном нагревателе, например, 30–50 Ом·м. Для этого в воду в измерительной ячейке дозировано добавляют соль или дистиллят и измеряют удельное сопротивление (табл. ЛЗ.1.2). Массу добавок определяют взвешиванием или с помощью мерного сосуда.

Таблица ЛЗ.1.2

Зависимость удельного сопротивления воды от концентрации добавок			
Измерено			Вычислено
$M_d, \text{г}$	$V_v, \text{М}^3$	$\rho_m, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$m_d, \text{г}/\text{М}^3$

В табл. ЛЗ.1.2: M_d, m_d – масса и концентрация соли или дистиллята; V_v – объем воды в измерительной ячейке.

По результатам табл. ЛЗ.1.2 строят графическую зависимость $\rho_m(m_d)$, по которой находят необходимую концентрацию добавки для получения требуемого удельного сопротивления воды.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы, результаты измерений.
2. Графические зависимости удельного сопротивления воды от температуры и концентрации соли или дистиллята.
3. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Электропроводность воды и факторы, ее определяющие.
2. Методы измерения удельной электрической проводимости или удельного сопротивления воды.
3. Температурная характеристика удельного сопротивления воды.

4. Влияние сопротивления воды на работу электродных водонагревателей и парогенераторов.

5. Необходимость и способ коррекции величины удельного сопротивления воды.

3.2. Элементный электрический нагрев

3.2.1. Классификация элементных нагревателей

Элементный нагрев наряду с электродным и электроконтактным является одним из видов электрического нагрева токами проводимости. Энергия электрического тока преобразуется в тепловую в нагревательном элементе и от него конвекцией, теплопроводностью, излучением или их комбинацией передается к нагреваемой среде.

Нагреватель состоит из нагревательного элемента и устройств для подвода тока, электроизоляции, защиты от внешних воздействий, крепления.

Нагревательный элемент выполняют из токопроводящего материала высокого сопротивления в виде спирали из проволоки, зигзагов ленты, стержня, пленки на изолирующей основе и других.

Конструктивное исполнение и технические характеристики нагревательных элементов в значительной мере зависят от физических свойств и геометрической формы нагревательного материала.

Металлические нагревательные элементы изготавливают чаще всего из проволоки и ленты, поэтому их изгибают в виде спирали или зигзага (рис. 3.4).

Элементные нагреватели разделяют:

по температуре (низкотемпературные – до 350 °С, среднетемпературные – 350–2000 °С, высокотемпературные – более 2000 °С);

материалу нагревательного элемента (металлические, полупроводниковые, неметаллические);

форме материала нагревательного элемента (проволочные, ленточные, стержневые, пленочные, тканевые и др.);

степени защиты нагревательного элемента от внешней среды (открытые, закрытые, герметические);

конструктивному исполнению нагревателя (трубчатые, протяженные, поверхностно распределенные).

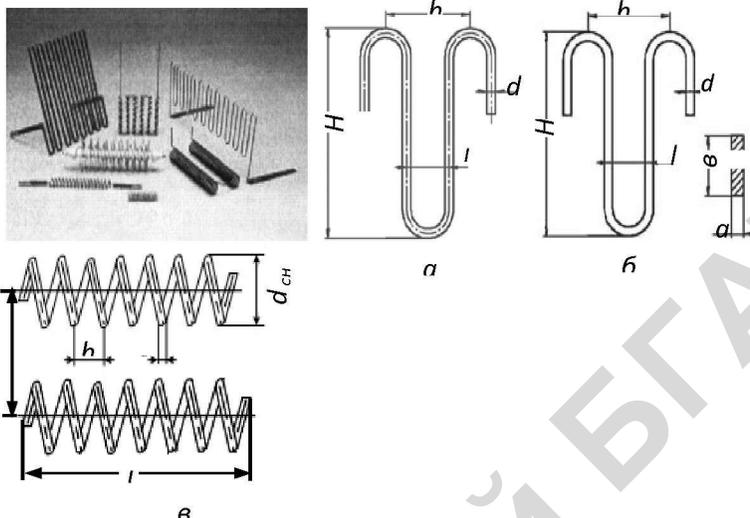


Рис. 3.4. Внешний вид и основные геометрические размеры проволочного (а) и ленточного (б) зигзагообразных и спиральных (в) нагревательных элементов: а, в – толщина и ширина металлической ленты; d, d_{сп} – диаметр проволоки и наружный спирали; l, H – ширина и высота зигзага; h – шаг

Открытые нагреватели просты по устройству, имеют хорошие условия для теплоотдачи, ремонтоспособны. Их недостаток – повышенная электрическая опасность, низкий срок службы. Они применяются главным образом в высокотемпературных установках с теплоотдачей преимущественно излучением (электрические печи, термоизлучатели).

Закрытые нагреватели – нагревательные элементы размещены в корпусе, предохраняющем от механического воздействия и нагреваемой среды.

Герметические нагреватели – нагревательные элементы защищены от воздействий механических, нагреваемой и окружающей среды (например, воздуха).

Трубчатые электрические нагреватели могут быть закрытыми и герметическими, цилиндрической, прямоугольной и другой формы. В установках низко- и среднетемпературного нагрева наиболее распространены герметические трубчатые электрические нагреватели

(ТЭН), используемые для нагрева газов, жидкостей и твердых тел в различных технологических процессах.

Протяженные электрические нагреватели объединяют собой нагревательные провода, кабели, ленты. Их применяют в низкотемпературных технологических процессах с низкой плотностью тепловых нагрузок (10^2 – 10^3 Вт/м²), рассредоточенных на значительной площади, например, для электрообогрева почвы в сооружениях защищенного грунта, полов, дорог, тротуаров, трубопроводов, технологических емкостей и др.

Поверхностно распределенные нагреватели выполняют из проволоки, токопроводящих частиц, волокон или пленок, создающих соответственно дисперсные, волокнистые или сложные композиции на поверхности или в объеме электроизоляционного компонента, который обычно является несущим основанием. В качестве токопроводящих используют металлы, углерод и другие материалы. Несущими могут быть ткани, керамика, металлические подложки, пластмассы. Поверхностно распределенные нагреватели бывают гибкие и жесткие: гибкие можно изогнуть по форме нагреваемой поверхности; жесткие – не способны к изменению своей конфигурации, заданной при изготовлении. Поверхностно распределенные нагреватели отличаются от других своей тонкослойностью при достаточно развитой площади поверхности. Их применяют при тепловых нагрузках до 10^4 Вт/м². Примером служат гибкие электропроводящие ткани, пленочные резистивные покрытия, стеклопластиковые и полимерные тонкостенные панели.

3.2.2. Материалы для нагревательных элементов

Материалы для нагревательных элементов должны отвечать определенным требованиям.

Высокая жаростойкость – устойчивость к окислению при высоких температурах. Окисление уменьшает площадь поперечного сечения, увеличивает сопротивление, ускоряет разрушение нагревательного элемента.

Высокая жаропрочность – способность материала выдерживать механические нагрузки при высоких температурах, как минимум, не провисать под собственной массой.

Высокое удельное электрическое сопротивление. С увеличением сопротивления уменьшаются габаритные размеры и расход материалов на изготовление нагревателя, повышается концентрация мощности.

Малый температурный коэффициент сопротивления. Зависимость сопротивления от температуры ведет к изменению мощности нагревателя, затрудняет расчет и регулирование температуры.

К другим требованиям относят: постоянство электрических свойств и размеров, технологичность при изготовлении нагревателей, приемлемая стоимость.

Основными характеристиками материалов для нагревателей являются удельное электрическое сопротивление, температурный коэффициент сопротивления (ТКС), максимальная рабочая температура и другие (табл. 1.1–1.5 [5]).

Удельное электрическое сопротивление материала зависит от его природы и температуры. Математическое выражение зависимости от температуры называют температурной характеристикой удельного сопротивления, которую для металлических проводников чаще всего записывают в виде

$$\rho_t = \rho_{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (3.41)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление проводника при 20 °С, Ом · м; α – температурный коэффициент сопротивления, °С⁻¹; t – температура, при которой рассчитывают сопротивление, °С.

Удельное сопротивление полупроводниковых и неметаллических нагревательных материалов имеет сложную зависимость от температуры. В этом случае чаще всего пользуются величиной сопротивления конкретного нагревателя, указанной в его технических характеристиках.

Температурный коэффициент сопротивления зависит от природы материала, показывает увеличение (положительный ТКС) или уменьшение (отрицательный ТКС) сопротивления проводника при увеличении температуры. Для рассматриваемых сплавов высокого сопротивления и сталей ТКС положительный, его величина изменяется нелинейно в диапазоне рабочих температур.

Поэтому для расчета сопротивления нагревателей используют поправочные коэффициенты ρ_t/ρ_{20} или графические зависимости удельного электрического сопротивления при изменении температуры. Ориентировочное увеличение удельного сопротивления при изменении температуры от 20 °С до максимальной рабочей составляет, %: нихромы – 2,5–10; фехрали – 4–14; хромели – 1,6–10; углеродистые стали – 250–310.

Максимальная рабочая температура материала нагревательного элемента принята исходя из скорости его разрушения, т. е. срока службы и достаточной окупаемости. Срок службы зависит от вида материала проводника, его массивности, окружающей среды и частоты включений нагревателя (табл. 1.1, 1.4 [5]).

Нагревательные элементы изготавливают из металлических (никельхромовые и железохромоалюминиевые сплавы, углеродистые стали), полупроводниковых (карбидкремниевые, дисилицидмолибденовые, хромитлантановые соединения, многокомпонентные сплавы для тонкопленочных нагревателей, содержащие Si, Fe, Cr, Al, Ti) и неметаллических (углеродные нити, ленты, ткани) материалов.

Никельхромовые сплавы, сокращенно нихромы (X15H60, X15H60-H, X20H80-H, *NIKROTHAL* и др.) состоят из 20–80 % никеля, 15–30 % хрома и железа. Удельное сопротивление – до $1,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Рабочая температура – до 1250 °С.

Железохромоникелевые сплавы: фехрали (X15Ю5, X23Ю5, X27Ю5Е, *KANTHAL*) содержат 65–75 % железа, 21–28 % хрома и 4–6 % алюминия; хромели (XH60Ю3, XH70Ю-H и др.) состоят из 26–29 % хрома, 60–70 % никеля и 3–4 % алюминия. Удельное сопротивление – до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Рабочая температура – до 1400 °С.

Нихромы, фехрали и хромели содержат в своем составе углерод, кремний, марганец, серу, фосфор, титан и другие примеси в количестве от сотых до 1,5 %.

Железохромоникелевые сплавы по сравнению с нихромами обладают более высокими рабочей температурой и удельным сопротивлением, большим в 2–4 раза сроком службы и меньшей в 2–3 раза стоимостью. Однако они более твердые и хрупкие, магнитны, сильнее корродируют во влажной атмосфере при комнатной температуре, их жаростойкость ниже.

Характеристики наиболее распространенных сплавов высокого сопротивления даны в табл. 1.1–1.4 [5].

Конструкционные стали не получили широкого распространения из-за следующих недостатков.

1. Электротехнические характеристики конструкционных сталей не регламентируются, значения их имеют большой разброс. Удельное электрическое сопротивление конструкционных сталей различных марок при 20 °С колеблется в пределах от $0,103 \cdot 10^{-6}$ до $0,189 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, а относительная магнитная проницаемость в пределах 3500–500. Такой разброс не позволяет рассчитывать стальные нагреватели столь же уверенно, как нагреватели из специальных сплавов, электрические параметры которых изменяются лишь в пределах 1–2 %.

2. Электрические нагреватели практически всегда питаются переменным током и рассчитывать их надо с учетом поверхностного эффекта. Так как удельное электрическое сопротивление конструкционных сталей сильно зависит от температуры (табл. 1.5 [5]), а магнитная проницаемость – от напряженности магнитного поля, т.е. от проходящего по проводнику тока, то и глубина проникновения поля в такой проводник, следовательно, и его активная площадь сечения не остаются постоянными, а изменяются в широких пределах при изменениях режима его работы.

3. Конструкционные стали имеют высокий температурный коэффициент сопротивления. Поэтому сопротивление нагревателя в холодном состоянии намного меньше такового в рабочем, из-за чего неизбежны пусковые толчки тока, длящиеся десятки секунд и более.

4. Практика использования стальных нагревателей показывает, что при малой площади сечения нагревателя даже незначительная коррозия или механическое уменьшение площади сечения увеличивает в этом месте мощность и температуру, а так как железо обладает большим положительным ТКС, это вызывает дальнейшую концентрацию мощности на слабом участке. Если теплоотдача от этого участка затруднена, то температура на нем поднимается до уровня быстрого окисления и нагреватель перегорает. При площади сечения более $8 \cdot 10^{-6}$ м² влияние этих явлений ослабевает вследствие большей теплопроводности вдоль

нагревателя и меньшего относительного влияния местной коррозии и повреждений на площадь поперечного сечения.

5. Конструкционная сталь сильно окисляется при температурах выше 400 °С и существенно корродирует при нормальной температуре. Работоспособными следует считать нагреватели диаметром более 8–10 мм.

6. В связи с тем, что для стальных нагревателей необходимо использовать большие площади сечения (для получения длительных сроков службы), а удельное электрическое сопротивление стали сравнительно мало, сопротивление одиночного нагревателя получается также незначительным. Поэтому следует иметь нагреватели большой длины (при значительной мощности установки) либо применять для их питания понижающие трансформаторы.

7. Масса материала благодаря большой площади сечения у стальных нагревателей во много раз превосходит соответствующие значения у нагревателей из специальных сплавов.

8. Так как железо ферромагнитное, индуктивность выполненного из него нагревателя существенна, что приводит к снижению коэффициента мощности до (0,8–0,9); у нагревателей из специальных сплавов $\cos\varphi \approx 1$.

Полупроводниковые керамические материалы на основе карбида кремния, хромита лантана и дисилицида молибдена используют при температуре в воздухе соответственно до 1400, 1700 и 1850 °С [12]. Они обладают электронным типом проводимости и свойствами типичными для полупроводников. Особенностью этих материалов является значительное снижение электрического сопротивления с изменением температуры. Номинальное электрическое сопротивление указано на одном из выводов нагревателя при калибровочной температуре, которая различается в зависимости от производителя и материала, например 800, 1050, 1200 °С.

Разброс сопротивления от номинальной величины достигает от 10 до 20 %. Хромитлантановые нагреватели в отличие от карбидкремниевых практически не изменяют свои характеристики в процессе эксплуатации. Дисилицидмолибденовые нагреватели устойчивы к резким перепадам температуры.

Неметаллические электронагревательные материалы получают путем пропитки полиакрилонитрильных, углеродистых и других

волокон и нитей водным раствором, например, угольно-графитовой пыли, хлористого аммония, хлорида меди или алюминия и другими с последующей сушкой и термообработкой для получения требуемой электрической проводимости. Конструктивно нагревательные материалы выполняют в виде нитей, лент, тканей [13, 14]. Техническая характеристика тканевых нагревательных материалов зависит от температуры стабилизации при изготовлении тканей (табл. 1.6–1.11 [5]). Максимальная рабочая температура углеграфитовых нагревателей не превышает 250 °С. Материал УКПМ выпускают в виде пластин 1,5×1,5 м, толщиной 0,8–40 мм; цилиндров диаметром до 2,2 м, высотой 0,2–1,0 м и толщиной стенки 1,5–30 мм.

Неметаллические нагревательные провода с нагревательной жилой из углеродного волокнистого материала выпускают с изоляцией из фторопласта (марка ПШУФ) и кремнийорганической резины (марка ПШУС) в поливинилхлоридной оболочке. Достоинство этих проводов состоит в высоком электрическом сопротивлении, стойкости к окружающей среде. Электрическое сопротивление может быть 120 и 220 Ом/м. Напряжение питания – до 220 В. Максимальная температура оболочки составляет до 180 °С, оптимальная – до 80 °С. Диаметр провода – 1,5 и 2,0 мм. Нарботка на отказ – 100 тыс. часов. Срок хранения – до 10 лет.

3.2.3. Трубчатые, протяженные, поверхностно распределенные нагреватели

Трубчатые электрические нагреватели (ТЭН) предназначены для нагрева газообразных, жидких и твердых сред. Могут быть с подводом напряжения с одного или двух концов, круглой, плоской, прямой, U-образной и другой формы, оребренные.

Двухконцевой ТЭН (рис. 3.5) состоит из металлической оболочки (трубки) 7, в которой размещена спираль 6, соединенная с контактными стержнями 5, наружные выводы 1 которых служат для подключения напряжения. Спираль изолирована от трубки наполнителем 4. Контактные стержни отделены от оболочки керамическими изоляторами 2. Место соединения изоляторов с трубкой и контактными стержнями герметизировано влагозащитающим термостойким лаком 3. Оболочку изготавливают из трубки диаметром

от 6 до 16 мм с толщиной стенки от 0,5 до 1,0 мм из углеродистой или нержавеющей стали, меди, латуни. В качестве наполнителя используют электротехнический переклаз (кристаллический оксид магния), который обладает высокими электрическим сопротивлением и теплопроводностью.

Герметиками служат кремнийорганические и другие лаки (например, КО-08, ВГО-1). Спираль выполняют из нихрома или фехрала. После заполнения наполнителем трубку опрессовывают. Мощность ТЭНов может быть от нескольких десятков Вт до 12 кВт. Температура поверхности трубки – до 750 °С.

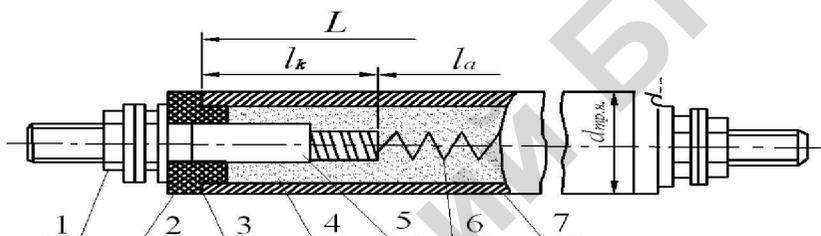


Рис. 3.5. Трубчатый электронагреватель двухконцевой:

- 1 – контактная часть; 2 – изолятор; 3 – герметик; 4 – наполнитель;
 5 – контактный стержень; 6 – спираль; 7 – оболочка; L – развернутая длина;
 l_a – длина активной (греющей) части; l_k – длина контактного стержня в заделке;
 $d_{тр.к}$ – диаметр трубки

Одноконцевой (патронный) ТЭН (рис. 3.6) представляет собой металлическую трубку, внутри которой расположен нагревательный элемент из проволоки, намотанный в виде спирали на керамический сердечник, изолированный от трубки переклазом. Оба вывода спирали расположены с одной стороны трубки и герметизированы так же, как в двухконцевых нагревателях. Другой конец трубки заварен. Диаметр патронных нагревателей может быть от 3 до 20 мм, удельная поверхностная мощность $-(4,0-40,0) \cdot 10^4$ Вт/м², температура оболочки – до 500 °С.

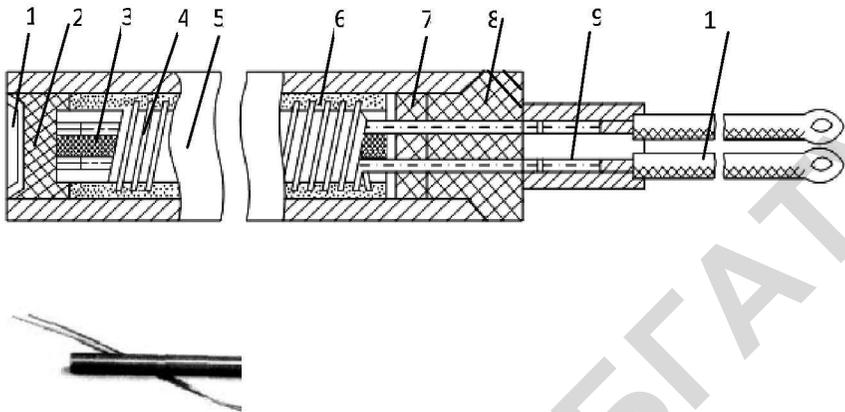


Рис. 3.6. Трубчатый электронагреватель одноконцевой:
 1 – доньшко; 2 – шайба; 3 – керамический сердечник; 4 – спираль
 нагревательная; 5 – оболочка; 6 – переклаз; 7 – шайба верхняя; 8 – изолятор;
 9 – стержень контактный; 10 – вывод гибкий

Контактную часть ТЭНов выполняют в виде резьбовой шпильки, контактной пластины, фляжка с отверстиями [5].

Технические характеристики ТЭНов для промышленных установок регламентированы ГОСТ 13268-88. Настоящий стандарт распространяется на двухконцевые электронагреватели круглого сечения, общего назначения, климатического исполнения УХЛ-4, предназначенные для нагрева теплопроводностью, конвекцией, излучением. Условное обозначение и некоторый диапазон технических параметров нагревателей показан на примере продукции Минского завода ТЭНов «Адиполь» [5]. ТЭНЫ для бытовых установок изготавливают согласно ГОСТ 19108-81.

Плоские нагреватели прямой, дисковой и кольцевой форм предназначены для нагрева контактным способом корпусов экструдеров, литьевых форм, топливных фильтров автомобилей, труб и резервуаров. Некоторые из них, производимые предприятием «Номакон» (Минск), показаны на рис. 3.7.

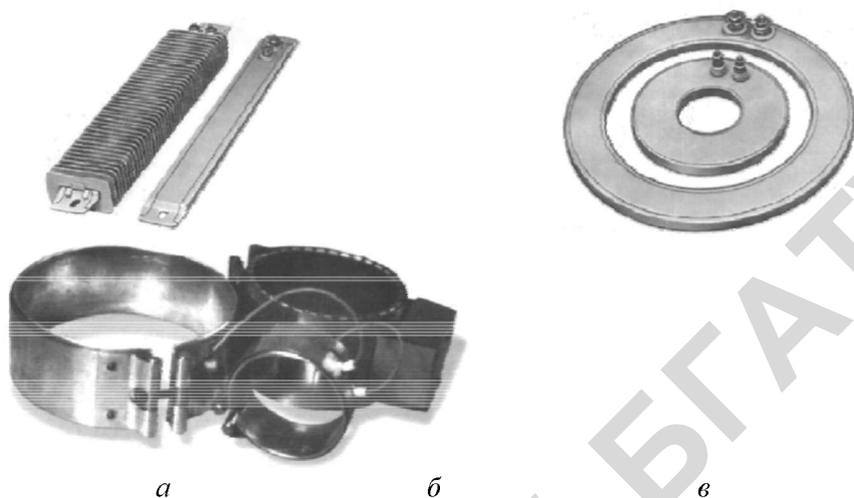


Рис. 3.7. Плоские электрические нагреватели:
а – прямые; *б* – дисковые; *в* – кольцевые

Нагревательный элемент – лента или провод из нихрома Х20Н80, намотанный на слюдопласт и изолированный от стального корпуса также слюдопластом. Удельная поверхностная мощность – до $4 \cdot 10^4$ Вт/м² при максимальной температуре 400 °С. При использовании керамической изоляции удельная мощность может быть до $7 \cdot 10^4$ Вт/м², а максимальная температура поверхности нагревателя 600 °С. Напряжение питания – от 12 до 220 В.

Условное обозначение ТЭНов представлено в табл. 3.1.

Электрические протяжённые нагреватели включают нагревательные провода, кабели и ленты. Их используют для создания необходимой температуры на поверхностях с большой площадью. Удельная поверхностная мощность протяжённых нагревательных устройств составляет от 5 до 500 Вт/м², температура обогреваемой поверхности в большинстве случаев менее 100 °С, хотя в некоторых технологических процессах она может быть до 200 и даже до 800 °С.

Нагревательные провода и кабели классифицируют по: конструктивному исполнению нагревательного элемента – жилы (проволочные, спиральные, зональные, саморегулирующиеся); количеству жил (одно- и многожильные);

конструктивному исполнению оболочки (обычные, армированные, бронированные);

рабочей температуре (низкотемпературные – до 100 °С, среднетемпературные – до 250 °С, высокотемпературные – до 1000 °С).

Проволочный нагревательный элемент выполняют из стальной оцинкованной, латунной, медной, сплава высокого сопротивления проволоки.

Спиральный нагревательный элемент представляет собой проволоку из сплава высокого сопротивления, навитую в виде спирали на гибкий термостойкий сердечник из кварцевых нитей или из другого материала.

Зональный нагревательный элемент выполняют в виде спирали из проволоки, навитой на две изолированные медные жилы, к которым подключают напряжение питания (рис. 3.8, *а*). Через определённое расстояние спираль электрически соединена с жилами, т. е. участки спирали подключены параллельно к жилам, подводящим напряжение.

Саморегулирующийся нагревательный элемент представляет собой две медные токоподводящие жилы, пространство между которыми заполнено полупроводящей пластмассой (рис. 3.8, *б*), сопротивление которой зависит от температуры. При ее увеличении сопротивление возрастает, мощность тепловыделения снижается, и наоборот.

Условное обозначение и характеристики ТЭНов

ТЭН – 100 А 13/ 2,0 Р 220 → Напряжение, В: 12...380

Развернутая
длина ТЭН, см:
20...600

Длина контактного стержня в
заделке, мм:
А-40; В-65; С-100; D-125; E-160;
F-250; G-400; H-630

Диаметр, мм:
6,5; 7,4; 8,0; 8,5; 10; 13; 16

Мощность, кВт:
от 0,2 до 6,3 и более

Рабочая среда:

S – Воздух и пр. газы и смеси газов.
Удельная мощность – 2,0 Вт/см². Нагрев в спокойной
газовой среде до рабочей температуры на оболочке ТЭН
до 450 °С.

O – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность
– 5,5 Вт/см². Нагрев воздуха, газов и пр. смесей,
движущихся со скоростью 6 м/с. Температура на
оболочке ТЭН – до 450 °С.

T – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность
– 5,0 Вт/см². Нагрев воздуха, газов и пр. смесей в
спокойном состоянии с температурой на оболочке ТЭН
до 750 °С.

K – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная мощность – 6,5 Вт/см². Нагрев в
среде, с движущимся со скоростью не
менее 6 м/с воздухом, с рабочей
температурой на оболочке ТЭН до 750 °С.

J – Вода, слабый раствор кислот (рН = 5-
7). Удельная мощность – 15,0 Вт/см².
Нагревание, кипение с максимальной
температурой на оболочке 100 °С.

P – Вода, слабый раствор щелочей (рН = 5-
9). Удельная мощность – 15,0 Вт/см².
Нагревание, кипение с максимальной
температурой на оболочке 100 °С.

Z – жиры, масла. Удельная мощность – 3,0
Вт/см². Температура на оболочке ТЭН
обусловлена вязкостью масла. Нагрев в
ваннах и др. емкостях

X – Вода, слабый раствор щелочей и
кислот (рН = 5-9). Удельная мощность –
9,0 Вт/см². Нагревание, кипение с
максимальной температурой на оболочке
100 °С.

L – Литейные формы, пресс-формы.
Удельная мощность – 5,0 Вт/см². Имеется
гарантированный контакт с нагреваемым
металлом. Нагрев с рабочей температурой
на оболочке ТЭН до 450 °С.

Op – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная
мощность – 11,0 Вт/см². Нагрев воздуха газов и пр.
смесей движущихся со скоростью 6 м/с.
Температура на оболочке ТЭН – до 450 °С.

Kp – Воздух и пр. газы и смеси газов. Удельная
мощность – 13,0 Вт/см². Нагрев воздуха, газов и пр.
смесей, движущихся со скоростью 6 м/с.
Температура на оболочке ТЭН – до 450 °С.

Ti – Вода, раствор щелочей и кислот. Удельная
мощность – 15 Вт/см². Нагревание с максимальной
температурой на оболочке 100 °С (материал
оболочки – титан).

W – Легкоплавкие металлы: олово, свинец, и др.
Удельная мощность – 3,5 Вт/см². Нагрев и
плавление в ваннах и др. емкостях с температурой
на оболочке ТЭН до 450 °С.

Материалы корпуса:

S, O, P, Z, Op, W – низкоуглеродистая сталь (08,
08Ю, 08КП, 10, 10КП); **T, K, J, Kp** –
нержавеющая сталь (12Х18Н10Т, 08Х18Н10).

Репозиторий БГАТУ

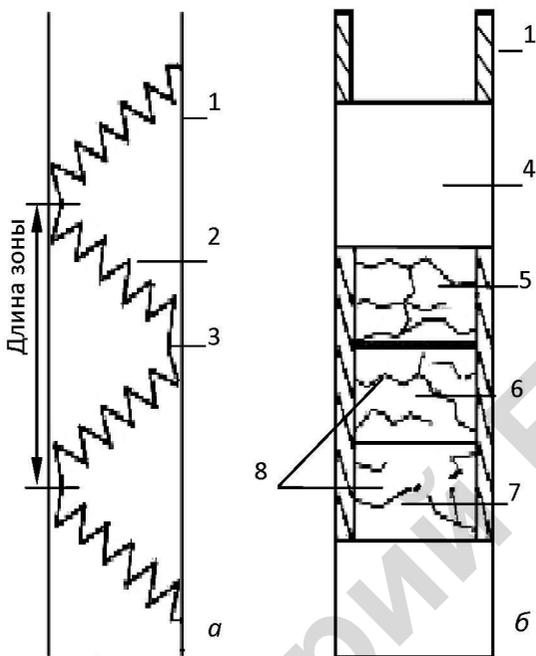


Рис. 3.8. Принцип устройства зонального (а) и саморегулирующего (б) протяженного нагревателя:

- 1 – токоподводящие провода; 2 – нагревательная жила; 3 – контакт между жилой и проводом; 4 – саморегулирующая полупроводящая матрица; 5, 6, 7 – холодный, теплый, горячий участки; 8 – токопроводящие мостики

Конструктивное исполнение оболочки (рис. 3.9) зависит от области преимущественного использования нагревателя и рабочей температуры. Из ряда протяжённых нагревателей несколько выделяется нагревательная лента типа Лонглайн (длинная линия), предназначенная для обогрева длинных трубопроводов, например до 5 км при питании из одной точки. Нагревательный элемент сделан из медной ленты, может быть одно- или трёхжильным, рассчитан на напряжение питания до 1000 В.

Низкотемпературные нагреватели (до 100 °С) применяют для обогрева почвы в теплицах, полов в животноводческих и бытовых

помещениях, площадок, крыш, трубопроводов и др. Это проволочные, зональные и саморегулирующиеся кабели.

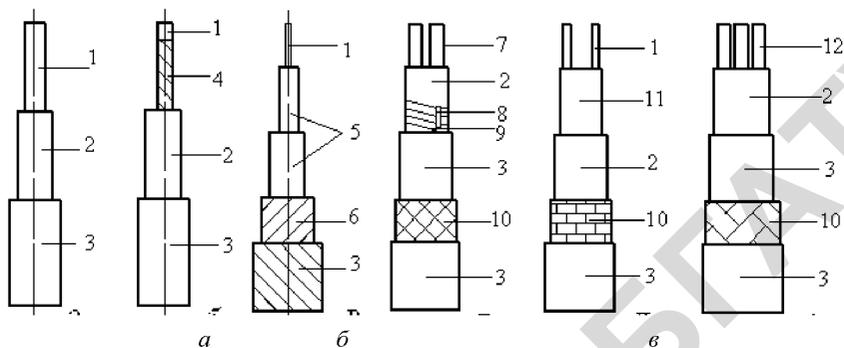


Рис. 3.9. Нагревательные провода (а); кабели (б), ленты (в):

- 1 – нагревательная жила; 2 – изоляция; 3 – оплетка; 4 – сердечник;
- 5 – двухслойная изоляция; 6 – броня; 7 – токоподводящие провода;
- 8 – контакт соединения жилы и проводов; 9 – полупроводниковая нагревательная масса; 10 – металлическая оплетка;
- 11 – плоская нагревательная лента

Среднетемпературные нагреватели (до 250 °С) используют в основном для обогрева трубопроводов, резервуаров. Наиболее употребляемые – проволочные и саморегулирующиеся кабели.

Высокотемпературные нагреватели (до 1000 °С) применяют для обогрева технологического оборудования. Используют проволочные и зональные кабели.

Условное обозначение нагревательных проводов и кабелей не систематизировано. На мировом рынке ряд производителей выпускают протяжённые нагреватели, конструктивно мало отличающиеся друг от друга. Некоторое отличие есть в технических и экономических показателях. Подробные характеристики нагревателей даны в прилож. 11 [5].

Поверхностно распределенные электрические нагреватели (ПРН) отличаются от трубчатых и протяженных нагревателей малой толщиной и достаточно большой (по отношению к толщине) площадью теплоотдающей поверхности. Конструктивно они состоят из тонкослойного нагревательного элемента, расположенного между слоями изоляции.

ПРН классифицируют: по материалу (металлические, полупроводниковые) и виду нагревательного элемента (фольгированные, проволочные, композиционные и др.); материалу, изолирующему нагревательный элемент (полиамидные, силиконовые, миканитовые и др.); допустимой рабочей температуре, которая зависит от вида изолирующего материала и способа крепления нагревателя на обогреваемой поверхности.

В качестве материалов, изолирующих нагревательный элемент, используют пленку из полиамида и полиэстера, кремнийорганическую резину (силикон), миканит. Поэтому нагреватели часто называют силиконовыми, миканитовыми, или, например, «Нагреватели Kapton» (торговая марка определенного вида полиамидной пленки). Материал изоляции определяет удельную мощность нагревателя и, следовательно, температуру его поверхности и даже ее размер (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Влияние материала изоляции на характеристики нагревателей

Материал изоляции	Характеристики нагревателя		
	Диапазон температуры, °С	Максимальные размеры, мм	Максимальное сопротивление, 10^4 Ом/м^2
Полиэстер прозрачный	-55–120	280×560	93–185
Полиамид (Kapton)	-200–200	250×600	8–70
Кремнийорганическая резина	-45–235	600×1800	31
Миканит	-150–600	600×1200	1,8

Полиамидная изоляция представляет собой тонкий, полупрозрачный материал с хорошими диэлектрическими свойствами. Может быть использована в воздухе, вакууме, воде, маслах, устойчива к кислотам и щелочам, кроме NaOH. Максимально допустимая температура – 200 °С.

Кремнийорганическая резина (силикон) выглядит как шероховатый, эластичный материал. Наиболее подходит для изготовления промышленных нагревателей. Устойчива к многим химическим веществам, однако не годится для использования в вакууме и длительно в маслах. Максимальная допустимая температура – 235 °С.

Миканитовая изоляция допускает наиболее высокую температуру нагревателя до 600 °С. Может иметь плоскую или изогнутую в заводских условиях поверхность.

Максимальная мощность и температура, которые может выделять нагреватель, зависят не только от вида изоляции, но и от клея, соединяющего нагревательный и изолирующий слои, а также способа крепления ПРН на обогреваемой поверхности, характеристик регулятора температуры, нагреваемой среды и места установки его первичного преобразователя. ПРН крепят на обогреваемой поверхности: акриловой лентой, покрытой клеем; приклеиванием, например, эпоксидной смолой; прижатием или другим механическим способом, максимальная температура поверхности при этих способах 150, 115 и 180 °С, при механическом прижатии – значительно выше.

Фольгированные ПРН изготавливают из тонкого (0,25 мм) листа сплава металлов на основе никеля (рис. 3.10). На этой фольге (по определенному рисунку) вытравливают электрическую цепь, которая и является нагревательным элементом при протекании по ней тока. Травленную фольгу размещают между слоями изоляции и скрепляют их между собой вулканизацией или другим методом.

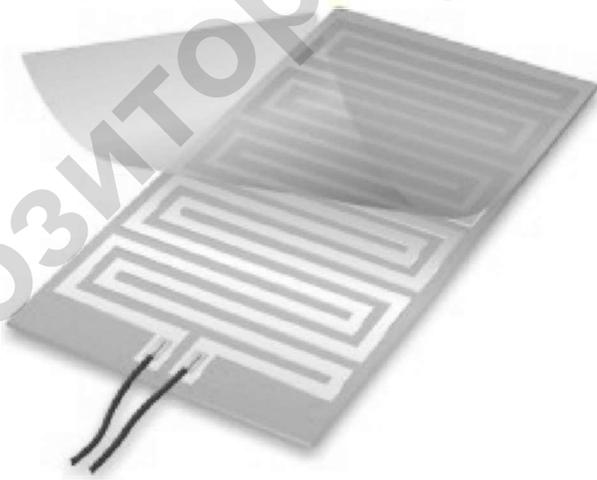


Рис. 3.10. Фольгированный поверхностно распределенный нагреватель:
1 – токопроводящие провода; 2, 4 – изоляция; 3 –нагревательный элемент

Токоподводящие провода крепят к фольге пайкой или сваркой. Изоляция может быть полиамидная, силиконовая или миканитовая. Типовые конфигурации фольгированных нагревателей показаны на рис. 3.11 и в прилож. 12 [5]. Для нагревателей прямоугольной формы размер X может быть от 6 до 280 мм, размер Y – от 6 до 460 мм. Нагреватели круглой формы имеют внутренний диаметр от 2 до 120 мм, а наружный – от 12 до 250 мм. Толщина нагревателя зависит от вида изоляции и лежит в диапазоне от 0,5 до 6 мм (миканитовая изоляция). Удельный вес нагревателей с полиамидной и силиконовой изоляцией составляет $2,1 \text{ кг/м}^2$, у миканитовых – больше.

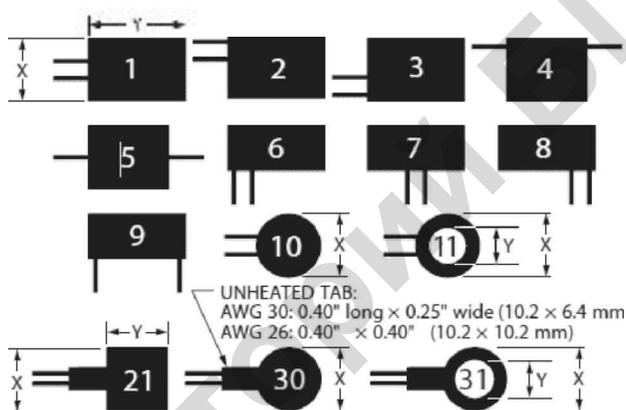


Рис. 3.11. Типовые конфигурации фольгированных и проволочных нагревателей с полиамидной (Kapton), силиконовой и миканитовой изоляцией

Проволочный ПРН (рис. 3.12) представляет собой оцинкованную проволоку из сплава с высоким электрическим сопротивлением, уложенную по определенному рисунку (например, зигзагом) между слоями изоляции и скрепленную с ней одним из способов. Проволочные нагреватели экономичнее фольгированных при больших размерах, удельная поверхностная мощность у них ниже, а допустимая температура выше (прилож. 13, 14 [5]). Диаметр проволоки зависит от мощности и назначения нагревателя. Например, у прозрачных для света нагревателях используют проволоку диаметром $0,02\text{--}0,05 \text{ мм}$, располагаемую между двумя слоями из полиэстера, пропускающими более 82 % света (прилож. 15 [5]), а в устройствах

обогрева резервуаров диаметр проволоки составляет более одного миллиметра (рис. 3.13, прилож. 16 [5]).

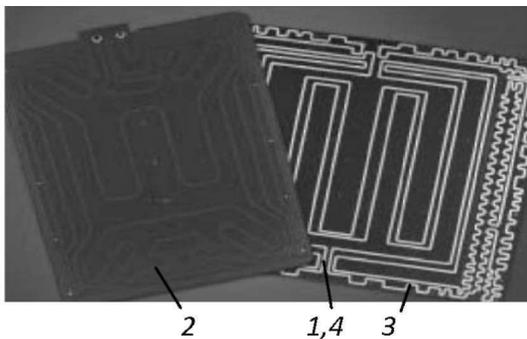


Рис. 3.12. Проволочный ПРН

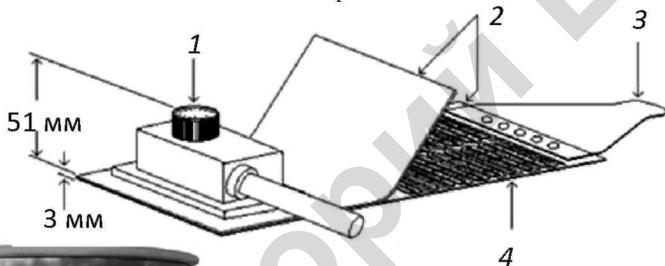


Рис. 3.13. Проволочный ПРН для обогрева резервуаров:
1 – терморегулятор; 2 – стеклотекстолитовая основа, усиленная силиконовой резиной; 3 – устройство для крепления нагревателя на резервуаре;
4 – проволочный зигзагообразный нагреватель

Удельная поверхностная мощность, как и в предыдущих конструкциях, зависит от метода монтажа нагревателя и его температуры.

Композиционный или тонкопленочный (рис. 3.14) нагреватель на основе дисперсных токопроводящих частиц-порошков представляет собой токопроводящую пленку, толщиной 0,1–0,2 мм, нанесенную на изолированную металлическую, керамическую или иную основу.

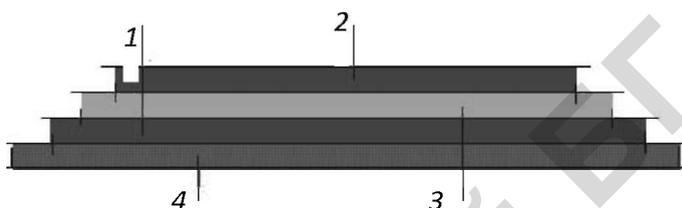


Рис. 3.14. Композиционный поверхностно распределенный нагреватель:
1 – основа диэлектрическая; 2 – покрытие диэлектрическое;
3 – нагревательный элемент; 4 – несущая основа (например, стальной лист)

В качестве токопроводящих материалов используют порошки металлов (алюминия, железа, никеля и др.), угольную или графитовую пыль, которые смешивают с наполнителем-пластификатором и наносят типографическим или лакокрасочным методом на основу. Нанесенную массу сушат, после чего на токопроводящую поверхность крепят контактные электроды и токопроводящие провода. На конечном этапе изготовления всю поверхность изолируют диэлектриком. Например композиционный нагреватель на основе нитрида алюминия, нанесенный методом фотолитографии на изолированный лист нержавеющей стали и сверху покрытый изолирующей пленкой, имеет следующие характеристики: толщина нагревателя – от 0,6 до 12,5 мм; удельная поверхностная мощность – от $3,5 \cdot 10^4$ до $23,2 \cdot 10^4$ Вт/м². Температура в воздухе составляет до 300 °С.

3.2.4. Выбор элементных электрических нагревателей

Выбор трубчатых нагревателей. Трубчатые электрические нагреватели выбирают по значениям мощности, напряжения питания, геометрическим размерам и форме, виду среды и характеру ее нагрева.

Последовательность выбора:

определяют расчетную мощность нагревательного устройства $P_{\text{расч}}$ (2.40);

принимают напряжение питания. Величину напряжения на нагревателях чаще всего принимают равной напряжению питания установки;

исходя из размеров и особенностей рабочей камеры, выбирают желательные габариты ТЭНа: развернутую длину активной части l_a , диаметр оболочки $d_{\text{тр}}$, длину контактных стержней в заделке l_k .

Геометрические размеры ТЭНа пропорциональны напряжению питания и мощности – чем ниже напряжение и мощность, тем меньше объем нагревателя. Последнее определяет какое количество ТЭНов можно разместить в нагреваемом объеме. Придавая ТЭНу форму, отличающуюся от прямолинейной, уменьшают его длину, оставляя неизменным объем и упрощают устройство токоподвода.

Уменьшение диаметра ТЭНа облегчает его гибку и придание различных форм, но снижает площадь теплоотдающей поверхности, в связи с этим могут возрасти удельная поверхностная мощность и температура оболочки, ухудшится прочность изоляции.

Не следует забывать о длине контактных стержней в заделке, которая должна обеспечивать нахождение всей активной зоны нагревателя в среде, даже, например, в случае колебания уровня жидкости в рабочем пространстве; необходимы достаточное удаление узлов герметизации от активной части ТЭНа и горячей зоны нагревательного устройства, размещение контактной части нагревателя в доступном для подключения напряжения месте, отвечающем требованиям безопасности.

В зависимости от вида нагреваемой среды и требований температуры определяют материал оболочки ТЭНа, находят максимальную удельную мощность $\varphi_{\text{макс}}$, Вт/м² (прилож. 2).

Рассчитывают максимальную мощность одного ТЭНа, Вт,

$$P_1 = \varphi_{\text{макс}} \pi d_{\text{тр}} l_a. \quad (3.41)$$

По значениям мощности P_1 , напряжения питания и среде, учитывая геометрические размеры, выбирают предварительно марку ТЭНа (прилож. 1, 2 [5]) и определяют их количество (кратно 3):

$$n = P_{\text{расч}} / P_1. \quad (3.42)$$

Затем производят проверочный расчет. Находят фактическую удельную мощность, Вт/м²,

$$\varphi_{\text{факт}} = P_1 / (\pi d_{\text{тр.факт}} l_{\text{а.факт}}), \quad (3.43)$$

где $d_{\text{тр.факт}}$, $l_{\text{а.факт}}$ – фактические диаметр оболочки и развернутая длина активной части ТЭНа, м.

При этом необходимо соблюдать условие

$$\varphi_{\text{факт}} \leq \varphi_{\text{макс}}, \quad (3.44)$$

где $\varphi_{\text{макс}}$ – допустимая удельная мощность для нагреваемой среды, Вт/м² (прилож. 2).

При несоблюдении условия (3.43) увеличивается температура нагревательного элемента, оболочки и среды. Это снижает срок службы ТЭНа и качество среды (подгорание, подсыхание и даже возгорание). Поэтому выбранный нагреватель во всех случаях следует проверить по условию (3.43).

Определяют температуру оболочки ТЭНа:

$$t_{\text{тр}} = t_{\text{с}} + \varphi_{\text{факт}} / \alpha, \quad (3.45)$$

где $t_{\text{с}}$ – температура нагреваемой среды, °С; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С).

Температура оболочки ТЭНа не должна превышать допустимую температуру материала оболочки и отвечать технологическим требованиям на нагрев.

Выбор нагревательных проводов и кабелей. Выбирают по назначению или преимущественной области использования, по напряжению питания и рабочей температуре $t_{\text{раб}}$, которая не должна превышать допустимую температуру $t_{\text{доп}}$. При этом учитывают особенности окружающей среды (взрывоопасность, коррозионность, солнечное облучение и др.).

Выбор поверхностно распределительных нагревателей. Типовые поверхностно распределительные нагреватели выбирают по тем же критериям, что и трубчатые или протяженные. Основным критерием оценки правильности выбора нагревателя служит

удельная поверхностная мощность нагревателя φ_1 . Во всех случаях она должна быть не более удельной поверхностной мощности, допустимой для данного нагревателя $\varphi_{\text{макс}}$ и для нагреваемой среды. Сложность состоит в определении удельной допустимой мощности для нагреваемой среды, ее ориентировочное значение можно принять из прилож. 2. Значение удельной поверхностной мощности нагревателя можно рассчитать, исходя из технических характеристик поверхностно распределенных нагревателей и способа его монтажа на обогреваемой поверхности.

3.2.5. Расчет элементных электрических нагревателей

Задача расчета состоит в определении геометрических размеров нагревательного элемента, при которых его температура не превышает допустимую, а мощность соответствует расчетной величине. Расчетными геометрическими размерами чаще всего являются: сечение (диаметр или размеры сторон) и длина проволоки, прутка, ленты, из которых изготавливают нагревательный элемент; количество витков, зигзагов и их шаг; длина и диаметр спирали и др.

Исходными данными для расчета служат расчетная мощность, напряжение питания, условия теплоотдачи, конструктивное исполнение нагревателя, температуры нагревательного элемента, поверхности нагревателя и среды, материал нагревательного элемента, параметры его электро- и теплофизических характеристик и др.

В настоящее время наиболее распространены методы расчета нагревательных элементов по удельной мощности и по рабочему току нагревателя.

Расчет по удельной мощности. В электрическом нагревателе имеет место баланс мощности. Мощность, выделяющаяся в нагревательном элементе, Вт,

$$P = \frac{U^2}{R_t} = \frac{U^2 S}{\rho_t l} = I^2 \rho_t \frac{l}{S} \quad (3.46)$$

равна мощности, отдаваемой в нагреваемую среду, Вт,

$$P = \frac{(t_{\text{нэ}} - t_{\text{с}})A}{R_{\text{т}}} = \varphi A, \quad (3.47)$$

$$\frac{U^2 S}{\rho_t l} = \varphi A = \varphi \Pi l, \quad (3.48)$$

где U, I – напряжение на нагревателе и сила тока, В, А; R_t, ρ_t – сопротивление нагревателя, Ом; удельное сопротивление материала нагревательного элемента при температуре t , Ом·м; l, S – длина и площадь поперечного сечения нагревательного элемента, м, м²; $t_{\text{нэ}}, t_{\text{с}}$ – температура нагревательного элемента и нагреваемой среды, °С; $A = \Pi l$ – площадь поверхности нагревательного элемента, м²; Π – периметр, м; R_t – термическое сопротивление теплопередачи от нагревательного элемента к среде, м²·°С/Вт; φ – удельная поверхностная мощность, отдаваемая нагревательным элементом, Вт/м².

По формулам (3.46) и (3.48) длина нагревательного элемента

$$l = \frac{U^2 S}{\rho_t P} = \varphi \Pi l. \quad (3.49)$$

Откуда

$$\Pi S = \frac{P^2 \rho_t}{U^2 \varphi}. \quad (3.50)$$

Если нагревательный элемент выполнен из проводника круглой формы, диаметр которого d (рис. 3.4), то

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad A = \pi d l. \quad (3.51)$$

Подставим (3.51) в (3.50):

$$\frac{\pi^2 d^3}{4} = \frac{P^2 \rho_t}{U^2 \varphi}. \quad (3.52)$$

Диаметр нагревательного элемента (3.52)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 \varphi}}. \quad (3.53)$$

Тогда длина проводника нагревательного элемента

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2}{4\rho_t \pi \varphi^2}}. \quad (3.54)$$

Для нагревателя прямоугольной формы с отношением сторон $b/a = m$ (рис. 3.4) расчетные формулы получают аналогично, подставляя в (3.50), $S = ab$, $\Pi = 2a(m+1)$.

$$a = \sqrt[3]{\frac{\rho_t P^2}{2m(m+1)U^2 \varphi}}. \quad (3.55)$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{mPU^2}{4\rho_t(m+1)^2 \varphi^2}}. \quad (3.56)$$

Таким образом, по формулам (3.53)–(3.56) можно рассчитать основные размеры проводника нагревательного элемента. Трудность пользования этими формулами состоит в том, что величина φ сама зависит от искомых размеров d , a , l , температуры нагревательного элемента и условий теплоотдачи. Поэтому сначала находят зависимость удельной мощности от диаметра или толщины проводника из (3.53) и (3.55), а потом по этим зависимостям определяют размеры проводника, отвечающие условию

$$\varphi_1 = \varphi_2. \quad (3.57)$$

Удельная поверхностная мощность, Вт/м², выделяющаяся в проводнике:

цилиндрической формы

$$\varphi_1 = \frac{4\rho_t P^2}{\pi^2 U^2 d^3}; \quad (3.58)$$

прямоугольной формы

$$\varphi_1 = \frac{\rho_t P^2}{2m(m+1)U^2 a^3}. \quad (3.59)$$

Удельная поверхностная мощность, Вт/м², отдаваемая нагревательным элементом,

$$\varphi_2 = \frac{t_{нэ} - t_c}{R_T}. \quad (3.60)$$

В (3.60) размеры нагревательного элемента входят в формулу термического сопротивления теплопередачи R_T , зависящего от конструкции нагревателя и способа теплопередачи.

Равенство (3.57) находят графически или аналитически, подставляя значения d в (3.58) или a в (3.59) и в (3.60). Диаметр или толщину a и значение φ , при которых выполняется условие (3.57), принимают для дальнейших расчетов, округлив их до ближайшего приемлемого значения.

Важно помнить, что нельзя принимать произвольно диаметр или ширину (площадь сечения) проводника, а его длину рассчитывать по (3.54) или (3.56). Необходимо вначале вычислить площадь сечения, а потом определить длину проводника.

Расчет по рабочему току. Это приближенный метод расчета, основанный на экспериментальной зависимости температуры нагревательного элемента от силы тока и сечения проводника. Эта зависимость получена для проволоки из нихрома, натянутой в неподвижном воздухе при 20 °С (прилож. 3). Отличие реального

нагревателя от экспериментального учитывают коэффициентами монтажа и среды (прилож. 4).

Коэффициент монтажа $k_m \leq 1$ учитывает ухудшение теплоотдачи от нагревательного элемента и, следовательно, увеличение его температуры в реальном нагревателе по сравнению с нагревателем в виде горизонтальной проволоки.

Коэффициент среды $k_c \geq 1$ учитывает улучшение теплоотдачи в реальном нагревателе по сравнению с теплоотдачей в неподвижном воздухе.

Расчет по рабочему току может быть выполнен в предлагаемой последовательности.

На основании исходных данных (эскиз нагревателя, его мощность и напряжение, материал, температура, удельное сопротивление материала нагревательного провода и др.) рассчитывают следующие параметры.

Сила тока в нагревательном элементе

$$I = P/U, \quad (3.61)$$

где P , U – мощность нагревательного элемента и напряжение на нем, Вт, В.

Расчетная температура нагревательного элемента, °С,

$$t_p = k_m k_c t_{нэ}. \quad (3.62)$$

Значения k_m и k_c принимают согласно прилож. 4

Температуру $t_{нэ}$ принимают исходя из условий теплоотдачи от нагревательного элемента. Для открытых нагревателей можно рекомендовать $t_{нэ} = (0,7-0,9) t_{доп}$, для герметичных – $t_{нэ} = (0,4-0,8) t_{доп}$. Допустимая температура $t_{доп}$ приведена в табл. 1.1–1.5 [5].

По величине I и t_p (прилож. 3) находят диаметр проволоки d и рассчитывают ее длину.

Длина проволоки нагревательного элемента

$$l = \frac{\pi d^2 U^2}{4 \rho_l P}. \quad (3.63)$$

Другие размеры спирали или зигзага из нихромовой проволоки можно найти по следующим рекомендациям (рис. 3.4):
диаметр спирали

$$d_{\text{сп}} = (6 - 10)d; \quad (3.64)$$

высота зигзага из ленты

$$H = 100a \quad (3.65)$$

Расстояние между центрами соседних витков (шаг спирали) или зигзагов

$$h = (2 - 6)d, \quad h \geq 2b. \quad (3.66)$$

Количество витков спирали

$$n = \frac{l}{\sqrt{(\pi d_{\text{сп}})^2 + h^2}}, \quad (3.67)$$

зигзагов ленты

$$n = \frac{l}{2h}. \quad (3.68)$$

Длина нагревательного элемента

$$L = hn. \quad (3.69)$$

В промышленных печах диаметр проволоки и толщина ленты, лежащих в пазе, должны быть не менее 3 и 2 мм соответственно, для проволочной спирали на керамической трубке – не менее 3 мм, для свободно подвешенных проволочных и ленточных зигзагообразных нагревателей – 5 и 2,5 мм соответственно. При увеличении температуры нагревателя от 900 до 1300 °С расстояние между точками подвеса спирали или зигзага должно соответственно уменьшаться от 300 до 100 мм.

Расчет стальных нагревателей. Сопротивление углеродистых сталей переменному току значительно отличается от сопротивления

немагнитных материалов из-за поверхностного эффекта и внутренней индуктивности стальных проводников. Поэтому в формулы (3.53) и (3.56) вводят коэффициент поверхностного эффекта $k_{\text{п}}$ и коэффициент мощности $\cos\varphi$ и рекомендуют рассчитывать размеры проводника нагревательного элемента по следующим формулам:

диаметр стального нагревательного проводника

$$d = \sqrt[3]{\frac{4\rho_l k_{\text{п}} P^2}{\pi^2 U^2 \varphi \cos^2 \varphi}}; \quad (3.70)$$

его длина

$$l = \sqrt[3]{\frac{PU^2 \cos^2 \varphi}{4\rho_l k_{\text{п}} \pi \varphi^2}}. \quad (3.71)$$

Однако диаметр, рассчитанный по (3.70), часто не удовлетворяет требованиям механической прочности. Приходится принимать диаметр проволоки в несколько раз больше расчетного, а нагреватели подключать на пониженное напряжение. В отдельных, упрощенных случаях можно принять диаметр проволоки по механической прочности, т. е. более 3 мм, а длину – исходя из конструкции нагревателя. В этом случае расчетной величиной является напряжение питания, которое можно найти из (3.46) с учетом $k_{\text{п}}$ и $\cos\varphi$:

$$U = \sqrt{\frac{\rho_l l P k_{\text{п}}}{S \cos^2 \varphi}}. \quad (3.72)$$

Коэффициент $k_{\text{п}}$ рассчитывают по формулам (3.15), (3.16), значение $\cos\varphi$ находится в пределах 0,82–0,92.

Контрольные вопросы

1. Области применения элементного нагрева.
2. Устройство, технические характеристики и применение основных видов нагревателей.

3. Открытые нагреватели, устройство, технические характеристики, области применения.

4. Нагревательные провода, кабели, ленты, устройство, технические характеристики, области применения.

5. Требования, предъявляемые к материалам, из которых изготавливают резистивные электрические нагреватели.

6. Почему в качестве материала для изготовления спиралей ТЭНов используют нихром?

7. Выбор ТЭНов.

8. Выбор нагревательных проводов и кабелей.

9. Методика расчета элементных электрических нагревателей по рабочему току.

10. Методика расчета элементных электрических нагревателей методом удельной поверхностной мощности.

11. Особенность расчета стальных нагревателей.

12. В электротермическом оборудовании нагревательными элементами служат 6 ТЭНов мощностью 1 кВт каждый, подключенных на напряжение 220 В. Определить полезную мощность ЭТО при соединении ТЭНов в последовательную или параллельную «звезду»; последовательный или параллельный «треугольник».

13. По резистивному нагревательному элементу из нихромовой проволоки диаметром 1,0 мм и длиной 5 м протекает ток 10,8 А. Определить мощность и напряжение питания нагревательного элемента.

14. Как изменится мощность трех резистивных нагревателей одинаковой мощности при переключении их со «звезды» на «треугольник»?

15. Как изменится мощность резистивного электрического нагревателя при уменьшении площади его поперечного сечения в 2 раза; при увеличении его сопротивления в 2 раза; при уменьшении его длины в 2 раза?

Практическое занятие 3

Расчет элементных электрических нагревателей

Задача занятия. Определить геометрические размеры нагревательного элемента, при которых его температура не превышает допустимую величину, а мощность соответствует расчетной.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе, литературе [3], изучить методику расчета элементарных электрических нагревателей, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 3.1. Рассчитать геометрические размеры трехфазного открытого спирального проволочного резистивного электрического нагревателя камерной печи, начертить его эскиз. Удельную теплоемкость нагреваемого материала принять по табл. П.1.1 [5]. Напряжение питания равно 380/220 В, КПД печи – 0,9. Расчет нагревателя произвести по рабочему току.

Задача 3.2. Рассчитать геометрические размеры трехфазного зигзагообразного ленточного резистивного электрического нагревателя камерной печи, начертить его эскиз. Напряжение питания равно 380/220 В, КПД печи – 0,9. Относительный коэффициент лучеиспускания принять по табл. П.1.8 [5]. Расчет произвести методом удельной поверхностной мощности.

Таблица П3.3.1

Исходные данные к задаче 3.1

Номер варианта	Нагреваемый материал	Масса нагреваемого материала m , кг	Температура нагрева, °С		Время нагрева τ , с	Материал нагревателя
			начальная t_1	конечная t_2		
1	2	3	4	5	6	7
1	Углеродистая сталь	50	20	800	3600	X15H60
2	Медь	50	10	800	3600	X15H60-H
3	Латунь	50	20	800	3600	X20H80-H
4	Красный	75	10	700	3600	XH70Ю

Окончание табл. П3.3.1

1	2	3	4	5	6	7
5	Нержавеющая сталь	75	20	700	3600	X15Ю5
6	Медь	75	10	700	3600	X23Ю5
7	Латунь	60	20	600	2400	X23Ю5Т
8	Медь	60	10	600	2400	X27Ю5Т
9	Титан	60	20	600	2400	XН60Ю3
10	Титан	70	10	500	2000	XН20ЮС
11	Латунь	70	20	500	2000	X15Н60Ю3А
13	Углеродистая сталь	80	20	600	3600	X15Н60-Н
14	Нержавеющая сталь	80	10	600	3600	X20Н80-Н
15	Углеродистая сталь	80	20	600	3600	XН70Ю
16	Медь	60	10	600	3600	X15Ю5
17	Титан	60	10	600	3600	X23Ю5
18	Латунь	60	20	600	3600	X23Ю5Т
19	Стекло	70	15	500	3000	X27Ю5Т
20	Текстолит	70	15	500	3000	XН60Ю3
21	Латунь	80	15	500	3000	XН20ЮС
22	Медь	50	15	500	3000	X15Н60Ю3А
23	Углеродистая сталь	60	15	400	2400	X15Н60
24	Нержавеющая сталь	60	15	400	2400	X20Н80-Н
25	Титан	70	15	400	2400	X27Ю5Т

Таблица ПЗ.3.2

Исходные данные к задаче 3.2

Номер варианта	Нагреваемый материал	Масса нагреваемого материала m , кг	Температура нагрева, °С		Время нагрева τ , с	Материал нагревателя	Отношение площади поверхности нагревателя A_1 и нагреваемого тела $A_2, A_1/A_2$	Отношение ширины « b » ленты к ее толщине « a », $m=b/a$
			начальная t_1	конечная t_2				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Сталь шлифованная	50	20	800	3600	X15H60	0,5	5
2	Медь полированная	50	10	800	3600	X15H60-H	0,5	5
3	Латунь полированная	50	20	800	3600	X20H80-H	0,5	5
4	Чугун обточенный	75	10	700	3600	X20H80-H	0,5	5
5	Сталь легированная	75	20	700	3600	X15Ю5	0,5	10
6	Медь окисленная	75	10	700	3600	X23Ю5	0,6	10
7	Латунь матовая	60	20	600	2400	X23Ю5Т	0,6	10
8	Бронза	60	10	600	2400	X27Ю5Т	0,6	10
9	Никель окисленный	60	20	600	2400	X27Ю5Т	0,6	10

Продолжение табл. П3.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	Никель, нанес. на чугун	70	10	500	2000	XH20ЮС	0,7	5
11	Бронза	70	20	500	2000	X15H60	0,7	15
12	Медь полированная	70	10	500	2000	X15H60	0,7	15
13	Сталь, листовая прокат	80	20	600	3600	X15H60-H	0,7	15
14	Сталь легированная	80	10	600	3600	X20H80-H	0,7	15
15	Сталь с шероховатой поверхностью	80	20	600	3600	X20H80-H	0,8	15
16	Медь окисленная	60	10	600	3600	X15Ю5	0,8	8
17	Никель окисленный	60	10	600	3600	X23Ю5	0,8	8
18	Латунь окисленная	60	20	600	3600	X23Ю5Т	0,8	8
19	Олово	70	15	500	3000	X27Ю5Т	0,8	8
20	Цинк листовый	70	15	500	3000	X27Ю5Т	0,8	12
21	Латунь матовая	80	15	500	3000	XH20ЮС	0,9	12

1	2	3	4	5	6	7	8	9
22	Медь полированная	50	15	500	3000	X15H60	0,7	12
23	Алюминий полированный	60	15	400	2400	X15H60	0,6	12
24	Алюминий с шерох. поверхностью	60	15	400	2400	X20H80-H	0,7	6
25	Цинк окисленный	70	15	400	2400	X27Ю5Т	0,7	6

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Задача расчета элементных электрических нагревателей, виды расчета.
2. Требования, предъявляемые к материалам, из которых изготавливают элементные электрические нагреватели.
3. Классификация элементных электрических нагревателей.
4. Методика расчета элементных электрических нагревателей по рабочему току.
5. Методика расчета элементных электрических нагревателей методом удельной поверхностной мощности.
6. Особенности расчета стальных нагревателей.
7. Физический смысл коэффициента монтажа и коэффициента среды.

Практическое занятие 4

Выбор и проверочный расчет трубчатых электрических нагревателей

Задача занятия. Выбрать ТЭН по технологическому назначению (установка, нагреваемая среда, условия нагрева и др.), значениям мощности, питающего напряжения, размерам и форме.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе, литературе [3], изучить методику выбора трубчатых электрических нагревателей, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 4.1. Выбрать ТЭНы для трехфазного электрического аккумуляционного водонагревателя и произвести их проверочный расчет. Жесткость воды составляет не более 3 мг·экв/кг. Напряжение питания – 380/220 В. Тепловой КПД водонагревателя $\eta = 0,92$. Условия размещения ТЭНов приведены на рис. 5.1 [3].

Таблица ПЗ.4.1

Исходные данные к задаче 4.1

Номер варианта	Объем нагреваемой воды $V, \text{ м}^3$	Время нагрева $\tau, \text{ с}$	Температура нагрева, °С		Внутренний диаметр резервуара водонагревателя, м ²
			Начальная t_1	Конечная t_2	
1	2	3	4	5	6
1	0,2	3600	8	80	0,56
2	0,2	7200	10	80	0,56
3	0,3	7200	12	80	0,56
4	0,4	7200	14	80	0,56
5	0,5	10800	15	80	0,66
6	0,6	10800	8	80	0,66
7	0,7	10800	10	80	0,96
8	0,8	10800	12	80	0,96
9	0,2	5400	14	85	0,56
10	0,3	7200	15	85	0,56
11	0,4	7200	15	85	0,56
12	0,5	7200	14	85	0,66
13	0,6	10800	12	85	0,66
14	0,7	10800	10	85	0,96
15	0,8	10800	8	85	0,96
16	0,2	5400	15	90	0,56

1	2	3	4	5	6
17	0,3	5400	14	90	0,56
18	0,4	5400	12	90	0,56
19	0,5	5400	10	90	0,66
20	0,6	5400	8	90	0,66
21	0,7	5400	8	90	0,96
22	0,8	5400	10	90	0,96
23	0,2	7200	14	95	0,56
24	0,4	7200	15	90	0,56
25	0,8	10800	12	90	0,56

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Параметры, по которым производят выбор трубчатых электрических нагревателей.
2. Устройство трубчатых электрических нагревателей.
3. Достоинства и недостатки трубчатых электрических нагревателей.
4. Структура условного обозначения трубчатых электрических нагревателей.
5. Методика выбора трубчатых электрических нагревателей.
6. Задача проверочного расчета трубчатых электрических нагревателей.

Лабораторное занятие 2

Исследование элементных электрических нагревателей

Цель работы. Изучить устройство элементных нагревателей, установить влияние условий эксплуатации на характеристики трубчатых электронагревателей.

Задачи работы

1. Изучить устройство электронагревателей, определить факторы, существенно влияющие на их характеристики при эксплуатации.
2. Исследовать влияние изменения напряжения питания на мощность и температуру нагревателя.

3. Исследовать влияние условий теплоотдачи на температуру нагревателя.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики элементных электрических нагревателей. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Изучить устройство и характеристики элементных нагревателей по рекомендуемой литературе и образцам, представленным в лаборатории. Начертить эскизы лабораторных нагревателей и записать их основные характеристики.

2. Влияние величины напряжения U на мощность P и температуру нагревателя t_n исследуют на экспериментальной установке.

Вентилятор выключен, скорость воздуха равна нулю. Напряжение на ТЭНе регулируют автотрансформатором в диапазонах 40, 60, 80, 100 % от номинального. Измеряют силу тока I , температуру трубки нагревателя t_n и окружающего воздуха t_o (табл. ЛЗ.2.1).

Таблица ЛЗ.2.1

Влияние напряжения питания на мощность и температуру нагревателя

Измерено					Вычислено		
$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$A, \text{м}^2$	$t_o, \text{°C}$	$t_n, \text{°C}$	$R_t, \text{Ом}$	$P, \text{Вт}$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

По результатам исследований необходимо установить графическую и математическую зависимости мощности и температуры поверхности ТЭНа от величины напряжения питания и проверить их адекватность.

Сопротивление нагревателя при температуре t , Ом,

$$R_t = \frac{U}{I}.$$

Мощность нагревателя

$$P = \frac{U^2}{R_t}.$$

Уравнение баланса мощностей, выделяющейся в нагревателе $\frac{U^2}{R_t}$ и отдаваемой в окружающую среду $\alpha A(t_n - t_o)$,

$$\frac{U^2}{R_t} = \alpha A(t_n - t_o),$$

где α – коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воздуху, Вт/(м²·°С); A – площадь поверхности теплоотдачи, м².

При конвективной теплоотдаче в неподвижном воздухе от плоской поверхности, температура которой лежит в диапазоне 0–150 °С, принимают приближенно $\alpha = 10$ Вт/(м²·°С).

3. Влияние условий теплоотдачи (в лабораторной работе – скорости воздушного потока) на температуру нагревателя исследуют на той же экспериментальной установке. Напряжение питания принимают 220 В. Скорость воздуха v изменяют в диапазонах 0,3; 0,6; 0,8 м/с заслонками, перекрывающими воздуховод. При каждом значении скорости воздуха измеряют силу тока в цепи нагревателя I , температуру трубки t_n и спирали t_c (табл. ЛЗ.2.2). По результатам исследований устанавливают графическую зависимость температуры t_n от скорости воздуха v и делают заключение о влиянии температуры спирали t_c на сопротивление нагревателя R_t .

Таблица ЛЗ.2.3

Влияние условий теплоотдачи на температуру нагревателя

Измерено						Вычислено		
$v, \text{ м/с}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$t_o, \text{ }^\circ\text{С}$	$t_n, \text{ }^\circ\text{С}$	$t_c, \text{ }^\circ\text{С}$	$R_t, \text{ Ом}$	$P, \text{ Вт}$	$\alpha, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{С})$

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы, результаты измерений.
2. Графические зависимости мощности и температуры нагревателя от напряжения питания, температуры нагревателя от скорости воздуха.
3. Математическая зависимость мощности и температуры нагревателя от напряжения питания.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Механизм преобразования электрической энергии в тепловую. Закон Джоуля – Ленца.
2. Классификация и устройство элементных нагревателей.
3. Условное обозначение ТЭНов.
4. Основные факторы, влияющие на надежность и безопасность элементных нагревателей.
5. Влияние составляющих уравнения баланса мощностей на характеристики нагревателя.
6. Основные правила монтажа и обслуживания нагревателей.

3.3. Электрообогрев помещений, массивов, материалов и устройств

3.3.1. Электрокалориферы, электрокалориферные установки, конвекторы

Унифицированный электрический калорифер типа СФО представляет собой блок нагревательных элементов, смонтированных в общем корпусе. При протекании электрического тока элементы нагреваются и отдают теплоту контактирующему с ними воздуху.

Выпускают данные электрокалориферы девяти типоразмеров мощностью 5, 10, 16, 25, 40, 60, 100, 160 и 250 кВт. Допустимая температура воздуха на выходе из калорифера – 100 °С. В качестве нагревателей используют ТЭНы мощностью 1,6 и 2,5 кВт.

Специальные электрические калориферы (доводчики температуры) мощностью 2, 6 и 10 кВт используют для компенсации пиков тепловой нагрузки при значительном снижении наружной

температуры. Их встраивают в распределительные воздуховоды или комплектуют отдельным вентилятором.

Конвекционный сельскохозяйственный электрообогреватель типа ЭОКС (рис. 3.15) с развитой теплоотдающей поверхностью нагревает воздух в условиях естественной конвекции. Выпускается двух типоразмеров: ЭОКС-2/1,5-И1 и ЭОКС-6/1,5-И1 мощностью 2 и 6 кВт. Максимальная температура поверхности нагревателя составляет 150 °С, мощность одного ТЭНа – 0,63 кВт.

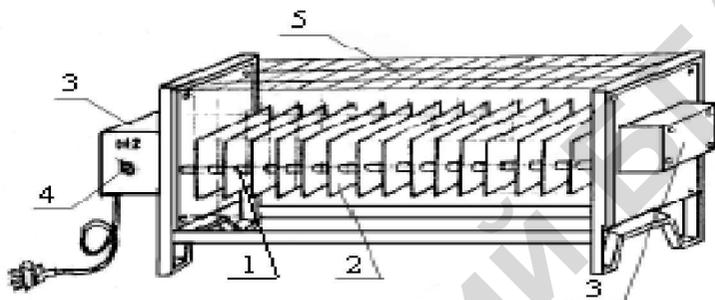


Рис. 3.15. Электроконвектор ЭОКС-2,0/1,5-И1:

1 – трубчатые нагреватели; 2 – пластины оребрения; 3 – коробка соединения ТЭНов; 4 – переключатель мощности; 5 – ограждающая сетка

Электрокалориферная установка (ЭКУ) помимо электрокалорифера включает в себя вентилятор и вспомогательные устройства для направления потока и регулирования подачи воздуха, а также гашения шума и пр. Различают ЭКУ с осевым (СФОО) и с центробежным (СФОЦ, ЭКОЦ) вентиляторами.

Достоинства электрокалориферных установок: совмещение функций отопления и вентиляции в одном агрегате, возможность применения во всех животноводческих помещениях, несложное регулирование теплопроизводительности и подачи воздуха.

Основные технические данные электрокалориферных установок исполнения ИЗ приведены в табл. 3.3.

Обозначения СФОЦ-40/0,5-ИЗ: С – нагрев сопротивлением (резистивный нагрев); Ф – индекс калорифера; О – окислительная среда – воздух; Ц – центробежный вентилятор; 40 – установленная мощность (40 кВт); 0,5 – предельная температура нагретого воздуха в сотнях градусов (50 °С); ИЗ – исполнение.

**Основные технические данные электрокалориферных установок СФОЦ
исполнения И3**

Параметр	СФОЦ- 16/0,5	СФОЦ- 25/0,5	СФОЦ- 40/0,5	СФОЦ- 60/0,5	СФОЦ- 100/0,5
Установленная мощность, кВт:					
- агрегата	15,8	23,3	46,5	69	94
- калорифера	15	22,5	45	67,5	90
Число ТЭНов	6	9	18	27	36
Подача воздуха, м ³ /с	0,44–0,77	0,44–0,77	0,66–1,2	0,9–1,6	1,25–2,5

Электрокалориферные установки типа СФОЦ выпускают в 4 исполнениях И2–И4. В ЭКУ исполнения И2 ТЭНы объединены в трехфазные группы (секции), включая и отключая которые можно ступенчато изменять мощность нагревателя. В последних модификациях (И3, И4) применяют схему управления с бесконтактными элементами (система «Электротерм»), что позволяет непрерывно регулировать мощность. Исполнение И3 в отличие от И4 позволяет регулировать подачу воздуха в помещении.

Установки исполнения И3 также отличаются от И2, И4 конструктивно. Они имеют удлиненный всасывающий патрубок с размещенным на нем тиристорным преобразователем и смесительное (байпасное) устройство с заслонкой (рис. 3.16).

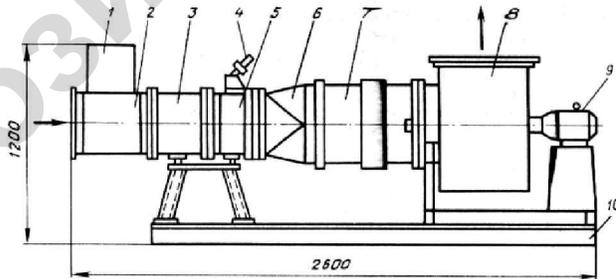


Рис. 3.16. Электрокалориферная установка СФОЦ-40/05-И3:

- 1 – тиристорный преобразователь; 2 – воздуховод; 3 – электрокалорифер;
4 – заслонка; 5 – смесительное (байпасное) устройство; 6 – переходный патрубок (диффузор); 7 – мягкая вставка; 8 – центробежный вентилятор;
9 – электродвигатель; 10 – рама

Принципиальная электрическая схема силовых цепей системы «Электротерм» приведена на рис. 3.17, а. В устройство входят силовой блок с гибридными модулями А1–А3 на базе диод-оптронных тиристоров, включенных в полупроводниковую мостовую трехфазную схему, и блок управления (рис. 3.17, б), содержащий первичный преобразователь ПП, нормирующий термопреобразователь НТП, задатчик базового сигнала ЗБС и систему импульсно-фазного управления СИФУ.

Нормирующий термопреобразователь состоит из измерительного моста, дифференциального усилителя постоянного тока и транзисторного усилителя мощности сигнала.

Система импульсно-фазного управления выполнена по одноканальному принципу и формирует три управляющих импульса, сдвинутых по фазе один относительно другого на 120° и подаваемых в цепи фотодиодов оптронных пар. При замыкании контактов выключателя *QF2* силовой цепи электрического калорифера вводится в действие блокировка, что предотвращает включение нагревателя при отключенном двигателе вентилятора. В схеме предусмотрена защита от обрыва фаз и нулевого провода, токов короткого замыкания и замыкания фазы на корпус.

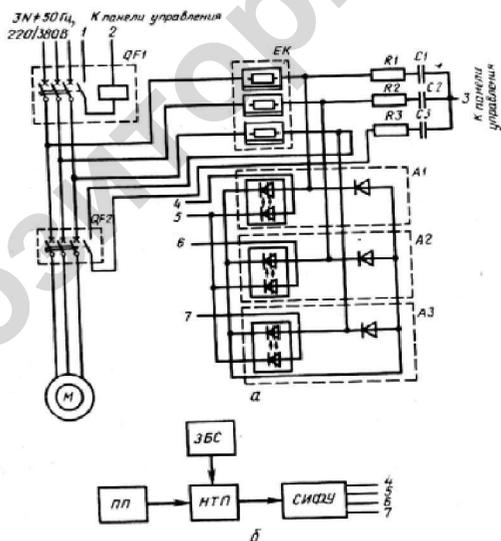


Рис. 3.17. Схемы системы «Электротерм»:

а – принципиальная электрическая силовых цепей; б – структурная блока управления



Рис. 3.18. Электрокалориферная установка ЭКОЦ

Электрокалориферная установка типа ЭКОЦ (рис. 3.18) по устройству аналогична установке СФОЦ. Основой для неё служит специальная рама, на которой размещаются в определённой последовательности сам калорифер типа ЭКО, патрубков и центробежный вентилятор, снабжённый электродвигателем.

Технические характеристики электрокалорифера позволяют ему работать на разных ступенях: 100, 50 % на 50 %, 66,7 % на 33,7 %. Основные технические данные электрокалориферных установок ЭКОЦ представлены в табл. 3.4.

Электрокалориферы ЭКО предназначены для комплектации установок ЭКОЦ. Кроме того, ЭКО могут применяться в качестве канальных подогревателей в приточных вентиляционных системах, скорость воздушного потока в которых не менее 6 м/с.

В электрокалорифере ЭКО-5 установлены 3 ТЭНа, в остальных – ТЭНы расположены в 3 ряда, каждый из которых представляет собой автономную электрическую секцию, в которой нагреватели соединены в «звезду».

В верхнем швеллере каркаса предусмотрен штуцер для установки температурного реле (датчика перегрева ТК – 20/220 В), размыкающее контакты при повышении температуры в корпусе ЭКО выше 140 °С (датчик перегрева поставляется только в комплекте с установками ЭКОЦ).

Таблица 3.4

Основные технические данные электрокалориферных установок ЭКОЦ

Марка установ-ки	Мощ-ность, кВт	Произво-дитель-ность по воздуху, м ³ /ч	Перепад темпера-туры на входе и выходе, °С	Полный аэродина-мич. напор, развиваемый вентилято-ром, Па	Габаритные размеры, мм			Мас-са, кг
					Длина	Ши-рина	Вы-сота	
ЭКОЦ-5	5	500	35	200	500	435	495	81
ЭКОЦ-10	10	800	35	400	800	530	742	120
ЭКОЦ-16	16	1900	35	400	1270	820	742	145
ЭКОЦ-25	24	2500	35	500	1270	820	742	150
ЭКОЦ-40	47	3500	50	800	1400	1005	918	185
ЭКОЦ-60	70	4000	65	950	1400	1005	918	200
ЭКОЦ-100	94	5000	70	1100	1600	1220	1145	260
ЭКОЦ-160	163	7500	85	1500	1600	1220	1145	290
ЭКОЦ-250	250	10000	100	1700	1800	1450	1280	320

Технические характеристики электрокалориферов ЭКО представлены в табл. 3.5. Температура выходящего воздуха составляет не более 50 °С, максимально допустимая температура на поверхности нагревателей – 180 °С.

Установки СФОО-10/0,4-И2 и СФОО-16/0,4-И2 выпускают мощностью 10 и 16 кВт. Калорифер смонтирован на нагнетающем патрубке вентилятора и содержит один ряд ТЭНов с ребристой поверхностью. Подача воздуха – до 2 м³/с, давление – до 300 Па. ЭКУ типа СФОО эксплуатируют без распределительных воздуховодов.

Основные технические характеристики

Характеристика	Тип ЭКО								
	-5	-10	-16	-25	-40	-60	-100	-125	-250
Установленная мощность, кВт	4,8	9,6	15,0	22,5	45,0	67,5	90,0	157,5	250,0
Производительность по воздуху, м ³ /ч	500	800	1900	2500	3500	4000	5000	7500	10000
Перепад температуры вх/вых, °С	35	35	35	35	50	65	70	85	100
Число электрических секций	1	2	2	3	3	3	3	3	3
Мощность секций, кВт	4,8	4,8	7,5	7,5	15	22,5	30	52,5	82,5

ЭКУ типа СФОО (рис. 3.19) используют в безнапорных системах отопления и вентиляции в овоще- и фруктохранилищах, других помещениях, где не требуется больших перепадов температур нагреваемого воздуха (8–10 °С).

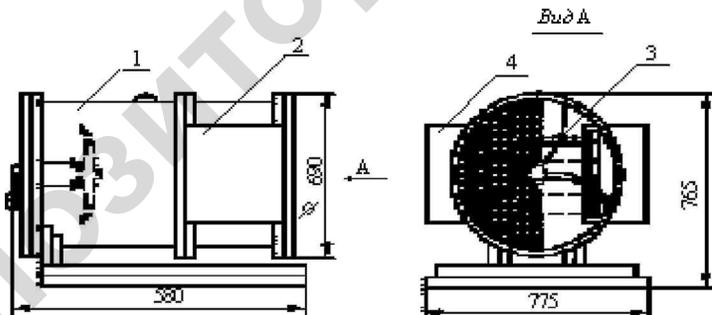


Рис. 3.19. Электрокалориферная установка СФОО-10/0,4И2:

1 – вентилятор; 2 – электрокалорифер; 3 – оребренный трубчатый электронагреватель (ТЭН); 4 – коробка подключений

Электрокалориферные установки применяют для создания и регулирования микроклимата в различных сельскохозяйственных помещениях (свиноматочниках, родильных отделениях, весенних

пленочных теплицах и др.), в качестве резервных источников отопления ответственных помещений, пиковых источников (доводчиков температуры приточного воздуха), а также для активного вентилирования и сушки материалов. Электрокалориферные установки применяют также в строительстве для сушки штукатурки, строительных материалов, краски и создания комфортных условий при выполнении работ.

Основными недостатками ЭКУ общего отопления по сравнению с устройствами местного и комбинированного обогрева являются повышенный расход электроэнергии, необходимость в распределительных воздуховодах, шум в помещении и пр.

Расчет мощности электрокалориферной установки. Расчетную мощность электрокалориферной установки для отопительно-вентиляционных систем определяют из уравнения теплового баланса помещения. Для животноводческих и птицеводческих помещений мощность, необходимая для отопления и вентиляции,

$$P = P_{\text{от}} + P_{\text{в}} - P_{\text{ж}}, \quad (3.71)$$

где $P_{\text{от}}$ – мощность или тепловой поток, теряемый через ограждения, Вт;

$P_{\text{в}}$ – мощность или тепловой поток на подогрев воздуха при вентиляции помещений, Вт;

$P_{\text{ж}}$ – мощность или тепловой поток, выделяемый животными или птицей, Вт.

Мощность, теряемая через ограждения,

$$P_{\text{от}} = q_{\text{от}} V (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (3.72)$$

где $q_{\text{от}}$ – удельная отопительная характеристика помещений, Вт/(м³·°С) (табл. П.1.2 [3]); $V = v_0 N$ – объем помещения, м³; N – количество животных или птицы, гол; v_0 – удельный объем помещения, м³/гол (табл. П.1.2 [3]); $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха, °С.

Температуру наружного воздуха принимают в зависимости от климатического района, в котором расположено данное помещение. Для Беларуси $t_{\text{н}} = -21$ °С. Температура внутреннего воздуха приведена в табл. П.1.2 [3].

Мощность на подогрев воздуха при вентиляции помещения

$$P_{\text{в}} = q_{\text{в}}V(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (3.73)$$

где $q_{\text{в}}$ – удельная вентиляционная характеристика помещения, Вт/(м³·°С) (табл. П.1.2 [3]).

Тепловой поток, выделяемый животными или птицей,

$$P_{\text{ж}} = q_{\text{ж}}N, \quad (3.74)$$

где $q_{\text{ж}}$ – удельный тепловой поток, выделяемый одним животным или птицей, Вт/гол (табл. П.1.7 [3]).

Мощность на подогрев воздуха при *сушке материала*

$$P = \rho_{\text{в}}L(h_{\text{в}} - h_{\text{н}}), \quad (3.75)$$

где $\rho_{\text{в}} = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха при 20 °С; $h_{\text{н}}$, $h_{\text{в}}$ – энтальпии входящего и выходящего воздуха, Дж/кг (прилож. 19); L – подача воздуха, м³/с.

Мощность на *обогрев теплиц и парников*

$$P = k_0A_0\varphi_0, \quad (3.76)$$

где $k_0 = 1,25$ – коэффициент ограждения; $A_0 = A_{\text{пол}}/\eta_{\text{ин}}$ – инвентарная площадь теплицы, м²; $A_{\text{пол}}$ – полезная площадь теплицы, м²; $\eta_{\text{ин}} = 0,85-0,9$ – коэффициент полезного использования инвентарной площади; φ_0 – теплопотери через ограждение.

$$\varphi_0 = \alpha_{\text{т}}k_{\text{инф}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}), \quad (3.77)$$

где $\alpha_{\text{т}} = 10$ Вт/(м²·°С) – коэффициент теплопередачи; $k_{\text{инф}} = 1,25-1,4$ – коэффициент инфильтрации в теплицах.

Мощность на обогрев теплиц и парников делят между почвенным и воздушным обогревом в отношении 1:2. Дальнейший расчет ведут раздельно для воздушного и почвенного обогрева.

Подача воздуха при вентиляции животноводческих и птицеводческих помещений

$$L = 0,8l_{\text{в}}N, \quad (3.78)$$

где l_B – минимальный воздухообмен для животноводческого или птицеводческого помещения, $m^3/(с \cdot гол)$, (табл. П.1.7 [3]).

Подача воздуха при сушке материалов

$$L = \frac{m_{вл} \cdot 10^3}{\rho_B (d_B - d_H)}, \quad (3.79)$$

где $m_{вл}$ – масса влаги, удаляемая при сушке, кг/с; d_H, d_B – влагосодержание подаваемого (наружного) и удаляемого (внутреннего) воздуха, г/кг (прилож. 19).

Масса влаги, которую необходимо удалить,

$$m_{вл} = \frac{m_t (\omega_1 - \omega_2)}{(100 - \omega_2)}, \quad (3.80)$$

где m_t – производительность установки по сырому материалу, кг/с; ω_1, ω_2 – начальная и конечная влажность материала, %.

Расчетная мощность электрокалориферных установок

$$P_{эку} = k_3 P / \eta, \quad (3.81)$$

где $k_3 = 1,05-1,1$ – коэффициент запаса; $\eta = 0,85-0,9$ – КПД установки.

Руководствуясь типоразмерным рядом номинальных мощностей (5; 10; 16; 25; 40; 60; 100 кВт и т. д.), выбирают количество $n_{эку}$ и мощность ЭКУ. Для отопительно-вентиляционных систем мощностью 25 кВт и более их число должно быть не менее двух. Определяют мощность одной ЭКУ $P_{1эку}$. Обычно по расчетной мощности $P_{1эку}$ и подаче воздуха, необходимой на отопление, вентиляцию, сушку или другой технологический процесс, выбирают ЭКУ из числа выпускаемых промышленностью (табл. 3.3, 3.4).

Проверочный расчет ЭКУ. Задача проверочного расчета ЭКУ состоит в определении температуры поверхности оболочки ТЭНа $t_{тр}$ и температуры воздуха t_2 , выходящего из калорифера.

Температура поверхности оболочки

$$t_{тр} = t_B + P_{1эку} / (\alpha_1 A_H), \quad (3.82)$$

где $t_b = 0,5(t_1 + t_2)$ – средняя температура воздуха в электрокалорифере, °С; t_1, t_2 – температуры воздуха на входе и выходе из электрокалорифера, °С;

$$t_2 = t_1 + P_{\text{1ЭКУ}} \eta / (\kappa_3 L_l \rho_b C_b), \quad (3.83)$$

где $C_b = 1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воздуха; $A_n = A_1 z$ – общая активная (теплоотдающая) площадь поверхности ТЭНов, м²; A_1 – активная площадь поверхности ТЭНа, м² (прилож. 6); z – количество ТЭНов, шт.; α_1 – коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНа к воздуху, Вт/(м²·°С).

Коэффициент теплоотдачи находят по номограмме (прилож. 19). Для этого определяют скорость воздуха в калорифере

$$v = L_1 / [0,48(H - z_1 \cdot d_{\text{тр.нар}})], \quad (3.84)$$

где 0,48 – ширина входного отверстия калорифера, м; H – высота входного отверстия (окна) калорифера, м, (прилож. 5); z_1 – число ТЭНов в одном вертикальном ряду.

Температура $t_{\text{тр}}$:

не должна превышать допустимую для выбранного материала трубки (для углеродистых сталей – не более 350 °С);

должна соответствовать технологическим требованиям на нагрев. Для ЭКУ отопительно-вентиляционных систем животноводческих помещений $t_{\text{тр}} \leq 180$ °С.

Температура воздуха на выходе из электрокалорифера отопительно-вентиляционных систем животноводческих помещений $t_2 \leq 50$ °С, при сушке материалов $t_2 \leq 40$ °С.

3.3.2. Установки активного вентилирования и сушки сельскохозяйственных материалов

При активном вентилировании зерна исключается его перемещение, перегрев семян при сушке, их травмирование. Чаще всего этот процесс проводят в закромах и специальных бункерах.

В закромах зерно насыпают слоем 1–1,5 м над воздухораспределительными каналами и продувают его холодным или подогретым в калориферах воздухом (рис. 3.20, а). В этом случае предотвращается самосогревание зерна, и оно может долго храниться.

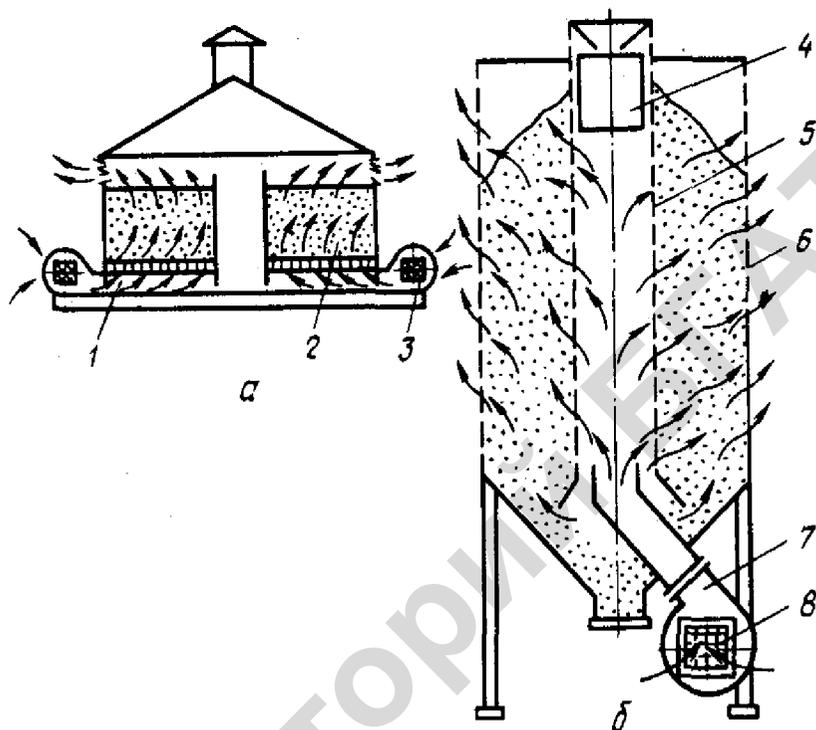


Рис. 3.20. Схемы активного вентилирования зерна:

a – в закромах; *б* – в вентилируемых бункерах; 1 – воздухораспределительный канал; 2 – закром с зерном; 3 – агрегат ВПЭ-6А; 4 – поршень-заглушка; 5 и 6 – внутренний и наружный перфорированные цилиндры; 7 – вентилятор; 8 – электрокалорифер

При сушке зерна в закромах воздух подают в систему воздухо-распределения с помощью центробежных вентиляторов и подогревают воздухоподогревателями (калориферами) с трубчатыми электрическими нагревателями.

Промышленностью выпускается воздухоподогреватель ВПЭ-6А с установленной мощностью 26 кВт (в том числе мощность нагревателей 16 кВт). Подача воздуха составляет до 6 тыс. м³/ч. Агрегат располагают снаружи здания и соединяют воздуховодами с

воздухораспределительной системой закрываем. Можно одновременно вентилировать зерно, насыпанное слоем до 1,5 м на площади до 18 м².

Калорифер воздухоподогревателя содержит 32 трубчатых нагревателя, соединенных в три секции, что позволяет изменять мощность подогрева и, следовательно, температуру выходящего воздуха в соответствии с требованиями технологии.

Бункер активного вентилирования (рис. 3.20, б) состоит из двух коаксиальных перфорированных цилиндров 5 и 6, в кольцевой зазор между которыми засыпают зерно. Во внутренний цилиндр с помощью центробежного вентилятора 7 подают воздух, который пронизывает слой зерна в радиальном направлении и уносит излишнюю влагу. Поршень-заглушка 4 во внутреннем цилиндре не пропускает воздух в незагруженную часть бункера. Положение поршня регулируют в зависимости от высоты слоя зерна.

В вентилируемом бункере атмосферный воздух при влажности более 65 % подогревают на 5–6 °С двухсекционным электрокалорифером 8.

Чаще всего применяют бункеры активного вентилирования БВ-25, БВ-40 и К878 (изготовитель Германия) вместимостью 25, 40 и 29 т и установленной мощностью 29,5; 47,5 и 25,5 кВт (в том числе мощность электрокалорифера 24, 40 и 18 кВт).

Вентилируемые бункеры размещают в зданиях закрытого типа с легкими ограждающими конструкциями промышленного изготовления.

В бункерах БВ-25 и БВ-40, а также отделениях бункеров ОБВ-100 и ОБВ-160 хранят влажные свежесобранные семена и сушат их. В состав отделения ОБВ-100 входят четыре бункера БВ-25, а ОБВ-160 – четыре бункера БВ-40.

Шкаф управления ШАУ 5903-23АЗУЗ для бункера активного вентилирования БВ-25, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 3.21, обеспечивает автоматическое управление сушкой зерна. При этом используются три влагурегулятора $S\phi 1$, $S\phi 2$ и $S\phi 3$, настроенные на влажность воздуха 70,80 и 65 %. Регуляторы $S\phi 1$ и $S\phi 2$ контролируют влажность воздуха при входе в вентилятор, а $S\phi 3$ – на выходе из бункера.

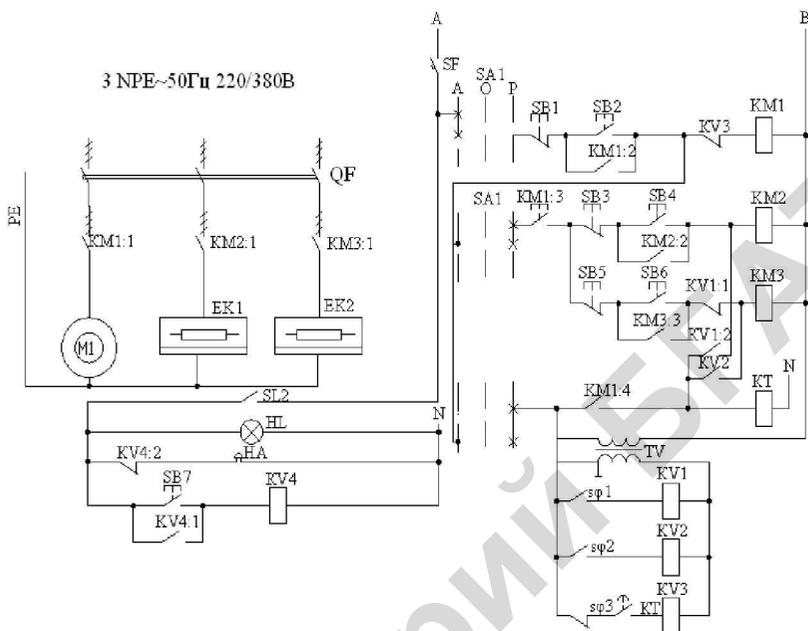


Рис. 3.21. Принципиальная электрическая схема бункера активного вентилирования

При заполнении бункера контакт SL датчика уровня замыкается и срабатывает световая HL и звуковая HA сигнализации. Чтобы снять звуковой сигнал, нажимают кнопку $SB7$.

В автоматическом режиме, нажав кнопку $SB2$, пускают двигатель вентилятора; одновременно включается реле времени KT и с выдержкой 200 с замыкается его контакт в цепи промежуточного реле $KV3$. Если зерно влажное, то относительная влажность воздуха, выходящего из бункера, более 65 %; контакт $S\phi3$ разомкнется и вентилятор будет работать до тех пор, пока влажность воздуха не станет ниже 65 % и контакт не замкнется.

При относительной влажности атмосферного воздуха более 70 % замкнется контакт $S\phi1$, сработает реле $KV1$ и магнитный пускатель $KM2$ включит первую секцию $EK1$ калорифера; при влажности выше 80 % замкнется контакт $S\phi2$, сработает реле $KV2$ и магнитный пускатель $KM3$ включит вторую секцию $EK2$ калорифера.

Сеносоломистые материалы сушат активным вентилированием,

пропуская через них атмосферный или подогретый воздух. Режим сушки выбирают в зависимости от влажности атмосферного воздуха.

Скошенную траву провяливают на солнце и при влажности 35–40 % укладывают в сарай или под навес в скирду на специально устроенные воздухораспределители из перфорированных труб, коробов из досок, жердей и т. п.

Для сушки рассыпного и прессованного сена применяют установку УДС-300 с осевым вентилятором, электрическим калорифером и системой распределительных воздуховодов. Ее установленная мощность – 19,5 кВт (в том числе мощность калорифера 15 кВт), воздухопроизводительность – 20 тыс. м³/ч. В качестве нагревательных элементов используют ТЭНы, подогревающие воздух на 2,5 °С. С помощью установки УДС-300 за сезон получают 50–60 т высококачественного сена.

Сушильные электропечи для плодов. Сушка – основной способ переработки плодов, при котором сохраняется их высокое качество и обеспечивается длительное хранение.

Конвективную сушку проводят в сушилках или сушильных электропечах, пропуская через слой плодов воздух, нагретый с помощью электрокалориферов до температуры 50–75 °С. При этом более высокую температуру поддерживают вначале сушки.

Наиболее распространены камерные и туннельные конвективные сушильные электропечи. Камерная электропечь предназначена в основном для сушки яблок и груш, которые укладывают на решетке слоем до 0,5 м. Туннельная сушилка служит для сушки плодов всех видов, уложенных тонким слоем на ситах, устанавливаемых в несколько ярусов на транспортные тележки, которые подают в сушильную камеру. Чтобы горячий воздух проходил свободно, сита располагают с просветами. Нагретый в калорифере воздух подают с помощью вентилятора в приточный воздуховод. Используя поворотные заслонки (шиберы), находящиеся в приточном и вытяжном воздуховодах, можно равномерно распределить потоки воздуха в камере.

Камерная и туннельная электропечи рассчитаны на разовую загрузку одной тонны сырья и сушку в течение суток. Установленная мощность калорифера – 42 кВт; при толщине слоя плодов 0,5 м подача вентилятора составляет 4000 м³/ч воздуха.

Расход электрической энергии – 5,3–5,6 кВт·ч на получение 1 кг сухофруктов.

Расчет мощности электроподогревателей воздуха для установок активного вентилирования и сушки. Исходные данные для расчета: масса m сырого материала, кг; его начальная ω_1 и конечная ω_2 влажность, %; температура t_0 , °С, и влажность φ_0 наружного воздуха, %; температура воздуха, выходящего из калорифера t_2 , °С; время сушки τ , с.

Масса испаряемой влаги, кг,

$$m_{\text{в}} = \frac{m(\omega_1 - \omega_2)}{100 - \omega_2}. \quad (3.85)$$

Необходимая подача вентилятора, м³/с,

$$L = \frac{m_{\text{в}} 10^3}{\rho(d_2 - d_1)\tau}, \quad (3.86)$$

где $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при средней относительной влажности $\varphi = 0,5(\varphi_0 + \varphi_2)$; d_2 , d_1 – влагосодержание воздуха, выходящего из материала при сушке и входящего в него, г/кг.

Влагосодержание d_1 определяют при температуре t_0 и относительной влажности φ_0 (нагревание в калорифере не изменяет влагосодержания), d_2 – при температуре t_2 и относительной влажности φ_2 . Из опыта принимают $t_2 = t_1 - (3-4) \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi_2 = 80 \text{ \%}$.

Мощность калорифера, Вт,

$$P = \frac{L\rho(h_1 - h_2)}{\eta\eta_{\text{к}}}, \quad (3.88)$$

где h_1 и h_0 – энтальпии воздуха соответственно после и до прохождения через калорифер, Дж/кг; $\eta = 0,8-0,9$ – коэффициент, учитывающий потери воздуха в сушилке; $\eta_{\text{к}} = 0,9-0,95$ – КПД электрокалорифера.

Значения d_1 , d_2 , h_0 и h_1 находят по диаграмме hd (прилож 19).

Электротерморadiационные, высокочастотные и комбинированные сушилки. Электротерморadiационные сушилки – это устройства, в которых теплота передается обрабатываемому материалу от источников инфракрасного излучения (рис. 3.22, а). Преимущество инфракрасной сушки по сравнению с конвективной – возможность получить значительные (в десятки раз больше) тепловые потоки и, следовательно, увеличить интенсивность испарения влаги внутри материала.

Интенсивную радиационную сушку применяют лишь для материалов с хорошей способностью поглощать инфракрасные лучи; причем толщина нагреваемого слоя не должна превышать глубину их проникновения, иначе из-за больших перепадов температур от поверхности вглубь тела процесс сушки замедляется.

Значительное распространение получила терморadiационная сушка лакокрасочных покрытий, тканей, бумаги, электрической изоляции, зерна, риса, семян подсолнечника и овощей, гранулированных кормов и др.

Терморadiационные сушилки бывают периодического и непрерывного действия, стационарные и переносные. Стационарные конструктивно выполняют камерными или туннельными. Материал в них перемещают в вагонетках, на лентах или конвейерах (рис. 3.22, а). Такие сушилки могут быть закрытыми с тепловой изоляцией или открытыми (без ограждений).

Радиационная сушка сопровождается сильным нагревом поверхности материала, в результате чего создается высокий температурный градиент, препятствующий перемещению влаги из глубинных слоев материала к поверхностным. Поэтому применяют прерывистое облучение, при котором в рабочий период поверхность материала быстро нагревается и обезвоживается, а во время паузы влага перемещается от внутренних слоев к поверхностным.

Высокочастотные сушилки – это установки диэлектрического нагрева, в которых происходит объемный ввод энергии в материал (рис. 3.22, б). При быстром нагреве внутренних слоев материала создаются градиенты температуры и давления, направленные наружу, что способствует миграции влаги из глубины тела к поверхности и существенной интенсификации процесса сушки. По

сравнению с конвективной скоростью высокочастотной (ВЧ) сушки выше в десятки-сотни раз. В отличие от других способов ВЧ-сушка обеспечивает равномерную усадку сушильного материала без образования трещин и поверхностной корки.

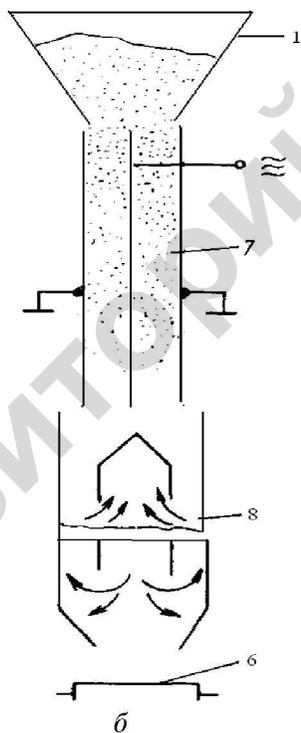
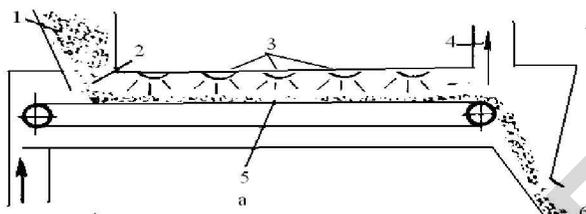


Рис. 3.22. Электрические сушилки:

a – терморadiационная конвейерная, *б* – высокочастотная, 1 – загрузочное устройство; 2 – задвижка; 3 – источники ИК-излучения; 4 – канал для выхода отработанного воздуха; 5 – конвейер; 6 – выгрузное устройство; 7 и 8 – камеры ВЧ-нагрева и охлаждения

В состав высокочастотной сушилки (рис. 3.22, б) входят генератор токов высокой частоты, рабочая камера (камера нагрева), загрузочный бункер, выгрузное устройство. Рабочая камера выполнена в виде конденсатора с коаксиальными сетчатыми электродами. К внутреннему электроду подводят высокое напряжение от генератора, а наружный заземляют. Зерно из бункера самотеком поступает в рабочую камеру, нагревается токами высокой частоты (ТВЧ), высушивается и подается в камеру охлаждения.

Генератор ТВЧ и рабочую камеру ВЧ-сушилки выбирают в соответствии со специальными рекомендациями.

Для сушки зерна используют частоты 10–12 МГц. Мощность установки определяют, проводя тепловой расчет. Энергоемкость при ВЧ-сушке составляет 1,8–3,5 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги.

Вследствие повышенного расхода электрической энергии терморрадиационную и высокочастотную сушилку экономически целесообразно сочетать с другими видами (конвективной, гелиосушкой, сушкой в топливных сушилках).

Например, в комбинированной высокочастотной сушилке прогрев зерна и перемещение влаги от внутренних слоев к наружным происходит за счет энергии ВЧ-поля, а поверхностную влагу удаляют нагретым воздухом. При этом сушка более равномерная, а расход электрической энергии почти в два раза снижается по сравнению с сушкой токами ВЧ.

3.3.3. Устройства электрообогрева массивов

При общем отоплении неравномерность температуры на полу и на высоте 1,5–2,0 м может достигать от нескольких до 10 и более градусов, на уровне пола образуется сквозняк. Повысив температуру пола можно снизить на 1–2 °С среднюю температуру помещения и в результате уменьшить потребление энергии на 10–20 %, не ухудшая тепловой комфорт. Кроме того, молодняк сельскохозяйственных животных на теплом полу не скучивается и не ложится друг на друга, как это бывает при инфракрасном обогреве, в результате повышается их сохранность на 2–3 % и прирост живой массы на 3–4 %.

Устройство электрообогреваемого бетонного пола мало различается в зависимости от его назначения и вида помещения (рис. 3.23).

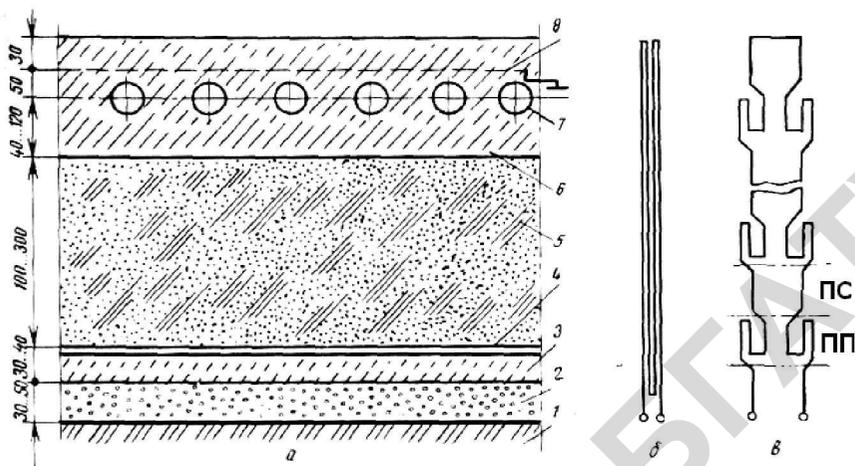


Рис. 3.23. Электрообогреваемый пол:

а – схематический разрез; *б* и *в* – способы укладки нагревательного провода;

1 – утрамбованный грунт; 2 – щебень; 3 и 6 – бетон; 4 и 5 – гидро- и теплоизоляция; 7 – нагревательный провод; 8 – экранирующая сетка;

ПС и ПП – площадки для свиноматов и поросят

Электрообогреваемые полы могут быть сплошными либо в виде полос или площадок, расположенных в зоне содержания животных. В качестве нагревательных элементов используют нагревательные провода и кабели, укладываемые в бетонный пол и подключаемые на сетевое или пониженное напряжение. В последнем случае используют специальные понижающие трансформаторы.

Нагревательные провода или кабели укладывают зигзагообразно с требуемым шагом в слое бетона. Для выравнивания потенциалов в пол укладывают металлическую сетку из стальной проволоки диаметром 3 мм с ячейками 800×200 мм. Температуру пола поддерживают его включением и отключением. Основным недостатком электрообогреваемых полов – их большая материалоемкость и сложность ремонта. Электрообогреваемые полы в производственных, общественных и жилых помещениях создают оптимальный температурный комфорт, экономят электроэнергию, повышают эффективность использования пространства, долговечны, не требуют подстилки, имеют пониженную влажность и концентрацию вредных газов в зоне нахождения животных. Обладая

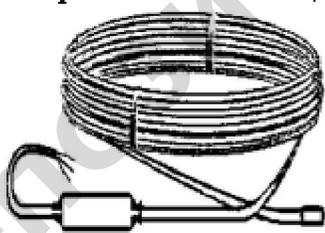
большой аккумуляционной способностью, они позволяют использовать внепиковую электроэнергию и безболезненно переносить перерывы электроснабжения,

Электрообогреваемый пол можно использовать как дополнительную (комфортную) и как основную (с аккумуляцией теплоты) системы отопления. В первом случае установленная мощность составляет до 150 Вт/м^2 , во втором – не должна превышать 200 Вт/м^2 . В противном случае аккумуляционная система должна быть дополнена другим отопительным оборудованием, например электроконвекторами. Рекомендуемая мощность в области края пола $200\text{--}250 \text{ Вт/м}^2$. Обычно ширина краевой зоны составляет $0,5\text{--}1,5 \text{ м}$.

Нагревательный провод или кабель укладывают в нижней части бетонной стяжки. Толщина стяжки для тёплых полов составляет $40\text{--}50 \text{ мм}$, для аккумулирующих – более 70 мм , краевой зоны – до 30 мм . В отдельных случаях в жилых помещениях толщина стяжки может составлять не более 20 мм . Гидроизоляция является необходимым элементом пола в сырых помещениях, особенно в животноводческих.

В настоящее время выпускают комплекты электротехнической части обогреваемого пола в составе одной или нескольких нагревательных секций, терморегулятора, монтажной ленты, трубки для защиты термопреобразователя, если его устанавливают в полу (рис. 3.24).

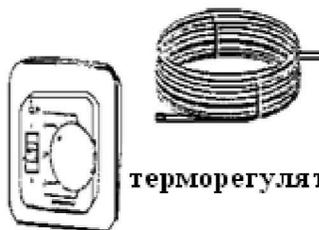
нагревательная секция



монтажная лента



термопреобразователь с питающими проводами



терморегулятор

гофрированная трубка

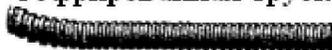


Рис. 3.24. Комплект для электрообогреваемого пола

Нагревательная секция – это отрезок нагревательного кабеля фиксированной длины, рассчитанной на определённую величину напряжения питания. Секции могут быть одно- и двухжильными. В одножильной секции нагревательная жила и экранирующая оплётка кабеля подключены в соединительных муфтах к медным проводам, которые в свою очередь подключают к терморегулятору и к сети питания. В двухжильной секции две жилы кабеля и оплётка в соединительной муфте подключены к медным выводным проводам, а другие концы жил закорочены между собой в концевой муфте.

Шаг укладки кабеля на полу может быть различным, например, в зонах содержания взрослых и молодняка животных (рис. 3.25). Обычно он находится в диапазоне от 50 до 200 мм.

Расчет нагревательных элементов начинают с определения конфигурации и площади обогреваемого участка пола. Если температура поверхности пола должна быть равномерной, провода укладывают с постоянным шагом (рис. 3.23, б). При необходимости дифференцировать температуру (например, в свиноматочнике) в зависимости от возраста животных принимают переменный шаг укладки (рис. 3.23, в): больший – на площадке для свиноматки, меньший – в месте размещения поросят. Рекомендуемые параметры для расчета электрообогреваемых полов приведены в прилож. 7.

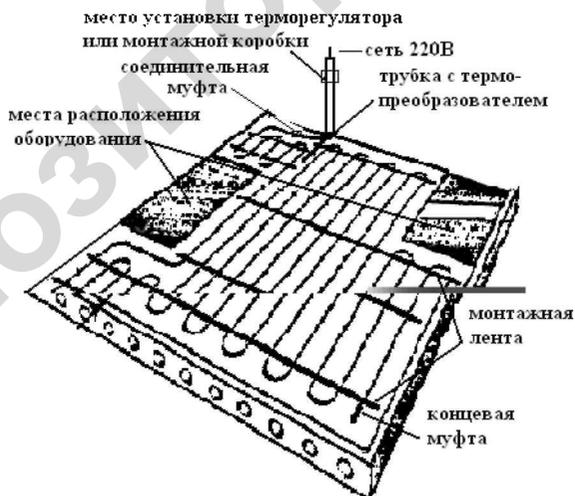


Рис. 3.25. Схема укладки нагревательной секции

Размеры нагревательного элемента находят, проводя тепловой и электрический расчеты. Пусть нагревательный элемент уложен в массив пола.

Тепловой поток, направленный от поверхности пола, Вт/м²,

$$\Phi_0 = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), \quad (3.89)$$

где $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ – коэффициент теплоотдачи; $t_{\text{п}}$ и $t_{\text{в}}$ – температуры поверхности пола (прилож. 7) и воздуха над массивом.

Перепад температур между нагревательным проводом с многослойной изоляцией и поверхностью пола, $^\circ\text{С}$,

$$\Delta t = t_{\text{ж}} - t_{\text{п}} = \frac{\Phi_0 A}{l} \left[\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\ln(D_i/d)}{2\pi\lambda_{\text{и}i}} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{2a}{\pi D} \operatorname{sh} \frac{2\pi h}{a}\right) \right], \quad (3.90)$$

где $t_{\text{ж}}$ – температура токоведущей жилы, $^\circ\text{С}$; A – обогреваемая площадь, м²; l – длина провода на обогреваемой площадке, м; $\frac{\ln(D_i/d)}{2\pi\lambda_{\text{и}i}}$ – термическое сопротивление i -го слоя изоляции, м $^\circ\text{С}/\text{Вт}$; D_i – наружный диаметр i -го слоя изоляции, м; d – диаметр токоведущей жилы, м; $\lambda_{\text{и}i}$ – теплопроводность i -го слоя изоляции, Вт/(м $^\circ\text{С}$); λ – теплопроводность бетона, Вт/(м $^\circ\text{С}$); a и h – шаг и глубина укладки провода, м.

Если нагревательный элемент выполнен из неизолированного провода, то выражение (3.90) имеет вид

$$\Delta t = t_{\text{ж}} - t_{\text{п}} = \frac{\Phi_0 A}{2l\pi\lambda} \ln\left(\frac{2a}{\pi d} \operatorname{sh} \frac{2\pi h}{a}\right). \quad (3.91)$$

Уравнения (3.90) и (3.91) решают графоаналитическим методом, задавая значения шага a и принимая конкретную конструкцию и технологию изготовления пола.

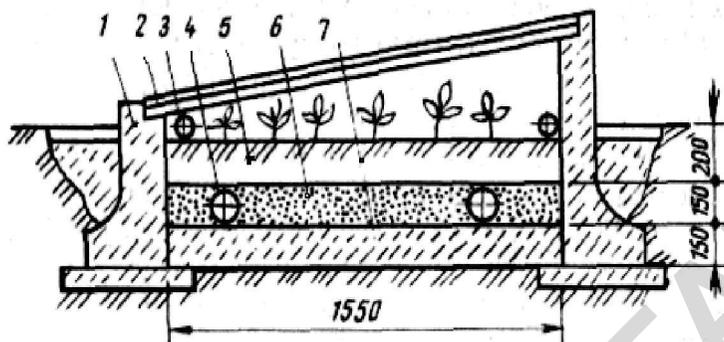


Рис. 3.26. Устройство электрообогрева почвы и воздуха в парнике трубными нагревательными элементами.

1 – парубни, 2 – рама; 3 и 4 – элементы воздушного и почвенного обогрева; 5 – почва; 6 – песок; 7 – плiak

При заданной температуре $t_{\text{п}}$ перепад температур Δt выбирают таким, чтобы температура $t_{\text{ж}}$ не превышала допустимую, а шаг a укладки провода таким, чтобы обеспечить необходимый поверхностный тепловой поток $\Phi_{\text{п}}$.

Установленная мощность нагревателя на обогреваемой площадке, Вт,

$$P = \frac{\Phi_0 A}{\eta}, \quad (3.92)$$

где $\eta = 0,7 - 0,85$ – КПД обогреваемого пола.

Пользуясь выражением (3.92), можно перейти от теплотехнического к электрическому расчету.

Общая длина нагревательного провода, уложенного в полу, м,

$$L = \frac{A}{a}. \quad (3.93)$$

Полученное значение L проверяют по условию

$$L = \frac{P}{\Delta P_{\text{д}}}, \quad (3.94)$$

где $\Delta P_{\text{д}}$ – допустимая удельная мощность провода, Вт/м.

Число фазоветвей (параллельных отрезков провода в одной фазе)

$$Z = \frac{P}{U_{\phi} \sqrt{R/\Delta P}}, \quad (3.95)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение, В; R – линейное сопротивление провода, Ом/м; $\Delta P = \frac{P}{L}$ – удельная мощность провода, Вт/м.

Длина отрезка провода, подключаемого к фазному напряжению, м,

$$l = \frac{L}{Z}. \quad (3.96)$$

Зная конфигурацию обогреваемой площади, длину l отрезков провода, их число Z , приходящееся на одну фазу, и шаг a укладки, komponуют нагревательный элемент и разрабатывают схему включения.

В каждой трехфазной секции электрообогреваемого пола предусмотрены индивидуальное питание и регулятор температуры пола.

Электрообогреваемые полы монтируют также из бетонных или асфальтобетонных блоков или плит, в которых расположены нагревательные элементы и защитная сетка. Например, бетонная электрообогреваемая плита ПБЭ-0,2-32 при установленной мощности 200 Вт и напряжении 32 В имеет габаритные размеры $1,4 \times 0,6 \times 0,06$ м и массу 80 кг.

Электрообогреваемые бетонные плиты лишены в значительной мере недостатков электрообогреваемых полов. Плита изготавливается промышленным методом и представляет собой бетонный блок, внутрь которого уложен нагревательный провод, сетка для выравнивания потенциалов и узел соединения токопроводящих проводов с нагревателями. Напряжение питания одной плиты 36 или 110 В. Плиты соединяют последовательно и подключают на сетевое напряжение. Плиты применяют для

обогрева небольших сельскохозяйственных помещений (родильные отделения КРС, профилактории, бытовки и др.), навешивая их, наподобие отопительных батарей, на стенки. Плиты могут использоваться для создания электрообогреваемого пола, что экономичнее сооружения стационарного пола.

В *сооружениях защищенного грунта* в зависимости от их назначения обогревают почву, воздух или то и другое одновременно. Наиболее рационален с точки зрения затрат электроэнергии и по агротехническим показателям почвенно-воздушный обогрев, который применяют в теплицах и парниках, эксплуатируемых круглый год. В теплицах, используемых весной, летом и осенью, предусматривают только воздушный, а в парниках для выращивания рассады – почвенный обогрев.

Из электрических способов в основном применяют элементный и электрокалориферный обогрев почвы и воздуха.

Устройства элементного обогрева почвы и воздуха различают по конструктивному выполнению нагревательных элементов, их размещению, значению питающего напряжения и пр. Нагревательными элементами служат нагревательные провода и кабели, а также стальной неизолированный провод.

При почвенном обогреве нагревательные элементы располагают следующими способами: в асбоцементных или гончарных трубах диаметром 50–150 мм, уложенных в песке под питательным слоем почвы (рис. 3.26); непосредственно в слое песка под почвой; в асфальтобетонных монолите или блоках под почвой.

Для обогрева воздуха нагревательные элементы подвешивают на строительных конструкциях сооружений защищенного грунта (непосредственно или в асбоцементных трубах диаметром 50–75 мм). К нагревательным элементам подводят напряжение 380/220 В или пониженное 24–17 В.

Нагревательные элементы, проложенные в трубах, защищены от влаги и механических повреждений, их легко ремонтировать и безопасно обслуживать; кроме того, при таком расположении выравнивается температура почвы. Основной недостаток – большой расход труб.

Обогреватели, выполненные в виде асфальтобетонного монолита или асфальтобетонных либо асфальтокерамзитобетонных плит, имеют большую аккумуляционную способность, равномерно

нагревают почву, электробезопасны. Устройство парника со сплошным асфальтобетонным покрытием нагревательного элемента показано на рис. 3.27.

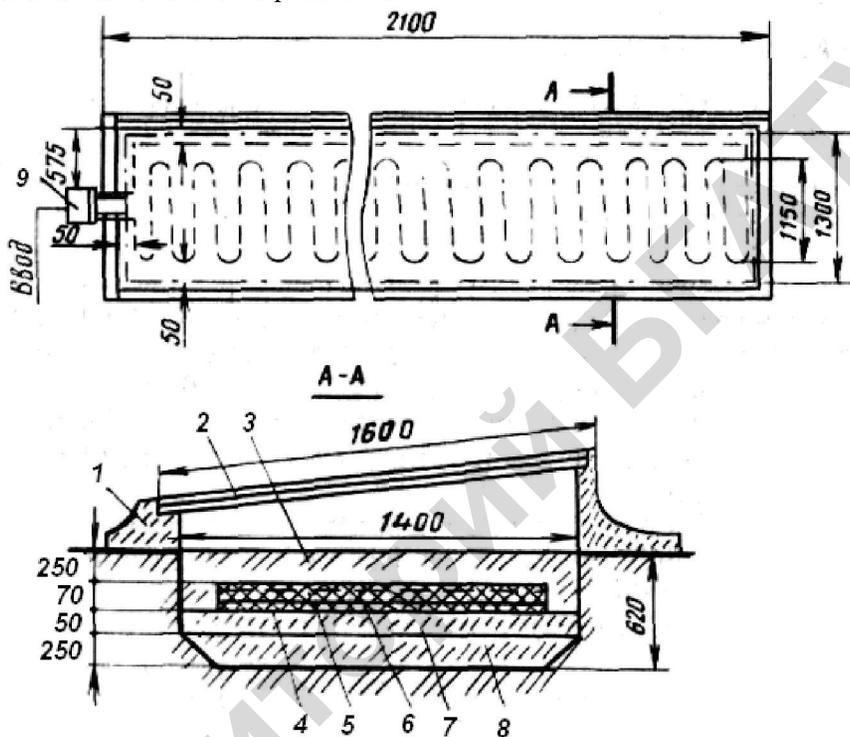


Рис. 3.27. Устройство электрообогрева почвы и воздуха в парнике с помощью асфальтобетонного монолита:

- 1 – парубки; 2 – рама; 3 – почва; 4 – асфальтобетонный монолит;
 5 – нагревательный элемент; 6 – защитная сетка-экран; 7 – гравий; 8 – грунт;
 9 – коробка выводов

На грунт насыпают слой шлака, затем песка, на который укладывают асфальтобетон (88 % песка, 12 % битума). Нагревательный провод или стальную неизолированную проволоку укладывают зигзагообразно и заливают асфальтобетоном, что обеспечивает хорошую электрическую изоляцию. Для питания нагревателя используют напряжение 380/220 В или пониженное.

Электрокалориферные установки применяют не только для обогрева почвы и воздуха, но и в качестве резервных при пиковых нагрузках. В парниках электрокалориферами обогревают почву, пропуская нагретый воздух по замкнутой системе воздухопроводов и подпочвенных труб, в теплицах – почву и воздух. При почвенно-воздушном обогреве воздух из подпочвенных воздухопроводов поступает в воздушную зону теплицы, а оттуда вновь в электрокалориферную установку. При воздушном обогреве применяют воздухораспределительные перфорированные трубы из пластмассы или полимерной пленки диаметром 180–250 мм.

Мощность электрообогрева сооружений защищенного грунта рассчитывают, пользуясь уравнением теплового баланса.

В практических расчетах мощность (Вт) установок электрообогрева для компенсации потерь теплоты находят по приближенной формуле

$$P = k_0 A_0 (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}), \quad (3.97)$$

где k_0 – приведенный коэффициент теплопередачи через остекления парников и теплиц (при изменении скорости ветра от 0 до 10 м/с $k_0 = 4 - 12$ Вт/(м²·°С); A_0 – площадь поверхности остекления, м²; $t_{\text{вн}}$ – температура внутри сооружения, необходимая для выращивания растений, °С; $t_{\text{нар}}$ – расчетная наружная температура, определяемая для конкретного района по СНиП 11-33-75.

В среднем удельная поверхностная мощность обогрева для парников составляет 150–200, а для весенних теплиц 100–160 Вт/м².

Нагревательные элементы почвенного и воздушного обогрева рассчитывают отдельно. Принимают мощность почвенного нагревателя для парников $P_{\text{п}} = (0,5 - 0,66)P$, для теплиц $P_{\text{п}} = (0,33 - 0,5)P$.

Параметры нагревательных элементов, выполненных в виде асфальтобетонных блоков и плит, можно определить по методике, изложенной выше.

Стальные нагреватели, уложенные в асбоцементные трубы или асфальтобетонные плиты, рассчитывают, используя зависимости,

приведенные на рис. 3.28. При этом необходимо определить диаметр d и длину L нагревательного элемента.

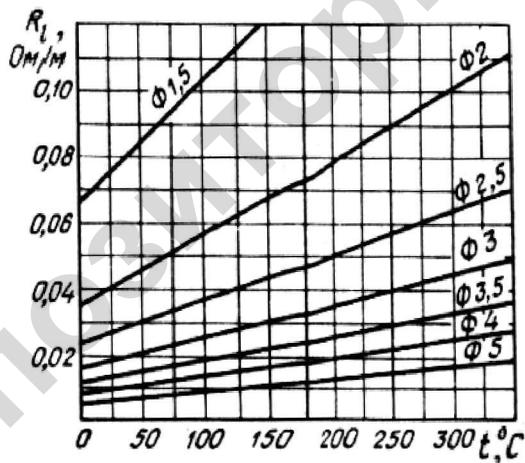
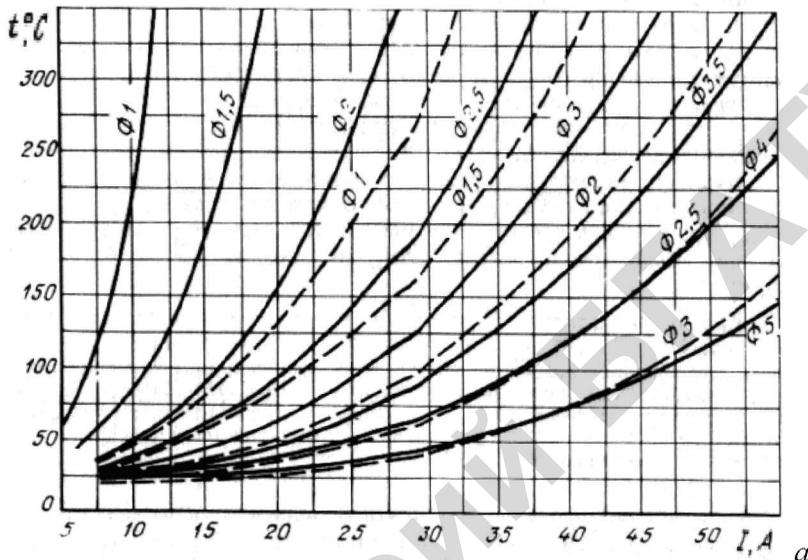


Рис. 3.28. Зависимости, используемые при расчете стальных нагревателей: a – температуры провода от силы тока; b – удельного линейного сопротивления провода от температуры (сплошная линия – провод проложен в асбоцементной трубе, пунктирная – в асфальтобетоне)

Активное сопротивление ветви, Ом,
Фазный ток нагревателя, А,

$$I_{\phi} = \frac{P}{mU_{\phi} \cos\varphi}, \quad (3.98)$$

где m – число фаз; U_{ϕ} – фазное напряжение, В; $\cos\varphi = 0,86$ – коэффициент мощности стального провода.

Исходя из конструктивных соображений, один из этих параметров задается, а другой находят. Температура проводов в асфальтобетонных плитах не должна превышать 70, в асбоцементных трубах – 250 °С. Допустимую силу тока I_d провода при заданных значениях t_{np} и d определяют, пользуясь рис. 3.28, а, и находят число параллельных ветвей

$$n = I_{\phi} / I_d, \quad (3.99)$$

которое округляют до ближайшего большего целого числа.

По значению фазного тока ветви

$$I_1 = I_{\phi} / n \quad (3.100)$$

уточняют температуру провода t_{np} (рис. 3.28, а).

$$R_b = \frac{mnU_{\phi}^2 \cos\varphi}{P}. \quad (3.101)$$

По известным значениям d и t_{np} определяют удельное линейное сопротивление R_l (рис. 3.28, б) и рассчитывают длину провода ветви, м.

$$L = R_b / R_l. \quad (3.102)$$

При компоновке нагревателя длину L корректируют в сторону увеличения, чтобы она была кратной длине культивационного сооружения.

Электрообогреваемые парники и теплицы по степени опасности поражения электрическим током относят к категориям А и Б.

Для обогрева парников и теплиц категории А используют неизолированные нагревательные устройства (электродные или элементные) при напряжении питания выше 65 В и асфальтобетонные блоки, к которым подводят напряжение 380/220 В. В эту же категорию входят помещения, в которых для обогрева воздуха применяют нагревательные провода, почвы – устройства без заземленной экранирующей сетки.

Для обогрева парников и теплиц категории Б используют неизолированные нагревательные устройства при напряжении питания ниже 65 В и элементы, проложенные в асбоцементных трубах, при напряжении выше 65 В. К этой же категории относят помещения, в которых для обогрева почвы служат провода и кабели с экранирующей сеткой или защитным отключением.

Парники и теплицы категории А должны быть огорожены сплошным забором высотой 2 м, отстоящим от ближайшего строения не менее чем на 1 м. Работать в этих помещениях можно только при отключенном напряжении.

В парниках и теплицах категории Б разрешается работать при включенном обогреве, если обслуживающий персонал использует инструмент с изолирующими рукоятками и погружает его в почву не более чем на 0,2 м.

Перед началом эксплуатации и затем ежегодно необходимо проверять сопротивление контура заземления подстанции и повторных заземлений питающей линии, а также сопротивление изоляции нагревательных устройств.

3.3.4. Устройства электрообогрева трубопроводов, резервуаров, водостоков

Электрообогрев используют для защиты от замерзания и для поддержания требуемой температуры жидкости внутри трубы. Устройство подогрева можно монтировать на наружной части или внутри трубы, проложенной над или под землей. Подогрев

исключает наледи на трубах, обеспечивает постоянную вязкость и равномерное течение жидкости, позволяет производить установку труб в земле на любой глубине.

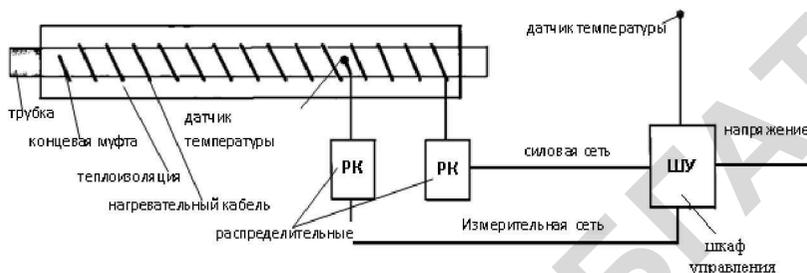


Рис. 3.29. Схема устройства электрообогрева трубопровода

Нагревательный кабель укладывают спиралью, прямой или волнистой линией непосредственно на поверхности трубы и приклеивают липкой алюминиевой лентой (рис. 3.29); трубу вместе с кабелем теплоизолируют пенопластом, минеральной ватой или другим материалом, толщиной от 10 до 50 мм. Изоляцию защищают от сырости и влаги. Электрообогреваемые трубы оснащают специальной надписью: «Внимание: нагревательный кабель 220 В». Надпись размещают на трубе, если она проложена в воздухе, или на специальной пластиковой ленте, проходящей над трубой в земле.

В большинстве случаев мощности кабеля 10 Вт на метр длины трубы достаточно для защиты от замерзания, если наружный диаметр трубы не превышает 50 мм, толщина изоляции не менее 50 мм, а наружная температура – не ниже -30°C .

Установка нагревательного кабеля внутри трубы весьма эффективна с точки зрения теплопотери. Оболочка кабеля из пищевого полиэтилена безвредна и не влияет на вкусовые качества жидкости в трубе.

Автостоянки, дороги, тротуары, наружные ступени, погрузочные рампы, мосты, крыши и водостоки – наиболее распространенные места стаивания снега и льда. При разработке устройств стаивания необходимо учитывать географическое местоположение

объекта, его назначение и специфику, требования к устройству, например, скорость таяния снега, возможность отвода талой воды, промерзаемость объекта снизу и сверху и др.

Нагревательный провод или кабель может быть уложен под асфальт, в бетон, под тротуарную плитку, на крышах, в желобах и водостоках. Существует два способа установки нагревателей под асфальт. Если стойкость изоляции кабеля менее $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, кабель укладывают в песок, а лучше в бетон толщиной до 20 мм, а потом укладывают асфальт, охладив его до $130\dots 140\text{ }^{\circ}\text{C}$. При способности изоляции выдерживать кратковременно температуру $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ асфальт укладывают непосредственно на кабель. При укладке асфальта желательно не использовать тяжелое оборудование, чтобы не повредить кабель. Минимальная толщина асфальта над кабелем 50 мм.

Электрообогрев ступеней (рис. 3.30) является эффективным средством удаления льда и снижения травматизма.

Ступени, открытые снизу, необходимо теплоизолировать. Если они расположены на грунте, это сделать желательно, но не обязательно.

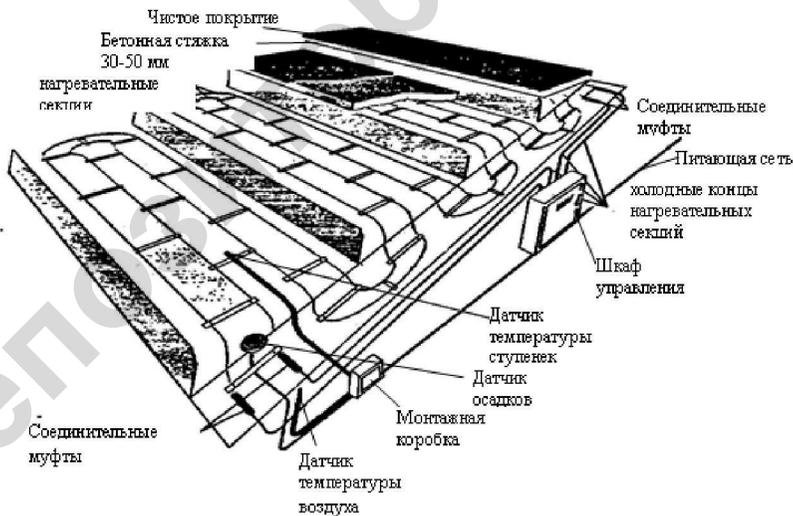


Рис. 3.30. Схема укладки и подключений кабеля при обогреве ступенек

Установленная мощность устройств стаивания для широт, в которых находится Беларусь, составляет 250–400 Вт/м². Мосты и погрузочные платформы особенно чувствительны к холоду и ветру. Ветер со скоростью 10 м/с дополнительно снижает температуру приблизительно на 5 °С. Мощность для них должна быть увеличена до 50 %, если нет возможности укладывать нагревательный кабель на термоизоляцию. Удельная поверхностная мощность обогрева ступеней всегда должна быть выше мощности обогрева площадки перед ними. Витки кабеля укладывают на горизонтальную поверхность ступеней равномерными петлями как можно ближе к краям каждой ступени. Толщина бетонного покрытия над кабелем – 30–50 мм.

Монтаж нагревательных проводов и кабелей под бетон и тротуарную плитку выполняют также как и монтаж в бетонных полах. Поверхность должна быть ровной, без углублений, свободной от острых камней. Кабель крепят к монтажной ленте или стальной арматуре, избегая пересечения термошвов. Бетон должен покрывать кабель и переходные муфты, не содержать воздушных пустот.

Электрообогрев крыш, желобов, водостоков и ендовых применим к любой конструкции кровли. Удельная мощность обогрева зависит от типа крыши: холодная, теплая или горячая.

«Холодная крыша» – хорошо теплоизолированная, часто с проветриваемым подкровельным пространством. Наледи образуются, когда снег тает на солнце, при температуре воздуха не ниже -5 °С. Мощность подогрева в этом случае минимальна и часто подогрев применяют только в водостоках.

«Теплая крыша» – плохо теплоизолированная, снег на ней тает при температуре не ниже -10 °С. К этому типу относят большинство крыш старых административных зданий с чердаком. Для них необходима полномасштабная система снеготаяния, более мощная, чем на холодных крышах.

«Горячая крыша» – слабо теплоизолированная, у которой чердак часто используют в технических или жилых целях. Снег тает при температуре даже ниже -10 °С. Успех электрообогрева таких крыш далеко не всегда предопределен.

Нагревательный кабель укладывают витками вдоль края крыш, а не в виде сплошной линии (рис. 3.31). Кабель следует надежно

закрепить. В некоторых случаях поверх кабеля укладывают защитный лист из того же металла, что и основная кровля. Это защищает кабель от механических повреждений, солнечных лучей, упавших листьев и семян растений. Кровля должна быть оборудована снегозадержателями, установленными на расстоянии 0,05–0,1 м от края крыши.

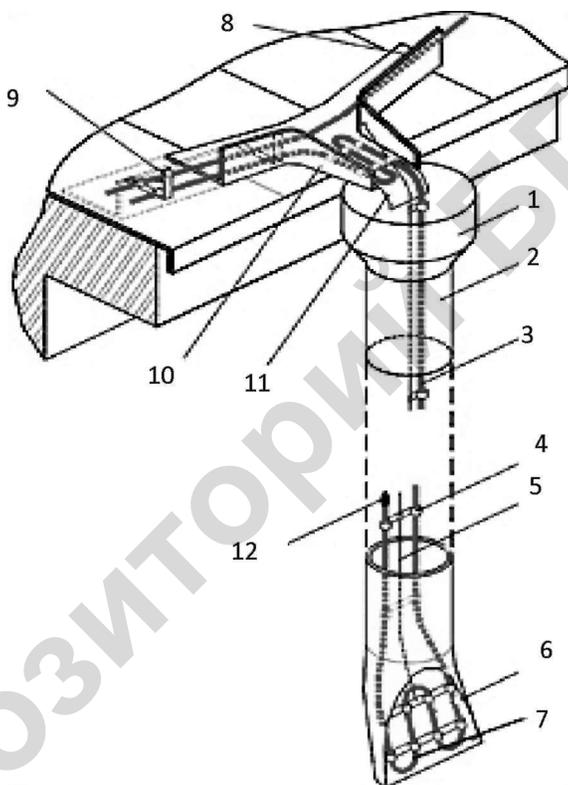


Рис. 3.31. Обогрев водосточной трубы большого диаметра и желоба:

- 1 – водоприемная воронка; 2 – водосточная труба; 3 – нагревательный кабель;
 4 – крепежный зажим; 5 – трос; 6 – отмет; 7 – усиленный обогрев отмета;
 8 – водосборный желоб; 9 – кронштейн, крепящий кабель к желобу;
 10 – направляющий лоток; 11 – поворотный элемент, обеспечивающий плавный изгиб кабеля; 12 – концевая муфта

В желобах нагревательные кабели укладывают параллельными линиями, на определенном расстоянии, при помощи специального пластикового крепления. Для «холодных крыш» чаще всего достаточно двух линий, для «теплых» – 3, 4 линии кабеля.

В водостоках кабель подвешивают на тросе или цепи, закрепленной за крышу. Чаще всего достаточно одной линии кабеля.

Контрольные вопросы

1. Электрокалориферы и электрокалориферные отопительно-вентиляционные установки, назначение, устройство, способы регулирования мощности и подачи воздуха.

2. Выбор и проверочный расчет электрокалориферных отопительно-вентиляционных установок.

3. Выбор и проверочный расчет электрокалориферных установок для обогрева теплиц и парников.

4. Выбор и проверочный расчет электрокалориферных установок для подогрева воздуха при сушке материалов.

5. Установки активного вентилирования и сушки сельскохозяйственных материалов, устройство, области применения.

6. Расчет мощности электронагревателей воздуха установок активного вентилирования.

7. Электрические печи сопротивления ремонтного производства, виды, назначение, устройство.

8. Расчет электрических печей сопротивления ремонтного производства.

9. Отопительные аккумуляционные электропечи, устройство, назначение.

10. Расчет отопительной аккумуляционной электропечи.

11. Установки конвективного электрообогрева, устройство, достоинства и недостатки.

12. Электрообогреваемые панели, плиты, полы, коврики, устройство, достоинства и недостатки.

13. Расчет напольных средств электрообогрева.

14. Установки комбинированного электрообогрева, устройство, области применения.

15. Способы и виды электрообогрева почвы и воздуха в сооружениях защищенного грунта.

16. Расчет устройств электрообогрева почвы и воздуха в сооружениях защищенного грунта.

17. Рассчитать температуру ТЭНов отопительной электрокалориферной установки СФОЦ-40/0,5ТИ2 при подаче воздуха $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ и его температуре на входе $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

18. Рассчитать электрообогреваемый пол в свинарнике для поросят-отъемышей. Размер обогреваемой площадки – $2,5 \times 20 \text{ м}$, ее температура – $25 \text{ }^\circ\text{C}$, температура воздуха в свинарнике – $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Для обогрева использовать провод ПОСХВТ, глубина заложения которого $0,08 \text{ м}$.

19. Определить мощность и диаметр стальной оцинкованной проволоки, применяемой для обогрева почвы квартала, состоящего из 12 двадцатирамных парников. Вдоль каждого парника прокладывают три ряда асбоцементных труб диаметром $0,1 \text{ м}$, в которые помещают стальную проволоку. Расчетная температура в парнике $17 \text{ }^\circ\text{C}$, температура наружного воздуха $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, напряжение сети $380/220 \text{ В}$.

Практическое занятие 5

Выбор и проверочный расчет электрокалориферных установок

Задача занятия. Выбрать электрокалориферную установку по назначению, мощности и подаче воздуха.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе, литературе [3], изучить методику выбора электрокалориферной установки, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 5.1. Выбрать ЭКУ для отопительно-вентиляционной системы помещения.

Таблица ПЗ.5.1

Исходные данные к задаче 5.1

Но- мер вари- анта	Наименование помещения	Количес- тво живот- ных (пти- цы) N , гол	Масса животно- го (птицы) m , кг	Параметры наружного воздуха	
				температу- ра $t_{нв}$, °С	влажность ω , %
1	2	3	4	5	6
1	Коровник	200	300	-10	80
2	Воловник	100	800	-10	80
3	Телятник (от 1 до 3 мес.)	200	60	-10	75
4	Свинарник (молодняк)	400	50	-10	80
5	Свинарник (откорм)	400	100	-10	80
6	Птичник (куры)	15000	2,0	-10	75
7	Птичник (утки)	15000	2,5	-10	75
8	Коровник	400	400	-15	85
9	Воловник	200	600	-15	80
10	Телятник (от 3 до 4 мес.)	200	90	-15	80
11	Свинарник (молодняк)	450	80	-15	85
12	Свинарник (откорм)	450	200	-15	85
13	Птичник (куры)	10000	2,0	-15	75
14	Птичник (утки)	10000	2,5	-15	75
15	Коровник	400	500	-20	95
16	Воловник	400	400	-20	85
17	Телятник (от 1 до 3 мес.)	300	100	-20	75
18	Телятник (от 3 до 4 мес.)	300	150	-20	75
19	Свинарник (молодняк)	350	100	-20	95

1	2	3	4	5	6
20	Свинарник (откорм)	500	200	-20	95
21	Птичник (куры)	17000	2,0	-20	85
22	Птичник (утки)	17000	2,5	-20	85
23	Коровник	200	400	-5	90
24	Птичник (куры)	20000	2,0	-5	70
25	Птичник (утки)	20000	2,5	-5	70

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Запишите уравнение теплового баланса для животноводческого помещения.
2. Как определить мощность электрокалориферной установки для отопительно-вентиляционной системы помещения?
3. Перечислите критерии выбора электрокалориферной установки.
4. В чем состоит задача проверочного расчета электрокалориферной установки?
5. Как определить температуру воздуха на выходе из электрокалориферной установки?
6. Как определить температуру трубки ТЭНа электрокалориферной установки?

Практическое занятие 6

Расчет массивов

Задача занятия. Выбрать конструктивное исполнение устройств обогрева массивов, напряжение питания; определить длину, диаметр, количество фазоветвей, температуру, схему укладки провода и др.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и литературе [3], изучить методику расчета массивов, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

6.1. Расчет устройств электрообогрева в сооружениях защищенного грунта

Индивидуальные задания

Задача 6.1.1. Рассчитать трубный нагревательный элемент (ТНЭ) со стальным оцинкованным проводом для почвенного нагрева квартала из N стандартных парников (рис. 11.1 [3]). Внутренние размеры стандартного парника: ширина – 1,5 м, длина – 21,5 м. Напряжение питания – 380/220 В. На период ввода парников в работу предусмотреть ускоренный нагрев почвы.

Таблица ПЗ.6.1.1

Исходные данные к задаче 6.1.1

Номер варианта	Начальная температура воздуха внутри парника $t_{в}$, °С	Расчетная температура наружного воздуха $t_{н}$, °С	Покрытие ограждения	Количество стандартных парников в квартале N , шт.
1	2	3	4	5
1	10	-3	Стеклопанельное однослойное	18
2	7	-4	Стеклопанельное двухслойное	20
3	8	-5	Пленочное однослойное	22
4	9	-6	Пленочное однослойное	24
5	12	-7	Пленочное двухслойное	18
6	14	-8	Пленочное двухслойное	20
7	7	-4	Стеклопанельное однослойное	22
8	8	-5	Стеклопанельное двухслойное	24
9	9	-6	Пленочное однослойное	18
10	10	-7	Пленочное однослойное	20
11	14	-8	Пленочное двухслойное	22
12	12	-3	Пленочное двухслойное	24
13	8	-5	Стеклопанельное	18
14	9	-6	Стеклопанельное двухслойное	20
15	10	-7	Пленочное однослойное	22
16	12	-8	Пленочное однослойное	24

1	2	3	4	5
17	7	-3	Пленочное двухслойное	18
18	8	-4	Пленочное двухслойное	20
19	9	-6	Стеклопленочное однослойное	22
20	10	-7	Стеклопленочное двухслойное	24
21	12	-8	Пленочное однослойное	18
22	14	-3	Пленочное однослойное	20
23	8	-4	Пленочное двухслойное	22
24	9	-5	Пленочное двухслойное	24
25	12	-7	Стеклопленочное однослойное	18

Задача 6.1.2. Рассчитать подпочвенные электрообогреваемые панели для пленочной теплицы. Нагревательные элементы выполнены стальным оцинкованным проводом. Приведенный коэффициент теплопередачи через ограждение теплицы $k = 9,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, коэффициент ограждения $k_0 = 1,28$.

Таблица ПЗ.6.1.2

Исходные данные к задаче 6.1.2

Номер варианта	Полезная площадь теплицы $A_{п}, \text{ м}^2$	К-во подпочвенных электрообогрев. панелей, шт.	Размеры электрообогрев. панелей, мм	Диаметр стального оцинкованного провода $d, \text{ мм}$	Температура внутреннего воздуха $t_{в}, ^\circ\text{С}$	Расчетная температура наружного воздуха $t_{н}, ^\circ\text{С}$	Напряжение на нагревательных элементах $U, \text{ В}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	800	2	10×20	2,0	20	-3	127
2	1120	4	8×20	2,5	21	-4	110
3	2520	6	12×20	3,5	20	-6	220
4	3920	8	14×20	4,0	19	-5	48
5	5600	10	16×20	1,0	23	-7	50
6	1260	2	18×20	1,5	24	-9	55

Окончание табл. ПЗ.6.1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
7	2800	4	20×20	2,0	25	-8	60
8	1680	6	8×20	3,0	18	-10	65
9	3360	8	12×20	2,5	22	-12	127
10	4900	10	14×20	3,5	21	-11	110
11	1120	2	16×20	4,0	20	-13	50
12	1400	4	10×20	1,0	19	-6	55
13	1680	6	8×20	1,5	18	-7	60
14	3360	8	12×20	1,5	23	-8	48
15	3500	10	10×20	2,0	24	-4	127
16	980	2	14×20	2,5	25	-3	220
17	420	4	12×20	3,0	24	-5	110
18	2240	8	8×20	3,5	22	-10	65
19	3780	6	18×20	4,0	21	-11	127
20	1960	4	14×20	1,5	19	-12	110
21	560	2	8×20	2,0	23	-13	55
22	3500	10	10×20	2,5	18	-14	60
23	3920	8	14×20	3,0	20	-15	65
24	1400	4	10×20	3,5	23	-9	127
25	2800	4	20×20	4,0	22	-16	220

6.2. Расчет электрообогреваемого пола

Задача 6.2.1. Рассчитать параметры электрообогреваемого пола в животноводческом помещении. Напряжение питания – 380/220 В. Станки расположены в помещении в 4 ряда.

Исходные данные к задаче 6.2.1

Номер варианта	Вид, возраст животного (птицы), сут	Температура поверхности пола $t_{\text{п}}$, °С	Температура воздуха в помещении $t_{\text{в}}$, °С	Количество обогреваемых площадей	Площадь площади, м ²	Тип нагревательного провода
1	2	3	4	5	6	7
1	Телята, 1–20	20	14	48	4,5	ПОСХП
2	Телята, 20–60	18	14	48	4,5	ПОСХВТ
3	Телята 60-120	16	14	48	4,5	ПНВСВ
4	Поросята, 1–26	26	14	96	5,0	ПОСХП
5	Поросята, 26–30	23	14	96	5,0	ПОСХВТ
6	Поросята, 30–45	22	14	96	5,0	ПНВСВ
7	Поросята, 45–60	21	14	96	5,0	ПОСХП
8	Ягнята	16	10	48	4,5	ПОСХВТ
9	Крольчата	16	10	192	3,0	ПНВСВ
10	Гусята	32	18	192	3,0	ПОСХП
11	Ягнята	17	12	48	4,5	ПОСХВТ
12	Телята, 1–20	20	12	96	2,25	ПНВСВ
13	Телята, 20–60	19	12	96	2,25	ПОСХП
14	Телята, 60–120	16	12	96	2,25	ПОСХВТ
15	Поросята, 1–26	28	12	96	6,0	ПНВСВ
16	Поросята, 26-30	24	12	96	6,0	ПОСХП
17	Поросята, 30–45	22	12	96	6,0	ПОСХВТ
18	Поросята, 45–60	21	12	96	6,0	ПНВСВ

1	2	3	4	5	6	7
19	Индюшата, 1–12	36	18	192	3,5	ПОСХП
20	Индюшата, 13–21	30	18	192	3,5	ПОСХВТ
21	Телята, 1–20	18	16	48	4,5	ПНВСВ
22	Телята, 20–60	17	16	48	4,5	ПОСХП
23	Поросята, 1–26	30	16	48	5,0	ПОСХВТ
24	Поросята, 30–45	20	16	48	5,0	ПНВСВ
25	Поросята, 45–60	21	16	48	5,0	ПОСХП

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. В чем заключается задача расчета электрообогрева массивов?
2. Какие исходные данные необходимы для расчета электрообогрева массивов?
3. Как определить мощность электрообогреваемого пола?
4. Как определить мощность электрических нагревателей для почвенного обогрева теплицы?
5. Как определить длину провода и шаг укладки?
6. Что такое фазоветвь?
7. Перечислите способы электрообогрева почвы и воздуха.

Лабораторное занятие 3

Исследование электрокалориферных установок

Цель работы. Изучить устройство, принцип действия, схемы управления, исследовать некоторые характеристики электрокалориферных установок.

Задачи работы

1. Изучить устройство и принцип действия электрокалориферных установок СФОО-10/0,4И2, СФОЦ-25/0,5И2, СФОЦ-25/0,5ИЗ.
2. Изучить принципиальные электрические схемы управления установок СФОЦ-25/0,5И2, СФОЦ-25/0,5ИЗ.

3. Исследовать влияние мощности электрокалорифера и подачи воздуха на температуру поверхности ТЭНов и выходящего воздуха, коэффициент теплоотдачи, КПД электрокалорифера.

4. Исследовать зависимость напряжения на ТЭНах и их мощности от величины заданной и фактической температур воздуха в помещении.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики электрокалориферных установок. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Устройство, принцип действия, схемы управления электрокалориферными установками СФОЦ-25/0,5-ИЗ, СФОО-10/0,4-И2 изучить по методическим указаниям и на установках, представленных в лаборатории.

Используя рисунки и их описание, уяснить: назначение и устройство электрокалорифера, вентиляционного блока, блока измерения и задания температуры, блока регулирования частоты вращения электродвигателя вентилятора, тиристорного регулятора мощности установки СФОЦ-25/05-ИЗ; устройство установок типов СФОО-10/0,4-И2, СФОЦ-25/0,5-И2.

2. На панели управления электродвигателем вентилятора установить ручной режим работы. Включить установку. Для этого включить автоматические выключатели $QF2$ и $QF1$, нажать кнопку включения электродвигателя «Скорость I» (подача воздуха $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Установить максимальную мощность электрокалорифера. Для этого открыть крышку блока измерения и задания температуры. Установить ручку задатчика температуры $R27$ в положение, при котором электрокалорифер потребляет максимальную мощность (по показаниям приборов).

Температуру воздуха на входе и выходе ЭКУ, трубки ТЭНов измерить регулятором температуры «Сосна-004», подключенным к компьютеру. Включить регулятор температуры и компьютер в сеть. На рабочем столе монитора найти значок «SysView». Открыть этот файл. Появится окно «Начальные установки». Нажать на слово «Принять». Появится таблица с тремя столбцами, в которых с заданным интервалом (10 секунд) начнет появляться информация о температуре на входе ЭКУ, на выходе из ЭКУ, трубки ТЭНа.

Подождать пока температура трубчатого нагревателя достигнет установившегося значения. Установившейся считается температура, которая не изменилась за опыт три раза в каждом столбце. Записать результаты измерений в табл. ЛЗ.3.1.

Опыт повторить при любых других трех-четырех значениях мощности электрокалорифера и подаче воздуха 3000 м³/ч (скорость II).

Таблица ЛЗ.3.1

Влияние мощности калорифера и подачи воздуха на КПД ЭКУ и коэффициент теплоотдачи от ТЭНов к воздуху

Задано		Измерено			Вычислено		
V_{τ} , м ³ /с	P_{κ} , Вт	t_1 , °C	$t_{\text{н}}$, °C	t_2 , °C	P , Вт	η , о.е.	α , Вт/(м ² ·°C)

В табл. ЛЗ.3.1: V_{τ} – подача воздуха; P_{κ} – мощность, потребляемая электрокалорифером; t_1 , t_2 , $t_{\text{н}}$ – температуры воздуха на входе, выходе из установки и трубки ТЭНов соответственно; P – полезная мощность на нагревание воздуха; η – КПД электрокалорифера; α – коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНов к воздуху.

Полезную мощность определить по формуле $P = V_{\tau} \rho C (t_2 - t_1)$, приняв $\rho = 1,29$ кг/м³ и $C = 1000$ Дж/(кг·°C).

Коэффициент полезного действия электрокалорифера

$$\eta = \frac{P}{P_{\kappa}}.$$

Коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНов к воздуху

$$\alpha = \frac{P_{\kappa}}{A(t_{\text{н}} - t_{\text{в}})}$$

Площадь поверхности одного нагревателя $A = 0,3 \text{ м}^2$. В калорифере используют 3 нагревателя, остальные (6 шт.) отключены с целью снижения мощности.

Средняя температура воздуха в электрокалорифере

$$t_{\text{в}} = 0,5(t_1 + t_2).$$

3. На панели управления электродвигателем вентилятора установить «автоматический режим работы». На термометре ТПК, показывающем температуру наружного воздуха, задать любую температуру, при которой контакты термометра разомкнуты, и, следовательно, двигатель будет работать на скорости I.

В блоке регулирования и задания температуры задать температуру, которая должна поддерживаться в помещении. Рекомендуется включить электрокалорифер на полную мощность.

Включить установку. Включить устройство, имитирующее изменение температуры в помещении. Имитатор изменения температуры воздуха в помещении представляет собой вентилятор с электронагревателем. Температуру воздуха на выходе вентилятора регулируют напряжением на нагревателе. С помощью имитатора изменять температуру воздуха в помещении до полного снятия напряжения с нагревателей калорифера.

Исследование провести для нескольких значений заданной температуры воздуха в помещении. Результаты записать в табл. ЛЗ.3.2.

Таблица ЛЗ.3.2

Зависимость напряжения на нагревателях от температуры воздуха в помещении

Задано			Измерено		Вычислено
$V_{\text{в}}$ $\text{м}^3/\text{с}$	t_3 , $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	$U_{\text{н}}$, В	P , Вт	Графические зависимости $U_{\text{н}}, P(t_{\text{н}})$

В табл. ЛЗ.3.2: t_3 – температура в помещении, заданная на шкале блока задания температуры; $t_{\text{н}}$ – фактическая температура воздуха

в помещении, создаваемая имитатором; U_n – напряжение на нагревателях калорифера.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Результаты измерений.
3. Рисунок блок-схемы установки СФОЦ-25/0,5-ИЗ.
4. Графические зависимости $t_n(V_\tau, P_k)$, $\alpha(V_\tau)$, $U_n(t_n)$.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия ЭКУ.
2. Схемы управления ЭКУ СФОЦ-25/0,5ИЗ, СФОЦ-25/0,5-И2.
3. Способы регулирования температуры воздуха.
4. Основные энергетические характеристики ЭКУ.
5. Особенности эксплуатации ЭКУ.

Лабораторное занятие 4

Исследование установок локального электрообогрева

Цель работы. Изучить устройство, принцип действия, схемы управления установками локального электрообогрева.

Задачи работы

1. Изучить устройство, принцип действия, схемы управления установками комбинированного электрообогрева ЭИС-11-И1 «Комби», электроконвектора ЭОКС-2,0/1,5-И1, электрообогреваемых полов, панелей и ковриков.

2. Проверить исправность блока защиты от токов утечки, определить соответствие температуры, заданной на терморегуляторе и фактической на поверхности обогреваемой панели.

3. Исследовать температурное поле и определить зону обогрева, создаваемую установкой ЭИС-11-И1 «Комби».

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики установок локального электрообогрева. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Изучить устройство, принцип действия, схемы управления установок ЭИС-11-И1 «Комби», ЭОКС-2/1,5-И1, коврика ЭП-935 на образцах, представленных в лаборатории, электрообогреваемых полов и панелей по рекомендуемой литературе, методическим указаниям и моделям в лаборатории.

2. Проверить исправность блока защиты от токов утечки в установке «Комби». Для этого включить установку в ручном или автоматическом режиме управления. Нажать кнопку SB1, после чего должно сработать устройство защиты А2. Отключить установку. Для возврата установки в рабочее состояние выключить ее и снова включить. Уяснить принцип действия блока защиты.

3. Измерить температуру на поверхности обогреваемой панели в зоне размещения датчика температуры и сравнить ее с заданной на шкале терморегулятора. Определить, насколько различаются заданная на терморегуляторе и фактическая температуры панели.

4. Приборами МТ2 и ЭТП-М измерить температуру на поверхности обогреваемой панели и в пространстве между облучателем и панелью. Результаты измерений записать в табл. ЛЗ.4.1.

Построить график распределения температуры в зоне обогрева в зависимости от высоты над панелью и расстояния от центра панели (рис. ЛЗ.4.1, б).

Таблица ЛЗ.4.1

Распределение температуры в зоне обогрева установки ЭИС-11-И1 «Комби»

Расстояние от облучателя до обогреваемой панели H , м	Расстояние от центра панели l , м				
	$l_1 =$	$l_2 =$	$l_3 = 0$	$l_4 =$	$l_5 =$
	Температура t , °C				
$H_1 =$					
$H_2 =$					
$H_3 =$					

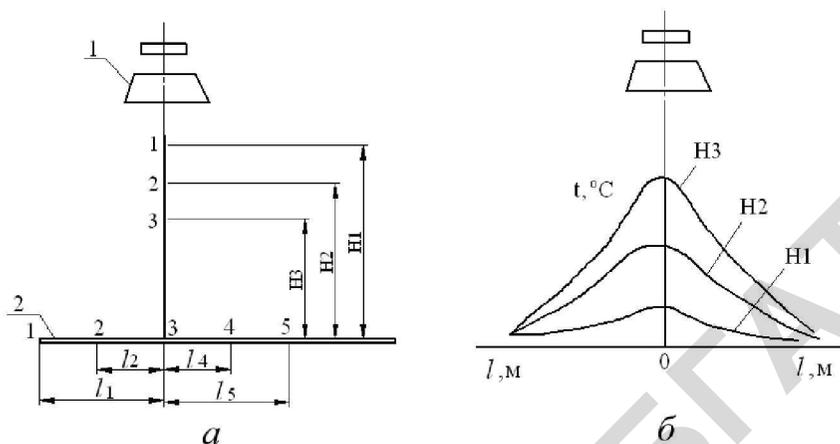


Рис. 13.4.1. Точки измерения температуры (а), распределение температуры в зоне обогрева ЭИС-11-И1 «Комби»:
1 – ИК-облучатель; 2 – электрообогреваемая панель

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальная электрическая схема управления установкой ЭИС-11-И1.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. График распределения температуры в зоне обогрева установки ЭИС-11-И1 «Комби».

Контрольные вопросы

1. Проблемы создания оптимального микроклимата для разных возрастных групп животных и птицы.
2. Устройство электрообогреваемых полов, плит, ковриков, панелей, электроконвекторов.
3. Устройство электроустановки ЭИС-11-И1 «Комби».
4. Работа электрической схемы управления ЭИС-11-И1 «Комби».
5. Особенности эксплуатации установок локального электрообогрева.

3.4. Электрические устройства нагрева воды и получения пара

3.4.1. Области применения и классификация

К электрическим устройствам нагрева воды и получения пара относят водонагреватели и парогенераторы. Электрические водонагреватели и парогенераторы применяют в системах горячего водоснабжения, отопления и вентиляции, в технологических процессах животноводства и растениеводства, в ремонтном производстве.

По сравнению с топливными установками электрические водонагреватели и парогенераторы позволяют снизить единичную мощность, повысить коэффициент использования и уровень автоматизации теплогенераторов, более точно поддерживать температуру и получить больший технологический эффект, снизить затраты на обслуживание, уменьшить длину тепловых сетей. При этом коэффициент полезного использования первичных энергоресурсов для огневых и электрических теплогенерирующих установок примерно одинаков и равен 0,23–0,30.

Установки для электрического нагрева воды и генерации пара классифицируют: по технологическому назначению (электрические водонагреватели, парогенераторы, пароводонагреватели); по виду нагрева (электродные, элементные, индукционные); по характеру работы (проточные и аккумуляторные); по напряжению (низковольтные до 0,4 кВ и высоковольтные до 10 кВ).

Электродные водонагреватели и парогенераторы большой мощности иногда называют котлами.

Совокупность технических средств, обеспечивающих нагрев воды и подачу ее к месту потребления, образует систему горячего водоснабжения. В зависимости от степени концентрации электрических водонагревателей возможны следующие системы горячего водоснабжения:

централизованные в масштабах всего объекта (фермы, комплекса, механизированного двора) с производством теплоты в специальном помещении, называемом центральной электростанцией, с аккумулярованием теплоты и распределением горячей воды по отдельным зданиям объекта и индивидуальным потребителям по наружным и внутренним тепловым сетям;

децентрализованные по отдельным зданиям объекта с производством теплоты в электрических водонагревателях, оборудованных

расположенными с наружной стороны здания водяными теплоаккумуляторами, и подачей горячей воды к точкам разбора по внутренним тепловым сетям;

децентрализованные по отдельным помещениям и тепловым процессам, сформированные на базе специализированных водонагревателей.

Системы горячей водоснабжения могут быть открытыми (горячую воду разбирают из водонагревателя) и замкнутыми (водонагреватель, насос и потребитель или теплоаккумулирующее устройство образуют замкнутую систему циркуляции горячей воды с автоматической подпиткой из водопровода).

Электрические водонагреватели могут работать по свободному или принудительному (режимному) графику потребления электрической энергии.

В зависимости от графиков потребления электроэнергии и горячей воды водонагреватели могут быть использованы:

в полностью аккумуляционном режиме, когда необходимое суточное количество воды нагревают в ночные часы «провала» графика электрических нагрузок, а горячую воду разбирают по мере надобности в остальное время суток;

в частично аккумуляционном режиме, когда суточное количество воды нагревают в ночные и дневные часы минимальной загрузки электросетей;

по свободному графику, когда водонагреватель включают по мере необходимости.

Наилучшие технико-экономические показатели имеют децентрализованные системы горячей водоснабжения, выполненные на базе специализированных водонагревателей и парогенераторов. Децентрализация соответствует особенностям сельскохозяйственных объектов, к которым относят низкие плотность тепловой нагрузки и годовое число часов использования оборудования. Мощность, годовой расход энергии и затраты на горячее водоснабжение в децентрализованных системах на 30–50 % ниже, чем при централизованном теплоснабжении.

3.4.2. Элементные водонагреватели

Элементные водонагреватели и парогенераторы представляют собой установки косвенного резистивного электронагрева. Элект-

роэнергия преобразуется в теплоту в нагревательных элементах и от них передается конвекцией и теплопроводностью к воде. Различают аккумуляционные и проточные водонагреватели и пароводонагреватели (табл. 3.6).

Аккумуляционные водонагреватели предназначены для нагрева и сохранения горячей воды в течение длительного времени. Водонагреватель представляет собой металлический теплоизолированный резервуар цилиндрической формы, внутри которого установлены трубчатые электронагреватели. Такая конструкция в совокупности с автоматизацией работы обеспечивает поддержание требуемой температуры воды, позволяет включать водонагреватель в часы наименьшей загрузки электрических сетей, исключает дополнительные резервуары для накопления горячей воды. Скорость остывания воды составляет 1–2 °С/ч.

Таблица 3.6

Основные технические данные некоторых элементных водонагревателей

Тип	Вместимость, л	Мощность, кВт	Максимальная температура, °С	Время нагрева на 80 °С, ч	Производительность, кг/ч
САОС-400/90И1 САЗС-400/90И1	400	12	95	3,2	120
САОС-800/90И1 САЗС-800/90И1	800	18	95	4,3	180
САОС-1600/90И1	1600	30	95	5,1	300
ЭВ-150М	150	6	95	3,0	60
ЭВ-Ф-15	12	15	80	0,2	140
ЭПВ-25 (вода/пар)	2000	25	95/130	8/0,5	250/30

Аккумуляционные водонагреватели САОС и САЗС (С – способ нагрева сопротивлением (резистивный нагрев), А – аккумуляци-

онный, ОС, ЗС – открытая или закрытая система водоразбора) устроены одинаково и предназначены для работы в системах водоснабжения с избыточным давлением до 0,4 МПа. Водонагреватель САЗС (рис. 3.32) оснащен циркуляционным насосом для перекачивания горячей воды по замкнутому контуру в системах поения, отопления и др. Расход воды восполняют из водопровода путем естественного притока.

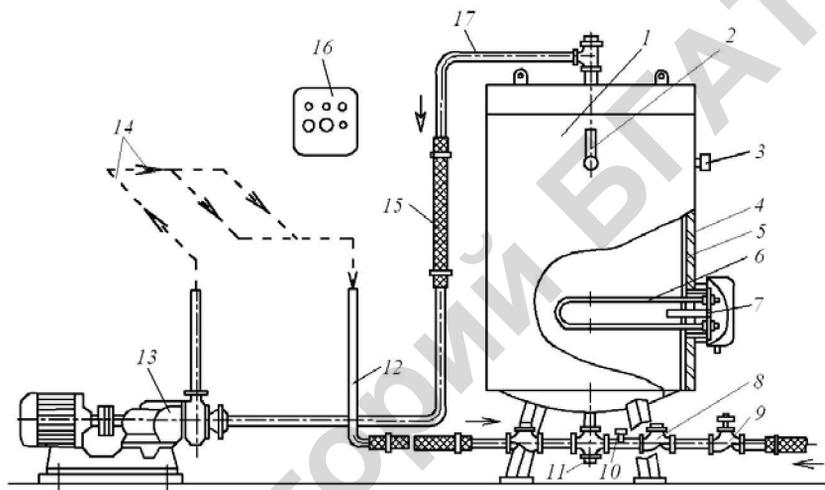


Рис. 3.32. Водонагреватель САЗС-800/90I1:

1 – кожух водонагревателя; 2 – термометр; 3 – аварийный датчик температуры; 4 – стальной резервуар; 5 – теплоизоляция и кожух; 6 – блок ТЭНов; 7 – датчик температуры воды; 8, 9 – обратный клапан и вентиль на трубопроводе холодной воды; 10 – клапан избыточного давления; 11 – пробка слива; 12 – трубопровод возврата воды; 13 – насос; 14 – система горячего водопотребления; 15 – изоляционная вставка; 16 – ящик управления; 17 – трубопровод горячей воды

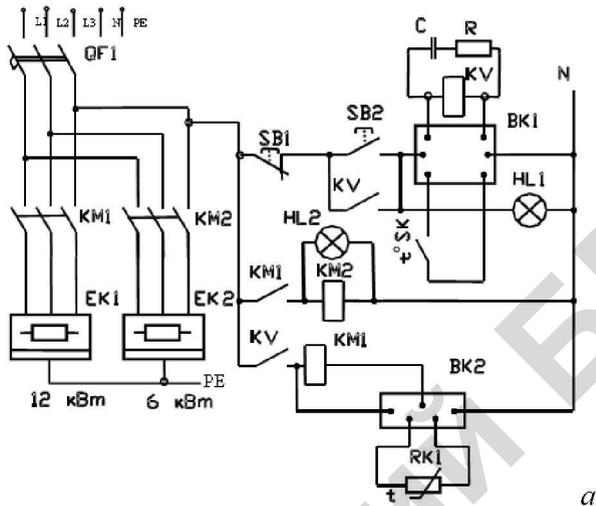
В водонагревателе САОС горячая вода вытесняется холодной при открытом вентиле на подающем трубопроводе.

Водонагреватели ЭВ-150М и САОС аналогичны по устройству и различаются размерами бака-аккумулятора.

Электрическая схема управления водонагревателем типа САЗС (рис. 3.33, а) автоматически поддерживает температуру с точностью $\pm 3-5^{\circ}\text{C}$ около значения, заданного на блоке регулирования температуры ВК2, защищает водонагреватель от перегрева воды

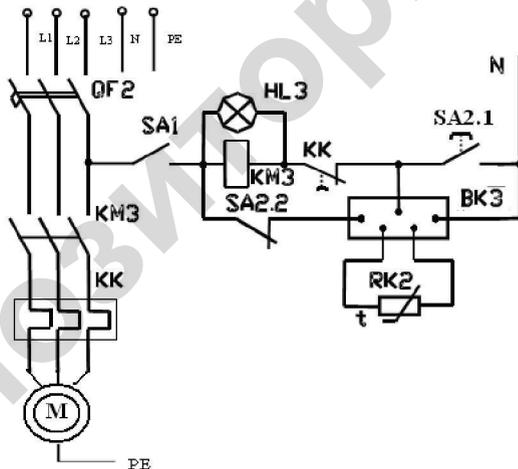
свыше 95 °С (терморегулятор ВК1), обеспечивает автоматическую работу насоса для перекачивания воды.

3 NPE-50П4;380/220В



a

3 NPE-50П4;380/220В



б

Рис. 3.33. Схема электрическая принципиальная управления водонагревателем САЗС-800/90И1 (*a*) и насосом (*б*)

При нажатии кнопки *SB2* напряжение подается на терморегулятор *BK1*, который включает промежуточное реле *KV*. Реле *KV* блокирует кнопку *SB2*, подает напряжение на *BK2*, который, в свою очередь, включает катушки магнитных пускателей *KM1*, *KM2* и нагревательные блоки *EK*. При достижении заданной температуры *BK2* отключает *KM1* и *KM2*. При снижении температуры воды на 3–5 °С, по сравнению с заданной, *BK2* снова включает нагрев. Если температура воды превышает заданную и достигает 95 °С, то замыкается термоконттакт *SK*, терморегулятор *BK1* выключает *KV*, *BK2* и нагреватели. Температуру воды в системе горячего водоснабжения поддерживают терморегулятором *BK3*, первичный преобразователь *RK2* которого установлен на трубопроводе системы (рис. 3.33, б). При понижении температуры *BK3* включает насос, который перекачивает остывшую воду через водонагреватель. Ручной или автоматический режим работы насоса задают выключателем *SA2.1*.

Температуру воды регулируют автоматически в пределах, заданных зоной возврата на шкале терморегуляторов *BK2* и *BK3*. Аварийный термоконттактор *SK1* замыкает свои контакты при температуре воды 95 °С и отключает реле *KV*, пускатель *KM1* и напряжение на нагревателях. Повторно водонагреватель включают кнопкой *SB2*. Циркуляционный насос пускают вручную выключателем *SA2* или автоматически терморегулятором *BK3*.

Проточные водонагреватели не имеют резервуара для хранения горячей воды и теплоизоляции корпуса, более компактные и быстродействующие, чем аккумуляционные. Различают *элементные* и *индукционные* проточные водонагреватели.

В водонагревателе ЭВ-Ф-15 (рис. 3.34, а) температуру воды регулируют подачей и контролируют по термометру. В автоматическом режиме работы (рис. 3.31, б) водонагреватель включается через 15–45 с после включения тумблера *SA* и замыкания контакта *SK*. Выдержку обеспечивает реле времени *KT*. При замыкании контакта *SK* конденсатор *C2* заряжается от выпрямителя *VD2–VD5* через *SK* и *R1*.

При достижении напряжения на *C2* определенной величины транзистор *VT* открывается и включает тиристор *VS1*, который закорачивает цепь постоянного тока выпрямителя и тем самым обеспечивает питание катушки пускателя *KM* на переменном токе. Выдержка времени снижает частоту включений пускателя и

подгорание контакта термореле. При температуре $75-80^{\circ}\text{C}$ термореле контактом *SK* отключает водонагреватель от сети.

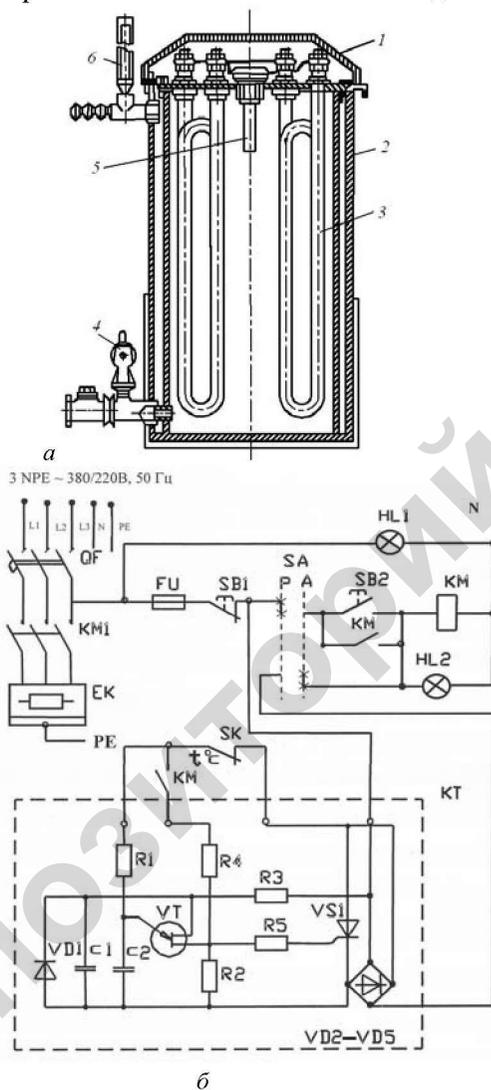


Рис. 3.34. Схема водонагревателя ЭВ-Ф-15:

a – конструктивная; *б* – принципиальная управления; 1 – защитный кожух; 2 – резервуар; 3 – нагреватель; 4 – предохранительный клапан; 5 – терморегулятор; 6 – термометр

Индукционный водонагреватель 084.ПВ-1 (рис. 3.35) представляет собой трехфазный понижающий трансформатор мощностью 30 кВА. Первичная обмотка выполнена из медного провода, вторичная – из стальной трубы диаметром 20 мм и электрически замкнута накоротко. Токи, достигающие тысяч ампер, нагревают вторичную обмотку, которая отдает теплоту воде, протекающей внутри нее.

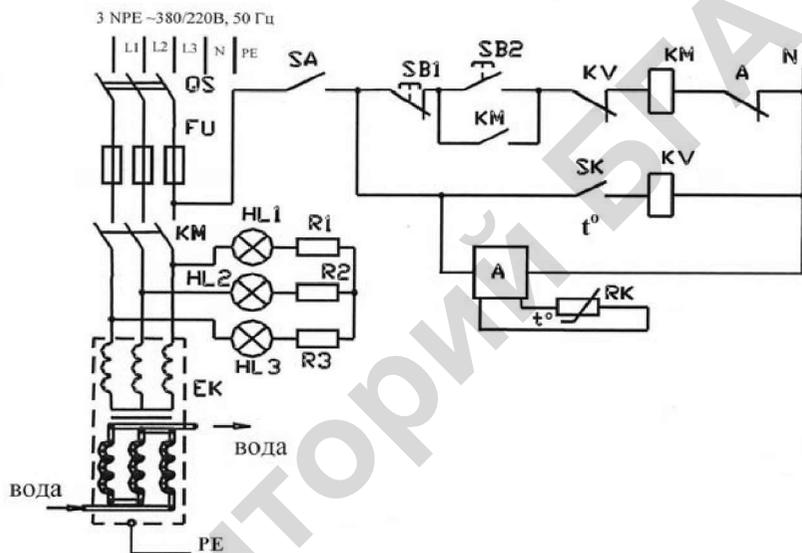


Рис. 3.35. Принципиальная электрическая схема управления индукционным водонагревателем 084.ПВ-1:

A – устройство защиты трансформатора от перегрева; *EK* – трансформатор-водонагреватель; *SK* – контакт термометра манометрического

Производительность водонагревателя составляет 300 л/ч при 90 °С. Электрическая схема индукционного водонагревателя 084.ПВ-1 обеспечивает отключение водонагревателя в случае превышения температуры воды, заданной на *SK*, и при перегреве трансформатора (блок *A*).

В проточных водонагревателях температуру воды регулируют чаще всего подачей. В электрических схемах управления предусмотрена защита нагревательных элементов от перегрева при отсутствии

протока воды. Для этого используют различные термореле, настроенные на температуру срабатывания, близкую 100 °С, или реле протока. В сельскохозяйственном производстве чаще необходим пар низкого давления с расходом всего 30–50 кг/ч, при продолжительности работы установки 2–6 ч в сутки. Получение такого количества пара с помощью мощных огневых или электрических установок неэкономично, особенно в летнее время. Для таких целей разработаны небольшие по мощности установки, например, пароводонагреватели ЭПВ-25 (стационарный мощностью 25 кВт) и ЭПВ-25П (передвижной мощностью до 33 кВт).

Электрический пароводонагреватель ЭПВ-25 предназначен для раздельного получения горячей воды и пара (рис. 3.36).

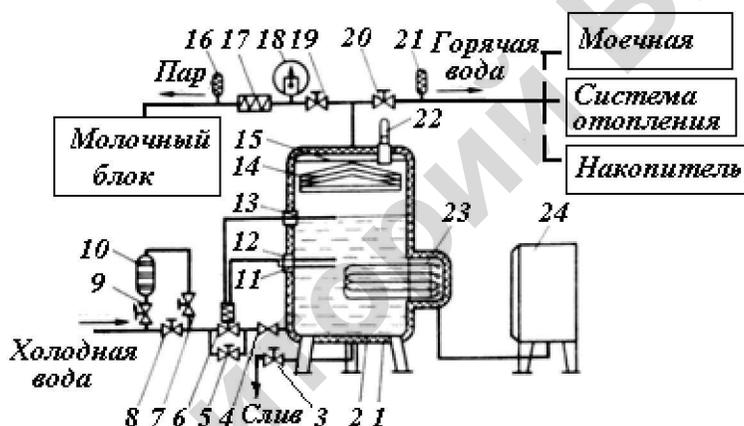


Рис. 3.36. Схема пароводонагревателя ЭПВ-25:

- 1 – пароводонагреватель; 2 – теплоизоляция; 3 – сливной вентиль; 4 – обратный клапан; 5, 7, 8, 9 – вентили; 6 – электромагнитный клапан; 10 – противонакипное устройство; 11–13 – электроды датчика уровня воды; 14 – устройство сепарации пара; 15 – крышка; 16, 21 – регуляторы температуры пара и воды; 17 – пароперегреватель; 18 – электроконтактный манометр; 19 и 20 – вентили отбора пара и горячей воды; 22 – термометр; 23 – блок нагревателей; 24 – щит управления

В водогрейном режиме работает как проточный нагреватель. Холодная вода поступает в резервуар через вентили 8, 5 и обратный клапан 4, горячую воду отбирают через вентиль 20. Температуру воды регулируют двухпозиционным терморегулятором 21 путем изменения числа включенных секций блока 23 нагревателей.

В режиме генерации пара вентили 7, 9, 19 открыты, а 5, 8, 20 закрыты. Паропроизводительность регулируют электроконтактным манометром 18 изменением мощности блока 23 нагревателей. Пар поступает из резервуара водонагревателя в пароперегреватель 17, где подогревается до 115–130 °С. Температуру пара контролируют терморегулятором 16. Уровень воды в резервуаре поддерживают с помощью электродного регулятора уровня, который управляет электромагнитным клапаном 6 на трубопроводе подачи воды.

Передвижной пароводонагреватель ЭПВ-25П состоит из рамы на колесах, электродного котла, струйного водонагревателя - аккумулялирующей емкости, бачка с постоянным уровнем воды, пульта управления, шкафа для укладки кабеля и шланга разбора пара или горячей воды. Аккумулялирующая емкость дает возможность агрегату работать в автономном режиме в течение одного-двух часов. Мощность и паропроизводительность могут плавно меняться от 10 до 33 кВт и от 12 до 42 кг/ч. Максимальная производительность по горячей воде с температурой 65–85 °С – 480 л/ч. Давление пара – до 70 кПа, температура – 107 °С. Удельное электрическое сопротивление воды – 10...60 Ом·м.

Предприятия выпускают разнообразные аккумуляционные и проточные водонагреватели, которые принципиально не отличаются от вышеназванных. Аккумуляционные: УАП-200, УАП-400, УАП-800, ЭВН-В-200, ЭВН-В-400, ЭВАД-100/1,25, ЭВАД-200/2,5, ЭВАД-400/4,8, ВЭТ-400. Проточные: ЭП-12, ЭП-15, ЭП-18, ЭП-21, ЭП-24, ЭВН-1,6, ЭВН-3,0, ЭВН-6,0, ЭВН-9,5, ЭВН-24, ЭВН-40, ЭВН-60, ЭВН-80, ЭПВН-7,5... до 30 (однофланцевые), ЭПВН-36... до 60 (двухфланцевые), ЭПВН-72, ЭПВН-74 (трехфланцевые), ЭПВН-96, ЭПВН-108, ЭПВН-120 (четырефланцевые).

3.4.3. Электродные водонагреватели и парогенераторы

Электродные водонагреватели и парогенераторы относят к установкам прямого резистивного электронагрева. Электрическая энергия преобразуется в теплоту при протекании электрического тока через воду, находящуюся между токопроводящими электродами. Водонагреватели выпускают на номинальное напряжение 0,4; 6 и 10 кВ и максимальное рабочее давление 0,6 МПа для низковольтных и 1–1,5 МПа для высоковольтных аппаратов. Типы

и основные характеристики наиболее распространенных водонагревателей и парогенераторов приведены в табл. 3.7 и 3.8.

Таблица 3.7

Основные технические данные низковольтных электродных водонагревателей (максимальная температура воды – 95 °С)

Тип	Мощность, кВт	Производительность при нагревании на 25 °С, м ³ /ч	Диапазон регулирования мощности, %	Удельное сопротивление воды при 20 °С, Ом·м
ЭПЗ-25/И2	25	0,8	100–50	10–30
ЭПЗ-100/ИЗ	100	3,4	100–25	10–30
ЭПЗ-250/ИЗ	250	8,5	100–25	10–30
ЭПЗ-400/ИЗ	400	13,6	100–25	10–30
КЭВ-9/0,4	9	0,3	Не регулируется	20–120
КЭВ-40/0,4	40	1,3	100–25	10–170
КЭВ-63/0,4	63	2,1	100–25	10–170
КЭВ-100/0,4	100	3,4	100–25	10–170
КЭВ-160/0,4	160	5,4	100–25	10–170
КЭВ-250/0,4	250	8,5	100–25	10–170
КЭВ-400/0,4	400	13,6	100–25	10–170
КЭВ-1000/0,4	1000	34,0	100–25	10–170

Электродные водонагреватели предназначены для нагрева проточной воды в замкнутых системах теплоснабжения с избыточным давлением до 0,6 МПа. Они представляют собой цилиндрический

сосуд, внутри которого расположены электроды для подвода тока к воде и электроды или диэлектрические вставки для регулирования мощности. Водонагреватели компактны, поверхность теплопотерь невелика и поэтому не теплоизолирована, имеют большую номинальную мощность, чем элементные водонагреватели.

Наиболее распространены водонагреватели с плоскими, цилиндрическими коаксиальными и секторными электродами.

Таблица 3.8

**Основные технические данные электродных парогенераторов
(максимальная температура пара – 164 °С)**

Параметр	ЭЭП-160/И1	ЭЭП-250/И1	ЭЭП-400/И1	КЭПР-160/0,4	КЭПР-250/0,4	КЭПР-2500/6
Мощность, кВт	160	250	400	160	250	2500
Производительность, кг/ч	200	315	500	210	320	3000
Диапазон регулирования мощности, %	25, 50	75, 100	100–0	100–5	100–5	100–50
Удельное сопротивление воды при 20 °С, Ом·м	15–60	15–60	15–60	10–120	10–120	20–80

Электродный водогрейный котел КЭВ (рис. 3.37) на номинальное напряжение 0,4 кВ выпускают в двух исполнениях: с цилиндрическими электродами для воды, имеющей при температуре 20 °С удельное сопротивление ниже 10 Ом·м, и с пластинчатыми – для воды, у которой удельное сопротивление выше 10 Ом·м. Мощность регулируют изменением активной высоты электродов в результате перемещения регулирующих пластин 2, выполненных из диэлектрика, в межэлектродном пространстве.

Электродный проточный водонагреватель ЭПЗ (рис. 3.38) имеет два исполнения, различающихся приводом механизма регулирования мощности (И2 – ручной привод, И3 – электродвигательный привод). Вода заполняет пространство, образованное шестью фаз-

ными 4 и тремя регулируемыми 5 электродами, изолированными друг от друга.

Ток протекает от электродов одной фазы через воду по регулирующему металлическому электроду, еще раз через воду и далее к электродам другой фазы. Регулирующие электроды изолированы от нулевого провода сети. Эквивалентная схема замещения водонагревателя – «треугольник».

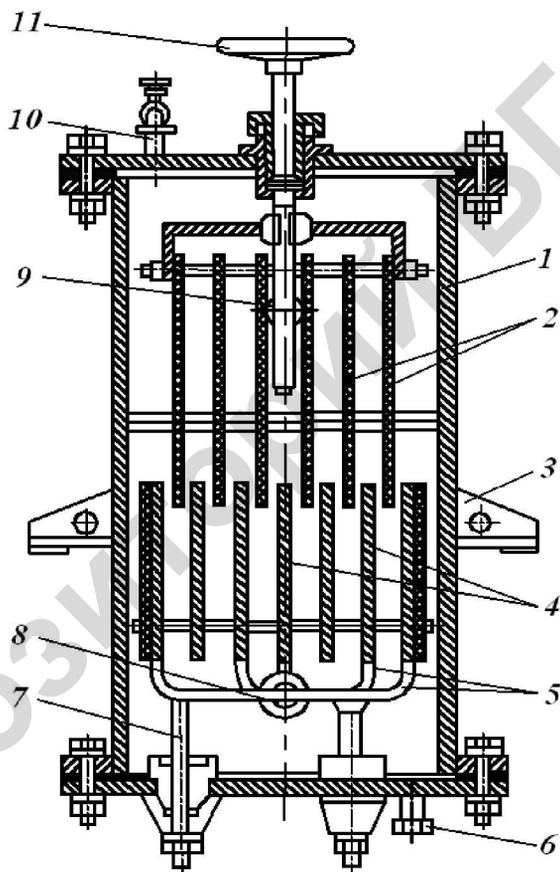


Рис. 3.37. Электродный водогрейный котел КЭВ-0,4:

- 1 – корпус; 2 – пластины диэлектрические; 3 – опоры; 4 – фазные электроды;
5 – перемычки; 6 – пробка слива; 7 – узел токоподвода; 8, 9 – входное и выходное
отверстия для воды; 10 – патрубок для выпуска воздуха; 11 – механизм
перемещения диэлектрических пластин

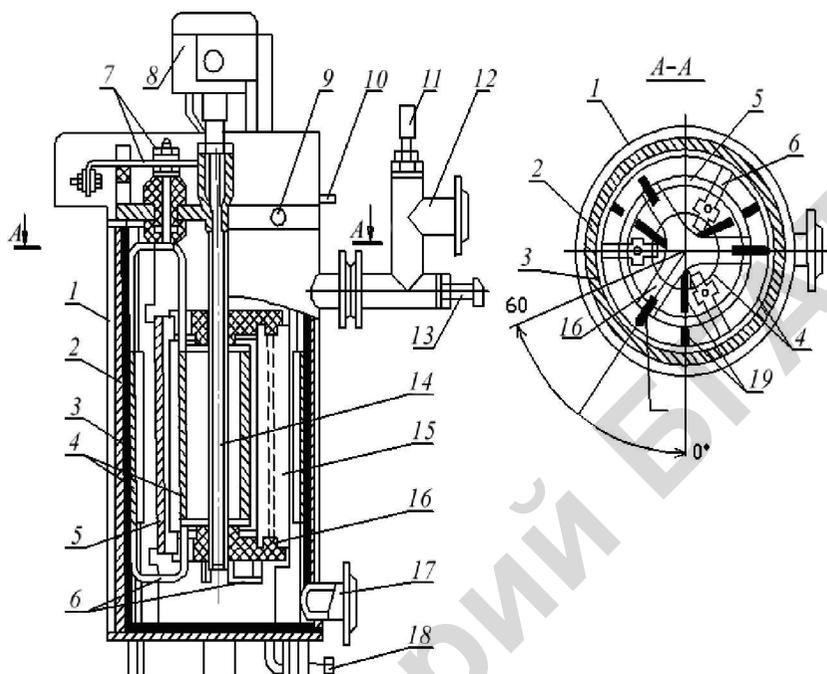


Рис. 3.38. Электродный водонагреватель ЭПЗ-100ИЗ:

1 – кожух; 2 – корпус; 3 – изоляционное покрытие; 4 и 5 – фазные и регулирующие электроды; 6 – перемычки; 7 – токоподвод к электродам; 8 – электроприводной механизм; 9 – вентиль выпуска воздуха; 10 – дренаж из зоны вала; 11, 13 – защитный и регулирующий термодатчики; 12, 17 – патрубki; 14 – вал; 15 – изоляционные пластины; 16 – траверса; 18 – пробка слива; 19 – изоляционные экраны

Мощность водонагревателя зависит от напряжения, геометрических размеров электродов, удельного сопротивления воды и, следовательно, ее температуры.

Последнее является недостатком, который надо учитывать при конструировании электродных нагревателей.

Мощность можно регулировать изменением напряжения питания или сопротивления электродной системы. Первый способ не нашел применения, так как тиристорные регуляторы напряжения усложняют и удорожают водонагреватель, второй – применяют широко, путем изменения площади электродов (высоты или ширины).

Для этого, например, между электродами размещают подвижные диэлектрические пластины (экраны) (рис. 3.36). Перемещая их вручную или электроприводом, изменяют рабочую высоту электродов и, следовательно, мощность и температуру воды.

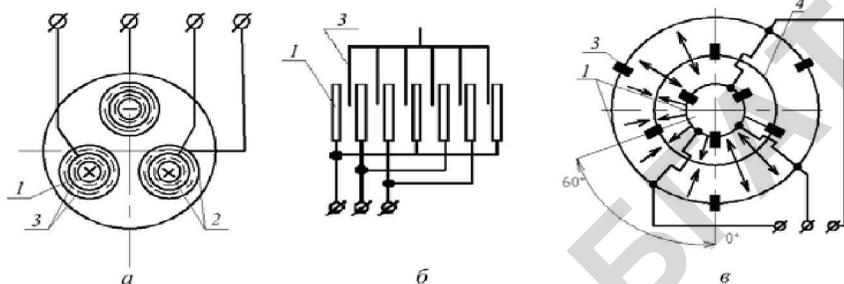


Рис. 3.39. Принципиальные схемы электродной системы водонагревателей ЭПЗ-100И2 (а), КЭВ-100 (б), ЭПЗ-100ИЗ (в):
1, 2, 4 – фазные, нулевые, регулирующие электроды; 3 – диэлектрические экраны

В водонагревателях ЭПЗ-ИЗ мощность регулируют плавным изменением рабочей поверхности регулирующих электродов путем их вращения электроприводным исполнительным механизмом вокруг вала. При повороте регулирующих электродов от 0 до 60° мощность увеличивается от 25 до 100 %.

Электрическая схема водонагревателей типа ЭПЗ-ИЗ (рис. 3.40) автоматически управляет мощностью водонагревателя по пропорционально-интегральному закону в зависимости от температуры воды на его выходе и воздуха в отапливаемом помещении с коррекцией по температуре наружного воздуха или без нее, а также в соответствии с заданным графиком отпуска теплоты и графиком потребления электроэнергии.

При режимном потреблении электроэнергии водонагреватель включают в заданные часы программным устройством *KV10*. В ручном режиме работы водонагреватель включают кнопкой *SB2*, его мощность регулируют кнопками «Ниже», «Выше» на шкале терморегулятора.

При перегреве воды терморегулятор *BK2* отключает водонагреватель от сети и включает в цепь *RK1* резистор *R4*, сопротивление

которого выбрано так, чтобы суммарное сопротивление этой цепи соответствовало температуре выше действительной на 15–20 °С. Повторно водонагреватель включается автоматически при понижении температуры воды на 15–20 °С ниже заданной на терморегуляторе *BK2*.

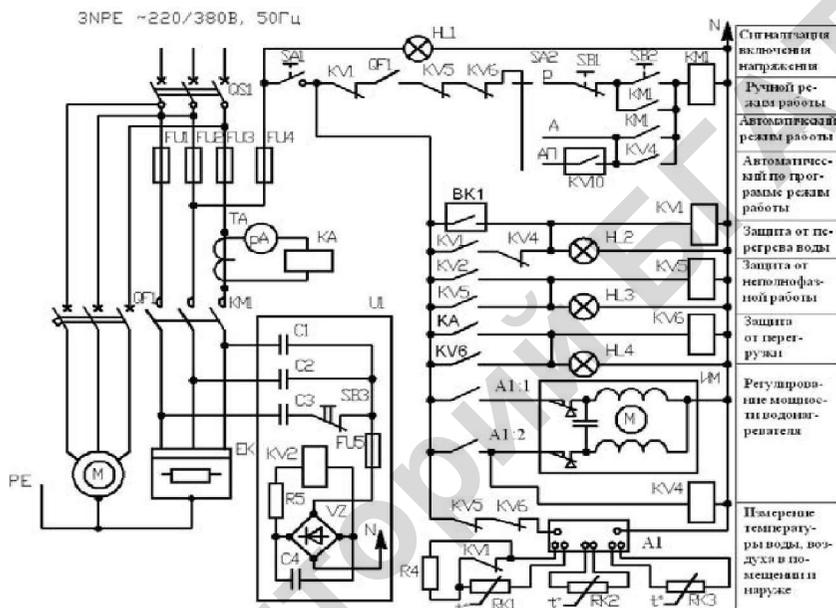


Рис. 3.40. Принципиальная электрическая схема управления водонагревателем ЭПЗ-ИЗ

При неполнофазном режиме работы или превышении номинального тока срабатывают соответственно промежуточное реле *KV2* или реле тока *KA* и отключают пускатель *KM1* и водонагреватель.

Электродный водонагреватель ЭВН-25/0,4 имеет принципиально новую конструкцию. Благодаря использованию многоэлементных электродов и поперечной схеме их расположения в корпусе достигают повышения эксплуатационной надежности и снижения металлоемкости.

Предложенный комбинированный способ регулирования мощности (раздвиганием электродов по вертикали и схемным переключением с «треугольника» на «звезду») обеспечивает работоспособность водонагревателя при изменении удельного электрического сопротивления воды в широком диапазоне. Многоэлементный электрод водонагревателя представляет собой набор элементов (стержней), имеющих дугообразную форму, расположенных на определенном расстоянии друг от друга и электрически соединенных между собой. Такая конструкция электродов обеспечивает более развитую поверхность и снижает их металлоемкость в сравнении с пластинчатой не менее чем в 1,3 раза.

Водонагреватель ЭВН-60/0,4 имеет регулирование мощности в широком диапазоне. Электроды каждой фазы нагревателя набраны из стержней, соединенных единым вертикальным токовводом, и изогнуты в плане под углом 120° . Имеются две схемы регулирования мощности: от 50 до 100 % номинальной мощности регулирование осуществляют механически – раздвиганием электродов; от 10 до 50 % регулирование может осуществляться с помощью тиристорного регулятора.

Электродные парогенераторы предназначены для получения пара с избыточным давлением до 0,6 МПа и температурой до 164°C (табл. 3.8). По устройству и принципу действия они аналогичны электродным водонагревателям, однако их электродные системы более просты, что обусловлено тяжелыми условиями работы в кипящей воде. Электродный паровой котел КЭПР (рис. 3.41) регулирует мощность самопроизвольно в зависимости от разбора пара.

При нормальном давлении пара клапан терморегулятора *10* открыт и вода в парогенерирующей *1* и вытеснительной *2* камерах находится на одинаковом уровне, полностью закрывая электроды. При уменьшении разбора пара давление и температура его возрастают и, когда они превысят заданное значение, регулятор *10* перекрывает сообщение между камерами *1* и *2*. Пар вытесняет воду из парогенерирующей камеры *1* в камеру *2*. С понижением уровня воды между электродами мощность парогенератора уменьшается. При увеличении расхода пара снижаются давление и температура. Регулятор *10* открывает сообщение между камерами, что восстанавливает прежний уровень воды в котле.

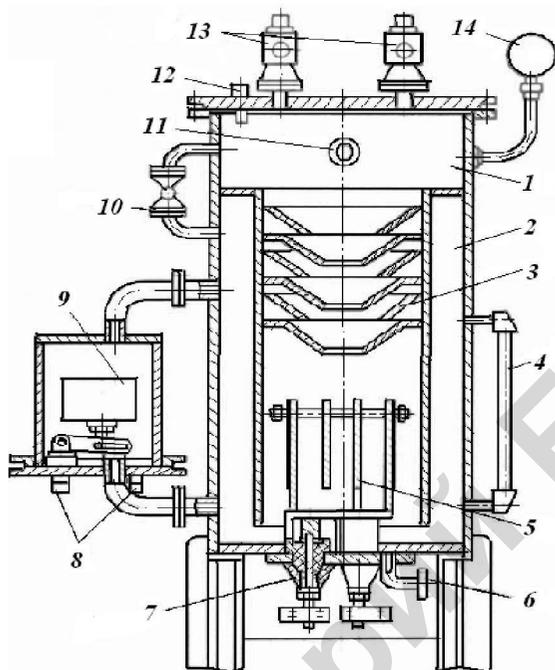


Рис. 3.41. Электродный паровой котел КЭПР-250/0,4:

1 и 2 – парогенерирующая и вытеснительная камеры; 3 – сепаратор пара; 4 – водомерное стекло; 5 – электрод; 6 – сливной патрубков; 7 – изоляторы и шпильки токоподвода; 8, 11 – патрубки автоматической и ручной подачи воды, выхода пара; 9 и 10 – регуляторы поплавковый и температуры; 12 – датчик температуры; 13 – предохранительные клапаны пара и воды; 14 – манометр

Электродный парогенератор ЭЭП (рис. 3.42) состоит из котла, питательного бака, термического деаэрата и насоса, смонтированных на общей раме, и щита управления.

Вода из водопровода через фильтр и противонакипное магнитное устройство поступает в питательный бак, откуда насосом-дозатором подается в электродный котел. В термическом деаэрате происходит ее дегазация и выпадение шлама. При продувке котла горячая вода проходит через теплообменник и отдает часть теплоты питающей воде.

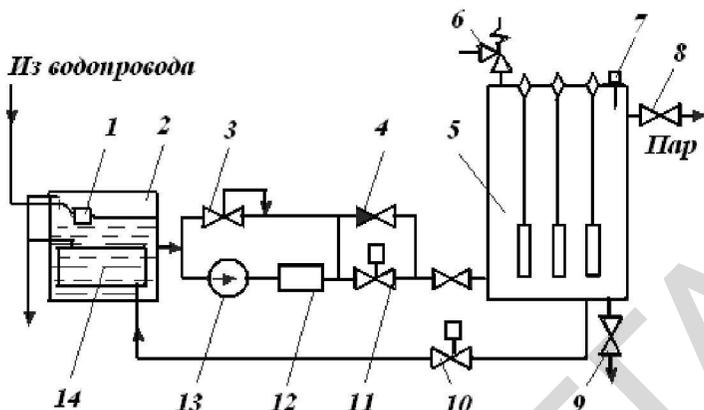


Рис. 3.42. Теплотехническая схема парогенератора типа ЭЭП:

- 1 – поплавокый клапан уровня воды; 2 – бак подпитки; 3 – регулятор давления; 4, 6 – обратный, предохранительный клапаны; 5 – электродный паровой котел; 7 – электродный датчик уровня воды; 8, 9 – вентили отбора пара, сливной; 10, 11 – электромагнитные клапаны; 12 – термический деаэрагор; 13 – насос; 14 – теплообменник

Мощность парогенератора регулируют уровнем воды в межэлектродном пространстве и продувкой.

3.4.4. Электрокотельные. Установки с аккумулярованием теплоты

Рассмотренные ранее ЭНУ, кроме аккумуляционных установок (САОС и др.), практически работают в режиме свободного электропотребления, что требует дополнительной мощности энергоснабжения при их включении и учете при расчете сети. В этих условиях более рационально использование ЭНУ с аккумулярованием теплоты.

Основная идея аккумулярования заключается в том, что, не увеличивая генерируемые мощности, мощности трансформаторных подстанций и сечений распределительных сетей системы, можно обеспечить работу электротепловых установок в необходимое по технологическим процессам время, запасая теплоту впрок с помощью теплоаккумуляторов. При этом установки могут работать в ночные часы «провалов» или недогрузки энергосистемы, запасая

теплоту на требуемое время работы в дальнейшем и не участвуя в максимумах графиков электрических нагрузок.

Аккумуляирование теплоты в установках может осуществляться с помощью твердых материалов: бетона, магнезита, шамота, кирпича, чугуна и т.д., формируемых в блоки, а также жидких теплоносителей: воды, солевых растворов, соляровых масел, антифризов, запасаемых в баках-аккумуляаторах.

Электрокотельные отличаются от систем общего центрального водяного отопления тем, что вместо котлов, работающих на твердом, жидком или газообразном топливе, обычно применяют электрические водонагреватели. Достоинства электрокотельного отопления – несложное регулирование тепловой мощности, возможность использования обычных отопительных приборов (труб, радиаторов, панелей и др.), лучшие санитарно-гигиенические условия.

Электрические котельные применяют для централизованного теплоснабжения и горячего водоснабжения сельскохозяйственных объектов, главным образом животноводческих ферм (табл. 3.9).

Таблица 3.9

**Ориентировочная потребность в теплоте на одну голову
(для районов с умеренным климатом)**

Ферма	Годовой расход теплоты, ГДж		Мощность, кВт		Суточный расход воды при 80 °С, л
	Отопление	Горячее водоснабжение	Отопление	Горячее водоснабжение	
<i>КРС:</i>					
молочная	4,0	1,7	0,7	0,3	15
откормочная	2,5	0,2	0,4	0,02	5,0
<i>Свиноводческая:</i>					
маточная	4,2	2,7	1,4	0,18	2,6
откормочная	0,6	1,6	0,1	0,24	9,0
<i>Птицеводческая</i>	0,25	0,015	0,075	0,012	—

Производственные и служебные помещения, объем которых не превышает 3000 м³, можно отапливать электрическими водонагревателями. Если водонагреватель установить на 1,5–2 м ниже уровня пола, то обеспечивается естественная циркуляция воды в отопительной системе.

Теплогенерирующими установками электродных служат преимущественно электродные водонагреватели и реже парогенераторы и элементные водонагреватели. Они могут быть встроенными в животноводческие помещения или установлены в специальных зданиях.

В зависимости от режима электропотребления котельные могут быть аккумуляционными и работающими по свободному графику. Преимущество первых в использовании «провалов» в графике нагрузки энергосистемы в ночное и дневное время и тем самым их выравнивание. Они позволяют равномерно нагружать сельские электросети и не требуют значительных расходов на их реконструкцию.

Безаккумуляционные установки, включаемые по свободному графику, нуждаются в достаточных генерирующих мощностях и пропускной способности электрических сетей и подстанций, не способствуют выравниванию графика нагрузки энергосистемы, однако исключают дополнительные затраты на аккумуляционные устройства и потери энергии в них.

Теплотехническая схема электродной с аккумуляцией теплоты на базе электродных водонагревателей (рис. 3.43), положенная в основу типовых проектов, содержит три контура.

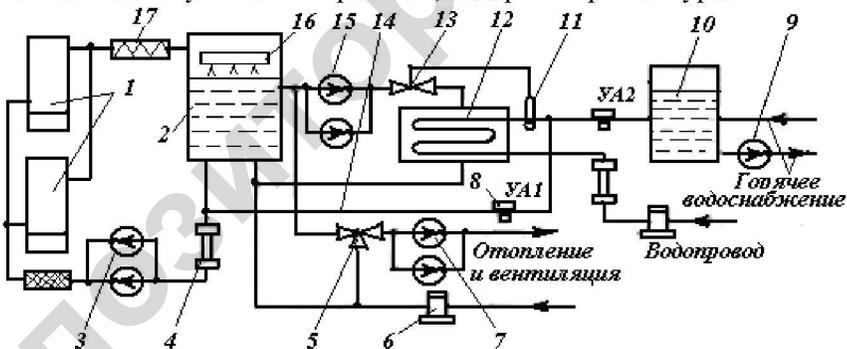


Рис. 3.43. Принципиальная теплотехническая схема электродной с аккумуляцией теплоты:

- 1 – электродводонагреватели; 2 – аккумуляторный бак; 3 и 7 – циркуляционные и сетевые насосы; 4 – противонакипное магнитное устройство; 5 и 8 – трехходовый смесительный и электромагнитный вентили; 6 – грязевик-отстойник;
- 9, 15 – насосы горячего водоснабжения; 10 – бак горячей воды; 11 – датчик температуры; 12 – водоводяной нагреватель; 13 – регулятор температуры;
- 14 – линия подпитки водой; 16 – деаэратор; 17 – изолирующая вставка

Первый контур обеспечивает аккумуляцию горячей воды. При включении электроводонагревателей 1 охлажденную воду (70 °С) из нижней части аккумулирующей емкости 2 подают циркуляционным насосом 3 в водонагреватель, где она нагревается до 95 °С, и затем поступает в верхнюю часть аккумулирующей емкости через разбрызгивающее устройство деаэрации 16. При достижении в нижней зоне аккумулятора температуры воды 95 °С электроводонагреватели отключаются. Воду первого контура обрабатывают противонакипным электромагнитным аппаратом 4, установленным на всасывающей линии циркуляционных насосов 3.

Второй контур предназначен для нужд теплоснабжения (отопления и вентиляции). Сетевые насосы 7 набирают воду (95 °С) из верхней зоны аккумулирующего бака и подают по системе трубопроводов в отопительные и вентиляционные устройства. Обратная вода (70 °С) через грязевик 6 возвращается в нижнюю зону бака. Температуру воды в системе отопления и вентиляции регулируют в зависимости от температуры наружного воздуха добавлением к прямой воде, поступающей в эти системы, обратной воды, выходящей из отопительно-вентиляционных установок, посредством смесительного вентиля 5.

Третий контур предназначен для нужд горячего водоснабжения. Воду из водопровода подают в водоводяной нагреватель 12, в котором нагревают до 55 °С, а затем перекачивают в бак-аккумулятор 10 для горячего водоснабжения, рассчитанный на суточный запас воды. Подачу воды в бак прекращают при достижении заданного уровня закрытием электрического вентиля УА2 на трубопроводе воды. Из бака воду насосами 9 горячего водоснабжения перекачивают к потребителю. Потери воды восполняют из водопровода через электромагнитный вентиль УА1.

Электроснабжение электродетальной может быть от отдельной или общей трансформаторной подстанции, питание которой обеспечивают от двух независимых источников. По надежности электроснабжения электродетальные относят ко второй категории.

Электроприемники электродетальной разделяют на две группы: электроводонагреватели, работающие преимущественно ночью, и насосы, освещение и другое вспомогательное оборудование, которое может быть включено в любое время суток.

Электроэнергию, потребляемую электроводонагревателями для расчета по льготному тарифу при использовании внепиковой энергии, учитывают счетчиками, установленными на линиях питания водонагревателей. Электроэнергию, потребляемую вспомогательным оборудованием, учитывают на питающей трансформаторной подстанции.

Комплекты КОГВ-1000/25 и КОГВ-2500/63. Для создания децентрализованных систем электротеплоснабжения с аккумулярованием теплоты на животноводческих комплексах, фермах и других сельскохозяйственных предприятиях разработаны и выпускаются промышленностью два типоразмера комплектов оборудования для горячего водоснабжения и одновременного обогрева помещений – КОГВ-1000/25 и КОГВ-2500/63. Эти комплекты предназначены для нагрева воды с разовым расходом 1000 и 2500 л в коровниках на 200 и 400 голов и одновременного обогрева в зимний период подсобных помещений молочного блока. Их используют в технологических процессах, связанных с потреблением горячей воды и обогревом помещений в зимний период года.

Комплекты КОГВ состоят (рис. 3.44) из бойлера-теплоаккумулятора 1, электродного водонагревателя 2, шкафа управления и автоматики 3, расширительного бака 4, подставки под бойлер-теплоаккумулятор 5, набора трубопроводов 6, 7, 9. В комплекте КОГВ-2500/63 имеется циркуляционный насос. Изолирующие вставки 9 включены как в контур бойлера-теплоаккумулятора, так и в контур обогрева помещений. При утечке воды из системы ее пополняют из водопровода в расширительный бак 4 через клапан уровня.

Греющим теплоносителем служит вода с температурой 95 °С, которая поступает из электродного водонагревателя и циркулирует в первичном контуре: водонагреватель – теплообменник – радиаторы. Летом контур водонагреватель – радиаторы отключен. В качестве источника теплоты в КОГВ-1000/25 используют электродные водонагреватели ЭВН-10/20-0,4, ЭВН-25 и ЭПЗ-25; в КОГВ-2500/63(100) используют ЭВН-63/0,4, ЭВН-60 и ЭПЗ-100И2. Бойлер-теплоаккумулятор (БТ) подключают к водопроводной сети через трубопровод холодной воды с помощью запорного вентиля и обратного клапана. При разборе горячей воды холодная подается под напором по трубопроводу в бойлер. С целью уменьшения потерь БТ покрыт теплоизоляцией.

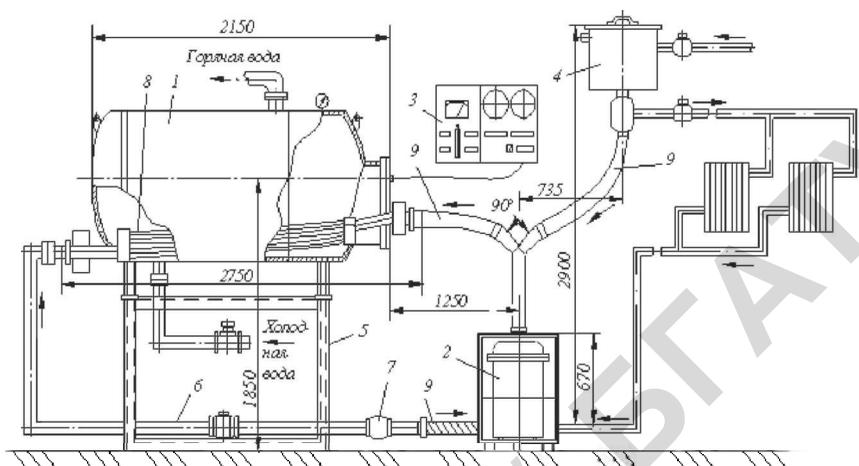


Рис. 3.44. Схема комплекта оборудования горячего водоснабжения КОГВ-1000/25:
 1 – бойлер-теплоаккумулятор; 2 – электродный водонагреватель;
 3 – шкаф управления и автоматики; 4 – расширительный бак;
 5 – подставка под бойлер; 6 – трубопровод; 7 – тройник; 8 – теплообменник
 бойлера; 9 – изолирующие вставки

Основные характеристики комплектов оборудования горячего водоснабжения приведены в табл. 3.10.

Для регулирования температуры воды в бойлере и автоматического управления комплектом (отключение установки при достижении номинальной температуры воды в БТ или в помещении и включение ее при снижении температуры) в крышках БТ и ЭВН имеются датчики терморегуляторов, размещенных в шкафу управления ШУА (рис. 3.45). Он обеспечивает следующие режимы работы комплектов: принудительный, свободный, летний и зимний.

Комплекты могут работать только на отопление, на горячее водоснабжение, и на отопление и горячее водоснабжение одновременно. Предусмотрено ручное управление. В автоматическом режиме КОГВ работают согласно программе, задаваемой реле времени (КТ 2РВМ).

Таблица 3.10

Основные характеристики комплектов оборудования горячего водоснабжения

Параметр	КОГВ-1000/25	КОГВ-2500/63(100)
Мощность, кВт	25	63
Напряжение, кВ	0,4	0,4
Удельное электрическое сопротивление воды, Ом·м	30	10–50
Рабочая вместимость бойлера-аккумулятора, л	1000	2500
Расчетное давление воды, кПа	250	250
Температура, °С:		
греющего теплоносителя	93 ± 3	95 ± 3
воды в бойлере:		
начальной	12±2	12±2
конечной	70±2	70±2
Время разогрева воды в бойлере, ч	6	6
Суточная производительность, л/сут:		
свободный режим	4000	10000
принудительный режим	2000	5000
Количество обслуживаемых животных	200	400
Объем обогреваемого помещения, м ³	250	550
Температура воздуха в помещении, °С	18±2	18±2

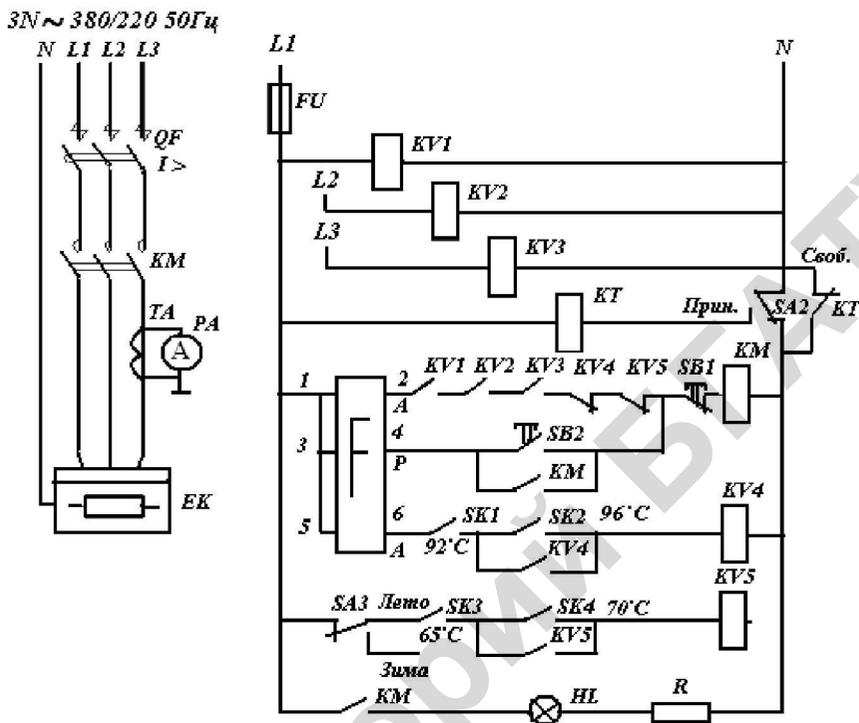


Рис. 3.45. Схема электрическая принципиальная шкафа управления КОГВ

От неполнофазного режима работы предусмотрена защита с помощью реле $KL1-KL3$.

Установка КОГВ-ЭС разработана на базе комплекта КОГВ-1000/25 для использования солнечной энергии с электрическим дублером и предназначена для горячего водоснабжения коровника на 200 голов с апреля по ноябрь. Гелионагреватель установки (ГН) имеет общую площадь 25 м^2 и состоит из 30 термоизолированных радиаторов типа РСГ2-1-8. Теплоноситель (вода), проходя через ГН, в зависимости от количества поступающей солнечной радиации, нагревается до $10-35 \text{ }^\circ\text{C}$. Для аккумуляции нагретой жидкости служит бак-накопитель (БН), позволяющий два раза в сутки заполнять бойлер-теплоаккумулятор теплой водой, которая подогревается затем до $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и расходуется на технологические нужды. Средняя температура воды, поступающей в БТ, составляет

30–55 °С. Максимальная мощность гелиоустановки – 12,5 кВт, КПД – 0,32–0,33. Сокращение расхода электрической энергии составляет 40 %, что при нагреве воды на технологические нужды коровника на 200 голов позволяет сэкономить около 14 тыс. кВт·ч/год.

3.4.5. Выбор электрических водонагревателей и парогенераторов. Особенности эксплуатации

Водонагреватели и парогенераторы выбирают по технологическому назначению и расчетной мощности. При этом учитывают график потребления энергии и возможность аккумуляции горячей воды, если это необходимо.

Мощность проточного водонагревателя или парогенератора

$$P = \frac{Q_{\max}}{3600\eta}, \quad (3.103)$$

где Q_{\max} – максимальная часовая потребность в теплоте, Дж/ч; η – КПД электроводонагревателя и системы раздачи горячей воды или пара.

Мощность аккумуляционного водонагревателя или электродвигательной, работающей с аккумуляцией теплоты,

$$P = \frac{k_3 Q_c}{\tau\eta}, \quad (3.104)$$

где $k_3 = 1,2-1,25$ – коэффициент запаса, учитывающий возможность расширения теплоснабжения; τ – продолжительность работы водонагревателя или электродвигательной в течение суток, с.

Суточная потребность в теплоте, Дж,

$$Q_c = \sum_1^{24} Q_{ci}. \quad (3.105)$$

Часовая потребность в теплоте для электродвигательных, Дж,

$$Q_{\text{чи}} = Q_{\text{оти}} + Q_{\text{ви}} + Q_{\text{сти}} + Q_{\text{ти}}, \quad (3.106)$$

где $Q_{\text{оти}}$, $Q_{\text{ви}}$, $Q_{\text{сти}}$, $Q_{\text{ти}}$ – часовая потребность в теплоте на отопление зданий и сооружений, подогрев вентиляционного воздуха, на санитарно-гигиенические и технологические нужды.

Методика расчета теплотребления на отопление и подогрев вентиляционного воздуха дана в специальной литературе.

Часовая потребность в теплоте на технологические нужды

$$Q_{\text{ти}} = \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (3.107)$$

Теплота, потребляемая на i -й тепловой процесс, Дж, для водонагревателей

$$Q_{\text{ти}} = m_{\text{ви}} c (t_{\text{ги}} - t_{\text{хи}}). \quad (3.108)$$

Для парогенераторов

$$Q_{\text{ти}} = m_{\text{пи}} c (h - h_{\text{к}}), \quad (3.109)$$

где $m_{\text{ви}}$, $m_{\text{пи}}$ – расход горячей воды или пара в i -м процессе, кг; c – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); $t_{\text{ги}}$, $t_{\text{хи}}$ – температуры горячей и холодной воды; h и $h_{\text{к}}$ – энтальпии пара и конденсата, Дж/кг.

Расход горячей воды или пара и температура даны в нормах технологического проектирования в зависимости от вида технологической операции. График потребления воды или пара в течение суток зависит от технологии производственных процессов (табл. 3.11).

Для водонагревателей и парогенераторов, обеспечивающих выполнение технологических процессов,

$$Q_{\text{чи}} = Q_{\text{ти}}. \quad (3.110)$$

Продолжительность работы водонагревателей при свободном графике электропотребления принимают исходя из технологических требований и технических возможностей самих водонагревателей (мощность, вместимость аккумулирующего резервуара), при режимном электропотреблении – задается энергосбытовой организацией. Например, разрешено включать электродогревательную с 23 до 6 ч и с 12 до 16 ч.

Суточная потребность в теплоте может быть представлена в виде табл. 3.11 или суточного графика тепловой нагрузки (рис. 3.46, а).

Таблица 3.11

**Потребление теплоты некоторыми технологическими процессами
молочно-товарной фермы на 200 голов ($t_x = 8^\circ\text{C}$)**

Технологический процесс	Расход воды, кг/гол		Температура горячей воды, °C	Потребление теплоты, МДж, по времени суток					
	утро	вечер		4–5	5–6	12–13	13–14	19–20	20–21
Поение коров	22	21	12	-	73,7	73,7	-	70,4	-
Обмывка вымени	0,6	0,45	38	15,1	-	-	-	11,4	-
Мытье посуды: подойной	0,7	0,7	65	-	34,0	-	-	-	34,0
для поения телят	0,5	0,5	60	-	21,8	-	21,8	-	21,8

Для электродогревательной количество теплоты, которое необходимо запасти в аккумулирующем резервуаре, и его вместимость находят по интегральным графикам выработки и потребления теплоты (рис. 3.46, б).

Ордината такого графика есть количество теплоты, выработанной или потребленной в течение какого-то периода времени и суток в целом:

$$Q_{\text{ак}} = Q_{\text{в}} - Q_{\text{пот}}, \quad (3.111)$$

где $Q_{\text{в}} - Q_{\text{пот}}$ – максимальная разность ординат интегральных графиков выработки (кривая 1, рис. 3.43, б) и потребления (кривая 2) теплоты.

Вместимость аккумулирующего резервуара, м³,

$$V_{\text{ак}} = \frac{Q_{\text{ак}}}{\rho(t_{\text{max}} - t_{\text{min}})}, \quad (3.112)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; t_{max} , t_{min} – температуры воды на входе и на выходе аккумулирующего резервуара, °С.

Вместимость резервуара аккумуляционного водонагревателя рассчитывают по формуле (3.76), подставив вместо $Q_{\text{ак}}$ значение $Q_{\text{с}}$.

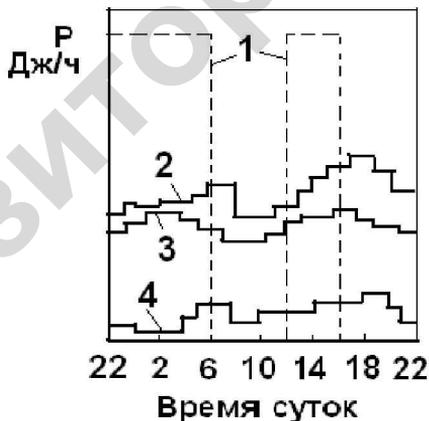


Рис. 3.46. Графики выработки и потребления теплоты для блока зданий молочно-товарной фермы на 400 голов:

- а – примерные суточные графики тепловых и электрических нагрузок;
- б – интегральные; 1 – выработка теплоты; 2 – общее потребление; 3 – расход на отопление и вентиляцию; 4 – расход на горячее водоснабжение

Максимальную температуру воды принимают равной 90–95 °С, что позволяет устанавливать аккумуляторы меньшего объема. Ее минимальное значение при открытом водоразборе соответствует температуре воды в водопроводе. При замкнутой системе работы водонагревателей, характерной для электрокотельной, температура воды должна быть не ниже 70 °С. Требуемую температуру $t_{см}$ воды достигают смешиванием горячей воды из водонагревателя с холодной. Расход горячей G_r и смешанной $G_{см}$ воды связан отношением

$$G_r = \frac{G_{см} (t_{см} - t_x)}{t_r - t_x} \quad (3.113)$$

По расчетной мощности выбирают требуемое число водонагревателей или парогенераторов.

Особенности эксплуатации электрических водонагревателей и парогенераторов. Элементные водонагреватели наиболее эффективно применять для локального горячего водоснабжения потребителей, сравнительно небольших сельскохозяйственных объектов. Водонагреватели САЗС используют в закрытых системах отопления и подогрева воды для поения животных, САОС – для подогрева воды на различные технологические и санитарно-бытовые нужды. Проточные водонагреватели применяют в системах аккумуляции горячей воды в теплоизолированных емкостях в качестве резервных при недостаточной подаче горячей воды от основных источников.

Наработка элементного водонагревателя на отказ составляет 10–14 месяцев. При этом 81 % повреждений приходится на ТЭНы и 15 % – на регуляторы температуры. Основные причины отказа ТЭНов – нарушение герметизации выводных концов, коррозионное нарушение оболочки, обрыв спирали из-за перегрева. Эти причины вызваны чрезмерными усилиями на контактные стержни при подключении проводов к нагревателям, образованием слоя накипи на поверхности трубки, утечкой воды из водонагревателя из-за неисправности или отсутствия обратного клапана. Регуляторы температуры чаще всего выходят из строя из-за несоответствия условиям эксплуатации.

Надежность работы элементных водонагревателей можно увеличить при выполнении следующих рекомендаций:

при подключении проводов к ТЭНам не следует прикладывать к гайкам контактных стержней излишнее усилие, в результате которого нарушается герметичность выводных концов;

исключить работу ТЭНов без воды и ее проток в водонагревателях. Для этого подводящий трубопровод должен быть оснащен обратным клапаном или устроен так, чтобы самовытекание воды исключалось;

очищать накипь с поверхности ТЭНов 1 раз в 2–3 месяца, не допуская отложений толщиной более 2 мм;

промывать индукционные водонагреватели 1 раз в два года 3–5%-ным водным раствором соляной кислоты в течение 2–3 ч;

не устанавливать запорные краны на трубопроводах горячей воды, если в системе водоснабжения отсутствует предохранительный клапан или свободное сообщение с атмосферой. Закрытую систему водоснабжения необходимо оснастить клапаном избыточного давления, который должен быть освидетельствован не реже 1 раза в полгода.

Применение электродных водонагревателей и парогенераторов наиболее эффективно в централизованных системах горячего водоснабжения животноводческих ферм, птицефабрик, механизированных дворов и других крупных объектов. На их базе в большинстве случаев организуют центральные электротепловые аккумуляцией теплоты.

Электродным паронагревателям и парогенераторам присущи особенности, обусловленные способом нагрева: мощность зависит от удельного сопротивления и температуры воды (при образовании накипи на электродах они уменьшаются); низкое сопротивление электродов относительно корпуса. Нарботка на отказ для электродных водонагревателей составляет 7–8 мес. Наиболее часто выходят из строя фазные электроды (52 %) и регуляторы температуры (30 %). Характерные повреждения электродов: образование накипи на их поверхности, выпадение токопроводящего осадка, коррозионное разрушение.

Надежность электродных водонагревателей увеличивается при работе по замкнутому контуру и специальной подготовке воды. Водонагреватель подключают к теплоаккумулирующей емкости

или теплообменнику и затем обеспечивают несменяемость заранее подготовленной воды (рис. 3.43). Подготовка воды включает ее фильтрацию, противонакипную магнитную обработку, деаэрацию, корректирование удельного сопротивления.

Водонагреватель должен работать на воде, имеющей удельное сопротивление в пределах, указанных в паспорте. Если оно выше паспортного, то в воду добавляют тринатрийфосфат или сульфат натрия, если ниже, то опресняют дистиллятом или дождевой водой.

При работе по замкнутому контуру температура обратной воды должна быть не менее 70 °С. Паспортная мощность водонагревателя соответствует номинальному удельному сопротивлению и температуре воды на его входе 70 и выходе 95 °С. Работа по замкнутому контуру и специальная подготовка воды существенно уменьшают образование накипи и выпадение токопроводящего осадка в межэлектродном пространстве, делают практически неизменным сопротивление воды и снижают его влияние на мощность водонагревателя.

Электродные парогенераторы в отличие от водонагревателей работают при переменном удельном сопротивлении воды, возрастающем в несколько раз из-за ее испарения и увеличения содержания солей. Устойчивую работу парогенераторов обеспечивают их периодической или постоянной продувкой, состоящей в удалении части воды с высоким содержанием солей и низким удельным сопротивлением, и добавлением в котел питающей воды с высоким электросопротивлением. Операции подготовки воды те же, что и для электродных водонагревателей.

Основные меры защиты от поражения электрическим током состоят в занулении водонагревателей и парогенераторов, подключении их к водопроводной сети через изолирующие вставки, выравнивании потенциалов в помещениях.

Элементные водонагреватели должны быть занулены. Изолирующие вставки в трубопроводах холодной и горячей воды нужны во всех случаях, за исключением тех, когда водонагреватели снабжены аппаратами защитного отключения и если они установлены и снабжают горячей водой помещения с искусственным или естественным выравниванием потенциалов. В помещениях без устройств выравнивания потенциалов необходимо

местное выравнивание потенциалов у водонагревателя и в местах разбора воды.

Элементные водонагреватели, обеспечивающие горячей водой душевые, должны иметь изолирующие вставки. Душевые кабины и места раздевания следует оборудовать устройствами выравнивания потенциалов в виде металлической сетки с ячейками размером не более $0,3 \times 0,3 \text{ м}^2$, заложенной в бетон на глубину 20–30 мм от поверхности пола и соединенной сваркой с трубопроводами холодной и горячей воды, и канализационными.

Длина изолирующей вставки, м,

$$l = \frac{1,4 \cdot 10^4 d^2}{\rho_t}, \quad (3.114)$$

где d – внутренний диаметр вставки, м; ρ_t – удельное сопротивление горячей воды, Ом·м.

Электродные водонагреватели и парогенераторы следует устанавливать в отдельных помещениях. Они могут питаться от трансформаторов или от общей сети. Корпус должен быть занулен. При этом коэффициент звездности

$$k_s = \frac{P - P_d}{P} \leq 0,25 - 0,3, \quad (3.115)$$

где P и P_d – мощность водонагревателя в нормальном режиме и при условии, что его корпус выполнен из диэлектрика.

В помещениях особо опасных и повышенной опасности, имеющих технологическое оборудование, связанное с электродным водонагревателем, необходимо оборудовать устройство выравнивания потенциалов. При отсутствии такого водонагреватель должен иметь защиту от неполнофазных режимов. Металлические трубопроводы необходимо соединить между собой и занулить не менее чем в двух точках, одна из которых должна быть в электрокотельной. Если зануление и выравнивание потенциалов не обеспечивают требуемого коэффициента звездности и напряжение прикосновения в аварийном режиме не более 12 В, то электродный

водонагреватель занулять или заземлять не разрешается. Его следует изолировать от земли, зануленного и заземленного оборудования и оградить сеткой высотой 1,7 м на расстоянии от корпуса не менее 1 м. Сетка должна быть занулена и оборудована блокировкой двери, отключающей водонагреватель от сети.

Контрольные вопросы

1. Элементные и индукционные водонагреватели, устройство, области применения, способы регулирования мощности.
2. Электродные водонагреватели и парогенераторы, устройство, области применения, способы регулирования мощности.
3. Особенности эксплуатации электрических водонагревателей и парогенераторов, выбор изолирующих вставок.
4. Выбор электроводонагревателей и парогенераторов.
5. Теплотехническая трехконтурная схема и оборудование электродных котлов.
6. Классификация электрических водонагревателей и парогенераторов.
7. Способы регулирования мощности элементных водонагревателей.
8. Способы регулирования мощности электродных водонагревателей.
9. Определить минимально допустимое расстояние между пластинчатыми электродами электродного водонагревателя. Удельное электрическое сопротивление воды при 20 °С равно 30 Ом·м, напряжение между электродами – 380 В.
10. Определить длину изолирующей вставки на трубопроводе горячей воды. Температура горячей воды составляет 90 °С, удельное электрическое сопротивление воды при 20 °С – 30 Ом·м, наружный диаметр трубопровода 0,025 м, напряжение питания 380/220 В.
11. Определить мощность электрического водонагревателя. Производительность 0,5 м³/ч, начальная температура нагрева воды – 10 °С, конечная – 90 °С.

Лабораторная работа 5

Исследование элементных водонагревателей

Цель работы. Изучить устройство, принцип действия элементных водонагревателей и электрические схемы управления ими.

Задачи работы

1. Изучить устройство, принцип действия, способы регулирования мощности элементных водонагревателей САОС, САЗС, ЭВ-Ф-15, КВ-02 и индукционного водонагревателя 084.ПВ-1.

2. Изучить принципиальные электрические схемы управления водонагревателями САЗС, ЭВ-Ф-15, 084.ПВ-1.

3. Опробовать нагрев воды в емкостном ЭН-1В, проточном КВ-02 и индукционном 084.ПВ-1 водонагревателях. Определить их КПД, скорость нагрева воды, удельный расход энергии.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики элементных водонагревателей. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Изучить устройство, принцип действия, способы регулирования мощности водонагревателей ЭВ-Ф-15, КВ-02, САОС, САЗС, 084.ПВ-1. Нарисовать принципиальные схемы изучаемых водонагревателей. Уяснить местоположение, назначение, действие подводящих и отводящих трубопроводов, предохранительных и обратных клапанов, циркуляционных насосов, изолирующих вставок, датчиков и регуляторов температуры. Изучить устройство терморегуляторов, температурных реле, манометрических термометров, установленных на водонагревателях.

Уяснить месторасположение, назначение, действие аппаратов, работу электрических схем водонагревателей, изучив электроаппаратуру, установленную в шкафах управления и на водонагревателях.

2. Поочередно включить водонагреватели КВ-02, ЭН-1В, 084.ПВ-1. Открыть вентиль и установить подачу воды m_{τ} равной, указанной на водонагревателе. Включить автоматический выключатель QF на лабораторном стенде «Элементные водонагреватели», установить пакетный переключатель SA в положение КВ-02. Включить автоматический выключатель QF1 на пульте управления водонагревателем КВ-02. С помощью измерителей-регуляторов МТ2 через каждые 2 минуты измерить температуру на входе t_1 , выходе t_2 водонагревателя и трубки ТЭНа $t_{\text{н}}$, контролируя время нагрева τ и мощность P . Опыт проводить до установившейся температуры t_2 . Результаты исследований записать в табл. ЛЗ.5.1.

Таблица ЛЗ.5.1

Энергетические характеристики водонагревателей КВ-02, ЭН-1В, 084.ПВ-1

Измерено						Вычислено			
m_{τ} кг/с	τ , с	t_1 , °C	t_2 , °C	$t_{\text{н}}$, °C	P , Вт	α , Вт/(м ² ·°C)	η , о.е.	$\Delta t/\tau$, °C/с	q , Дж/(кг·°C)

Мощность водонагревателей снижена по сравнению с номинальной из-за ограниченных возможностей лабораторной электрической сети.

По результатам исследований определить следующие показатели.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воде

$$\alpha = \frac{P}{(t_1 - t_2)A},$$

где A – площадь теплоотдающей поверхности (ЭН-1В – 0,82 м², КВ-02 – 0,2 м², 084.ПВ-1 – 0,965 м²).

Коэффициент полезного действия водонагревателя

$$\eta = \frac{m_{\tau}c(t_2 - t_1)}{P},$$

где $c = 4190$ Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воды.

Скорость нагрева

$$\Delta t / \tau = \frac{t_2 - t_1}{\tau}.$$

Удельный расход энергии на нагрев воды

$$q = \frac{P}{m_{\tau}(t_2 - t_1)}.$$

По результатам исследований сделать вывод об энергетической эффективности водонагревателей.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы, результаты измерений.
2. Графические зависимости $t_2(\tau)$.
3. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство, принцип действия элементных и индукционных водонагревателей.
2. Работа принципиальных электрических схем управления.
3. Способы регулирования температуры воды.
4. Основные энергетические характеристики водонагревателей.
5. Основные правила эксплуатации элементных водонагревателей.

Лабораторная работа 6

Исследование электродных водонагревателей

Цель работы. Изучить устройство, принцип действия, типовые схемы управления электродных водонагревателей.

Задачи работы

1. Изучить устройство, принцип действия и способы регулирования мощности водонагревателей ЭПЗ и КЭВ.

2. Определить геометрический коэффициент электродной системы и пределы регулирования мощности водонагревателя КЭВ-100/0,4.

3. Исследовать влияние температуры воды на мощность водонагревателя. Определить КПД системы «водонагреватель – теплообменник» и расход энергии на нагрев воды.

4. Установить влияние неполнофазных режимов питания водонагревателя на «вынос» напряжения на трубопроводы.

5. Изучить принцип работы α -контроллера для автоматического управления электродным водонагревателем в системе отопления.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики электродных водонагревателей. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

Лабораторная установка включает электродный водонагреватель ЭПЗ-100ИЗ, работающий по замкнутому контуру, и КЭВ-100/0,4 со снятым корпусом.

1. Устройство, принцип действия и схему включения водонагревателей в систему горячего водоснабжения изучить по лабораторным образцам.

Измерить размеры и нарисовать электродную систему водонагревателя КЭВ-100/0,4.

2. Геометрический коэффициент рассчитать по формуле

$$k = \frac{l}{b(n-1)}$$
 и результатам измерения, выполненным в п. 1. Изме-

рить линейкой пределы перекрытия электродов диэлектрическими

вставками и рассчитать пределы регулирования мощности водонагревателя КЭВ-100/0,4.

3. Открыть кран подачи воды в теплообменник. Мерным сосудом, секундомером и термометром измерить расход и температуру воды во вторичном контуре теплообменника. Включить автоматический выключатель QF на лабораторном стенде, рубильник QS на шкафу управления, запустить насос подачи воды. Пакетный переключатель SA установить в положение «Р» (ручной режим работы электродного водонагревателя) и установить мощность водонагревателя 8–10 кВт.

Влияние температуры воды на мощность наблюдать в период «разгона» водонагревателя до установившейся температуры. Показания приборов записать согласно табл. ЛЗ.6.1.

Таблица ЛЗ.6.1

Влияние температуры воды на мощность электродного водонагревателя							
Измерено				Вычислено			
$\tau, \text{с}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Вт}$	$\rho_{20}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$t_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\rho_t, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$\rho_{\text{ср}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$

В табл. ЛЗ.6.1: τ – время работы водонагревателя; t_1, t_2 – температуры воды на входе и выходе водонагревателя; P – мощность, потребляемая водонагревателем; $t_{\text{ср}} = 0,5(t_1 + t_2)$ – средняя температура воды; $\rho_{20}, \rho_t, \rho_{\text{ср}}$ – удельное сопротивление воды при 20°C , t_2 и $t_{\text{ср}}$.

В установившемся режиме работы (температура воды на выходе из теплообменника не изменяется) записать показания приборов согласно табл. ЛЗ.6.2.

Таблица ЛЗ.6.2

Энергетические показатели системы «водонагреватель – теплообменник»								
Измерено						Вычислено		
$P, \text{Вт}$	$P_{\text{дв}}, \text{Вт}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$m_t, \text{кг/с}$	$\eta, \text{о.е.}$	$q, \text{Дж/кг}$

В табл. ЛЗ.6.2: $P_{\text{дв}}$ – мощность электродвигателя насоса; t_3, t_4 – температуры воды на входе и выходе теплообменника; m_t – подача воды; η – КПД системы «водонагреватель – теплообменник»; q – удельный расход энергии на нагрев воды.

$$\text{Кoeffициент полезного действия } \eta = \frac{m_{\tau} c (t_4 - t_3)}{P}.$$

$$\text{Удельный расход энергии } q = \frac{P + P_{\text{дв}}}{m_{\tau}}.$$

4. Отключить пакетным выключателем, который находится на стенке шкафа управления, одну из фаз. Вольтметром и щупом измерить напряжение по отношению к нулевому проводу в специальных точках на поверхности диэлектрической вставки, гальванически связанных с водой. Измерения выполнить для случаев: полнофазный режим работы; двухфазный режим работы с зануленным трубопроводом; двухфазный с незануленным трубопроводом (табл. ЛЗ.6.3).

По результатам исследований сделать заключение и влиянии температуры на мощность, энергоемкости нагрева воды и электробезопасности электродных установок.

Таблица ЛЗ.6.3

Влияние неполнофазного режима питания водонагревателя на «вынос напряжения» на трубопровод

Точка измерения, номер	Трубопровод занулен		Трубопровод не занулен	
	3 фазы	2 фазы	3 фазы	2 фазы

5. Установить на лабораторном стенде пакетный переключатель SA в положение «А» (автоматический режим работы электродного водонагревателя). Открыть щит управления, подключить α -контроллер к системному блоку, подать напряжение на α -контроллер. Включить в сеть компьютер и уяснить, как загрузить программу (для управления работой электродного водонагревателя в системе отопления) в α -контроллер.

Изменить температуру воздуха внутри условного объекта отопления (макет домика), для чего переключателем SA1 включить источник обогрева домика. При повышении температуры в домике выше заданной электродвигатель включается в работу и поворачивает электроды электродного водонагревателя ЭПЗ-100ИЗ против часовой стрелки, что снижает мощность, при понижении температуры ниже нормы электродвигатель поворачивает электроды по ча-

совой стрелке, что увеличивает мощность. Увеличение или понижение мощности необходимо контролировать по измерительным приборам на лабораторном стенде.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Результаты измерений.
3. Графические зависимости $\rho_{cp}(t_2)$, $\rho_A(t_2)$.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия электродных водонагревателей.
2. Способы регулирования мощности и температуры.
3. Работа схем управления водонагревателями ЭПЗ.
4. Основные энергетические показатели водонагревателей.
5. Основные меры по повышению надежности электродных водонагревателей.

3.5. Электрические печи и ванны

3.5.1. Области применения и классификация

Электрические печи применяют для выполнения термических процессов на производственных предприятиях АПК (ремонтные заводы и мастерские, предприятия по переработке сельскохозяйственного сырья).

Электрические печи классифицируют по способу нагрева – косвенного и прямого нагрева; по технологическому назначению – термические для термической и термохимической обработки металлов, плавильные и сушильные; по способу загрузки и характеру работы – периодического и непрерывного действия; по температурным режимам это в основном среднетемпературные (до 1250 °С) и низкотемпературные (до 700 °С).

3.5.2. Электрические нагревательные печи, соляные, масляные, щелочные ванны

Камерные электрические печи СНО – печи нагревательные, универсальные, предназначенные для нагрева деталей (заготовок)

под закалку, механическую обработку (ковку, штамповку и т. д.), отпуск; нормализацию, цементацию, пайку твердыми припоями и др. Устройство печи типа СНО представлено на рис. 3.47.

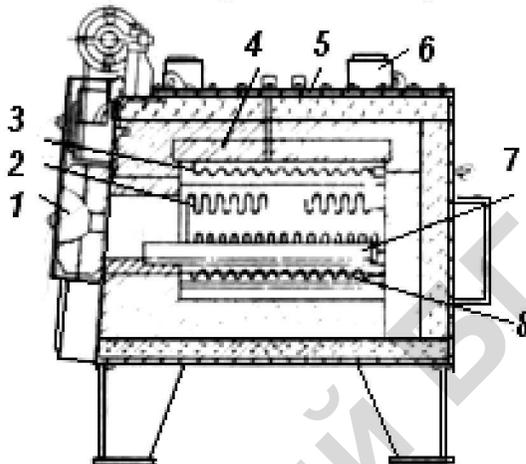


Рис. 3.47. Камерная электропечь:

1 – дверца; 2, 3 и 8 – боковой, сводный и подовый нагреватели; 4 – футеровка; 5 – кожух; 6 – коробка выводов нагревателей; 7 – подовая плита

Печь представляет собой камеру, футерованную огнеупорным кирпичом, теплоизолированную и заключенную в металлический кожух. На внутренних поверхностях рабочей камеры смонтированы нагревательные спирали или зигзагообразные (проволочные или ленточные) нагревательные элементы из жаростойких (рабочая температура до 1000 °С) сплавов с высоким сопротивлением. В печах с рабочей температурой до 1500 °С применяют стержневые нагреватели из карборунда или дисилицида молибдена.

Техническая характеристика некоторых печей сопротивления представлена в табл. 3.12.

В условных обозначениях типовых печей сопротивления первая буква (С) означает способ нагрева – сопротивлением (резистором); вторая – конструкцию печей (Н – камерная, Ш – шахтная, В – ванна); третья – характер среды в рабочем пространстве печи (О – окислительная, З – защитная, С – соляная, Г – щелочная). В цифрах, следующих за буквенным обозначением, числитель показывает размеры рабочего пространства в дециметрах, знаменатель – максимальную температуру печи в сотнях градусов.

Основные технические данные некоторых камерных электропечей

Тип печи	Мощность, кВт	Напряжение на нагревателях, В	Число фаз	Максимальная рабочая температура, °С
СНО-3.6.2/10-И2	14,6	72	1	1000
СНО-6.12.4/10-И2	71	103	3	1000
СНО-3.2.6.2,5/15-М1	23,5	20–26	1	1500
СНЗ/СНО-3.6.2/10-М1	14	72	1	1000
СНЗ-4.8.2,5/12-М1	19	20–26	1	1200

Печи с защитной средой содержат устройство для подачи защитного (инертного) газа в рабочую камеру и конструктивно не отличаются от печей с окислительной средой.

Нагревательные печи подключают к сети непосредственно или через понижающий трансформатор. Для управления печами выпускают серийные щиты типа ИЗР и ИЗ (измерение, запись, регулирование температуры). Температуру регулируют двухпозиционным регулятором ВК. Первичным преобразователем служит термopара, установленная в рабочей камере. Дверцу печи поднимают и опускают с помощью реверсируемого электродвигателя М. В верхнем положении дверцы при отключенном напряжении электродвигатель заторможен в результате действия электромагнита УА.

Реже используют другие печи сопротивления (шахтные, колпаковые и т. д.).

Электрические ванны (табл. 3.13) предназначены для термической обработки металлических изделий в жидких теплоносителях (масла, щелочи, расплавы солей).

Наиболее распространены электродные соляные ванны, а также соляные и масляные с внешним или внутренним обогревом нагревательными элементами.

Электродные соляные ванны типа СВС (рис. 3.48) применяют для безокислительного нагрева изделий, главным образом термообработки режущего и ударного инструмента. Их температура не превышает 1300 °С.

Основные технические данные некоторых электрических ванн

Обозначение	Мощность, кВт	Напряжение питания, В	Максимальная рабочая температура, °С
С электродным нагревом			
СВС-1.3/13	63	6,5–20	1300
СВС-2.3/13	160	6,5–20	1300
С элементным нагревом			
СВГ-1,5.2/8.5	10	380/220	850
СВГ-2,5.3,5/8.5	20	380/220	850
СВГ-3,5.4/8.5	30	380/220	850

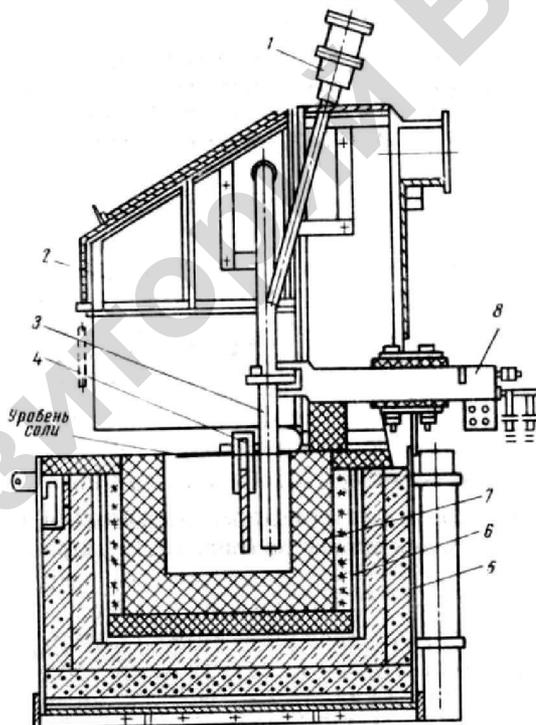


Рис. 3.48. Электродная соляная ванна:

1 – пирометр; 2 – зонг; 3 – электроды; 4 – перегородка; 5 и 6 – наружный и внутренний кожухи; 7 – футеровка; 8 – токоподвод

Подбирая состав солей, можно проводить и термохимическую обработку. Соль расплавляют электрическим током, протекающим через нее между электродами, расположенными в ванне и подключенными к понижающему трансформатору. Температуру контролируют пирометром и регулируют с помощью щита управления типа ИЗР или ИР.

Электрические масляные (рис. 3.49) и щелочные ванны предназначены для отпуска деталей и инструмента после закалки. Их рабочая температура составляет 200–250 °С. Нагрев – с помощью ТЭНов, погруженных в жидкость, или спиральных нихромовых элементов, заложенных в футеровку ванны.

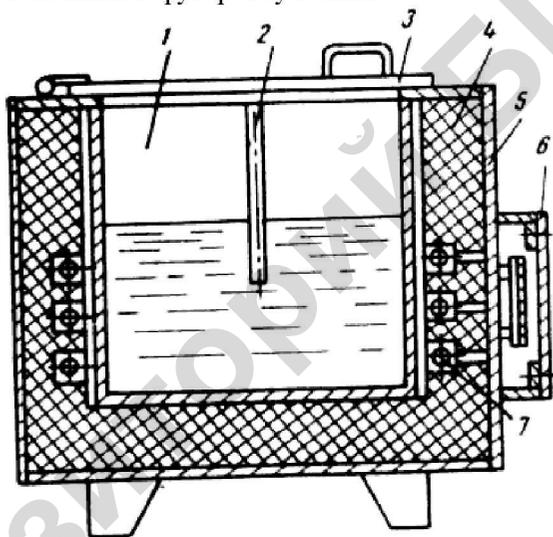


Рис. 3.49. Масляная ванна:

- 1 – рабочая ванна; 2 – датчик температуры; 3 – крышка; 4 – футеровка;
5 – наружный кожух; 6 – коробка подключений; 7 – нагреватель

Нагрев масляных и щелочных ванн осуществляют ТЭНами. Мощность масляных ванн составляет до 100 кВт, щелочных – до 800 кВт.

Недостатки соляных, масляных и щелочных ванн:

- высокий расход электрической энергии;
- тяжелые условия труда обслуживающего персонала;
- длительность разогрева ванн;
- необходимость очистки деталей от соли (соляные ванны).

Отопительная электрическая теплоаккумулирующая печь ЭОКС-150/0,5-И1 (рис. 3.50) предназначена для подогрева воздуха в животноводческих помещениях. Основные сборочные единицы: сердечник, состоящий из 30 теплоаккумулирующих блоков, выполненных из бетона с магнезитовым наполнителем; нагреватели в виде спиралей из нихромовой проволоки, установленные в каждом блоке; электрический калорифер СФО-40/1Т; центробежный вентилятор и система воздуховодов. Теплоаккумулирующие блоки помещены в металлический кожух, футерованный керамическими плитами и изолированный минеральной ватой. Воздух подается через каналы аккумуляционной насадки вентилятором. Работа печи состоит из циклов зарядки и разрядки. В период зарядки включают нагревательное устройство и температура теплоаккумулирующего сердечника повышается до 500–700 °С. При этом часть мощности устройства может расходоваться на нагревание воздуха. В период разрядки нагревательное устройство включают и запасенная теплота распределяется в воздухе при продувании через каналы теплоаккумуляционной насадки.

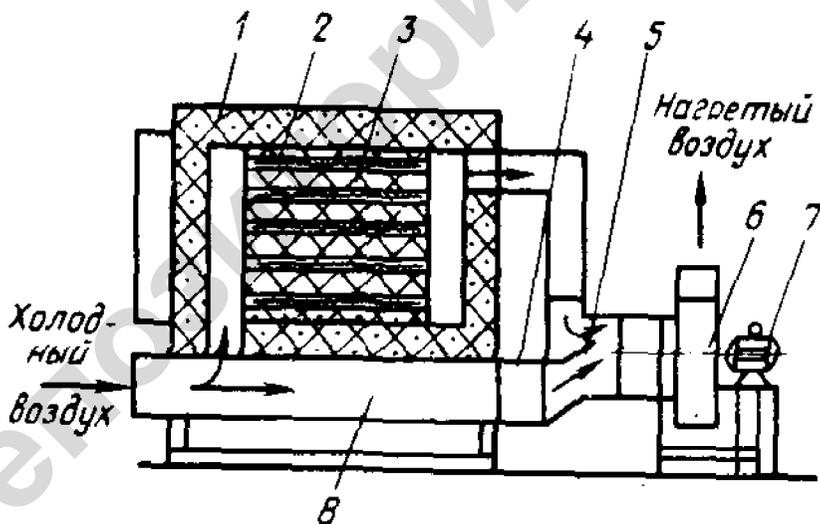


Рис. 3.50. Устройство теплоаккумулирующей установки:

- 1 – теплоизолирующий кожух; 2 – электронагреватель; 3 – теплоаккумулирующий сердечник; 4 – электрокалорифер; 5 – регулирующая заслонка смесительного устройства; 6 – вентилятор; 7 – электродвигатель; 8 – байпасный канал

Установленная мощность печи составляет 155 кВт, в том числе аккумулирующего нагревательного устройства – 105 кВт, отопительного (электрокалорифера) в период зарядки – 5 кВт. Длительность зарядки – 8, разрядки – 16 ч; разность температур входящего и выходящего воздуха равна 35 °С.

Система автоматического управления установкой поддерживает температуру воздуха в помещении в соответствии с технологическими требованиями, обеспечивает заданные циклы включения и выключения нагревательного устройства, защищает оборудование от перегрузок в случае отклонений в режиме работы.

3.5.3. Расчет электрических печей

Упрощенный расчет электрической печей по их выбору включает технологический, тепловой и электрический. Механический, гидравлический и другие расчеты выполняют при проектировании установок.

Технологический расчет заключается в уточнении технологических требований к процессу, режиму работы печи, требуемому полезному объему, температуре нагревателей.

Тепловой расчет печей достаточно сложен и излагается в специальной литературе. Упрощенный тепловой расчет выполняют путем решения уравнения теплового баланса

$$Q = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + \sum Q_{\text{пот}}, \quad (3.116)$$

где Q – количество теплоты, необходимое для нагрева загрузки до заданной конечной температуры, Дж; $Q_{\text{пол}}$ – полезная теплота на нагрев изделий, Дж; $Q_{\text{всп}}$ – количество теплоты, потребное для нагрева вспомогательных жароупорных устройств, входящих вместе с загрузкой в печь (корзин, поддонов, муфелей, подвесок), и газа, Дж; $\sum Q_{\text{пот}}$ – суммарные тепловые потери печи за цикл, Дж.

Полезная теплота на нагрев изделий

$$Q_{\text{пол}} = c_{\text{изд}} m_{\text{изд}} (t_2 - t_1), \quad (3.117)$$

где $c_{\text{изд}}$ – средняя удельная теплоемкость материала загрузки, Дж/(кг·°С); $m_{\text{изд}}$ – масса загрузки, кг; t_2 , t_1 – конечная и начальная температуры изделий, °С.

Аналогично определяют количество теплоты для нагрева вспомогательных загрузочных приспособлений и газа по каждой из составляющих.

Суммарные тепловые потери печи $\Sigma Q_{\text{пот}}$, Дж, применительно к циклу «нагрев – охлаждение» загрузки в печи равны:

$$\Sigma Q_{\text{пот}} = R_{\text{п}}(q_{\text{н}}\tau_{\text{н}} + q_{\text{выд}}\tau_{\text{выд}} + q_{\text{охл}}\tau_{\text{охл}} + q_{\text{зв}}\tau_{\text{зв}}), \quad (3.118)$$

где $q_{\text{н}}$ – мощность тепловых потерь через стенки печи в период нагрева, Вт; $q_{\text{выд}}$ – то же, в период выдержки, Вт; $q_{\text{охл}}$ – то же, в период охлаждения, Вт; $q_{\text{зв}}$ – мощность тепловых потерь через загрузочные проемы и щели при загрузке и выгрузке, Вт; $R_{\text{п}} = 1,15 - 1,3$ – коэффициент неучтенных тепловых потерь, который вводится для учета теплотерь через щели и неплотности конвекцией, через выводы нагревателей, термопар и т. п.; $\tau_{\text{н}}$, $\tau_{\text{выд}}$, $\tau_{\text{охл}}$, $\tau_{\text{зв}}$ – продолжительность соответствующих периодов цикла, с.

Определения составляющих потерь в упрощенном виде приведены в специальной литературе.

Электрический расчет печей сопротивления заключается в определении размеров (сечения и длины) нагревателей по фазам, напряжения их питания и конструктивной формы размещения на стенках печи. Исходными данными для расчета являются: мощность печи, полученная в результате теплового расчета; конечная температура нагрева изделий; характеристика нагреваемых изделий; габариты; теплоемкость, масса; напряжение питающей сети; особые условия нагрева (наличие или отсутствие защитных сред, вакуума).

Для среднетемпературных (700–1200 °С) и высокотемпературных (свыше 1500 °С) печей передача теплоты от нагревателей к изделиям осуществляется в основном излучением. Доля конвективного теплообмена снижается с повышением температуры и не превышает 3–5 %.

Особенности лучистого теплообмена приведены в п. 2.3. Там же описываются и условия теплообмена идеального нагревателя. В реальных условиях нагреватели имеют форму, отличную от сплошного листа (поверхности), соотношение площадей изделия и нагревателей может варьироваться в больших пределах, нагреватель и изделие не являются абсолютно черными. Кривые

удельной поверхностной мощности идеального абсолютно черного нагревателя приведены в прилож. 21. Удельная поверхностная мощность реального нагревателя учитывается путем введения поправочных коэффициентов для различных условий работы нагревателей и приведения коэффициентов излучения:

$$\varphi = C_{\text{пр}} \alpha_{\text{эф}} \varphi_{\text{ид}}, \quad (3.119)$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы «нагреватель – изделие»; $\varphi_{\text{ид}}$ – удельная поверхностная мощность при теплообмене двух абсолютно черных тел (прилож. 21); $\alpha_{\text{эф}} = 0,3-0,7$ – коэффициент эффективности излучения нагревателя.

Расчетный диаметр круглых нагревателей, м, равен:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P^2 \rho_t}{\pi^2 U^2 \varphi}}. \quad (3.120)$$

Для нагревателя прямоугольного сечения при соотношении сторон прямоугольника $m = b/a$ (обычно принимают $m = 5-15$), где b – ширина полосы, м; a – толщина полосы, м,

$$a = \sqrt[3]{\frac{P^2 \rho_t}{2m(m+1)U^2 \varphi}}, \quad (3.121)$$

где P – мощность нагревателя, Вт; φ – удельная поверхностная мощность нагревателя выбранной конструкции, Вт/м²; U – напряжение на нагревателе, В; ρ_t – удельное электрическое сопротивление нагревателя при рабочей температуре, Ом·м.

Полученные расчетные значения диаметра или размеров сечения ленты округляют до ближайших по сортаменту.

После определения основных размеров нагревателей выполняют его конструирование и размещение в рабочем пространстве печи. Диаметр спирали выбирают по условиям ее механической прочности: для никельсодержащих сплавов сопротивления $D = (7-10)d$; для железохромоалюминиевых $D = (5-7)d$. Для проволочных зигзагообразных нагревателей из проволоки $d = 6-15$ мм высоту

зигзага выбирают в пределах 200–400 мм по условиям механической прочности. Шаг волны определяется технологическими возможностями изготовления бездефектного нагревателя и должен быть $s \geq 5d$. Для ленточных нагревателей высота шага $A \leq 100a$, шаг волны $s \geq 2b$.

Расчет электрической отопительной аккумуляционной печи.
Задача расчета. Определить геометрические размеры и массу сердечника печи, при которых аккумулируется необходимое количество теплоты.

Исходные данные. Вид и характеристики отопляемого помещения, конструктивное исполнение печи, вид и характеристики теплоаккумулирующего материала, вид электрических нагревателей (ТЭНы, открытые нагреватели).

Последовательность расчета. Количество теплоты, которое необходимо запасти в аккумуляционной печи, Дж,

$$Q_{\text{ак}} = \frac{P_{\text{в}} \tau_{\text{р}}}{\eta_{\text{т}}}, \quad (3.122)$$

где $P_{\text{в}}$ – мощность отопительно-вентиляционной установки, Вт; $\tau_{\text{р}}$ – длительность разрядки теплоаккумулятора, с, в большинстве случаев принимают 24 ч; $\eta_{\text{т}} = 0,9$ – тепловой КПД.

Установленная мощность нагревателей печи, Вт,

$$P_{\text{уст}} = \frac{k_3 Q_{\text{ак}}}{\tau_3}, \quad (3.123)$$

где τ_3 – длительность зарядки теплоаккумулятора печи, с; $k_3 = 1,1$ – $1,2$ – коэффициент запаса.

Масса теплоаккумулирующего сердечника печи, кг,

$$m_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{ак}}}{c_{\text{м}} (t_2 - t_1)}, \quad (3.124)$$

где $t_1 = 100$ – 200 °С, $t_2 = 500$ – 700 °С – температуры сердечника в начале зарядки и в конце разрядки; $c_{\text{м}}$ – удельная теплоёмкость

материала сердечника, Дж/(кг·°С).

В качестве теплоаккумулирующих материалов используют магнезит, термостойкий бетон и др. Сердечник выполняют из отдельных блоков, каждый массой $m_{cl} = 100\text{--}150$ кг.

Количество теплоаккумулирующих блоков

$$n_6 = m_c / m_{cl}. \quad (3.125)$$

Для существующих печей удельная масса термоаккумулирующего блока $m_{уд} = 40\text{--}50$ кг/кВт, удельный объем $V_{уд} = 0,07\text{--}0,10$ м³/кВт.

Объем теплоаккумулирующего материала

$$V_{ак} = P_{уст} V_{уд}. \quad (3.126)$$

Теплоаккумулирующие блоки выполняют прямоугольной или цилиндрической формы. Количество нагревателей чаще всего равно числу блоков. Размеры нагревателей должны обеспечить их рациональное размещение в сердечнике печи.

Контрольные вопросы

1. Классификационные признаки электрических печей и ванн.
2. Устройство, принцип действия электрических нагревательных печей.
3. Устройство, принцип действия соляных ванн.
4. Устройство, принцип действия щелочных ванн.
5. Устройство, принцип действия масляных ванн.
6. Методика расчета электрической отопительной аккумуляционной печи.

Практическое занятие 7

Расчет электрической отопительной аккумуляционной печи

Задача занятия. Определить геометрические размеры и массу сердечника печи, при которых аккумулируется необходимое количество теплоты.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и литературе [3], изучить методику расчета электрической отопительной аккумуляционной печи, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 7.1. Определить геометрические размеры и массу сердечника аккумуляционной печи для отопления помещения. Конструктивное исполнение печи приведено на рис. 9.1 [3].

Таблица ПЗ.7.1

Исходные данные к задаче 7.1

Номер варианта	Наименование помещения	Количество животных (птицы) N , гол.	Масса животного (птицы) m , кг	Температура наружного воздуха $t_{в}$, °С	Время зарядки печи τ_3 , ч
1	2	3	4	5	6
1	Коровник	200	400	-10	8
2	Воловник	100	400	-10	8
3	Телятник (от 1 до 3 мес.)	200	60	-10	8
4	Свинарник (молодняк)	400	50	-10	8
5	Свинарник (откорм)	400	150	-10	8
6	Птичник (куры)	15000	2,0	-10	8
7	Птичник (утки)	15000	2,5	-10	8
8	Коровник	400	300	-15	6
9	Воловник	200	500	-15	6
10	Телятник (от 3 до 4 мес.)	200	80	-15	6

Окончание табл. ПЗ.7.1

1	2	3	4	5	6
11	Свинарник (молодняк)	450	60	-15	6
12	Свинарник (откорм)	450	160	-15	6
13	Птичник (куры)	10000	2,0	-15	6
14	Птичник (утки)	10000	2,5	-15	6
15	Коровник	400	450	-20	7
16	Воловник	400	550	-20	8
17	Телятник (от 1 до 3 мес.)	300	40	-20	7
18	Телятник (от 3 до 4 мес.)	300	75	-20	7
19	Свинарник (молодняк)	350	70	-20	7
20	Свинарник (откорм)	500	180	-20	7
21	Птичник (куры)	17000	2,0	-20	7
22	Птичник (утки)	17000	2,5	-20	7
23	Коровник	200	350	-5	8
24	Птичник (куры)	20000	2,0	-5	8
25	Птичник (утки)	20000	2,5	-5	8

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Задача расчета электрической отопительной аккумуляционной печи.

2. Исходные данные для расчета электрической отопительной аккумуляционной печи.

3. Как определить количество аккумулируемой теплоты?

4. Как определить мощность печи?

5. Какие теплоаккумулирующие материалы используют в отопительных печах?

6. Как определить количество теплоаккумулирующих блоков?

Репозиторий БГАТУ

4. ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАГРЕВ

4.1. Свойства и характеристики электрической дуги

Электрическая дуга – устойчивый самостоятельный электрический разряд в газах или парах металлов, характеризующийся высокой плотностью тока и низким падением напряжения на катоде. Горение дуги сопровождается интенсивным нагревом электродов и газового промежутка. Температура дуги достигает 6000–10000 °С и более, что достаточно для плавления и испарения самых тугоплавких металлов и сплавов.

В сельскохозяйственном производстве *основная область применения электродугового нагрева* – дуговая электросварка. Прохождение электрического тока в ионизированных газах не сопровождается электролизом, поэтому для дугового нагрева применяют переменный и постоянный ток.

Возбуждение дуги осуществляют путем первоначального касания («чирканья») электродов, вызывая термическую ионизацию паров металла и молекул газа между электродами, или с помощью специальных устройств бесконтактного поджога дуги, создающих между электродами импульсы высокого напряжения.

После возбуждения, горение дуги поддерживается благодаря совокупному воздействию ионизации соударением, фотоионизации, термоэлектронной и автоэлектронной эмиссий. Основную роль играет ионизация соударением. По физической природе дуга представляет собой низкотемпературную плазму, в которой степень ионизации газа составляет несколько процентов.

Потоки заряженных частиц, достигающие электродов, отдают им, запасенную в электрическом поле кинетическую энергию, выделяемую на электроде в форме теплоты. При дуге постоянного тока катод нагревается меньше, чем анод (температура металлических электродов составляет 2300–2400 °С), так как длина свободного пробега положительных ионов меньше, чем электро-

нов, и, кроме того, часть энергии потока положительных ионов расходуется на совершение работы выхода электронов с катода.

Таким образом, горение электрической дуги сопровождается следующими эффектами, обуславливающими области ее применения: большим выделением теплоты на электродах (на этом основана электродуговая сварка и плавка металлов в электродуговых печах прямого нагрева; высокоинтенсивным инфракрасным излучением (это свойство используется в электродуговых печах косвенного нагрева); мощным потоком видимого излучения (это свойство дуги используется в электродуговых осветительных приборах – прожекторах); интенсивным ультрафиолетовым излучением (как генератор ультрафиолетовых лучей электрическая дуга не используется из-за низкого энергетического КПД).

Электрическая дуга как газовый проводник по длине неоднородна и состоит из трех последовательных участков (рис. 4.1, а), различающихся длиной и характером протекающих в них процессов: катодной области (l_k), столба дуги (l_c) и анодной области (l_a).

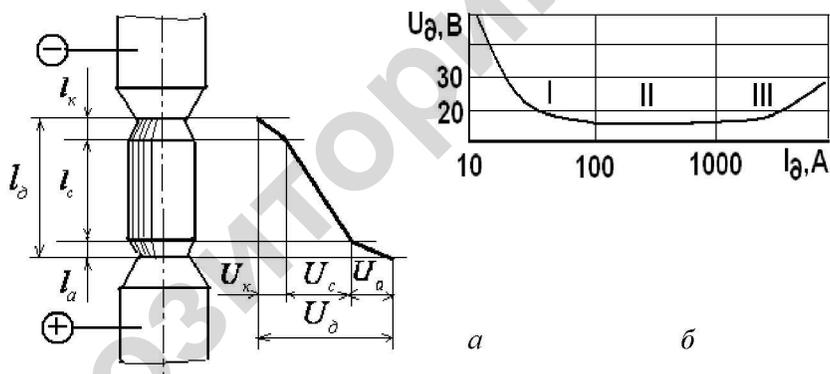


Рис. 4.1. Электрическая дуга:
а – строение; б – статическая вольт-амперная характеристика

Общая длина дуги состоит из длин трех областей (рис. 4.1, б):

$$l_d = l_k + l_c + l_a.$$

Общее напряжение на дуге U_d складывается из падений напряжений в катодной области U_k , столбе дуги U_c , в анодной области U_a :

$$U_{\text{д}} = U_{\text{к}} + U_{\text{с}} + U_{\text{а}}.$$

Ток дуги вытекает из анода и втекает в катод (при дуге постоянного тока) через так называемые активные пятна – наиболее нагретые части электродов, которые называются соответственно анодным и катодным пятном.

Катодная область дуги расположена вблизи катода, длина ее около 10^{-6} м, что приближенно равно длине свободного пробега электрона. Катодное падение напряжения порядка 10 В создается за счет объемного прикатодного заряда положительных ионов.

Столб дуги занимает основную долю длины дуги. В длинных дугах $l_{\text{д}} = l_{\text{с}}$. Он состоит из движущихся навстречу один другому электронов, положительных ионов и очень малого числа отрицательных ионов. В целом столб дуги электрически нейтрален, так как положительные и отрицательные заряды компенсируют один другой. Высокая температура столба поддерживается в основном в результате упругих соударений электронов с молекулами и атомами газа. Плотность тока в дуговом столбе достигает десятков и сотен А/мм², напряженность электрического поля $(10-35) \cdot 10^2$ В/м. Температура столба дуги зависит от состава газовой смеси, материала и диаметра электродов, плотности тока. Приближенно температура, К, столба дуги может быть определена по формуле

$$T = 810U_j, \quad (4.1)$$

где U_j – потенциал ионизации газовой среды, В.

Анодная область непосредственно примыкает к аноду. Длина ее больше катодной ($10^{-5} - 10^{-6}$ м), падение напряжения – около 30 В. Анодное падение напряжения создается за счет отрицательного объемного заряда из ускоренных электронов, извлекаемых из столба дуги.

Электрическую дугу классифицируют по роду среды, в которой происходит дуговой разряд (открытая, горячая под флюсом, в среде защитных газов); роду тока (постоянного, переменного,

трехфазного); полярности (прямой и обратной – для дуги постоянного тока).

Эффективная мощность дуги

$$P_{\text{эд}} = U_{\text{д}} I \eta, \quad (4.2)$$

где η – КПД, учитывающий потери энергии при ее передаче изделию. Его значение зависит от материала электродов: при сварке открытой дугой металлическими электродами $\eta = 0,7 - 0,85$, под флюсом – $\eta = 0,8 - 0,95$.

Важную роль при изучении свойств сварочной дуги и определении требований к источникам питания для дуговой сварки играет статическая *вольт-амперная характеристика* (ВАХ) дуги, представляющая собой зависимость падения напряжения на дуге от силы тока $U_{\text{д}} = f(I)$. Ее вид изображен на рис. 4.1, б. При малых токах (до 100 А, область I) сопротивление дуги уменьшается быстрее, чем увеличивается ток, и ВАХ имеет падающий характер, согласно уравнению

$$U_{\text{д}} = a + b l_{\text{д}} + \frac{c + d l_{\text{д}}}{I}, \quad (4.3)$$

где $a = U_{\text{к}} + U_{\text{а}}$ – сумма катодного и анодного падений напряжения; b – удельное падение напряжения в газовом столбе, отнесенное к 1 мм длины дуги (зависит от газового состава столба дуги); $l_{\text{д}}$ – длина дуги, мм; c – мощность, необходимая для вырывания электрона из катодного пятна и зависящая от материала электродов, Вт; d – мощность, затрачиваемая на прохождение электронного потока через газовый промежуток дуги длиной 1 мм, Вт.

При средних значениях токов (100–1000 А, область II) третья составляющая правой части уравнения (4.3) становится незначимой и напряжение на дуге практически не зависит от тока. ВАХ имеет жесткий характер и описывается первыми двумя составляющими правой части уравнения (4.3):

$$U_{\text{д}} = a + b l_{\text{д}}. \quad (4.4)$$

В высокопроизводительных промышленных установках при автоматической сварке под флюсом применяют еще большие токи (более 1000 А, область III). В этом случае ВАХ имеет возрастающий вид.

В электрической дуге переменного тока катод и анод периодически (с частотой тока) меняются местами. При каждом переходе тока через нуль другого участка снижается температура дугового промежутка, происходит частичная деионизация газовой смеси. Повторное зажигание дуги в начале следующего полупериода происходит при достижении напряжения, достаточного для зажигания дуги. Поэтому дуга переменного тока горит прерывисто и неустойчиво. Чтобы повысить устойчивость, необходимо более высокое напряжение питания, чем для дуги постоянного тока. Устойчивость дуги возрастает при включении индуктивности в сварочную цепь.

4.2. Условия устойчивого горения дуги

Источник питания и дуга образуют энергетическую систему, которая будет устойчива, если обеспечен баланс расхода энергии и доставки ее от источника, иными словами, если случайные изменения значения тока будут с течением времени уменьшаться, возвращая систему в исходное состояние. Для этого источники питания должны иметь внешние характеристики $U_{и} = f(I)$, (которые могут быть падающими, жесткими, возрастающими), соответствующие вольт-амперной характеристике дуги $U_{д} = f(I)$, или содержать устройства автоматической стабилизации тока дуги.

В первом случае условие устойчивости в статическом режиме сводится к тому, чтобы дифференциальное сопротивление системы, называемое коэффициентом устойчивости k_y , было больше нуля:

$$k_y = \left(\frac{\partial U_{д}}{\partial I} - \frac{\partial U_{и}}{\partial I} \right)_{I_p} > 0. \quad (4.5)$$

Частные производные представляют собой дифференциальные сопротивления соответственно дуги и источника в рабочей точке

при $I = I_p$. Условие (4.5) выполняется, если при падающей характеристике дуги внешняя характеристика источника питания будет более падающей. На рис. 4.2 показаны совмещенные падающая характеристика источника питания и дуги.

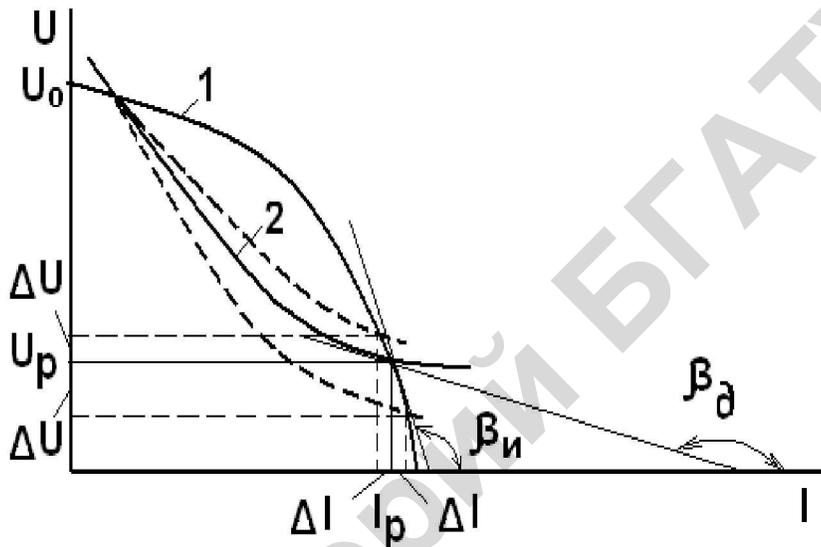


Рис. 4.2. Совмещенные падающие характеристики:
1 – источника питания; 2 – электрической дуги

Так как $\frac{\partial U_d}{\partial I} = \text{tg}\beta_d$, $\frac{\partial U_{и}}{\partial I} = \text{tg}\beta_{и}$, то условие устойчивости можно записать как $\text{tg}\beta_d > \text{tg}\beta_{и}$.

Падающую внешнюю характеристику используют в аппаратах ручной сварки, где необходимо обеспечить устойчивость дуги и малое изменение сварочного тока при изменении длины дуги. Изменение напряжения вследствие изменения длины дуги на величину ΔU (рис. 4.2) приводит к незначительному изменению сварочного тока ΔI . Падающая внешняя характеристика обеспечивает небольшую кратность тока короткого замыкания, которая должна быть не более 1,4. При больших токах короткого замыкания источник питания испытывает значительные перегрузки, качество сварки и безопасность обслуживания из-за разбрызгивания металла ухудшаются.

Источники с жесткой и возрастающей характеристиками используют при автоматической сварке под флюсом и в среде защитных газов (аргон, углекислый газ).

4.3. Источники питания электрической дуги и их классификация

Источники питания для дуговой сварки классифицируют по роду тока (постоянного и переменного токов); числу фаз (однофазного и трехфазного токов); виду внешних характеристик (с падающей, жесткой, возрастающей характеристиками); техническому исполнению (вращающиеся, статические); числу сварочных постов (однопостовые, многопостовые); способу снабжения энергией (зависимые – питаемые от электрической сети, и автономные – с собственным двигателем внутреннего сгорания).

К источникам питания для дуговой сварки предъявляют следующие требования: обеспечивать устойчивое горение дуги, возможность настройки режимов сварки, безопасность обслуживания, высокие энергетические и экономические показатели. Выполнение этих требований достигается выбором основных параметров источников питания: внешней характеристики, напряжения холостого хода, способа регулирования сварочного тока.

Внешняя характеристика источника $U_{II} = f(I)$ должна в наибольшей степени соответствовать форме статической характеристики дуги. В аппаратах ручной сварки, где необходимо обеспечить устойчивость дуги и малое изменение сварочного тока при изменении длины дуги используют падающую внешнюю характеристику, при автоматической сварке под флюсом и в среде защитных газов – пологопадающую, жесткую и даже возрастающую. В большинстве случаев наиболее целесообразна падающая внешняя характеристика источника.

Напряжение холостого хода U_0 выбирают из условия надежного зажигания дуги и безопасности обслуживания. Повышение напряжения облегчает зажигание дуги, но одновременно увеличивает опасность поражения сварщика. Кроме того, повышение напряжения холостого хода источников питания дуги переменного тока

(сварочных трансформаторов) приводит к возрастанию тока намагничивания и снижению $\cos\varphi$.

Напряжение зажигания дуги переменного тока составляет 50–55 В, следовательно, напряжение холостого хода не может быть ниже этого значения. Верхний предел значений U_0 ограничивается условиями безопасности и составляет 60–90 В, а у мощных сварочных трансформаторов на токи 2000–2500 А оно не должно превышать 110 В.

Дуга постоянного тока зажигается при более низких напряжениях (30–40 В), напряжение холостого хода источников питания принимают 45–90 В.

Регулирование сварочного тока необходимо при сварке деталей различной толщины. Для этого источник питания снабжают устройствами ступенчатого или плавного регулирования сварочного тока, обеспечивающими возможность работы на различных характеристиках.

Сварочные трансформаторы представляют собой одно- или трехфазные понижающие трансформаторы со вторичным напряжением холостого хода 60–110 В, рассчитанные на большие сварочные токи. Они могут быть однопостовыми – для питания одной сварочной дуги и многопостовыми – для питания одновременно нескольких сварочных дуг. Однопостовые трансформаторы обычно имеют падающую внешнюю характеристику, многопостовые – жесткую.

Однопостовые сварочные трансформаторы различают по способу формирования падающей внешней характеристики и регулирования сварочного тока (что нередко осуществляется одними и теми же устройствами). По этому признаку трансформаторы разделяют на две группы: с нормальным магнитным рассеянием и с повышенным. Последние, в свою очередь, разделяют на трансформаторы с подвижными катушками и с магнитными шунтами (рис. 4.3).

Пренебрегая активным сопротивлением сварочной цепи, уравнение внешней характеристики (рис. 4.4) можно представить в виде

$$\dot{U} = \dot{U}_2 - jI_2\omega L. \quad (4.6)$$

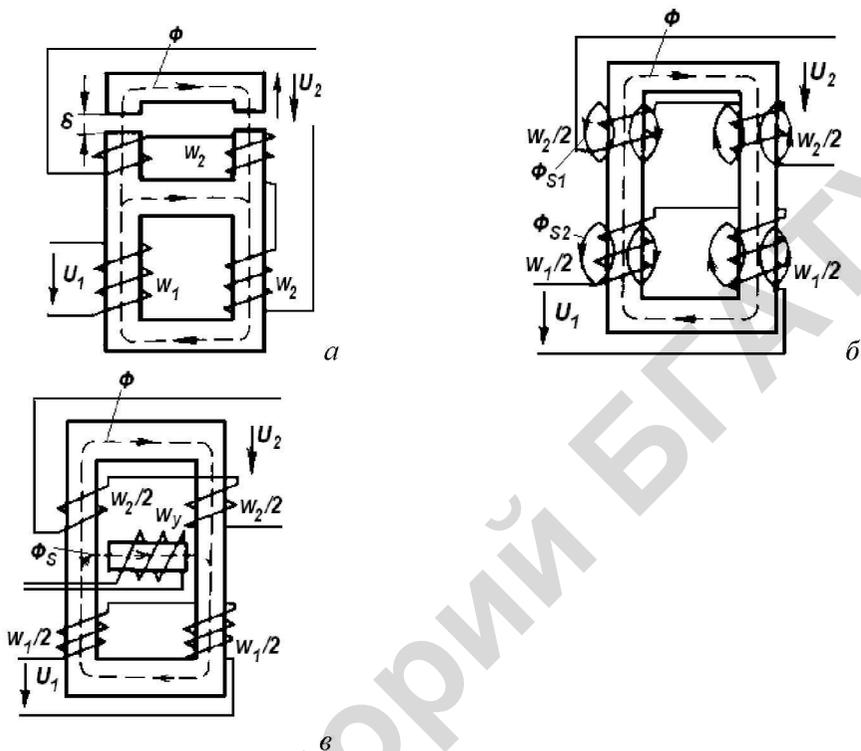


Рис. 4.3. Схемы устройства сварочных трансформаторов:
 а – с нормальным магнитным рассеянием; б – с подвижными обмотками;
 в – с магнитным шунтом

В трансформаторах с *нормальным магнитным рассеянием* (типа СТН, ТСД) в сварочную цепь включают дроссель L с регулируемым воздушным зазором, встроенный в основной магнитопровод (рис. 4.3, а). Дроссель формирует падающую внешнюю характеристику и выполняет функцию регулятора сварочного тока. Для трансформаторов с нормальным магнитным рассеянием ЭДС, обусловленные потоками рассеяния первичной E_{S_1} и вторичной E_{S_2} обмоток, равны нулю.

При увеличении воздушного зазора магнитное сопротивление дросселя возрастает, следовательно, уменьшается индуктивное сопротивление ωL катушки дросселя. При этом, как следует из

формулы (4.6), сварочный ток I_2 при некотором фиксированном значении U возрастает. При уменьшении воздушного зазора сварочный ток уменьшается и при $\delta = 0$ достигает минимума. Каждому значению воздушного зазора соответствует своя внешняя характеристика.

В трансформаторах с *повышенным магнитным рассеянием* (типа ТД) падающую внешнюю характеристику создают в результате повышенных индуктивностей рассеяния первичной L_{S_1} и вторичной L_{S_2} обмоток трансформатора, обуславливающих соответствующие потоки рассеяния Φ_{S_1} и Φ_{S_2} (рис. 4.3, б). Это достигают разнесением на магнитопроводе катушек первичной и вторичной обмоток (в силовых трансформаторах катушки располагают соосно).

Принципиальная электрическая схема сварочного трансформатора для общего случая изображена на рис. 4.4.

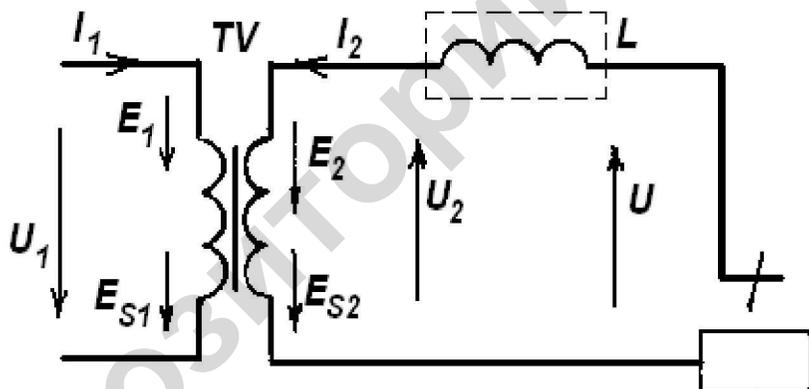


Рис. 4.4. Принципиальная электрическая схема сварочного трансформатора:
 E_{S_1} , E_{S_2} – ЭДС, обусловленные потоками рассеяния первичной и вторичной обмоток; L – дополнительная индуктивность в сварочной цепи; U – напряжение на дуге

Уравнение внешней характеристики получим из схемы на рис. 4.4, приняв L и пренебрегая, как и выше, активным сопротивлением сварочной цепи:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 \omega L_{S_2}, \quad (4.7)$$

где $X_2 = \omega L_{S_2}$.

Трансформаторы имеют стержневой магнитопровод с подвижными вторичными обмотками (рис. 4.3, б). Крутизну характеристики и сварочный ток регулируют изменением расстояния между первичными и вторичными обмотками. При раздвижении обмоток магнитная связь между обмотками уменьшается, потоки рассеяния, индуктивность L_{S_2} и индуктивное сопротивление обмоток возрастают, следовательно, ток уменьшается. При сближении обмоток ток увеличивается. Каждому положению вторичных обмоток соответствует своя внешняя характеристика. Ток регулируют ступенчато изменением включения обмоток с параллельного на последовательное и обратно (при наличии в первичной и вторичной обмотках по две катушки) или изменением числа активных витков вторичной обмотки. При этом изменяется и напряжение холостого хода.

В трансформаторах типа ТДФ повышенное магнитное рассеяние создают с помощью неподвижного *магнитного шунта* (пакета шихтованной стали), расположенного в окне магнитопровода между разнесенными первичной w_1 и вторичной w_2 обмотками трансформатора. Шунт отделен от стержней магнитопровода воздушными зазорами. На шунте помещена катушка подмагничивания (управления) постоянного тока w_y (рис. 4.3, в). Через шунт замыкается поток рассеяния, не пересекающий вторичную обмотку. С увеличением тока в катушке w_y возрастает магнитное сопротивление шунта, вследствие чего уменьшается замыкающийся через него поток рассеяния, а основной поток, замыкающийся через вторичную обмотку, возрастает, следовательно, увеличивается сила тока в сварочной цепи.

Для облегчения зажигания и повышения устойчивости сварочной дуги переменного тока, особенно при сварке на малых токах, применяют *осцилляторы*, представляющие собой маломощные (100–250 Вт) искровые генераторы, преобразующие ток низкого напряжения промышленной частоты в ток высокой частоты (100–3000 кГц) высокого напряжения (2500–6000 В). Высокочастотные

импульсы подводят к дуговому промежутку сварочного аппарата. Высокое напряжение облегчает возбуждение и стабилизацию дуги, а высокая частота делает этот ток безопасным для сварщика. Применяют осцилляторы последовательного и параллельного включения. Принципиальная схема простейшего осциллятора последовательного включения изображена на рис. 4.5. Он состоит из искрового колебательного контура, образованного конденсатором C_2 , индуктивностью L и разрядником F . Контур получает питание от трансформатора TV .

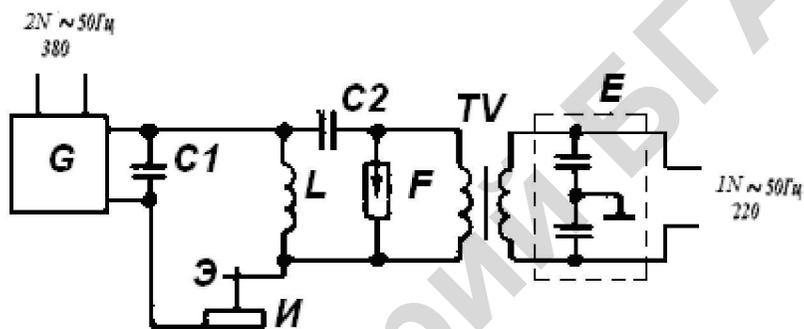


Рис. 4.5. Принципиальная электрическая схема осциллятора последовательного включения

Возникающие в контуре колебания через индуктивность L подводят к дуговому промежутку. Емкость $C1$ защищает источник питания G , а фильтр E защищает питающую сеть от высокочастотных колебаний.

Сварочные выпрямители – статические преобразователи трехфазного электрического тока в выпрямляемый ток для дуговой сварки. По сравнению с вращающимися сварочными преобразователями они имеют более высокий КПД и меньшую массу, проще и надежнее в эксплуатации.

На рис. 4.6 изображена принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВД-306УЗ.

Сварочный ток плавно регулируют изменением расстояния между обмотками трансформатора $TV1$, имеющего повышенное магнитное рассеяние, а ступенчато – переключением обмоток со «звезды» (диапазон малых токов) на «треугольник» (диапазон

больших токов). Защита от выхода из строя диодов выпрямителя или повреждения изоляции вторичной обмотки трансформатора состоит из маломощного магнитного усилителя *A*, вспомогательного трансформатора *TV2* и реле *KV*. В нормальном состоянии сердечники магнитного усилителя не насыщены и вторичное напряжение трансформатора *TV2* недостаточно для срабатывания реле *KV*.

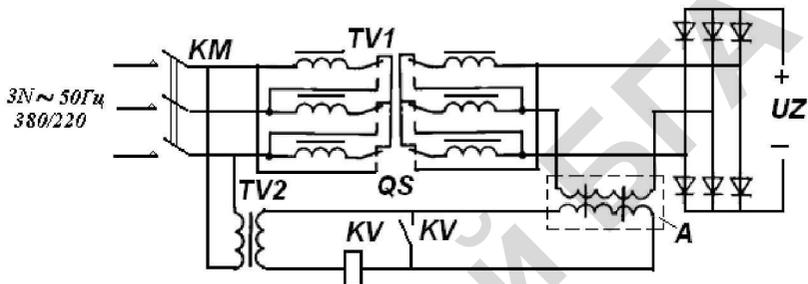


Рис. 4.6. Принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВД-306УЗ

При аварийной ситуации в фазных токах вторичной обмотки трансформатора *TV1* возникают постоянные составляющие, вызывающие насыщение сердечников усилителя *A*, что приводит к срабатыванию реле *KV*, отключающего выпрямитель от сети.

Универсальные сварочные выпрямители типа ВДУ (ВДУ-305, ВДУ-504, ВДУ-1001) могут работать на падающих и жестких внешних характеристиках. Вид характеристики формируется с помощью выпрямительного блока, собранного на тиристорах. На рис. 4.7, *a* показана упрощенная электрическая схема силового блока сварочного выпрямителя ВДУ-504.

Силовой трансформатор *TV1* выпрямителя имеет две вторичные обмотки, соединенные через тиристоры в две обратные «звезды». Между собой обмотки соединены уравнивающим реактором *L1*. Первичная обмотка может быть соединена в «треугольник» или «звезду». Соединение в «треугольник» используют при работе выпрямителя с падающими внешними характеристиками и на первой ступени регулирования, соединение в «звезду» – при работе с жесткими характеристиками. Линейный дроссель *L2*, вклю-

ченый в цепь сварочного тока, сглаживает пульсации и участвует в формировании внешних характеристик. Он имеет два вывода: при работе на падающей характеристике дроссель включается полностью, при работе на жесткой – только частично. Вид характеристики выбирают переключением в блоке управления БУ.

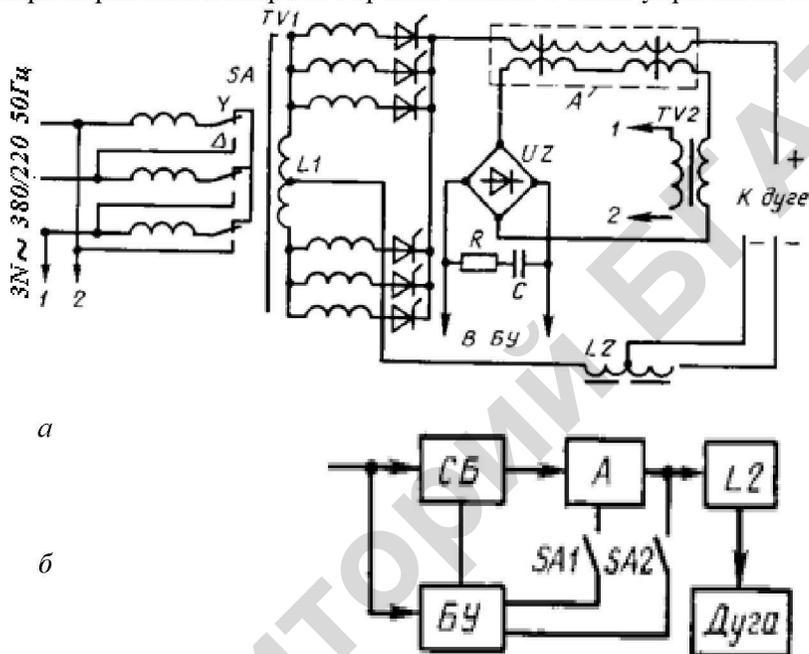


Рис. 4.7. Схемы силового блока сварочного выпрямителя ВДУ-504:
 а – принципиальная электрическая; б – функциональная; СБ – силовой блок;
 А – магнитный усилитель; L2 – линейный дроссель; БУ – блок управления;
 SA1 и SA2 – обратная связь по току и напряжению

На рис. 4.7, б это условно изображено выключателями SA1 (обратная связь по току – падающая характеристика), SA2 (обратная связь по выпрямленному напряжению – жесткая характеристика).

Для получения падающей характеристики используют обратную связь по току. Датчиком сварочного тока служит магнитный усилитель А, обмотка подмагничивания которого включена в цепь сварочного тока. Рабочие обмотки включены последовательно с мостом UZ. Сигнал обратной связи снимают с выхода моста UZ и

подают в блок управления БУ, где он сравнивается с уставкой датчика. Результирующий сигнал подается на управляющие электроды тиристоров.

Для получения жесткой характеристики используют обратную связь по выпрямленному напряжению. При этом датчик тока отключают и управляющий сигнал определяется только датчиком напряжения. Сигнал управления, выработанный в БУ, определяет угол отпирания тиристоров и, следовательно, выпрямленное напряжение.

Сварочными генераторами комплектуют вращающиеся сварочные преобразователи, относящиеся к зависимым источникам питания с первичным асинхронным двигателем, питаемым от электрической сети, и автономные сварочные агрегаты с двигателями внутреннего сгорания. На рис. 4.8 изображены принципиальные электрические схемы наиболее распространенных сварочных генераторов типа ГСО.

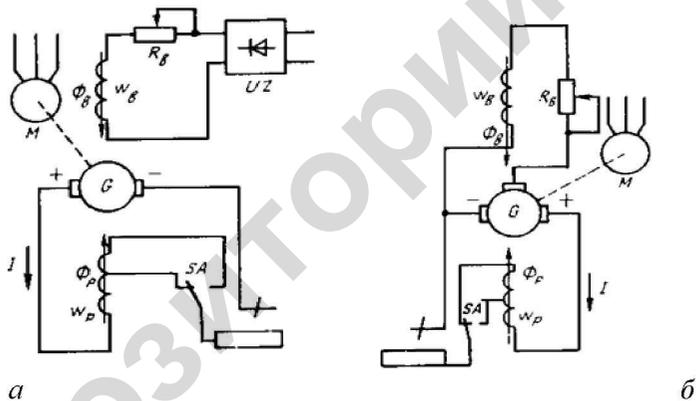


Рис. 4.8. Принципиальные электрические схемы сварочных генераторов типа ГСО: а – с независимым возбуждением; б – с самовозбуждением

По первой схеме выполняют генераторы независимого возбуждения с размагничивающей последовательной обмоткой w_p . Обмотка возбуждения w_g питается от сети переменного тока через выпрямитель. Размагничивающая последовательная обмотка w_p имеет две секции и включается последовательно с обмоткой якоря.

Магнитные потоки обмотки независимого возбуждения Φ_v и размагничивающей обмотки Φ_p направлены навстречу один другому. Результирующий магнитный поток $\Phi_{рез} = \Phi_v - \Phi_p$.

Уравнение внешней характеристики генератора $U = E - IR_{я}$, где E – ЭДС, индуцируемая результирующим потоком $\Phi_{рез}$ в обмотке якоря; $R_{я}$ – внутреннее сопротивление якорной цепи.

При увеличении тока в сварочной цепи возрастает поток Φ_p , а результирующий поток $\Phi_{рез}$, ЭДС и напряжение на зажимах генератора снижаются – так создается падающая внешняя характеристика. Сварочный ток регулируют реостатом R_v в цепи обмотки независимого возбуждения и переключением секций последовательной обмотки. Генераторы с самовозбуждением (рис. 4.9, б) по принципу действия близки описанному, но имеют лучшие динамические свойства.

Сварочный инвертор – это устройство, преобразующее входной переменный ток в постоянный. Далее с помощью транзисторных ключей постоянный ток преобразуется в переменный с частотой выше 50 кГц и подаётся на высокочастотный сварочный трансформатор с последующим выпрямлением. Система управления с помощью обратных связей формирует идеальные выходные характеристики для любого способа сварки.

Благодаря высокой частоте, вес и размеры силового трансформатора снижаются в разы по сравнению с традиционными сварочными аппаратами. Например, обычный сварочный трансформатор на 160 А весит 18 кг, в то время как силовой трансформатор сварочного инвертора на 160 А весит всего 0,25 кг и по размерам чуть больше пачки сигарет.

Сварочные инверторы являются наиболее современными источниками сварочного тока. В отличие от трансформаторов и выпрямителей, у инверторов отсутствует силовой трансформатор. Работа сварочного инвертора построена на принципе фазового сдвига (инверсии) напряжения, осуществляемого электронной микропроцессорной схемой с покаскадным усилением тока (обычно микропроцессором типа *IGBT*). За счёт применения такого принципа удаётся получить широкий спектр вольт-амперных характеристик – от крутопадающей до возрастающей – с очень гладкой кривой тока,

отклонения которого снижены до уровня десятых долей процента, что позволяет добиваться высокого качества сварки. Включение в схему высокочастотного генератора расширяет сферу применения инверторных источников питания и позволяет использовать их практически для любого метода дуговой сварки и для плазменной резки. За счёт небольшой массы, инверторы малой мощности очень перспективны для использования при монтаже ответственных металлоконструкций и трубопроводов, к сварным соединениям которых предъявляются повышенные требования, а условия работы не позволяют применять громоздкое промышленное оборудование, предназначенное для работы в цеховых условиях. Мощные инверторы промышленного типа позволяют создавать сварочные комплексы для любого вида дуговой сварки, построенные по модульному принципу – на основе одного источника тока. Все инверторы имеют плавную регулировку сварочного тока, а цифровая схема микропроцессора и введение ячеек памяти позволяет организовать запоминание нескольких наиболее часто применяемых режимов сварки.

Основные достоинства сварочных инверторов:

малый вес (5–10 кг) и скромные размеры сварочных инверторов позволяют производить сварку, легко перемещаясь вместе с аппаратом;

в инверторе нет силового трансформатора, значит, и нет внутренних потерь на перемагничивание железа, на нагрев обмоток при взаимодействии их электромагнитных полей, на поглощение части электромагнитной индукции регулировочным шунтом, то есть КПД инвертора просто несопоставим с КПД обычного сварочного трансформатора или выпрямителя. Так, при сварке электродом диаметром 3 мм обычный аппарат потребляет не менее 6–7 кВт, а любой, даже самый простенький инвертор не более 4 кВт;

микропроцессорное управление сварочного инвертора обеспечивает устойчивую обратную связь тока и напряжения на дуге с выходными параметрами аппарата – при зажигании дуги аппарат генерирует дополнительный импульс тока (так называемый «горячий старт»), а при коротком замыкании сварочный ток сразу отключается, то есть «приморозить» электрод здесь практически невозможно;

сварочный инвертор имеет значительно более широкий, чем у обычного аппарата, диапазон регулировки сварочного тока, что особенно важно при сварке тонкими электродами (диаметром 1,6 или 2 мм). Дуга на малых токах «шепчет», нет брызг – не сварка, а одно удовольствие.

Принцип работы инверторного сварочного аппарата основан на том, что сетевое напряжение частотой 50 Гц, пройдя через фильтр, преобразуется до частоты 25–50 кГц, благодаря чему появляется возможность заменить крупногабаритный силовой трансформатор на высокочастотный, что резко снижает массогабаритные показатели. Применение принципа широтно-импульсной модуляции обеспечивает удобное и точное управление силой сварочного тока и другими параметрами, а также обеспечивает стабильность и устойчивость горения дуги. Современный инверторный сварочный аппарат потребляет в 2-3 раза меньшую мощность по сравнению с выпрямителями традиционной конструкции, имеет КПД 85–90 %, малые габариты и вес, высокую электробезопасность. В отличие от обычных сварочных выпрямителей, у которых силовой трансформатор работает на частоте сетевого напряжения 50 Гц, сварочный инвертор использует ток высокой частоты (десятки килогерц). Повышение частоты тока, протекающего через силовой трансформатор, позволило существенно уменьшить его массу и габариты. Если у обычных выпрямителей величина, характеризующая отношение сварочного тока к массе, равна 1–1,5 А/кг, то у сварочных инверторов, собранных на «скоростных» тиристорах, этот показатель вырос до 4–5 А/кг. Основным принципом работы сварочного инвертора является многократное поэтапное преобразование электрической энергии. Можно выделить основные этапы преобразования тока в сварочном инверторе: выпрямление переменного сетевого напряжения частотой 50 Гц в первичном выпрямителе, собранном из силовых диодов по мостовой схеме; преобразование полученного выпрямленного напряжения с повышенными пульсациями в переменное напряжение высокой частоты с помощью инвертирующего преобразователя; понижение переменного напряжения высокой частоты импульсным высокочастотным трансформатором до значения, соответствующего напряжению сварки, с формированием необходимого вида вольт-амперной характеристики; преобразование вторичным

выпрямителем переменного напряжения высокой частоты, имеющего величину сварочного напряжения, в постоянное напряжение со сглаживанием пульсаций тока. Инверторные сварочные аппараты, получившие распространение благодаря технологии преобразования тока и появлению соответствующих деталей, работают на базе МОП-транзисторов высокой мощности для преобразования рабочей частоты 50/60 Гц в более высокую частоту (100 кГц и выше). Затем напряжение понижается и происходит регулирование тока. При помощи широтно-импульсной модуляции обеспечивается питание сварочной дуги постоянным током большой мощности. Благодаря применению инверторной технологии переключения мощности удалось уменьшить вес и размеры основного трансформатора сварочного аппарата и увеличить его эффективность на 30 %. Аппарат аргодуговой сварки инверторного типа отличается простотой в работе с дугой, более глубокой сварочной выемкой, несильным нагреванием, влияющим на постоянный и регулируемый ток. Инверторный сварочный источник представлен на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Инверторный сварочный источник «Строитель 300P»

4.4. Выбор источников питания для ручной дуговой сварки

Критерии выбора: производительность сварочной установки, сила сварочного тока, рабочее напряжение сварки, толщина свариваемых деталей.

Исходные данные: характер сварочных работ, годовая производительность установок, тип и размеры сварочных швов, материал и толщина свариваемых деталей, исполнение источника питания, степень защиты.

Последовательность выбора. Определяют объем сварочно-наплавочных работ для ручной сварки. Здесь возможны два случая.

Задана годовая программа работ (капитальный ремонт тракторов, монтаж трансформаторной подстанции и т. п.) и известны укрупненные нормативы на выполнение сварочно-наплавочных операций. В этом случае годовой объем сварочно-наплавочных работ M_T (по массе наплавляемого металла, кг/год) определяют по формуле

$$M_T = N_T m_1 \alpha / 100, \quad (4.7)$$

где N_T – годовая производительность предприятия в единицах продукции (тракторов, подстанций и т. п.) в год; m_1 – объем (норматив) сварочно-наплавочных работ на единицу продукции, кг/ед; α – доля ручной сварки в общем объеме сварочно-наплавочных работ, %. Доля ручной дуговой сварки и наплавки в общем объеме сварочно-наплавочных работ составляет, %: шасси колесных тракторов – 11–15; шасси гусеничных тракторов – 16; тракторные двигатели – 15–19; шасси грузовых автомобилей – 11; двигатель автомобилей – 5–7.

Значения m_1 приводят в нормативной и специальной литературе, типовых проектах по соответствующим видам работ.

Заданы типы и размеры сварочных швов. Объем сварочно-наплавочных работ

$$M = \sum_{i=1}^n A_i l_i \rho_i \varphi, \quad (4.8)$$

где A_i и l_i – площадь поверхности поперечного сечения i -го шва, m^2 ,

и его общая длина, м; ρ_i – плотность наплавляемого металла, кг/м³; $\varphi = 1,2-1,4$ – поправочный коэффициент на усиление шва.

Количество единиц сварочного оборудования для предприятия с годовым объемом сварочно-наплавочных работ M_{Γ} , кг/год,

$$n = \frac{M_{\Gamma}}{\Phi_{\Gamma} q k}, \quad (4.9)$$

где Φ_{Γ} – нормативный годовой фонд времени работы сварочно-наплавочного оборудования, ч/год, с учетом сменности. При односменной работе и 41-часовой рабочей неделе $\Phi_{\Gamma} = 2010$ ч/год, при двухсменной – 3935 ч/год; q – средняя производительность ручной сварки и наплавки (0,6–1,0 кг/ч в зависимости от квалификации сварщика); $k = 0,70-0,80$ – коэффициент недоиспользования сварочного оборудования по времени.

Количество единиц сварочного оборудования для процессов, характеризующихся массой наплавляемого металла M , кг,

$$n = \frac{M}{\Phi q k}, \quad (4.10)$$

где Φ – заданное (располагаемое) время выполнения работ, ч. При известном n по формуле (4.10) можно определить время Φ , необходимое для выполнения объема работ M .

Выбор источника питания по роду тока – это вариантная технико-экономическая задача, решение которой определяют конкретные цели, условия и возможности предприятия. Сварочные выпрямители обеспечивают высокое качество сварки за счет повышенной стабилизации дуги, имеют высокий КПД, широкий диапазон регулирования силы сварочного тока, более низкое напряжение холостого хода. На постоянном токе достаточно высокое качество сварки может быть получено при менее жестких требованиях к квалификации сварщика. Сварочные трансформаторы более просты по конструкции, надежны, имеют меньшую стоимость, могут работать на открытом воздухе без искусственной вентиляции.

Для ручной сварки внешняя характеристика источника питания

однозначно должна быть крутопадающей.

Выбор марки электродов определяют химический состав и свойства материала свариваемых деталей. Некоторые типы и марки электродов для сварки наиболее распространенных низкоуглеродистых (содержание углерода менее 0,3 %) и среднеуглеродистых (содержание углерода 0,3–0,5 %) сталей приведены в табл. 14.5 [3].

Сварку высокоуглеродистых и легированных сталей производят специальными электродами, деталей из цветных металлов и сплавов – на постоянном токе неплавящимся вольфрамовым электродом, нержавеющей и жароупорных сталей – ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом.

Выбор диаметра электродов. Диаметр электродов зависит от толщины свариваемых деталей (табл. 14.6 [3]). Для ручной сварки применяют электроды диаметром 2–6 мм. Для сварки вертикальных и потолочных швов используют электроды, как правило, диаметром не более 4 мм, снижая при этом силу сварочного тока на 10–20 % по сравнению со сваркой в нижнем положении.

Силу сварочного тока определяют по эмпирической формуле

$$I_2 = (\alpha + \beta d_3) d_3, \quad (4.11)$$

где d_3 – диаметр электрода, мм; α и β – опытные коэффициенты. Для низко- и среднеуглеродистых сталей $\alpha = 20$ А/мм, $\beta = 6$ А/мм².

Номинальным режимом работы источника питания для ручной сварки является, как правило, перемежающийся режим с длительностью нагрузки ПН = 60 или 65 % и длительностью цикла 5 мин. Если источник питания работает в ненормальном режиме, то допустимую силу тока определяют по формуле

$$I_{д} = I_{н} \sqrt{(\text{ПН})_{н} / (\text{ПН})_{д}}, \quad (4.12)$$

где индекс «н» означает номинальные значения величин, а «д» – действительные. Максимальная сила тока при ручной сварке не должна превышать 70 А.

Рабочее напряжение U_2 при ручной сварке связано с силой тока I_2 эмпирической зависимостью

$$U_2 = 20 + 0,04 I_2. \quad (4.13)$$

Источники питания для ручной сварки по исполнению могут быть переносными или передвижными. То или иное выбирают в зависимости от мощности установки и условий сварки, степень защиты, как правило, *IP22*.

Контрольные вопросы

1. Перечислите свойства и характеристики электрической дуги.
2. Дайте определение электрической дуги.
3. Дайте определение вольт-амперной характеристике дуги, перечислите ее виды.
4. Каковы условия устойчивого горения дуги?
5. Почему для ручной сварки используют падающие вольт-амперные характеристики?
6. Требования, предъявляемые к источникам питания сварочной дуги для ручной сварки.
7. Классификация источников питания электрической дуги.
8. Методика выбора источника питания сварочной дуги для ручной сварки.
9. Трансформаторы для дуговой сварки, устройство, принцип работы.
10. Сварочные выпрямители, устройство, принцип работы.
11. Сварочные генераторы, назначение, виды, принципиальные схемы, регулирование сварочного тока.
12. При некоторых условиях сварки внешняя вольт-амперная характеристика сварочного трансформатора описывается зависимостью $U_{\text{н}} = \sqrt{80^2 - 0,054I^2}$, где $U_{\text{н}}$ – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, В; I – ток во вторичной цепи, А; вольт-амперная характеристика дуги $U_{\text{д}} = 18^2 + 4200/I_{\text{д}}$, где $U_{\text{д}}$ – напряжение на дуге, В; $I_{\text{д}}$ – ток дуги, А. Установите возможность устойчивого горения дуги для принятых условий и определите параметры рабочего режима (ток $I_{\text{р}}$ и напряжение $U_{\text{р}}$).
13. Дайте характеристику (преимущества, недостатки, области применения) основных типов источников питания для сварочной дуги.
14. В каких случаях сварки на постоянном токе используют дугу прямой и обратной полярности?

Практическое занятие 8

Выбор источника питания сварочной дуги для ручной сварки

Задача занятия. Выбрать источник питания сварочной дуги для ручной сварки по производительности установки, силе сварочного тока, рабочему напряжению сварки, толщине свариваемых деталей.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и литературе [3], изучить методику выбора источника питания сварочной дуги для ручной сварки, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 8.1. Выбрать источники питания для ручной дуговой сварки и наплавки цеха капитального ремонта шасси трактора или автомобиля. Материал свариваемых деталей – преимущественно низкоуглеродистая (СТ2, СТ3) и среднеуглеродистая (СТ30, СТ35, СТ40) стали. Источник питания должен быть в подвижном исполнении и со степенью защиты IP22.

Таблица ПЗ.8.1

Исходные данные к задаче 8.1

Номер варианта	Объект ремонта		Двигатель	Производительность N_T , шт.	Нормативный год-й фонд работы оборудования Φ_T , ч	Квалификация сварщика (разряд)	Толщина свариваемых деталей, мм
	Трактор	Автомобиль					
1	2	3	4	5	6	7	8
1	МТЗ1	-	Колесный	600	2010	4	12–24
2	МТЗ8	-	Колесный	650	2010	3	3–5
3	ДТ-75	-	Гусеничный	450	2010	5	30–60
4	Т-150К	-	Колесный	400	2010	6	4–10

1	2	3	4	5	6	7	8
5	Т-4А	-	Гусеничный	550	2010	4	12–24
6	К-701	-	Колесный	640	2010	3	3–5
7	-	ГАЗ-51	Колесный	800	3935	5	30–60
8	-	ЗИЛ-130	Колесный	720	3935	6	4–10
9	-	ГАЗ-53	Колесный	950	3935	4	12–24
10	МТЗ	-	Колесный	130	3935	3	3–5
11	МТЗ2	-	Колесный	125	3935	5	30–60
12	ДТ-75	-	Гусеничный	900	3935	6	4–10
13	Т-150К	-	Колесный	100	2010	4	12–24
14	Т-4А	-	Гусеничный	110	2010	3	3–5
15	К-701	-	Колесный	120	2010	5	30–60
16	-	ГАЗ-51	Колесный	850	2010	6	4–10
17	-	ЗИЛ-130	Колесный	135	2010	4	32–24
18	-	ГАЗ-53	Колесный	120	2010	3	3–5
19	МТЗ	-	Колесный	700	3935	5	30–60
20	МТЗ	-	Колесный	500	3935	6	4–10
21	ДТ-75	-	Гусеничный	700	3935	4	12–24
22	Т-150К	-	Колесный	115	3935	3	3–5
23	К-701	-	Колесный	140	3935	5	30–60
24	-	ГАЗ-53	Колесный	750	3935	6	4–10
25	-	ЗИЛ-130	Колесный	840	3935	4	30–60

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Критерии выбора источника питания сварочной дуги для ручной сварки.
2. Исходные данные при выборе источника питания сварочной дуги для ручной сварки.
3. Как определить объем сварочно-наплавочных работ по заданной годовой программе работ и типу, размерам сварочных швов?
4. Как определить количество единиц сварочного оборудования?
5. Какой тип вольт-амперной характеристики источника питания принимают при ручной сварке?
6. Как выбирают марку и диаметр электродов?

7. Как определяют силу сварочного тока и рабочее напряжение при ручной сварке?

Лабораторное занятие

7

Исследование электросварочного оборудования

Цель работы. Изучить устройство, принцип действия, электрические схемы сварочного выпрямителя ВД-306УЗ и машины электроконтактной точечной сварки МТ-501, экспериментально определить их основные параметры.

Задачи работы

1. Изучить назначение, устройство, принцип действия, электрическую схему сварочного выпрямителя ВД-306УЗ.
2. Изучить назначение, устройство, принцип действия, электрическую схему машины электроконтактной точечной МТ-501.
3. Определить внешние характеристики сварочного выпрямителя ВД-306УЗ.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики электросварочного оборудования. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

Пункты 1, 2 задач работы выполняют при подготовке к лабораторному занятию, используя рекомендованную литературу, а также в процессе самого занятия при изучении устройства и работы оборудования.

Испытание сварочного выпрямителя ВД-306УЗ (п. 4) производят на лабораторном стенде (рис. ЛЗ.7.1) после изучения устройства, принципа действия, электрической схемы и правил обслуживания выпрямителя.

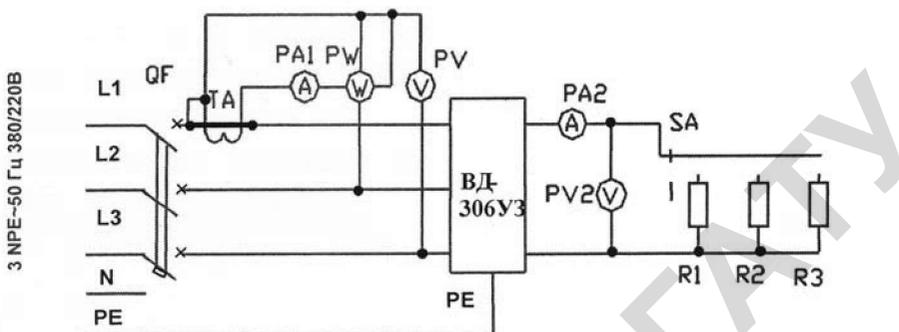


Рис. Л3.7.1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки:
 R1, R2, R3 – нагрузочные сопротивления выпрямителя, которые равны соответственно 1,26; 0,63 и 0,42 Ом

Выпрямитель включают нажатием кнопки «Пуск». Кнопку следует удерживать в нажатом состоянии до тех пор, пока не придет во вращение вентилятор и не сработает реле потока *SP*. Необходимо убедиться, что вентилятор вращается в нужном направлении – воздух должен засасываться со стороны лицевой панели. В случае неправильного вращения вентилятора следует поменять местами два провода питания выпрямителя, предварительно отключив его от сети. При перерывах в работе выпрямитель должен быть отключен нажатием красной кнопки «Стоп».

Сила сварочного тока зависит от: 1) нагрузки – электрического сопротивления дуги, которое (при данном диаметре электрода) определяется длиной дуги; 2) расстояния между катушками первичной и вторичной обмоток.

Нагрузку выпрямителя в лабораторных условиях имитируют сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , а расстояние между обмотками изменяют вращением ходового винта с помощью рукоятки на верхней крышке кожуха.

В работе необходимо снять и построить 5 внешних характеристик, соответствующих 5 положениям регулятора силы тока при изменении нагрузки (сопротивлений R_1 , R_2 , R_3).

**Внешние и энергетические характеристики сварочного
выпрямителя ВД-306УЗ**

Положение регулятора	R	Измерено					Вычислено		
		U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	cosφ	η
	Ом	В	А	кВт	В	А	кВт	о.е.	%
2	х.х. 1,26 0,63 0,42								
3	х.х. 1,26 0,63 0,42								
4	х.х. 1,26 0,63 0,42								
5	х.х. 1,26 0,63 0,42								
6	х.х. 1,26 0,63 0,42								

Силу тока в зависимости от расстояния между обмотками устанавливают по шкале регулятора (окошко в верхней крышке кожуха), на которой нанесены деления от 1 до 9. Большая цифра соответствует большей силе тока.

При выполнении работы для уменьшения износа механизма регулятора фиксируют его положения (2, 3, 4, 5, 6) и для каждого из

них изменяют величину нагрузки: $R = \infty$ (холостой ход), $R1 = 1,26 \text{ Ом}$, $R2 = 0,63 \text{ Ом}$, $R3 = 0,42 \text{ Ом}$.

Показания приборов и результаты вычислений записывают в табл. 7.1, где индекс 1 имеют величины, относящиеся к первичной цепи выпрямителя, индекс 2 – к вторичной.

$$\text{Коэффициент мощности } \cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}.$$

$$\text{КПД выпрямителя приблизительно равно: } \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Каждая цифра шкалы регулятора соответствует определенному расстоянию между обмотками: $l = 2, 3, 4$, и т. д.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Электрическая схема ВД-306УЗ.
3. Результаты измерений и вычислений.
4. Графические зависимости, $U_2(I_2, l)$, $\cos \varphi(I_2)$, $\eta(I_2)$, $I_2(l)$.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Требования к источникам питания сварочной дуги, условия устойчивого горения дуги.
2. Статическая ВАХ сварочной дуги, ее практическая значимость.
3. Принципиальная электрическая схема сварочного выпрямителя ВД-306УЗ.
4. Принципиальная электрическая схема машины электроконтактной точечной сварки МТ-501.
6. Основные правила техники безопасности при эксплуатации установок дуговой сварки.

Репозиторий БГАТУ

5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ

5.1. Физические основы термоэлектрического нагрева и охлаждения

Термоэлектрический метод преобразования энергии основан на явлениях *Зеебека* и *Пельтье*. В основе метода лежат эффекты, наблюдаемые в цепи термоэлемента, состоящего из двух спаянных по концам разнородных проводников (рис. 5.1).

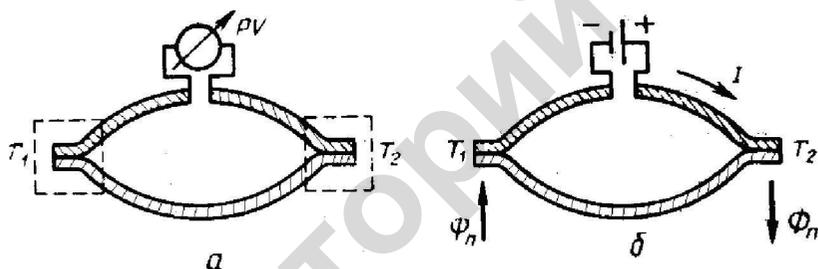


Рис. 5.1. Эффекты в цепи термоэлемента:
а – Зеебека; б – Пельтье

Если спаи поместить в среды с разными температурами, то включенный в цепь милливольтметр покажет разность потенциалов (рис. 5.1, а). Это явление носит название эффекта Зеебека, а возникающая на концах термоэлемента разность потенциалов – термоэлектродвижущей силой (термоЭДС). Эффект Зеебека используют в измерительной технике (термопары и др.) и в термоэлектрических генераторах. ТермоЭДС зависит от свойств материалов, ветвей термоэлементов и разности температур спаев. В простейшем случае ее определяют по выражению

$$E = (\alpha_1 - \alpha_2)(T_2 - T_1), \quad (5.1)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты термоЭДС ветвей термоэлементов, В/К; T_1, T_2 – температуры спаев, К.

Если в цепь термоэлемента включить источник ЭДС и пропустить по ней постоянный электрический ток, то один спай будет охлаждаться и поглощать теплоту $Q_{\text{п}}$, а другой нагреваться и выделять ее (рис. 5.1, б). Это явление носит название эффекта Пельтье, а выделяющаяся теплота – теплоты Пельтье.

Количество теплоты Пельтье $Q_{\text{п}}$, выделяемое или поглощаемое в спае за время τ при силе тока I ,

$$Q_{\text{п}} = \Pi I \tau = (\alpha_1 - \alpha_2) T I \tau, \quad (5.2)$$

где $\Pi = (\alpha_1 - \alpha_2) T$ – коэффициент Пельтье, В; T – температура спаев, К.

В основе эффектов Зеебека и Пельтье лежат контактные явления в спаих термоэлемента. Рассмотрим упрощенную картину явлений в спае двух разнородных металлов (рис. 5.2).

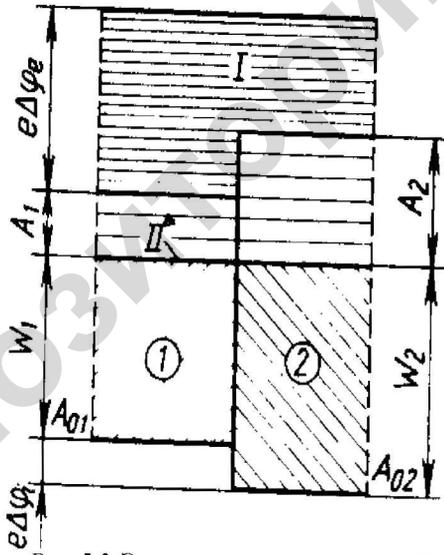


Рис. 5.2. Энергетическая диаграмма спаев двух металлов:

W_2, W_1 – потенциальная энергия электронов (валентные, или заполненные зоны); A_1, A_2 – работа выхода электронов (запрещенные зоны); A_{01}, A_{02} – нижний уровень энергии электронов (дно потенциальных ям); 1 – свободная зона (зона проводимости); 2 – уровень Ферми

Обозначим работу выхода электронов из металла 1 через A_1 , а из металла 2 – через A_2 и положим, что $A_1 < A_2$. При возникновении контакта часть электронов из металла 1 переходит в металл 2, сообщая ему отрицательный заряд. На границе раздела образуется двойной электрический слой и устанавливается внутренняя контактная разность потенциалов

$$\Delta\varphi_i = (W_2 - W_1)/e,$$

где W_2, W_1 – потенциальная энергия электронов в металлах 2 и 1 (рис. 5.2); e – заряд электрона, Кл.

В равновесном состоянии разность потенциалов $\Delta\varphi_i$ препятствует дальнейшему переходу электронов из металла 1 в металл 2. На концах цепи, состоящей из металлов 1 и 2, устанавливается внешняя контактная разность потенциалов

$$\Delta\varphi_e = (A_2 - A_1)/e.$$

Если через спай протекает электрический ток так, что электроны движутся от металла 1 к металлу 2, то разность потенциалов $\Delta\varphi_i$, направленная в данном спае (при условии $A_1 < A_2$) против внешней ЭДС, замедляет движение электронов, энергия их снижается и спай охлаждается. Так как сила тока во всех сочетаниях электроэлемента одинакова, то снижение скорости электронов в металле 2 компенсируется большей концентрацией в нем свободных электронов. При противоположном движении электронов контактная разность потенциалов ускоряет электроны и спай нагревается.

5.2. Принцип устройства термоэлектрической батареи

Термобатарея – это рабочий орган термоэлектрических трансформаторов теплоты. Термобатареи собраны из большого числа последовательно соединенных полупроводниковых модулей-термоэлементов. Одну (положительную) ветвь термоэлемента изготавливают из полупроводника с дырочной (p) проводимостью, имеющего положительный коэффициент α_1 термоЭДС, другую (отрицательную) – из полупроводника с электронной (n) проводимостью.

мостью, имеющего отрицательный коэффициент α_2 термоЭДС. Этим обеспечивается высокая добротность z термоэлемента.

Для изготовления термоэлементов наиболее распространены соединения на основе теллурия: теллуристый висмут Bi_2Te_3 , свинец PbTe , сурьма Sb_2Te_3 и др. Распространен термоэлемент, включающий пару Sb_2Te_3 ($\alpha = +0,13 \text{ В}\cdot\text{К}^{-1}$) и PbTe ($\alpha = -0,13 \text{ В}\cdot\text{К}^{-1}$). Помимо теллуристых соединений применяют оксид хрома Cr_2O_3 , селенистый свинец PbSe , сурьмистый свинец PbS и др.

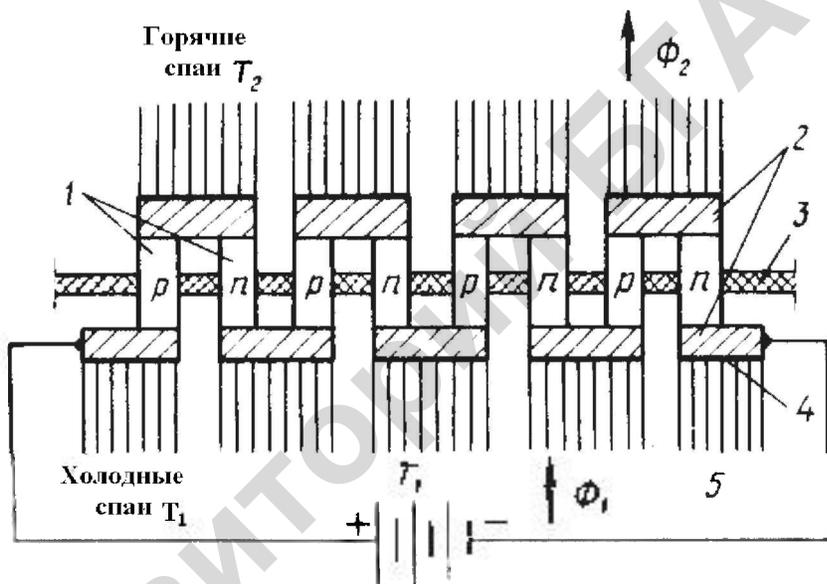


Рис. 5.3. Схема термоэлектрической батареи:

- 1 – положительные (p) и отрицательные (n) ветви термоэлементов; 2 – контактные пластины; 3 – перегородка, разделяющая горячие и холодные спаи;
- 4 – электрическая изоляция; 5 – радиатор; T_1 и T_2 – температуры холодных и горячих спаев; Φ_1 и Φ_2 – тепловые потоки холодных и горячих спаев

Ветви термоэлементов изготавливают в виде пластин или призм и соединяют последовательно одну с другой медными контактными пластинами, припаиваемыми (привариваемыми) к торцам двух соседних элементов (рис. 5.3). Для увеличения поверхности теплоотдачи спаи оборудуют алюминиевыми ребрами (радиаторами).

5.3. Энергетические характеристики термоэлектрического преобразователя теплоты

Трансформаторы теплоты (ТТ) работают по обратному термодинамическому циклу Корно. Функционально-энергетическая схема трансформатора при работе в режиме теплового насоса или холодильной машины изображена на рис. 5.4.



Рис. 5.4. Функционально-энергетическая схема трансформатора теплоты: ТН – тепловой насос; ХУ – холодильная установка

В обоих режимах работы ТТ существует два температурных уровня: нижний T_1 и верхний T_2 . Трансформатор переносит теплоту от среды с температурой T_1 к теплоприемнику с большей температурой T_2 , повышая ее температурный потенциал.

На перенос теплоты источник питания затрачивает в единицу времени работу W . В соответствии с первым законом термодинамики

$$\Phi_2 = \Phi_1 + W. \quad (5.3)$$

Таким образом, теплоприемнику сообщается не только теплота, отобранная у охлаждаемой среды (источника теплоты), но и теплота, эквивалентная работе, затраченной источником. Соотно-

шения между составляющими баланса (5.3) определяют энергетические параметры трансформатора теплоты. При работе в режиме холодильной машины параметрами ТТ являются холодильный коэффициент ε и разность температур ΔT , которая может быть создана между холодными и горячими спаями.

Коэффициент ε равен отношению количества теплоты Φ_1 , отнятому за единицу времени или один цикл работы от охлаждаемой среды, к затраченной на это за тот же период времени энергии W :

$$\varepsilon = \Phi_1 / W. \quad (5.4)$$

В соответствии с законом Пельтье при протекании по термоэлементу тока I в холодном спае, имеющем температуру T_1 , поглощается тепловой поток, определяемый формулой

$$\Phi_1 = \Pi_1 I = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I, \quad (5.5)$$

а в горячем спае, имеющем температуру T_2 , выделяется тепловой поток

$$\Phi_2 = \Pi_2 I = (\alpha_1 - \alpha_2) T_2 I. \quad (5.6)$$

В реальном термоэлементе с сопротивлением R при протекании тока I выделяется поток джоулевой теплоты $I^2 R$. Вследствие этого поток Φ_1 уменьшается на $1/2 I^2 R$, а поток Φ_2 увеличивается на $1/2 I^2 R$, но так как ветви термоэлемента имеют теплопроводность λ , то от горячего спая к холодному передается поток теплоты

$$\Phi_\lambda = \lambda (T_2 - T_1). \quad (5.7)$$

С учетом этого истинные значения потоков будут:

$$\Phi_1 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I - 1/2 I^2 R - \Phi_\lambda; \quad (5.8)$$

$$\Phi_2 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_2 I + 1/2 I^2 R - \Phi_\lambda. \quad (5.9)$$

Разность температур ΔT получим из выражения (5.7) с учетом величины Φ_λ , определяемой по зависимости (5.5).

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = \frac{1}{\lambda} \left[(\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I - \frac{1}{2} I^2 R - \Phi_1 \right]. \quad (5.10)$$

Подставив значения Φ_1 и W , вычисленные по формулам (5.3), (5.8), (5.9), получим

$$\varepsilon = \left[(\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I - \frac{1}{2} I^2 R - \Phi_\lambda \right] / \left[(\alpha_1 - \alpha_2) (T_2 - T_1) I + I^2 R \right]. \quad (5.11)$$

Из выражения (5.10) и (5.11) следует, что холодильный коэффициент и разность температур зависят от силы тока I и достигают максимума при определенном ее значении, в чем нетрудно убедиться, исследовав эти выражения на экстремум. Полученные таким образом зависимости для ε и ΔT имеют вид

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \cdot \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_2 + T_1) - T_2 / T_1}}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} z (T_2 + T_1) + 1}}; \quad (5.12)$$

$$\Delta T_{\max} = (T_2 - T_1)_{\max} = \frac{1}{2} z T_1^2. \quad (5.13)$$

Из формул (5.12) и (5.13) видно, что при неизменной силе тока I значения ε и ΔT зависят от величины z – функции физических свойств материалов термоэлементов:

$$z = (\alpha_1 - \alpha_2)^2 / (Rk). \quad (5.14)$$

Величина z имеет размерность K^{-1} и называется добротностью термоэлемента, характеризующей его эффективность.

Анализ выражения (5.14) показывает, что наибольшей добротностью отличаются термоэлементы из полупроводников.

При работе трансформатора теплоты в режиме теплового насоса его энергетической характеристикой служит отопительный коэффициент

$$\varphi = \Phi_2 / W = (\Phi_1 + W) / W = \varepsilon + 1. \quad (5.15)$$

В современных тепловых насосах значение φ составляет 2,5–4, т. е. на единицу затраченной энергии можно получить 2,5–4 единицы теплоты.

Наибольшая эффективность трансформаторов теплоты достигается при комбинированном производстве теплоты и холода (совмещенный цикл работы). В этом случае эффективность его характеризуют коэффициентом преобразования энергии

$$\psi = (\Phi_1 + \Phi_2)/W = 2\varepsilon + 1, \quad (5.16)$$

который может достигать значений 4–5 и более.

5.4. Термоэлектрические тепловые насосы и холодильники

При движении электронов в термоэлементе в направлении от положительной (p) к отрицательной (n) ветви в спае выделяется теплота (горячие спаи), а при обратном направлении поглощается теплота (холодные спаи). Холодные спаи помещают в среду, откуда теплота отбирается (холодильная камера; низкопотенциальный источник энергии), а горячие – в среду, куда теплота переносится (окружающая или нагреваемая среды). При этом трансформатор теплоты может работать в режиме охлаждения (холодильная машина), нагрева (тепловой насос) или в смешанном режиме охлаждения и нагрева. Изменив направление тока, изменяют функцию трансформатора теплоты. Так, в системах кондиционирования воздуха летом трансформатор теплоты охлаждает подаваемый в помещение воздух, а зимой (после перемены направления тока) подогревает его.

Тепловые насосы служат для передачи теплоты от среды с низкой температурой к среде с более высокой, что позволяет использовать теплоту низкопотенциальных и возобновляемых источников (Земли, воды, Солнца и т. д.). Они могут быть компрессионными (механическими), абсорбционными (термохимическими) и полупроводниковыми (термоэлектрическими). Широко распространены компрессионные тепловые насосы, но более совершенны и перспективны термоэлектрические.

Схема использования термоэлектрического теплового насоса в системе отопления помещения приведена на рис. 5.5. При протекании

нии электрического тока по цепи, состоящей из термоэлементов, теплота выделяется на одном из спаев, а поглощается на другом. Холодный спай «отбирает» теплоту воздуха наружного или находящегося в помещении, подаваемого в тепловой насос по воздуховоду 7. За счет электрической энергии низкпотенциальная теплота переходит на более высокий температурный уровень и горячий спай термоэлемента нагревает воздух, поступающий в отапливаемое помещение 9 по воздуховоду 2. В летнее время достаточно изменить направление тока в цепи, чтобы приточный воздух охлаждался.

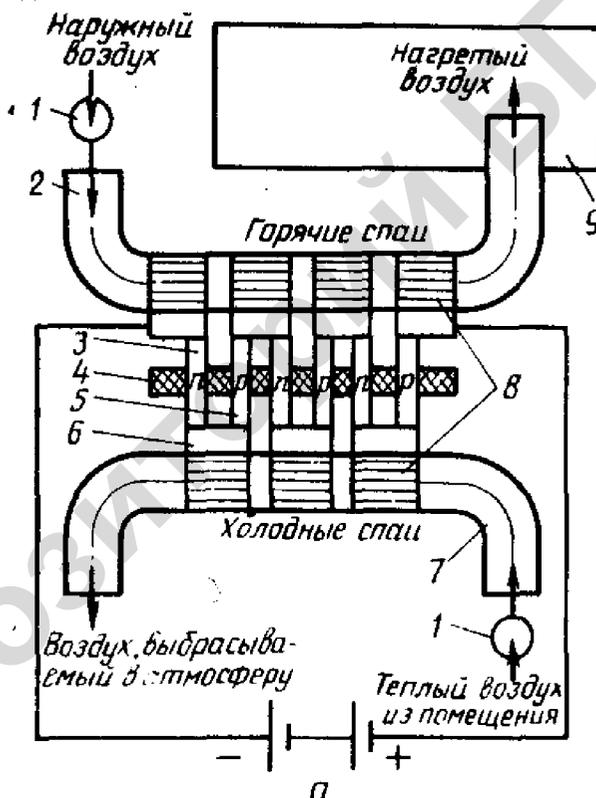


Рис. 5.5. Схема использования в системе отопления теплового насоса:

1 – вентилятор; 2 и 7 – воздуховоды; 3 и 5 – ветви термоэлементов с электронной (n) и дырочной (p) проводимостью; 4 – перегородка, изолирующая холодные и горячие спаи; 6 – пластина спаев термоэлемента; 8 – радиаторы; 9 – отапливаемое помещение

Термоэлектрические тепловые насосы ТН-1,5, ТН-3, ТН-5 и ТН-7,5 имеют тепловую мощность соответственно 1,75; 3,5; 5,8 и 8,7 кВт; холодильную мощность 1,17; 2,34; 3,84 и 5,84 кВт; коэффициент преобразования энергии 2–4.

Тепловые насосы эффективно используют в южных районах страны (при расчетной температуре не ниже 10 °С), для отопления помещений зимой и охлаждения летом. В этом случае затраты на отопление в 2–3 раза ниже, чем при применении установок прямого электронагрева.

Термоэлектрический холодильник состоит из корпуса 1 (рис. 5.7), съемной крышки 2, холодильной камеры 3, 4-х термоагрегатов 4, вентилятора 5, электропроводки 6.

Холодильная камера 3 представляет собой ёмкость для хранения продуктов, выполненную из алюминия. К двум противоположным стенкам камеры крепятся попарно термоагрегаты 4, соединенные между собой последовательно (рис. 5.7). Каждый термоагрегат представляет собой блок термоэлектрической батареи. Холодные спаи каждого термоблока прижаты к холодильной камере, охлаждая ее. Горячие спаи термоблоков снабжены радиаторами – теплообменниками, предназначенными для отвода теплоты. Радиаторы охлаждаются воздухом, протягиваемым вентилятором 5. Электрическая схема холодильника приведена на рис. 5.6.

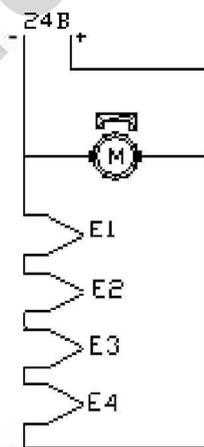


Рис. 5.6. Схема электрическая принципиальная:
М – электродвигатель; E1–E4 – термопары

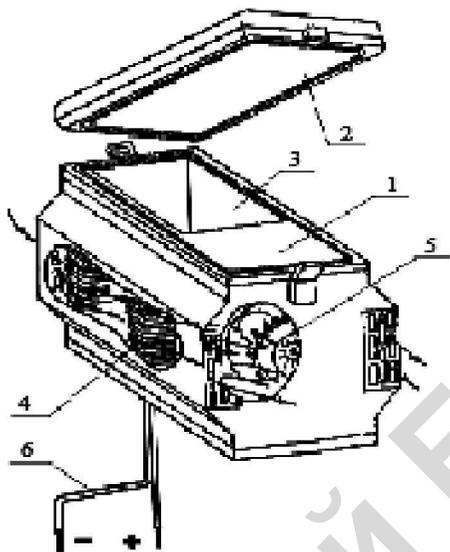


Рис. 5.7. Термоэлектрический холодильник ХАТЭ-24:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – холодильная камера; 4 – термоагрегат; 5 – вентилятор;
 6 – подвод тока

Техническая характеристика термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24 представлена в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Техническая характеристика термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24

Параметр	Величина параметра
1. Напряжение питания, В, при окружающей температуре 30 °С, °С, не менее	24
2. Род тока – постоянный	
3. Потребляемая мощность, Вт, не более	170
4. Перепад температур воздуха при окружающей температуре не менее 30 °С, °С, не менее	28
5. Время выхода на перепад температур 25 °С при окружающей температуре не менее 30 °С, ч, не более	1
6. Внутренний объем холодильника, дм ³	7
7. Масса, кг	15

Контрольные вопросы

1. На каких эффектах основана работа термоэлектрических трансформаторов теплоты, их сущность?
2. Физические основы термоэлектрического нагрева и охлаждения.
3. Устройство термоэлектрической батареи.
4. Принцип работы термоэлектрической батареи.
5. Почему для изготовления термоэлементов используют разнородные по физическим свойствам полупроводники?
6. В каких режимах может работать термоэлектрический трансформатор теплоты?
7. Что произойдет, если изменить направление тока в термоэлектрической батарее?
8. Какие энергетические параметры характеризуют работу трансформаторов теплоты в различных режимах?

Лабораторное занятие 8

Исследование термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24

Цель работы. Изучить принцип термоэлектрического нагрева и охлаждения на примере термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24, получить основные его энергетические характеристики.

Задачи работы

1. Изучить физические основы термоэлектрического нагрева и охлаждения.
2. Изучить устройство и принцип действия термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24.
3. Определить энергетические характеристики холодильника при различной силе тока, проходящего через термобатареи.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики термоэлектрического холодильника. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Изучить основы термоэлектрического преобразования энергии, используя теоретический материал, приведенный в настоящей главе.

2. Изучить устройство термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24 на натуральном образце, нарисовать его эскиз и принципиальную электрическую схему (рис. Л3.8.1).

$1NPE \sim 380/220B, 50Гц$

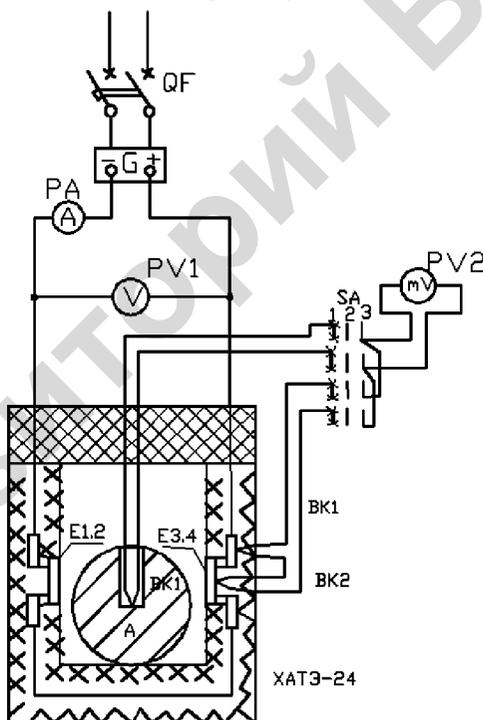


Рис. Л3.8.1. Схема экспериментальной установки:

ХАТЭ-24 – холодильник; А – охлаждаемое тело; E1, E2, E3, E4 – термобатареи; BK1, BK2 – термопары; G – источник питания; SA – переключатель термопар

3. Охладить алюминиевое тело, помещенное в камеру при различной величине тока, протекающего через термобатарею. Работу произвести в следующей последовательности.

3.1. Не включая холодильник, измерить температуру охлаждаемого тела t_1 и разность температур горячих и холодных спаев Δt в начале опытов (при $\tau = 0$).

3.2. Включить холодильник, установить ток $I = 3$ А и через каждые 3 минуты в течение 15 минут охлаждения измерять и заносить в табл. ЛЗ.8.1 значения температуры охлаждаемого тела t_2 и разности температур горячих и холодных спаев Δt .

Таблица ЛЗ.8.1

Результаты измерений и вычислений

Измерено					Вычислено			
$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$\tau, \text{мин}$	$t_1, \text{°С}$	$t_2, \text{°С}$	$\Delta t, \text{°С}$	$W, \text{Дж}$	$Q, \text{Дж}$	$\varepsilon, \text{о.е.}$

3.3. Увеличить ток до 4 А, через 3 минуты (через 18 минут от начала охлаждения) записать значения t_2 и Δt и так продолжать до 30 минут от начала процесса.

3.4. Следующий цикл измерений (от 31 до 45 минут) продолжать при токе 5 А, а затем заключительный цикл (от 46 до 60 минут) при токе 6 А.

Энергия W (Дж), потребляемая холодильником для охлаждения содержимого камеры:

$$W = UI\tau,$$

где U, I, τ – напряжение, ток и время каждого (i -го) опыта при токе соответственно 3, 4, 5 и 6 А.

Количество теплоты Q_x (Дж), уносимое из камеры в каждом опыте:

$$Q_x = mc(t_1 - t_2)_i,$$

где $m = 1,5$ кг – масса охлаждаемого тела; $c = 880$ Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость алюминия; t_1, t_2 – начальная и конечная температуры охлаждаемого тела в начале и конце i -го опыта, °С.

Холодильный коэффициент приблизительно равен:

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{W}.$$

По результатам измерений и вычислений построить кривые охлаждения $t = f(\tau)$ для каждого значения тока I , определить постоянную времени охлаждения $\tau_{\text{охл}}$ и установившуюся температуру охлаждения $t_{\text{уст}}$, используя графики 1-го ($I = 3 \text{ A}$) и 3-го ($I = 5 \text{ A}$) опытов. Способ определения этих параметров показан на рис. ЛЗ.8.2.

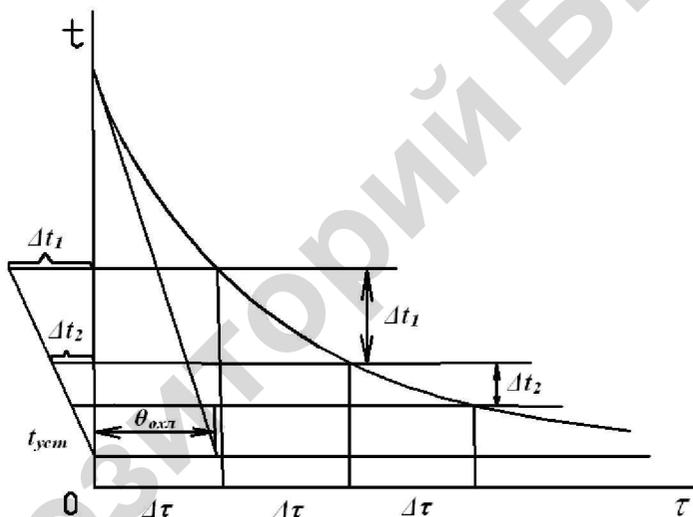


Рис. ЛЗ.8.2. Графическое определение установившейся температуры охлаждения $t_{\text{уст}}$ и постоянной охлаждения $\theta_{\text{охл}}$

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Принципиальная схема термоэлектрической батареи.
3. Таблица измерений и вычислений.
4. Графические зависимости, построенные по результатам опытов.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Физическая природа теплоты Пельтье и ее зависимость от силы тока.
2. Устройство, электрическая схема и принцип действия термоэлектрического холодильника ХАТЭ-24.
3. Энергетические параметры трансформатора теплоты в режиме холодильной машины, теплового насоса, в совмещенном цикле.
4. Экспериментальное определение энергетических параметров трансформатора теплоты.
5. Графическое определение установившейся температуры и постоянной времени охлаждения термоэлектрического холодильника.

6. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

6.1. Особенности и области применения

Индукционный нагрев используют для нагрева проводников 1-го и 2-го рода в переменном магнитном поле, которое, проникая в материал, вызывает появление вихревого электрического поля. ЭДС индукции определяется скоростью изменения магнитного потока

$$e = - d\Phi/dt,$$

под действием которой возникают вихревые токи, выделяющие теплоту по закону Джоуля – Ленца (формулы (3.8), (3.12)).

Индукционный нагрев является прямым бесконтактным нагревом, позволяющий достигать неограниченного уровня температуры. Преимуществами индукционного нагрева являются:

быстрота;

высокая концентрация и точная локализация энергии, обеспечивающие короткий цикл, высокую производительность, улучшающие показатели использования оборудования и материалов и снижающие риск деформации при нагреве;

высокое и однородное качество;

легкое и точное автоматическое управление процессом;

выделение теплоты непосредственно в нагреваемом материале, позволяющее избежать сложного технического обслуживания, измерения, нагрева футеровки печей и их охлаждения. В процессе нагрева не выделяется дым или другие вредные эмиссии, загрязняющие материалы и оборудование. Все это снижает опасность процесса и улучшает условия работы. Кроме этого, процесс более эффективен по затратам энергии, чем другие методы, и количество рассеиваемой энергии мало.

Электромагнитные поля высокой напряженности и частоты создают специальными устройствами – *индукторами* (рис. 6.1, 6.2).

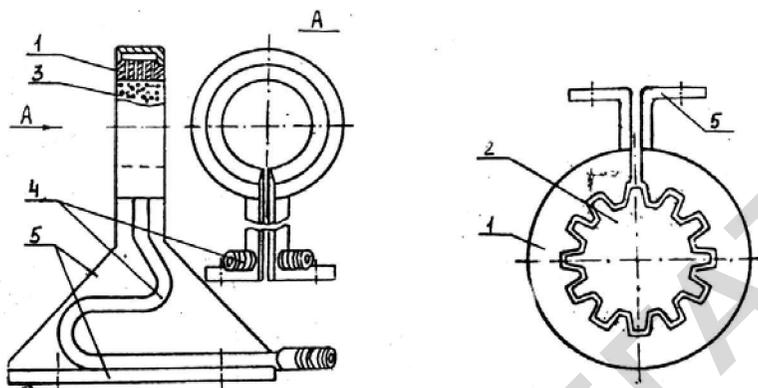


Рис. 6.1. Индукторы закалочные:

- 1 – индуктирующий провод; 2 – заготовка (изделие); 3 – отверстие для подачи воды при закалке; 4 – трубки охлаждения индуктора; 5 – токоподводящие шины

Форма и размеры индуктора зависят от способа нагрева, размеров и конструкции нагреваемой поверхности, подводимой мощности, частоты тока, объемов производства, степени механизации и т. д. Индуктор является основным элементом любой высокочастотной нагревательной установки. В большинстве случаев достоинства и недостатки технологических устройств, в которых используется индукционный нагрев, могут быть поставлены в прямую связь с особенностями конструкции индуктора. Для увеличения электрического КПД и $\cos\phi$ (формулы (6.13), (6.15)) зазор между индуктирующим проводом и нагреваемым материалом должен быть минимальным. Однако, при уменьшении зазора возможно значительное удорожание изготовления и эксплуатации устройства из-за необходимости изготовления индуктора с большей точностью, так как при малых зазорах, повышается процент брака из-за случайных прикосновений детали к индуктору и возникающего при этом пробоя между индуктором и деталью. Зазор, который можно допустить без существенного уменьшения КПД, пропорционален ширине индуктирующего провода. Форма индукторов разнообразна (цилиндрические, плоские, фасонные и др.) и зависит от формы изделия. Как правило, их выполняют из меди марки М1.

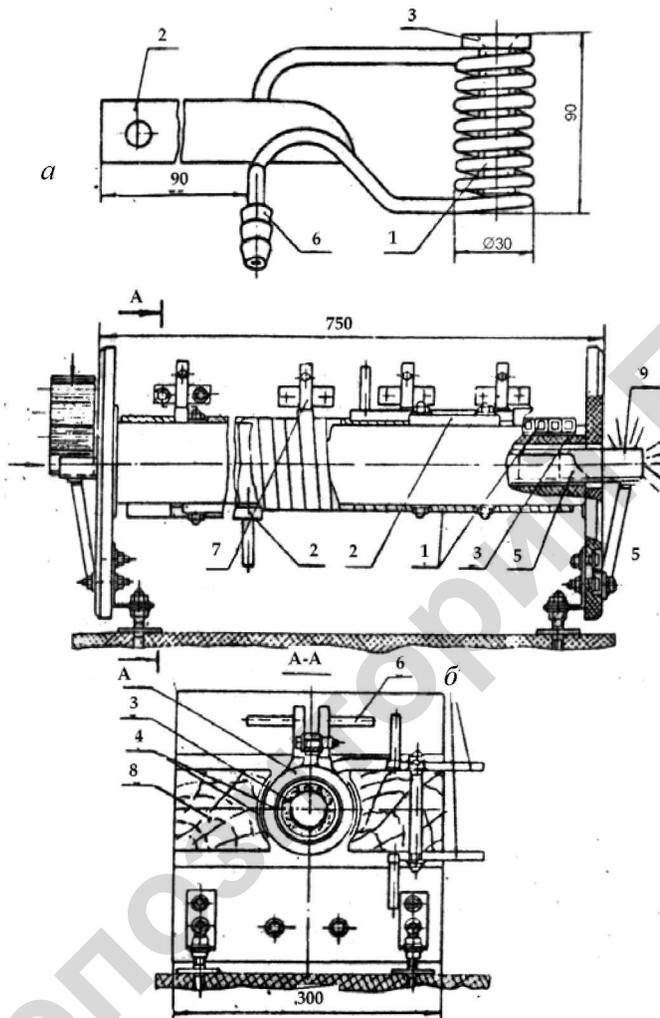


Рис. 6.2. Индукторы нагревательные периодического (а) и методического (б) действия:

1 – индуктирующий провод; 2 – токоподводящие шины; 3 – керамические втулки (тепловая изоляция); 4 – асбестовая прокладка; 5 – металлическая направляющая для перемещения заготовок; 6 – трубки водоохлаждения; 7 – узел соединения секций индуктора; 8 – бруски крепления индуктора; 9 – заготовка

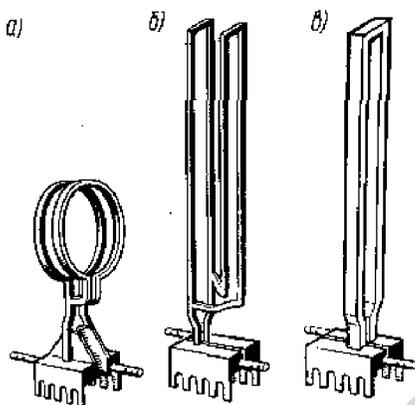


Рис. 6.3. Индукторы для нагрева наружных наплавляемых поверхностей:
а – с двумя витками, соединенными параллельно; *б* – прямоугольный; *в* – петлевой

В последние годы разработаны индукторы с электроизоляционным покрытием рабочих поверхностей окисью алюминия. Благодаря этому устраняются случайные замыкания детали и индуктора, уменьшается зазор между ними, что повышает КПД.

Индуктирующий провод и другие токонесущие элементы индуктора нагреваются при прохождении по ним тока высокой частоты. Кроме того, обрабатываемая деталь излучает тепло, которое частично поглощается индуктирующим проводом. Поэтому в большинстве случаев для предохранения индукторов от разрушения (расплавление участков) его элементы охлаждают, чаще всего, водой. По конструкции индукторы разделяются на разборные и неразъемные. По числу витков – на одновитковые и многovitковые. По направленности нагрева – для нагрева наружных (цилиндрических, плоских и др.) (рис. 6.3) и внутренних поверхностей (рис. 6.4).

Нашли распространение и индукторы с магнитопроводом, которые применяются для вытеснения тока в сторону открытого паза. Такие конструкции используют главным образом при закалке внутренних (рис. 6.4, *а*) или плоских поверхностей, а также в случаях, где требуется неодинаковая степень нагрева.

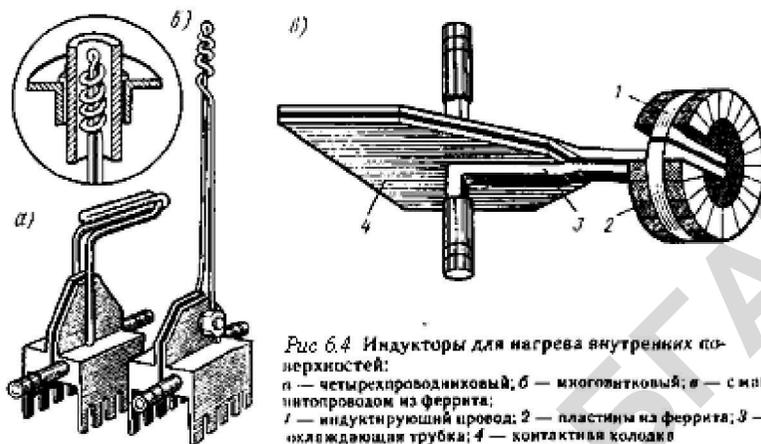


Рис. 6.4 Индукторы для нагрева внутренних поверхностей:
 а — четырехпроводниковый; б — многовитковый; в — с магнитопроводом из феррита;
 1 — индуктирующий провод; 2 — пластины из феррита; 3 — окладывающая трубки; 4 — контактные колодки

По частоте тока индукторы делят на два класса;
низкочастотные частотой до 66 кГц: имеют большое число витков и диаметр, предназначены для разогрева, как правило, крупных заготовок либо плавления металла;

высокочастотные частотой от сотен кГц до 5 МГц: имеют один виток небольшого диаметра, предназначены для разогрева мелких деталей.

Для индукционного нагрева применяют частоты от 50 Гц до 5 МГц. Принципиальная электрическая схема индукционной установки представлена на рис. 6.5.

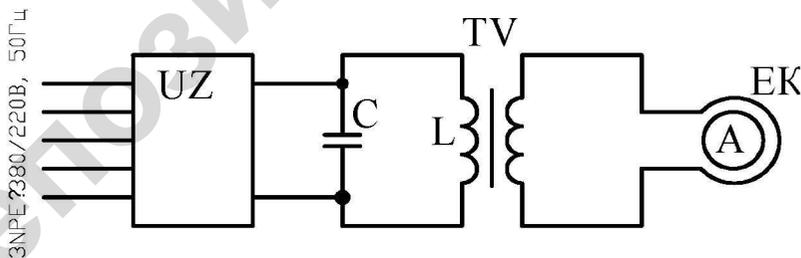


Рис. 6.5. Принципиальная схема установки индукционного нагрева средней и высокой частоты:

UZ — источник питания; C-L — колебательный контур; TV — понижающий трансформатор, во вторичную цепь которого включен индуктор EK; A — нагреваемый материал

Наиболее широко применяют прямой нагрев материалов на средних и высоких частотах: поверхностная закалка, нагрев под пластическую деформацию (ковка, штамповка и др.), плавление металлов, термическая обработка (отжиг, отпуск, нормализация), сварка, пайка и др. Косвенный нагрев применяют для обогрева технологического оборудования (трубопроводы, емкости и т. п.), нагрева жидких сред.

6.2. Физические основы индукционного нагрева

Процессы, происходящие при индукционном нагреве и особенности распространения электромагнитного поля в нагреваемом материале рассмотрим на примере падения плоской электромагнитной волны на полуграниченное металлическое тело с плоской поверхностью (рис. 6.6). Допустим, что размеры поверхности и глубина тела бесконечны, а его электрофизические свойства (магнитная проницаемость μ , удельное электрическое сопротивление ρ_l) постоянны.

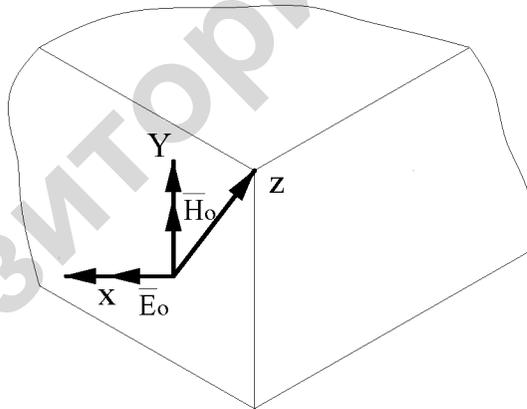


Рис. 6.6. Проникновение плоской электромагнитной волны в полуграниченное металлическое тело

Электромагнитное поле характеризуют напряженностью электрического поля E (В/м) и напряженностью магнитного поля H (А/м), изменяющихся по синусоидальному закону:

$$E = E_z \sin \omega t; \quad H = H_z \sin \omega t, \quad (6.1)$$

где E_z, H_z – амплитудные значения напряженности электрического и магнитного полей, В/м и А/м; ω – угловая частота, рад/с; t – время, с.

При проникновении в материал электромагнитная волна затухает по экспоненциальному закону, тогда амплитуды E_z и H_z на глубине z от поверхности материала:

$$E_z = E_0 e^{-kz}; \quad H_z = H_0 e^{-kz}, \quad (6.2)$$

где E_0, H_0 – амплитудные значения напряженности электрического и магнитного полей на поверхности материала, В/м и А/м; $k = \sqrt{\omega \mu_a / 2\rho}$ – коэффициент затухания волны; $\mu_a = \mu_0 \mu$ – абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала, Гн/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость материала; ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·м.

Чаше пользуются величиной обратной k , называемой глубиной проникновения электромагнитной волны:

$$z_a = \sqrt{1/k} = \sqrt{2\rho / (\omega \mu_a)} = 503 \sqrt{\rho / (\mu f)}. \quad (6.3)$$

Из формул (6.2) видно, что электромагнитная волна ослабевает по мере удаления от поверхности материала тем быстрее, чем больше k или меньше z_a . На расстоянии $z = z_a$ от поверхности материала амплитуды напряженности электрического и магнитного полей равны:

$$\begin{aligned} E_{z_a} &= E_0 e^{-kz} = E_0 e^{-1} = 0,368 E_0; \\ H_{z_a} &= H_0 e^{-kz} = H_0 e^{-1} = 0,368 H_0. \end{aligned} \quad (6.4)$$

Следовательно, глубина проникновения электромагнитной волны – это расстояние от поверхности вглубь материала, на которое она проникает и затухает в e раз (рис. 6.7).

Причиной затухания электромагнитной волны является превращение энергии электромагнитного поля в теплоту по закону Джоуля – Ленца, вследствие чего и происходит нагрев материала.

Энергию электромагнитного поля определяют вектором плотности потока мощности (вектор Пойтинга). В комплексной форме

$$\dot{S} = [H \dot{E}^*], \quad (6.5)$$

где \dot{E} – комплекс амплитудного значения напряженности электрического поля; H^* – сопряженный комплекс амплитудного значения напряженности магнитного поля.

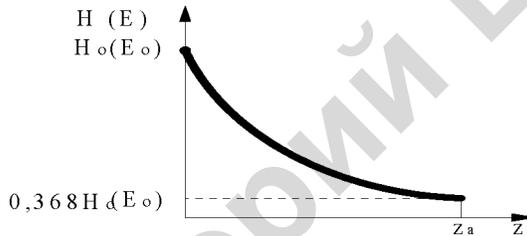


Рис. 6.7. Зависимость напряженности магнитного и электрического полей от глубины проникновения в материал

Действительная часть вектора Пойтинга представляет поток активной энергии, поступающей в материал через единицу поверхности и расходуемой на нагрев p_s (Вт/м²), мнимая – поток реактивной энергии, идущей на перемагничивание материала q_s (вар/м²). Для полуограниченного металлического тела эти составляющие равны и определяются формулами:

$$q_s = p_s = 2 \cdot 10^{-3} H^2 \sqrt{\rho \mu f}, \quad (6.6)$$

где $H = IW$ – напряженность магнитного поля, А/м²; I – сила тока в индукторе, А; W – число витков индуктора, приходящееся на 1 м длины; $k_1 = \rho \mu f$ – коэффициент поглощения мощности.

Из формулы (6.6) видно, что удельная поверхностная мощность, выделяемая в нагреваемом материале, прямо пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля H и коэффициенту поглощения мощности k_1 . При $H = \text{const}$ интенсивность нагрева тем больше, чем выше удельное электрическое сопротивление материала ρ_t , магнитной проницаемости μ и частоте f .

Формула (6.6) справедлива для случая плоской электромагнитной волны и наблюдается только на высоких частотах. Для реальных условий нагрева в выражение вводят дополнительные функции F_p и F_q :

$$p_s = 2 \cdot 10^{-3} H^2 \sqrt{\rho \mu f} F_p, \quad (6.7)$$

$$q_s = 2 \cdot 10^{-3} H^2 \sqrt{\rho \mu f} F_q. \quad (6.8)$$

Полная активная мощность системы «индуктор – нагреваемый материал»:

$$P = p_{s1} + p_{s2}, \quad (6.9)$$

где индекс «1» относится к индуктору, «2» – к нагреваемому материалу.

Полная реактивная мощность

$$Q = q_{s1} + q_{s2} + q_{s3}, \quad (6.10)$$

где q_{s3} – реактивная мощность в зазоре, вар/м².

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (6.11)$$

Энергетическими параметрами индукционного нагрева являются электрический КПД η_e и коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Электрический КПД

$$\eta_e = p_{s2} / P = 1 / (1 + \sqrt{\rho_1 \mu_1} / \sqrt{\rho_2 \mu_2}). \quad (6.12)$$

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P/S. \quad (6.13)$$

При высокой частоте в соответствии с формулой (6.6) $q_s = p_s$ и максимальное значение

$$\cos\varphi = 1/\sqrt{2} = 0,707.$$

Из-за наличия воздушного зазора между индуктором и нагреваемым материалом, $\cos\varphi$ индуктора всегда меньше 0,707 и его определяют по приближенной формуле

$$\cos\varphi = \mu_{2z_a}/\sqrt{2} a = 503 \sqrt{\rho_2 \mu_2} / (\sqrt{2} a \sqrt{f}), \quad (6.14)$$

где a – воздушный зазор между индуктором и нагреваемым материалом, м.

6.3. Приближенный расчет индукторов

Задача расчета состоит в выборе частоты, определении напряжения и тока индуктора, числа витков, коэффициента мощности, коэффициента полезного действия, мощности, подводимой к индуктору.

Исходными данными являются вид термообработки; форма, материал, размеры и другие характеристики обрабатываемого материала; начальная и конечная температуры нагрева и т.п.

Выбор частоты. Частота влияет на электрический КПД индуктора, глубину проникновения тока и распределение температуры по сечению обрабатываемого материала, вид высокочастотного оборудования. Например, диапазон частот для нагрева углеродистых сталей можно рассчитать по следующим формулам.

Сплошной цилиндр радиусом R_2

$$0,75/R_2^2 \leq f \leq 3/R_2^2. \quad (6.15)$$

Полый цилиндр с наружным радиусом R_2 толщиной стенки δ_2

$$2,5 \cdot 10^5 \rho_2 / (R_2 \delta_2) \leq f \leq 10 \cdot 10^5 \rho_2 / (R_2 \delta_2), \quad (6.16)$$

где ρ_2 – удельное сопротивление стали в горячем режиме (температура более 750 °С), Ом·м (табл. 6.3).

Детали прямоугольного сечения

$$f = 8,1 \cdot 10^{12} \rho_2 h_2, \quad (6.17)$$

где h_2 – толщина детали, м.

При нагреве деталей всех форм в коротких индукторах ($l_1 < 4R_1$) частоту, рассчитанную по формулам (6.16)–(6.18), следует увеличить в 1,25–1,5 раза, где l_1 и R_1 – длина и радиус индуктора (рис. 6.8), определяемых по (6.27).

Диапазон частот при закалке углеродистых сталей равен:

$$3 \cdot 10^{-2} / X_k^2 \leq f \leq 25 \cdot 10^{-2} / X_k^2, \quad (6.18)$$

где X_k – глубина закаленного слоя, м (табл. 6.2).

По расчетной величине выбирают ближайшую большую, на которую выпускают высокочастотные преобразователи. Рекомендуемые диапазоны частот при нагреве стальных заготовок цилиндрической формы представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Рекомендуемая частота тока при нагреве стальных заготовок

Диаметр, 10^3 м	250 и более	80–250	55–80	35–55	20–35	5–20
Частота, кГц	0,05	0,5	1,0	2,4	8,0	66,0

Таблица 6.2

Глубина закалки стальных заготовок

Глубина зака- ленного слоя, 10^{-3} м	Частота, кГц			
		8,0	2,5	1,0
Наименьшая	1,3	2,4	3,6	17
Наибольшая	5,5	10,0	16,0	70
Оптимальная	2,7	5,0	8,0	34

Таблица 6.3

Усредненное значение удельного сопротивления углеродистых сталей

$t, ^\circ\text{C}$	20	100	200	400	600	800	1000	1200	1300
$\rho_{25}, 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	0,2	0,25	0,33	0,52	0,79	1,18	1,22	1,26	1,3

Условием правильного выбора частоты при нагреве различных материалов является:

$$D_2/(\sqrt{2} z_a)=2,2-2,5, \quad (6.19)$$

где D_2 – диаметр заготовки, м; z_a – глубина проникновения тока в металл, м.

$$z_a = 503 \sqrt{\rho/(\mu f)}, \quad (6.20)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость обрабатываемого материала.

Определение мощности и размеров индуктора. Средняя полезная мощность, Вт, за время нагрева заготовки

$$P_n = mC(t_2 - t_1)/\tau_k, \quad (6.21)$$

где $m = V\rho'_{\text{ст}}$ – масса заготовки, кг; c – средняя удельная теплоемкость обрабатываемого материала. Для углеродистых сталей $c = 668 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; t_1, t_2 – начальная и конечная температуры нагрева, $^\circ\text{C}$; τ_k – время нагрева до конечной температуры при нормируемом теплоперепаде, с; $\rho'_{\text{ст}}$ – средняя за время нагрева плотность обрабатываемого материала. Для стали $\rho'_{\text{ст}} = 7860 \text{ кг}/\text{м}^3$; V – объем заготовки, м^3 .

Время нагрева τ_k при теплоперепаде Δt между поверхностью и центром цилиндрической заготовки:

$$\Delta t = 100 \text{ }^\circ\text{C}, \tau_k \approx 5,9 \cdot 10^4 D_2'^2, \quad (6.22)$$

$$\Delta t = 150 \text{ }^\circ\text{C}, \tau_{\kappa} \approx 3,7 \cdot 10^4 D_2 t^2, \quad (6.23)$$

где $D_2' = D_2 - z_{\text{ак}}$ – расчетный диаметр заготовки, м.

Глубина проникновения тока в заготовку в конце нагрева, м, для углеродистых сталей

$$z_{\text{ак}} = 0,5 / \sqrt{f}. \quad (6.24)$$

Удельная полезная мощность на поверхности заготовки, Вт/м²,

$$P_o = P_{\text{п}} / S, \quad (6.25)$$

где S – площадь поверхности заготовки без учета торцов, м².

Воздушный зазор между индуктором и нагреваемой заготовкой Δh принимают в пределах 2–5 мм, если диаметр D_2 меньше 50 мм, и 5–10 мм при $D_2 \geq 50$ мм. Увеличение зазора снижает КПД и $\cos\phi$ индуктора. Длину индуктора l_1 принимают примерно равной длине заготовки.

$$D_1 = D_2 + \Delta h, \quad h_1 = h_2 + \Delta h, \quad l_1 \approx l_2. \quad (6.26)$$

Толщина стенки трубки индуктирующего провода при частотах до 10^4 Гц

$$\delta \approx 1,6 z_{a1}, \quad (6.27)$$

где z_{a1} – глубина проникновения тока в медь (6.29), м.

При частоте более 10^4 Гц $\delta_1 > 0,5$ мм по механической прочности.

Индуктор изготавливают из медной трубки круглого или прямоугольного сечений. Используют электротехническую медь марок М0 или М1, обладающих минимальным удельным сопротивлением. Удельное сопротивление меди можно считать $(0,018-0,02) 10^{-6}$ Ом·м.

Электрический расчет индуктора. Задача расчета – определить напряжение на индукторе $U_{\text{и}}$, ток индуктора $I_{\text{и}}$, число витков индуктора W , коэффициент мощности $\cos\phi_{\text{и}}$, коэффициент полезного действия $\eta_{\text{и}}$, мощность $P_{\text{и}}$, подводимую к индуктору.

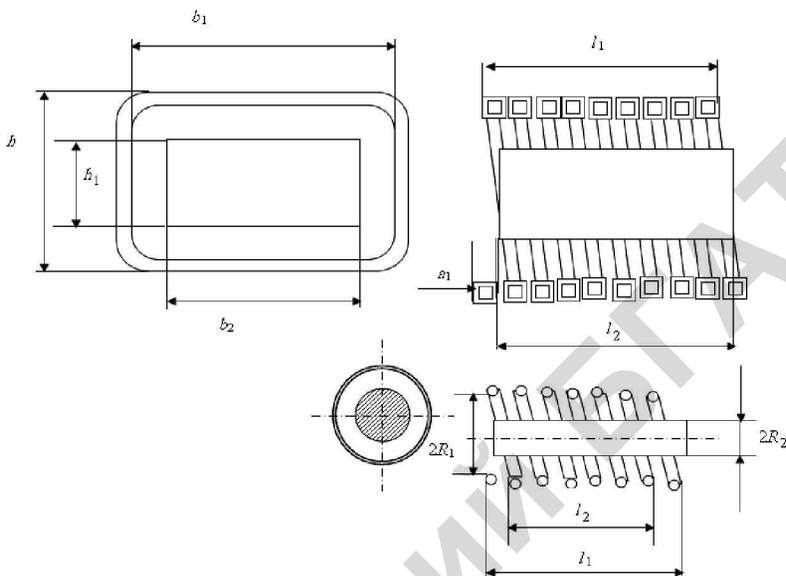


Рис. 6.8. Геометрические размеры системы «индуктор – деталь»

Расчет выполняют условного одновиткового индуктора. В конце расчета определяют количество витков W и пересчитывают параметры индуктора на это количество витков.

Глубина проникновения тока:

в медь индуктора, м,

$$z_{a1} = 0,7/\sqrt{f} ; \quad (6.28)$$

в заготовку в горячем режиме

$$z_{a2} = 503/\sqrt{\rho_2/f} , \quad (6.29)$$

где ρ_2 – удельное сопротивление заготовки в горячем режиме (табл. 6.3), Ом·м, при относительной магнитной проницаемости μ равной относительной магнитной проницаемости на поверхности заготовки μ_c .

$$z_{ae} = f(\rho_2, f, H_B^2 \sqrt{\mu_e}). \quad (6.30)$$

Величину z_{ae} находят по прилож. 9. Для этого необходимо определить величину:

$$H_B^2 \sqrt{\mu_e} = 3,67 \cdot 10^2 P_0 / \sqrt{\rho_2 / f}. \quad (6.31)$$

Если $\rho_2 > 0,18 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, то полученное значение z_{ae} нужно увеличить в $\sqrt{\rho_2 / 0,18 \cdot 10^{-6}}$ раз.

По формулам прилож. 10 рассчитывают r_2 , x_{2M} для холодного, промежуточного и горячего режимов нагрева, а также x_s и x_0 . Температуру промежуточного режима принимают 750–800 °С.

Коэффициент приведения параметров, характеризующий соотношение размеров индуктора и заготовки,

$$C = \frac{x_0^2}{r_2^2 + (x_0 + x_s + x_{2M})^2}. \quad (6.32)$$

Активное сопротивление пустого индуктора, Ом:
цилиндрического

$$r_1 = \frac{2\pi\rho_1(R_1 + 0,5Z_{a1})W^2 k_{r1}}{Z_{a1}l_1}, \quad (6.33)$$

прямоугольного

$$r_1 = \frac{2 \cdot 10^{-8} \rho_1 (b_1 + h_1) W^2 k_{r1}}{Z_{a1}l_1}. \quad (6.34)$$

В формулах (6.33) и (6.34) принимают $W = 1$, $k_{r1} = 1,3$ – характеризует отношение δ_1 / Z_{a1} .

Сопротивление нагруженного индуктора:

Активное

$$r_{и} = r_1 + r_2 C W^2; \quad (6.35)$$

индуктивное

$$x_{\text{и}} = C \cdot [x_{\text{s}} + x_{2\text{м}} + (r_2^2 + [x_{\text{s}} + x_{2\text{м}}]^2)/x_0] W^2; \quad (6.36)$$

полное

$$z_{\text{и}} = \sqrt{r_{\text{и}}^2 + x_{\text{и}}^2}. \quad (6.37)$$

В формулах (6.36), (6.37) так же принять $W = 1$.

Ток в одновитковом индукторе

$$I'_{\text{и}} = \sqrt{P_{\text{и}}/(r_2 \cdot C)}. \quad (6.38)$$

Напряжение на индуктирующем проводе одновиткового индуктора

$$U'_{\text{и}} = I'_{\text{и}} \cdot z_{\text{и}}. \quad (6.39)$$

Число витков индуктора

$$W = U_{\text{и}}/U'_{\text{и}}, \quad (6.40)$$

где $U_{\text{и}}$ – напряжение фактическое, подводимое к индуктору, В.

Напряжение, подводимое от преобразователя частоты к индуктору, можно регулировать в пределах от нескольких до 800–1600 В.

Ширина (диаметр) индуктирующего провода без учета зазора между витками

$$a_1 = l_1/W. \quad (6.41)$$

По ширине (диаметру) выбирают медную трубку для изготовления индуктора.

Параметры индуктора, пересчитанные на реальное число витков, находят по формулам (6.33)–(6.36), подставив в них принятое число витков, а также ток индуктора, А:

$$I_{\text{и}} = I'_{\text{и}}/W. \quad (6.42)$$

Электрический КПД индуктора, о.е.:

$$\eta_{\text{и}} = (r_{\text{и}} - r_1)/r_{\text{и}}. \quad (6.43)$$

Коэффициент мощности, о.е.,

$$\cos\varphi_{\text{и}} = r_{\text{и}}/z_{\text{и}}. \quad (6.44)$$

Мощность, подводимая к индуктору,

$$P_{\text{и}} = P_{\text{п}}/\eta_{\text{и}}. \quad (6.45)$$

Напряжение на индукторе

$$U_{\text{и}} = I_{\text{и}}z_{\text{и}}, \quad (6.46)$$

где $z_{\text{и}}$ – полное сопротивление индуктора с числом витков W .

Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$P_{\text{к}} = P_{\text{и}}\text{tg}\varphi_{\text{и}}. \quad (6.47)$$

Коэффициент мощности индукционной установки в номинальном режиме должен составлять 0,98–0,99 и иметь емкостной характер.

6.4. Выбор установок индукционного нагрева

Установки индукционного нагрева выбирают по технологическому назначению, мощности и рабочей частоте генератора.

Исходными данными являются: вид технологического процесса (нагрев, закалка, плавление и т. п.); форма, геометрические размеры, материал изделия; температурный режим (сквозной до температуры 1200–1300 °С, нагрев под поверхностную закалку до температуры свыше 750 °С на различной глубине и т. п.); масса нагреваемого материала, время нагрева или производительность.

Частоту генератора индукционной установки выбирают в зависимости от вида термообработки, формы и материала обрабатываемого изделия по формулам (6.15)–(6.20).

Мощность генератора

$$P_{\text{г}} = P_{\text{и}}/\eta_{\text{тр}} \eta_{\text{л}}, \quad (6.48)$$

где $\eta_{\text{тр}} = 0,85$ – КПД понижающего трансформатора, о.е.; $\eta_{\text{л}} = 0,95$ – КПД линии, соединяющей генератор с индуктором, о.е.

Технические характеристики некоторых индукционных установок приведены в прилож. 17–18.

Контрольные вопросы

1. Перечислите физические законы, лежащие в основе индукционного нагрева.

2. Назовите области применения индукционного нагрева.

3. Какие частоты используют для индукционного нагрева?

4. Изложите методику приближенного расчета индуктора.

5. Как определить мощность, подводимую к индуктору?

6. Что такое глубина проникновения тока и как ее определяют?

7. Укажите критерии выбора установок индукционного нагрева.

8. Охарактеризуйте особенности эксплуатации установок индукционного нагрева.

9. Как зависит КПД и $\cos\varphi$ системы «индуктор – изделие» от воздушного зазора между ними?

10. Удельное электрическое сопротивление стали марки Ст.10 при $20\text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_c = 16 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, относительная магнитная проницаемость $\mu_c = 60$; меди соответственно $\rho_m = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, $\mu_m = 1$. Какое соотношение z_c/z_m глубины проникновения тока в сталь z_c и в медь z_m при индукционном нагреве?

11. Выберите ламповый автогенератор для индукционного нагрева под поверхностную закалку стального цилиндра диаметром 30 мм, высотой 360 мм. Толщина закаливаемого слоя – 1 мм, температура закалки – $750\text{ }^\circ\text{C}$, начальная температура изделия – $0\text{ }^\circ\text{C}$, время нагрева – 5 с, КПД индуктора – 0,62.

12. Определите глубину проникновения тока высокочастотной закалки стальной детали в индукторе при частоте $f = 20$ кГц, если удельное электрическое сопротивление стали при $20\text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_{20} = 0,15 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, относительная магнитная проницаемость $\mu = 100$.

13. Рассчитать удельную мощность, поглощаемую стальным цилиндром в индукторе, если число витков индуктора на 1 см высоты 1,5, сила тока индуктора равна 1000 А, частота тока $f = 70$ кГц, $\rho_{20} = 0,15 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\mu = 80$.

Практическое занятие 9

Расчет индуктора

Задача занятия. Выбрать частоту индукционного нагрева. Определить мощность и размеры индуктора. Рассчитать напряжение и ток индуктора, число витков, коэффициент полезного действия, мощность, подводимую к индуктору.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и литературе [3], изучить методику расчета индуктора, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

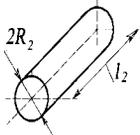
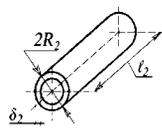
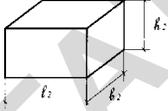
Индивидуальные задания

Задача 9.1. Рассчитать индуктор и выбрать индукционную установку для сквозного нагрева заготовки (исходные данные приведены в табл. ПЗ.9.1).

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Задача расчета индуктора.
2. Исходные данные для расчета индуктора.
3. Как определяют частоту индукционной установки для нагрева и закалки заготовки?
4. Как определяют полезную мощность?
5. Как определяют размеры индуктора?
6. Задача электрического расчета индуктора.
7. Как определяют электрический КПД индуктора?
8. Как определяют коэффициент мощности?
9. Как определяют мощность высокочастотного генератора для питания индуктора?

Исходные данные к задаче 9.1

Вариант задания																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Форма и характеристики заготовки																									
Длина $l_2, 10^{-3}$ м	50	60	70	80	170	180	190	85	195	200	90	30	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190		
Радиус $R_2, 10^{-3}$ м	10	15	20	25	70	75	80	85	90	90	30	30	30	35	40	45	50	55	60	65	160	120	130	140	150
Толщина стенки $\delta_2, 10^{-3}$ м											3	3	4	5	5	5	5	5	6	7					
Ширина $b_2, 10^{-3}$ м																					30	40	50	50	50
Высота $h_2, 10^{-3}$ м																					10	30	15	20	25
Конечная температура $t_2, ^\circ\text{C}$	1025	1050	1075	1100	1120	1140	1170	1180	1190	1125	1150	1175	1200	1225	1255	1270	1280	1200	1250	1275	1300	1325	1350	1375	1400
Темпероперпад $\Delta t, ^\circ\text{C}$	100	150	100	150	100	150	100	150	100	100	150	100	150	100	1225	1270	1280	150	100	150	100	150	100	150	100
Удельное сопротивление $\rho_{20}, 10^{-6}$ Ом·м	0,10	0,12	0,13	0,14	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,15	0,16	0,17	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
Глубина закаленного слоя $X_k, 10^{-3}$ м	1	2	3	4	5	4	3	2	1	5	1,5	2	3	4	2,5	3,5	4,5	3	2	4	5	3	2	4	5

Лабораторное занятие 9

Исследование установки индукционного нагрева

Цель работы. Изучить энергетические характеристики индукционного нагрева, устройство, принцип действия, приобрести навыки эксплуатации индукционных установок.

Задачи работы

1. Изучить энергетические характеристики индукционного нагрева, устройство и принцип действия индукционной установки ВЧИ4-10/0,44, конструктивное исполнение индукторов.

2. Определить пределы регулирования напряжения на индукторе. Установить зависимость между анодным напряжением и напряжением на индукторе, его мощностью и напряженностью магнитного поля.

3. Исследовать влияние удельного сопротивления и магнитной проницаемости металла на глубину проникновения тока и поглощаемую мощность.

4. Исследовать влияние зазора между изделием и индуктором на поглощаемую мощность, скорость нагрева, теплоперепад, КПД, коэффициент мощности.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики установки индукционного нагрева. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Оборудование индукционного нагрева (блок регулирования напряжения, анодный трансформатор, выпрямитель, генераторная лампа, разделительные емкость и индуктивность, высокочастотный трансформатор, индуктивности обратной связи, колебательный

контур) изучить на примере установки ВЧИ4-10/0,44 и индукторах, представленных в работе. Характеристики лабораторного индуктора записать в табл. ЛЗ.9.1.

Таблица ЛЗ.9.1

Индуктивный провод					Индуктор			
Материал	Форма	Сечение, мм ²	Толщина стенки, мм	Конструктивное исполнение	Количество витков, шт.	Высота, мм	Диаметр, мм	
							вн.	нар.

2. Прочитать краткую инструкцию «Подготовка и работа на генераторе ВЧИ4-10/0,44». Согласно инструкции и схеме управления включить генератор. Задачиком «Регулятор напряжения» установить нужное анодное напряжение U_a и по приборам на лабораторном стенде определить напряжение U_1 и магнитный поток H индуктора, анодный I_a и сеточный I_c токи генератора. Результаты записать в табл. ЛЗ.9.2.

Таблица ЛЗ.9.2

Зависимость напряжения магнитного потока и мощности ненагруженного индуктора от анодного напряжения

$U_a, В$	$I_a, А$	$I_c, А$	$U_1, В$	$H, А \cdot м^{-1}$	$P_1, Вт$
----------	----------	----------	----------	---------------------	-----------

3. Заготовки одинаковых геометрических размеров из стали Ст.3 и меди М1 поочередно поместить в индуктор и нагреть при одинаковом напряжении и продолжительности. Продолжительность нагрева установить по реле времени КТ2. Глубину проникновения тока определить визуально по изменению цвета поверхности заготовок и расчетным путем. Поглощаемую мощность найти методом калориметрирования. Для этого заготовки сразу после окончания нагрева сбросить специальным устройством в калориметр. Измерить температуру воды в калориметре до и после погружения заготовок. Результаты записать в табл. ЛЗ.9.3.

**Влияние электрических свойств металла на глубину проникновения
тока и поглощаемую мощность**

Металл	ρ_2 , Ом·м	μ_2 , о.е.	C_2 , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Измерено					Вычислено			
				m_2 , кг	$m_{\text{в}}$, кг	$t_{\text{в}1}$, °C	$t_{\text{в}2}$, °C	τ , с	$z_{\text{а.х}}$, м	$z_{\text{а.г}}$, м	P_2 , кВт	
Сталь	$1,8 \cdot 10^{-7}$	5... 10	0,67									
Медь	$0,18 \cdot 10^{-7}$	1	0,42									

В табл. ЛЗ.9.3: m_2 – масса заготовки; $m_{\text{в}}$ – масса воды в калориметре; $t_{\text{в}1}$, $t_{\text{в}2}$ – температура воды в калориметре до и после погружения заготовки; τ – продолжительность нагрева; P_2 – мощность, поглощенная заготовкой; $z_{\text{а.х}}$, $z_{\text{а.г}}$ – глубина проникновения тока в холодном ($t < 700$ °C) и горячем ($t > 800$ °C) режимах.

4. На индукторе установить требуемое напряжение. Заготовки различных диаметров из стали Ст.3 поочередно поместить в индуктор, обеспечив равномерный по периметру зазор. Термопары, приваренные к поверхности заготовки, подключить к самописцу. Установить на реле времени продолжительность нагрева. Включить самописец, протяжку ленты (1 мм/с), отметчик времени. Включить нагрев. После автоматического окончания нагрева заготовку сбросить в калориметр. Данные записать в табл. ЛЗ.9.4.

Таблица ЛЗ.9.4

**Влияние зазора между индуктором и изделием на характеристики нагрева
(исходные данные)**

d_1 , мм	d_2 , мм	m_2 , кг	$U_{\text{а}}$, В	$U_{\text{в}}$, В	$I_{\text{ав}}$, А	τ , с	$m_{\text{в}}$, кг	$t_{\text{в}1}$, °C	$t_{\text{в}2}$, °C
---------------	---------------	---------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	---------------	------------------------	-------------------------	-------------------------

Обработать записи на диаграмме самописца. Результаты записать в табл. ЛЗ.9.5.

Таблица ЛЗ.9.5

Кинетика индукционного нагрева заготовок различного диаметра

τ , с	$d_1 =$ мм			$d_2 =$ мм		
	$t_{\text{о}2}$, °C	$t_{\text{и}2}$, °C	Δt_2 , °C	$t_{\text{о}2}$, °C	$t_{\text{и}2}$, °C	Δt_2 , °C

По результатам, отраженным в табл. ЛЗ.9.4 и ЛЗ.9.5, определить мощность, поглощаемую изделием, скорость нагрева, средний теплоперепад, КПД и $\cos \varphi$. Данные записать в табл. ЛЗ.9.6.

Таблица ЛЗ.9.6

Влияние зазора (a) между индуктором и изделием на характеристики индукционного нагрева

$a = \frac{d_1 - d_2}{2}$, мм	t_p , °C	t_2 , °C	$\Delta t / \Delta \tau$, °C/c	Δt_{cp} , °C	P_2 , Вт	η , о.е.	$\cos \varphi$, о.е.

В табл. ЛЗ.9.4, 9.5, 9.6: d_1, d_2 – диаметры индуктора (внутренний) и заготовки; $t_o, t_{ц}$ – температура поверхности и центра заготовки; Δt – теплоперепад; I_{ay} – анодный ток в установившемся (горячем) режиме нагрева; $\Delta t / \Delta \tau$ – средняя скорость нагрева; Δt_{cp} – средний теплоперепад; t_1, t_2 – начальная и конечная температуры заготовки.

Глубина проникновения тока

$$z_a = 503 \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2 \cdot f}}$$

Значение ρ_2 принять по табл. ЛЗ.9.3. Величину μ_2 в холодном режиме определить по величине H (табл. ЛЗ.9.2) на рис. ЛЗ.9.1, в горячем режиме $\mu_2 = 1$. Частота тока $f = 440$ кГц.

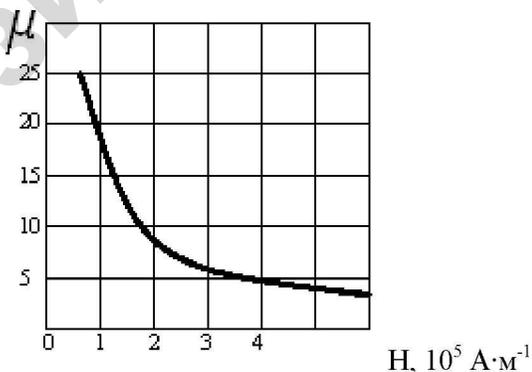


Рис. ЛЗ.9.1. Зависимость магнитной проницаемости сталей от напряженности магнитного поля

Мощность индуктора определяется по формуле $P_1 = U_a P_a / \eta_k$, где $\eta_k = 0,7$ – КПД генераторного блока.

Мощность, поглощаемая заготовкой, установленная методом калориметрирования:

$$P_2 = \frac{(m_B C_B + m_2 C_2)(t_{B2} - t_{B1})}{\tau},$$

где $C_B = 4190$ кДж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воды.

Температурный перепад и средний температурный перепад:

$$\Delta t = t_0 - t_{ц}, \quad \Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}}{2}.$$

Скорость нагрева

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_2 - t_1}{\tau}.$$

Коэффициент мощности определить в горячем режиме по формуле

$$\cos \varphi = \frac{r_n}{z_n} = \frac{503}{a} \sqrt{\frac{\rho_2 \mu_2}{2f}}.$$

Коэффициент полезного действия

определить приближенно по экспериментальным данным и по формулам:

$$\eta_{\text{перед}} = \frac{P_2}{P_1} = \left(1 - \frac{r_1}{r_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}} \right); \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{I_{аср} U_a \cos \varphi},$$

где $I_{аср} = 1,25 \cdot I_{ay}$ – средний анодный ток; I_{ay} – табл. ЛЗ.9.4; P_1 – активная мощность, подводимая к индуктору.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Эскиз цилиндрического индуктора.
3. Таблицы с результатами измерений.
4. Графические зависимости: $U_1, H, P_1(U_a); t_o, t_{ц}(\tau); P_2, \Delta t/\Delta \tau, \eta, \cos \varphi(a)$.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Физические основы индукционного нагрева.
2. Назначение, классификация, конструктивное исполнение индукторов.
3. Основные характеристики системы «индуктор – изделие».
4. Устройство лампового генератора ВЧИ4-10/0,44.
5. Принцип работы генератора ВЧИ4-10/0,44.
6. Настройка генератора ВЧИ4-10/0,44 на оптимальный режим работы.

7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВ

7.1. Особенности и области применения

Диэлектрический нагрев используют для нагрева диэлектриков и полупроводников в переменном электрическом поле. Нагрев происходит вследствие поляризации и протекания токов электрического смещения, что приводит к нагреву.

Диэлектрический нагрев является прямым и обладает следующими преимуществами:

равномерностью нагрева всего объема материала;

селективностью (избирательностью) нагрева, так как наибольшее количество теплоты выделяется в тех частях материала, которые обладают наибольшими диэлектрическими потерями. Например, влага в древесине, высокопроводящие фазы в керамике, клеевые растворы, вредные насекомые в злаковых культурах;

высокой концентрацией мощности, позволяющей существенно изменять, рационализировать и интенсифицировать процесс нагрева, снижать его энергоемкость.

При диэлектрическом нагреве используют частоты 5 МГц – 1 ГГц. На частотах 5 – 300 МГц нагрев осуществляют в электрическом поле конденсатора. Токами сверхвысокой частоты 1–5 ГГц нагревают в электромагнитном поле, создаваемом в волноводах или объемных резонаторах, куда помещают нагреваемый материал.

Принципиальная схема установки диэлектрического нагрева представлена на рис. 7.1.

Диэлектрический нагрев применяют для сушки (семян, зерна, чая, фруктов и т. д.), пастеризации и стерилизации сред (молока, соков и т. д.), вулканизации резины, нагрева пластмасс и др. Классификация основных технологий диэлектрического нагрева представлена на рис. 7.2.

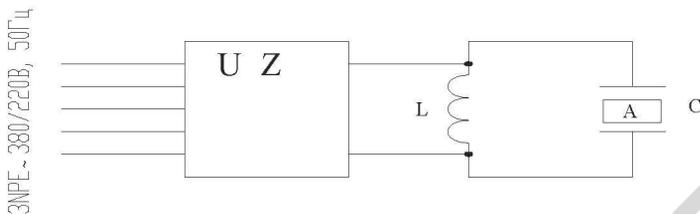


Рис. 7.1. Принципиальная схема установки диэлектрического нагрева: UZ – источник питания, $L-C$ – колебательный контур; C – рабочий конденсатор; A – нагреваемый материал



Рис. 7.2. Классификация технологии диэлектрического нагрева

7.2. Физические основы диэлектрического нагрева

В диэлектриках электроны и положительные ионы связаны между собой внутриаомными и внутримолекулярными силами, а свободные заряды практически отсутствуют. При помещении диэлектрика в электрическое поле, его частицы испытывают механическое воздействие, смещающее положительные заряды в одну сторону, а отрицательные – в другую. В результате центры электрического действия положительных и

отрицательных частиц не совпадают и образуются диполи – системы двух равных, но противоположных по знаку зарядов $+q$ и $-q$, смещенных друг относительно друга на расстояние l (рис. 7.3). Такой диэлектрик называют *поляризованным*. Различают несколько видов поляризации: электронную, ионную, дипольную, релаксационную, спонтанную и др., отличающихся видом электрических диполей и характером смещения в электрическом поле.

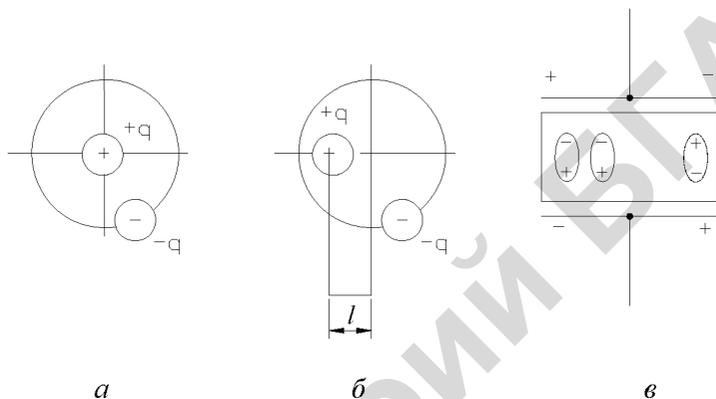


Рис. 7.3. Воздействие электрического поля на диэлектрик: а – неполяризованный; б – поляризованный; в – смещение зарядов

Направление поляризации меняется с частотой поля (рис. 7.3, в). Поляризация сопровождается потерями энергии, вызванными трением между молекулами (потери трения) и перемещением диполей (дипольные потери), что вызывает нагрев и приводит к запаздыванию смещения молекул по отношению к внешнему полю. С ростом частоты отставание увеличивается, пока не достигнет максимума. Дальнейшее увеличение частоты из-за вязкости среды приводит к обратному результату – уменьшению поляризации, что снижает диэлектрическую проницаемость вещества.

При отсутствии потерь ток опережает напряжение на угол 90° . Если поляризация сопряжена с потерями, то ток опережает напряжение на угол φ меньший 90° . Разница $\delta = 90 - \varphi$ характеризует потери в диэлектрике и называется *углом диэлектрических потерь* (рис. 7.4).

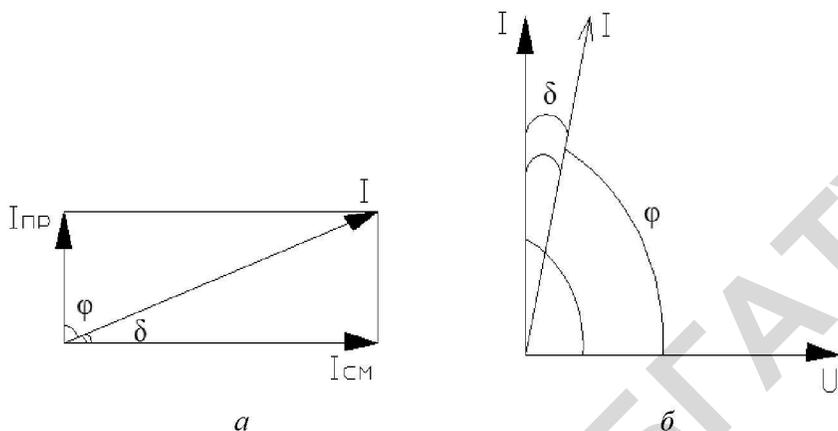


Рис. 7.4. Векторная диаграмма:
 а – тока и напряжения, б – токов

Проходящий через диэлектрик ток I имеет две составляющие:
 ток смещения

$$I_{см} = j\omega CU; \quad (7.1)$$

ток проводимости

$$I_{пр} = GU, \quad (7.2)$$

где U – напряжение между пластинами конденсатора, В; ω – угловая частота, рад/с; C – емкость конденсатора, Ф; G – проводимость диэлектрика, См.

Полный ток

$$\bar{I} = \bar{I}_{пр} + \bar{I}_{см} = (G + j\omega C) U. \quad (7.3)$$

Мощность, выделяемая в диэлектрике,

$$P = UI \cos \varphi. \quad (7.4)$$

Так как в диэлектриках ток смещения преобладает над током проводимости ($I_{см} \gg I_{пр}$), то током проводимости можно пренебречь ($I_{пр} \approx 0$) и $I \approx I_{см}$ (рис. 7.4), т. е.

$$\cos\varphi = I_{\text{пр}}/I = I_{\text{пр}}/I_{\text{см}} = \text{tg}\delta. \quad (7.5)$$

С учетом формул (7.1), (7.2), (7.5), мощность, выделяемая в диэлектрике,

$$P = UI \text{tg} \delta = \omega CU^2 \text{tg}\delta. \quad (7.6)$$

Электрическая емкость плоского конденсатора, Ф,

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 s/d, \quad (7.7)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, s – площадь пластины конденсатора, м²; d – расстояние между пластинами конденсатора, м.

Угловая частота, рад/с,

$$\omega = 2\pi f. \quad (7.8)$$

Объем диэлектрика, м³,

$$V = sd. \quad (7.9)$$

Напряженность электрического поля, В/м,

$$E = U/d. \quad (7.10)$$

С учетом формул (7.6) – (7.10) удельная объемная мощность (мощность, выделяемая в единице объема диэлектрика), Вт/м³,

$$p_V = P/V = 0,555 \cdot 10^{-10} \varepsilon f E^2 \text{tg}\delta. \quad (7.11)$$

Произведение $\varepsilon \text{tg}\delta = k$ – фактор потерь, отражает электрофизические свойства диэлектрика и зависит от его температуры и частоты поля. Следовательно, удельная мощность, выделяемая в диэлектрике, зависит от свойств диэлектрика (ε , $\text{tg}\delta$) и параметров электрического поля f , E .

7.3. Выбор установок диэлектрического нагрева

Установки диэлектрического нагрева выбирают по технологическому назначению, мощности, рабочей частоте генератора и допустимой напряженности электрического поля.

Исходными данными являются: вид технологического процесса (нагрев, сушка, пастеризация и т. п.); вид материала и его электрофизические свойства; производительность или масса материала; время обработки и т. д.

Мощность генератора, Вт,

$$P_{\Gamma} = P_{\text{конд}} / (\eta_{\kappa} \eta_{\text{л}}), \quad (7.12)$$

где $\eta_{\kappa} = 0,65-0,70$ – КПД, учитывающий потери в колебательном контуре; $\eta_{\text{л}} = 0,90-0,95$ – КПД линии, соединяющий генератор с колебательным контуром; $P_{\text{конд}}$ – мощность, подводимая к конденсатору, Вт.

$$P_{\text{конд}} = mC(t_2 - t_1) / (\tau \eta_{\Gamma}) = m_{\tau} C(t_2 - t_1) / \eta_{\Gamma}, \quad (7.13)$$

где m – масса материала, кг; m_{τ} – производительность, кг/с; C – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С); t_2, t_1 – конечная и начальная температуры нагрева, °С; τ – время нагрева, с; η_{Γ} – тепловой КПД установки.

Допустимая напряженность электрического поля, В/м,

$$E_{\text{доп}} = E_{\text{пр}} / (1,5 - 2), \quad (7.14)$$

где $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность материала диэлектрика, В/м.

Для установок диэлектрического нагрева частоту f выбирают по условию

$$f_{\text{min}} \ll f \ll f_{\text{max}}, \quad (7.15)$$

где $f_{\text{min}}, f_{\text{max}}$ – допустимые минимальная и максимальная частоты, Гц.

Минимальное значение частоты

$$f_{\text{min}} = \frac{1,8 \cdot 10^{10} \rho C}{\text{ctg} \delta \eta_{\Gamma} E^2} \cdot \frac{t_2 - t_1}{\tau}, \quad (7.16)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; $E \ll E_{\text{доп}}$ – напряженность электрического поля, В/м; ρ – плотность материала, кг/м³; C – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С).

Максимальное значение частоты

$$f_{\max} = 1/(2\pi \sqrt{L_{\min} C_{\min}}), \quad (7.17)$$

где L_{\min} , C_{\min} – минимальные значения индуктивности, Гн, и емкости, Ф, колебательного контура.

Технические характеристики некоторых диэлектрических установок приведены в прилож. 22.

7.4. Проверочный расчет рабочего конденсатора

Проверочный расчет рабочего конденсатора производят для установления возможности размещения загрузки, определения наибольшего значения напряженности электрического поля и действительной мощности установки.

Необходимым условием размещения материала является

$$V_{\text{к}} > V_{\text{м}}, \quad (7.18)$$

где $V_{\text{к}}$ – рабочий объем межэлектродного пространства, м³; $V_{\text{м}}$ – объем единовременной загрузки материала, м³.

Это условие уточняют применительно к конструкции и схеме конденсатора (табл. 7.1).

Напряженность поля в материале E также определяют по формулам табл. 7.1. Должно соблюдаться условие

$$E < E_{\text{доп}}. \quad (7.19)$$

Мощность загруженного конденсатора, Вт,

$$P'_{\text{конд}} = pV_{\text{м}}, \quad (7.20)$$

где p_V – удельная объемная мощность, определяемая по формуле (7.11), Вт/м³.

Для точного расчета фактическое значение $P''_{\text{конд}}$ определяют по эмпирическим параметрам нагруженного конденсатора

$$P''_{\text{конд}} = I^2 r = U^2 r / Z = U^2 r [(1/\omega C)^2 + r^2]^{-1/2}, \quad (7.21)$$

где U – анодное напряжение, В; I , r , C , Z – сила тока, А, активное сопротивление, Ом, емкость, Ф, полное сопротивление, Ом, нагруженного конденсатора.

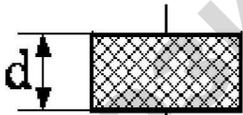
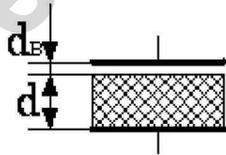
Действительная скорость нагрева

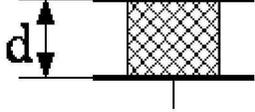
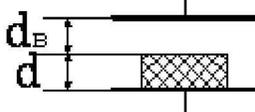
$$(\Delta t/\tau)''' = (\Delta t/\tau)' (P''_{\text{конд}} / P_{\text{конд}}), \quad (7.22)$$

где $(\Delta t/\tau)'$ – скорость нагрева, принятая при расчете мощности $P_{\text{конд}}$.

Таблица 7.1

Формулы для расчета параметров рабочего конденсатора и напряженности поля

Схема рабочего конденсатора	Емкость	Активное сопротивление	Напряженность электрического поля
1	2	3	4
	$C = \epsilon_0 \epsilon s / d$	$r = \frac{d \operatorname{tg} \delta}{\omega \epsilon \epsilon_0 s}$	$E_M = U/d$
	$C = \epsilon_0 \epsilon s / (\epsilon d_B + d)$	$r = \frac{d \operatorname{tg} \delta}{\omega \epsilon \epsilon_0 s}$	$E_M = U/(d + \epsilon d_B)$ $E_B = \epsilon E_M$

1	2	3	4
	$C = \frac{\varepsilon}{d} [(\varepsilon - 1)s_M + s]$	$r = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta s_M}{\omega d C^2}$	$E_M = E_B = \frac{U}{d}$
	$C = \frac{\varepsilon_0}{d + d_B} \left[s + \frac{d(\varepsilon - 1)s_M}{d + \varepsilon d_B} \right]$	$r = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta s_M}{\omega C^2 (d + \varepsilon d_B)}$	$E_M = \frac{U}{(d + \varepsilon d_B)}$ $E_B = \varepsilon E_M$ $E_{B2} = \frac{U}{(d + d_B)}$
	$C = 2\pi l \varepsilon \varepsilon_0 \ln(R_2 / R_1)$	$r = \frac{\operatorname{tg} \delta \ln(R_1 / R_2)}{2\pi \omega l \omega \varepsilon \varepsilon_0}$	$E_M = \frac{U}{\rho \ln R_2 / R_1}$

Примечание. U – напряжение на рабочем конденсаторе, B , s – площадь поверхности пластины конденсатора, m^2 ; s_M – площадь поверхности пластины конденсатора, занятой нагреваемым материалом, m^2 ; l – длина цилиндрического электрода (перпендикулярно площади чертежа), m ; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума

Контрольные вопросы

1. Какие физические явления лежат в основе диэлектрического нагрева?
2. Укажите особенности и преимущества диэлектрического нагрева.
3. Назовите основные области применения установок диэлектрического нагрева.
4. Какие частоты используют для диэлектрического нагрева?
5. Изложите методику приближенного расчета индуктора.
6. Как определить объемную мощность, выделяемую в диэлектрике?
7. Охарактеризуйте критерий выбора установок диэлектрического нагрева.

8. Укажите особенности эксплуатации установок диэлектрического нагрева.

9. Укажите особенности нагрева в поле сверхвысоких частот.

10. Номинальная частота установки диэлектрического нагрева f_n , объемная мощность – p_v . Как изменятся значения частоты и объемной мощности при увеличении расстояния между пластинами конденсатора в 2 раза?

11. Как определить необходимую частоту лампового генератора для нагрева диэлектрика по заданным технологическим условиям на нагрев?

12. Определить мощность, выделяемую в рабочем конденсаторе, при нагреве деревянного бруска площадью 2 м^2 и толщиной $0,05 \text{ м}$. Относительная диэлектрическая проницаемость дерева $\varepsilon = 6$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,25$, частота 100 МГц , напряженность электрического поля $E = 20 \text{ кВ/м}$.

Практическое занятие 10

Выбор установки диэлектрического нагрева и проверочный расчет рабочего конденсатора

Задача занятия. Выбрать установку диэлектрического нагрева по назначению, исполнению, колебательной мощности, частоте, производительности и произвести ее проверочный расчет с целью установления возможности размещения загрузки, определения наибольшего значения напряженности электрического поля и действительной мощности.

Задание для самостоятельной подготовки

По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и литературе [3], изучить методику выбора установки диэлектрического нагрева, расчетные формулы и способы определения необходимых для проведения расчетов справочных значений параметров.

Индивидуальные задания

Задача 11.1. Выбрать установку для нагрева гранулированного реакотпласта, имеющего $\varepsilon = 2,2$; $\text{tg}\delta = 6 \cdot 10^{-3}$; $E_{\text{пр}} = 5 \cdot 10^5 \text{ В/м}$; $\rho = 1150 \text{ кг/м}^3$; $C = 1150 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$.

Таблица ПЗ.10.1

Исходные данные к задаче 10.1

Номер варианта	Единовременная нагрузка m , кг	Начальная температура материала t_1 , °C	Конечная температура материала t_2 , °C	Скорость нагрева $\Delta t / \tau$, °C/c	Минимальное расстояние между обкладками конденсатора, мм	Величина воздушного зазора d_B , мм	Толщина слоя материала d , мм	Размер пластин рабочего конденсатора, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,6	15	110	2,0	20	5,0	15,0	260×260
2	0,55	12	100	2,5	22	5,5	14,5	255×255
3	0,5	17	115	3,0	24	6,0	14,0	250×250
4	0,45	10	120	3,5	26	6,5	13,5	245×245
5	0,4	13	125	4,0	28	7,0	13,0	240×240
6	0,55	15	100	2,0	22	5,5	14,5	255×255
7	0,5	12	115	2,5	24	6,0	14,0	250×250
8	0,45	17	120	3,0	26	6,5	13,5	245×245
9	0,4	10	125	3,5	28	7,0	13,0	240×240
10	0,6	13	110	4,0	20	5,0	15,0	260×260
11	0,5	15	115	2,0	24	6,0	14,0	250×250
12	0,45	12	120	2,5	26	6,5	13,5	245×245
13	0,45	15	125	3,0	28	7,0	13,0	240×240
14	0,4	17	100	3,5	20	5,0	15,0	260×260
15	0,6	10	100	4,0	22	5,5	14,5	255×255
16	0,4	15	120	2,0	26	6,5	13,5	245×245
17	0,6	17	125	2,5	28	7,0	13,0	240×240
18	0,55	13	100	3,0	20	5,0	15,0	260×260
19	0,4	12	110	3,5	22	5,5	14,5	255×255

1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	0,55	10	115	4,0	24	6,0	14,0	250×250
21	0,6	12	125	2,0	28	7,0	13,0	240×240
22	0,55	17	110	2,5	20	5,0	15,0	260×260
23	0,5	10	110	3,0	22	5,5	14,5	255×255
24	0,5	13	115	3,5	24	6,0	14,0	250×250
25	0,45	13	120	4,0	26	6,5	13,5	245×245

Вопросы для подготовки к защите выполненного задания

1. Критерии выбора установок диэлектрического нагрева.
2. Исходные данные для расчета установок диэлектрического нагрева.
3. Как определяют колебательную мощность генератора?
4. Как определяют напряженность электрического поля в материале при диэлектрическом нагреве?
5. Как определяют минимальное и максимальное значения частоты при диэлектрическом нагреве?
6. Задача проверочного расчета рабочего конденсатора.

Лабораторное занятие 10

Исследование установки диэлектрического нагрева

Цель работы. Изучить устройство, принцип действия, электрическую схему установки ВЧД2-2,5/81, определить энергетические параметры диэлектрического нагрева.

Задачи работы

1. Изучить устройство, принцип действия, электрическую схему установки ВЧД2-2,5/81.
2. Изучить принцип генерирования токов высокой частоты ламповыми преобразователями.
3. Определить мощность и КПД установки, расход электроэнергии на сушку, распределение температуры по толщине образца.

Общие сведения. По теоретическому материалу, приведенному в настоящей главе и рекомендуемой литературе, изучить устройство, принцип действия и характеристики установки электрического нагрева. Методику исследования изучить по изложенному выше материалу и литературе [4].

Задание на самостоятельную подготовку

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

Методика выполнения работы

1. Пункты 1 и 2 задач работы выполняют при подготовке к лабораторной работе, используя теоретический материал, приведенный в настоящей главе.

2. После проверки руководителем занятий знания устройства, принципа действия и правил обслуживания, с его разрешения включить установку под напряжение и прогреть на холостом ходу в течение не менее 5 минут и выключить.

3. Работу установки изучают на примере нагрева деревянных брусков с целью их сушки. Для этого необходимо:

бруски предварительно увлажнить, лишнюю влагу снять;

измерить путем взвешивания начальную массу образца m_1 и с помощью потенциометра определить его температуру t_1 ;

поместить образец в рабочий конденсатор, закрыть камеру, поставить переключатель $SA2$ в положение «Авт» и кнопкой $SB1$ «Нагрев» подать напряжение на генератор.

4. В процессе нагрева (сушки) через каждые 20 с, начиная с момента включения, измерять и заносить в табл. 9.1 указанные в ней величины. Нагрев производить в течение 4–5 минут. После окончания нагрева, не извлекая образец из камеры, измерить температуру t_2 внутри образца и на его поверхности $t_{2п}$, а также температуру t_k нижней пластины конденсатора. Извлечь образец, взвесить его и данные записать в табл. ЛЗ.10.2.

Таблица ЛЗ.10.2

Нагрев образца № 1 со стабилизацией анодного тока

τ , с	10	20	40	60	
U , В					
I , А					
$P_{\text{потр}}$, Вт					
I_a , А					

В табл. ЛЗ.10.1: τ – время от начала опыта, с; U – напряжение питания, В; I , $P_{\text{потр}}$ – ток и мощность, потребляемая из сети, А, Вт; I_a – анодный ток, А.

Повторить опыт с образцом № 2 в режиме нагрева без стабилизации анодного тока. Результаты представить в табл. ЛЗ.10.3 и ЛЗ.10.4, аналогичных табл. ЛЗ.10.1 и ЛЗ.10.2.

Таблица ЛЗ.10.2

Результаты измерений и вычислений (образец № 1)

Измерено							Вычислено										
τ , с	m_1 , кг	m_2 , кг	t_1 , °С	t_2 , °С	$t_{2п}$, °С	$t_{к}$, °С	$\Delta\omega$, кг	$P_{\text{пол}}$, Вт	$P_{\text{потр}}$, Вт	I , А	η	$\cos\phi_T$	P_v , Вт/м ³	E_{M_6} , В/м	a , кВт·ч/кг		

В табл. ЛЗ.10.2: τ – продолжительность нагрева (сушки) с; m_1 и m_2 – масса влажного и высушенного образцов, кг; t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры образца, °С; $t_{2п}$ – температура поверхности образца в конце нагрева, °С; $t_{к}$ – температура нижней пластины конденсатора, °С; $\Delta\omega$ – количество удаленной влаги, кг; $P_{\text{пол}}$ – полезная мощность, израсходованная на нагрев образца и испарение влаги, Вт; $P_{\text{потр}}$, I – средние за период нагрева значения потребляемой мощности и тока:

$$P_{\text{потр}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_{\text{потр}}(\tau) d\tau;$$

$$I = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} I(\tau) d\tau,$$

где $P_{\text{потр}}$, I – определяют путем графического интегрирования кривых $P_{\text{потр}}(\tau)$, $I(\tau)$, η , $\cos\varphi$ – полный КПД и коэффициент мощности установки; η_T – тепловой КПД рабочего конденсатора; P_v – удельная объемная мощность, выделяемая в древесине, Вт/м³; E_M – напряженность электрического поля в древесине, В/м; a – удельный расход электроэнергии на испарение влаги, кВт·ч/кг.

Количество удаленной влаги

$$\Delta\omega = m_1 - m_2.$$

Полезная мощность на нагрев образца и испарение влаги

$$P_{\text{пол}} = \frac{\Delta\omega \left[C_v (t_2 - t_1) + q \right] + m_2 C_d (t_2 - t_1)}{\tau},$$

где $C_v = 4190$ Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость воды; $C_d = 1760$ Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость древесины; q – удельная теплота испарения воды ($2,96 \cdot 10^6$ Дж/кг).

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}}};$$

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{пол}}}{UI};$$

$$\eta_T = \frac{P_{\text{пол}}}{P_v \cdot V},$$

где V – объем образца, м³; P_v вычисляют по формуле $P_v = 0,555 \cdot 10^{-10} \text{tg}\delta f E^2$, приняв для древесины следующие средние за время нагрева значения: $\epsilon \approx 2$; $\text{tg}\delta \approx 0,08$.

Напряженность поля в древесине приближенно равна:

$$E_M = \frac{U}{d_M + \epsilon d_B},$$

где U – напряжение, подводимое к обкладкам конденсатора (5000 В); $d_M = 40 \cdot 10^{-3}$ м – толщина образца древесины; $d_B = 10 \cdot 10^{-3}$ м – величина воздушного зазора между образцом и второй обкладкой конденсатора.

Сумма

$$d = d_M + d_B$$

представляет собой расстояние между обкладками конденсатора ($50 \cdot 10^{-3}$ м).

По результатам опытов (табл. ЛЗ.10.1 и ЛЗ.10.2) построить зависимости I , $P_{\text{потр}}$, I_a от τ для образцов № 1 и № 2.

Содержание отчета

1. Цель и задачи работы.
2. Таблицы измерений и вычислений.
3. Графические зависимости.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Физическая природа нагрева диэлектриков в высокочастотном электрическом поле.
2. Принцип работы лампового автогенератора.
3. Принципиальная электрическая схема установки ВЧД2-2,5/81.
4. Факторы, определяющие мощность, выделяющуюся в диэлектрике.
5. Особенности эксплуатации установок диэлектрического нагрева.

8. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОГО И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА

8.1. Классификация источников питания

Источники питания обеспечивают подачу электрической энергии с требуемыми характеристиками к рабочим органам установок (индукторам, конденсаторам и др.). Они включают трансформаторы, выпрямители, инверторы, генераторы частоты и другие преобразовательные устройства, а также устройства регулирования параметров электрической энергии на стороне сети и рабочих органов.

Основной признак классификации источников питания установок индукционного и диэлектрического нагрева – частота, так как частоты разных диапазонов получают принципиально различными способами. В простейшем случае источником питания служит сеть промышленной частоты 50 Гц. В табл. 8.1 приведены частотные диапазоны, используемые при индукционном и диэлектрическом нагреве, области их применения и источники питания установок.

8.2. Особенности эксплуатации установок

Оборудование установок индукционного и диэлектрического нагрева с трансформаторами, двигатель-генераторными, тиристорными и ионными преобразователями или ламповыми генераторами и конденсаторами устанавливаются либо в отдельном помещении, либо в цехе.

Для улучшения использования трансформаторов и преобразователей в контурах индукторов должны устанавливаться конденсаторные батареи. Для облегчения настройки в резонанс конденсаторные батареи в установках со стабилизированной частотой следует разделять на две части – постоянно включенную и регулирующую.

Таблица 8.1

**Диапазоны частот и источники питания установок индукционного
и диэлектрического нагрева**

Частота	Диапазон частот	Способ электронагрева	Источники питания
Промышленная	50 Гц	Индукционный промышленной частоты	Электрическая сеть 50 Гц
Средняя (повышенная)	500 Гц – 20 кГц	Индукционный	Электромашинные, тиристорные и транзисторные преобразователи
Высокая	66 кГц – 5 МГц 1–100 МГц	Индукционный, диэлектрический	Ламповые генераторы
СВЧ	Выше 100 МГц	СВЧ-нагрев	Магнетроны

Взаимное расположение элементов установок должно обеспечивать наименьшую длину токопроводов резонансных контуров в целях уменьшения активного и индуктивного сопротивлений.

Применение кабелей со стальной броней и прокладка проводов в стальных трубах для цепей с частотой до 10 кГц допускается только при обязательном использовании жил одного кабеля или проводов в одной трубе для прямого и обратного направлений тока. При частоте более 10 кГц применение таких кабелей или проводов не допускается.

Двигатели-генераторы установок частоты 8 кГц и более должны снабжаться ограничителями холостого хода, отключающими возбуждение генератора во время длительных пауз между рабочими циклами, когда остановка двигателей-генераторов нецелесообразна.

Установки индукционного и диэлектрического нагрева высокой частоты должны иметь экранирующие устройства для снижения уровня напряженности электромагнитного поля на рабочих местах до значений, определяемых санитарными правилами.

В сушильных камерах диэлектрического нагрева с применением вертикальных сетчатых электродов сетки с обеих сторон проходов должны быть заземлены.

Двери блоков установок индукционного и диэлектрического нагрева высокой частоты должны быть снабжены блокировкой, при которой открывание двери возможно лишь при отключении напряжения всех силовых цепей.

Ширина рабочих мест у щитов управления должна быть не менее 1,2 м, а у нагревательных устройств плавильных печей, нагревательных индукторов (при индукционном нагреве) и рабочих конденсаторов (при диэлектрическом нагреве) – не менее 0,8 м.

8.3. Машинные и статические преобразователи, ламповые генераторы, магнетроны

Электромашинные преобразователи применяют в качестве источников питания установок индукционного нагрева средних частот в диапазоне от 500 Гц до 10 кГц. Преобразователь представляет собой агрегат, включающий асинхронный или синхронный приводной электродвигатель и генератор средней частоты индукторного типа.

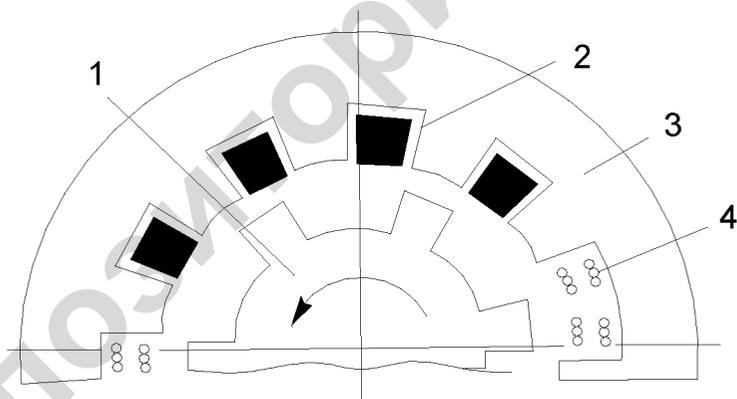


Рис. 8.1. Схема электромашинного преобразователя:
1 – ротор; 2 – статорная обмотка; 3 – статор; 4 – обмотка возбуждения

В пазы статора (рис. 8.1) укладывают рабочую обмотку переменного тока. На статоре также расположена питаемая от отдельного источника постоянного тока обмотка возбуждения, с помощью которой создают магнитное поле, силовые линии которого направ-

лены нормально по отношению к воздушному зазору и замыкаются через рабочую обмотку, зазор и ротор. На роторе, имеющем зубчатую поверхность, обмоток нет. Число зубцов статора, обычно, в 2 раза больше зубцов ротора. При вращении ротора его зубцы и впадины устанавливаются против паза статора, в котором расположена обмотка возбуждения. Вследствие чего сопротивление магнитному потоку периодически изменяется с частотой, пропорциональной числу зубцов z ротора и его частоте вращения n : при совпадении зубцов ротора и статора сопротивление минимально, при совпадении пазов – максимально. Возникает пульсирующий магнитный поток, пересекающий рабочую обмотку и индуцирующий в ней ток с частотой, Гц,

$$f = \frac{zn}{60} \quad (8.1)$$

Преимущества электромашинных преобразователей: надежность; устойчивость к перегрузкам по току; большая глубина регулирования. Недостатки: невысокий КПД (0,7–0,9); инерционность; сложность ремонта; наличие вращающихся частей; значительные габариты; шум при работе.

Статические (тиристорные) преобразователи выпускают серий ТПЧ, СЧГ для частот 0,5–10 кГц мощностью 160–3200 кВт.

Тиристорные преобразователи состоят из полупроводникового выпрямителя и тиристорного инвертора, к выходу которого подключают индуктор и конденсаторную батарею.

Используют две основные схемы инверторов: параллельно-последовательную и с удвоением частоты и обратными диодами. В параллельно-последовательной схеме (рис. 8.2, а) в диагональ моста, образованного тиристорами $VT1$ – $VT4$, включена нагрузка EK с компенсирующим и коммутирующим конденсаторами $C1$ и $C2$. Схема проста и имеет большой КПД, однако для надежной работы требует специальных систем пуска и управления. По этой схеме и ее вариантам (последовательный и параллельный инверторы тока) выполнены преобразователи типа ТПЧ мощностью 500–800 кВт, частотой 0,5–2,5 кГц, при 250 кВт – до 8 кГц.

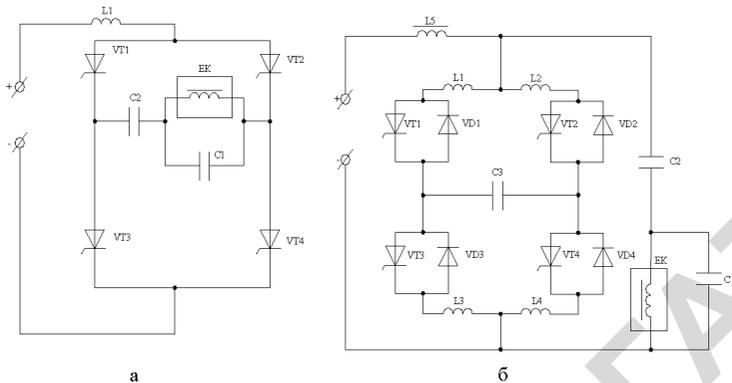


Рис. 8.2. Принципиальная электрическая схема инвертора тока:
а – параллельно-последовательного; *б* – с удвоением частоты и обратными диодами

В схеме с удвоением частоты и обратными диодами (рис. 8.2, *б*) нагрузочный контур, образованный индуктором *EK*, компенсирующим конденсатором *C1* и разделительным *C2*, подключен параллельно мосту, плечи которого состоят из тиристоров *VT1–VT4*, диодов *VD1–VD4* и катушек индуктивностей *L1–L4*. По схеме (рис. 8.2, *б*) выполнены преобразователи малой и средней мощности (до 100 кВт) и частотой 2,5–10 кГц и преобразователи типа СЧГ.

У большинства серийных преобразователей выходное напряжение составляет 800 или 400 В, также предусмотрено изменение частоты в пределах 20–30 %.

Статические преобразователи не содержат движущихся частей, имеют более высокий КПД (0,92–0,94), более устойчивы в работе, обеспечивают возможность изменения частоты, отличаются малой инерционностью и постоянной готовностью к работе. Недостатками являются узкий диапазон нагрузок, сравнительно высокая стоимость, малая перегрузочная способность. Однако благодаря отмеченным преимуществам статические преобразователи более перспективны, чем электромашинные.

Ламповые генераторы – единственные источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева в диапазоне частот от 66 кГц до 100 МГц и мощностью от сотен Вт до единиц МВт.

Ламповые генераторы для диэлектрического нагрева принципиально не отличаются от генераторов для индукционного нагрева и

нередко выполняются на одних и тех же генераторных лампах. Существующие между ними различия обусловлены разными диапазонами генерируемых частот. В технике высокочастотного нагрева частотный диапазон индукционного нагрева относят к «низким» частотам, а диэлектрического нагрева, у которого частоты на 2–3 порядка выше, – к «высоким». В диапазоне высоких частот (выше 5 МГц) на работу генераторов заметно влияют паразитные емкости и индуктивности монтажа, а также межэлектродные емкости лампы: катод–анод, сетка–катод, сетка–анод, что усложняет настройку генератора и затрудняет его работу.

Питание током промышленной частоты осуществляют только в установках небольшой мощности (до 20 кВт). Генераторы мощностью выше 20 кВт изготавливают в виде четырех отдельных блоков:

- 1 – силовой трансформатор, повышающий напряжение до 6–9 кВ;
- 2 – выпрямитель (выполнен на диодах, тиристорах, тиратронах).

Преобразует переменный ток в постоянный;

3 – генераторный блок (в зависимости от мощности состоит из одной или нескольких трехэлектродных ламп). Служит для преобразования постоянного тока в ток высокой частоты;

4 – нагрузочный блок. Включает трансформатор, индуктор или рабочий конденсатор.

- Высокочастотные ламповые генераторы выпускают двух типов:
- с независимым возбуждением;
 - с самовозбуждением (автогенераторы).

Чаще используют последние. Принципиальная электрическая схема лампового генератора для индукционного нагрева представлена на рис. 8.3.

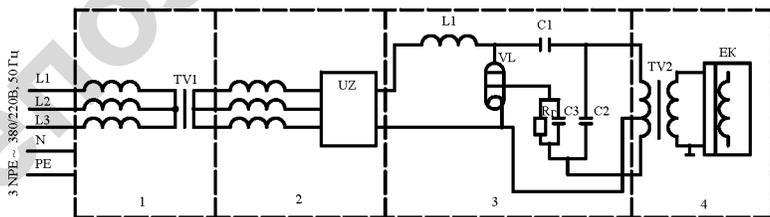


Рис. 8.3. Принципиальная электрическая схема лампового генератора для индукционного нагрева:

- 1 – силовой трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – генераторный блок;
- 4 – нагрузочный блок

Для понимания работы генератора важно иметь представление о процессах, происходящих в колебательном контуре. Рассмотрим работу идеального колебательного контура, состоящего из идеальной катушки индуктивности L и конденсатора C (рис. 8.4). Потери в таком контуре отсутствуют.

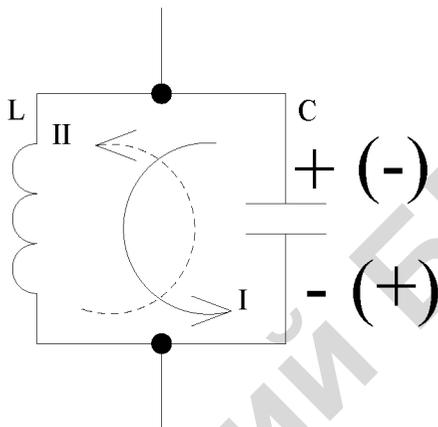


Рис. 8.4. Колебательный контур

Колебательный процесс в контуре заключается во взаимном преобразовании электрического и магнитного полей. При подаче напряжения от источника питания происходит зарядка конденсатора C , энергия которого определяется

$$W_c = CU^2/2. \quad (8.2)$$

При достижении напряжения на конденсаторе максимального значения, он начинает разряжаться и его электрическое поле будет уменьшаться. По цепи потечет ток, от чего в катушке индуктивности появится магнитное поле. Через некоторое время, равное четверти периода колебания, конденсатор разрядится полностью и электрическое поле исчезнет совсем. Но магнитное поле при этом достигнет максимума. Следовательно, энергия электрического поля превратится в энергию магнитного поля катушки

$$W_L = LI^2/2. \quad (8.3)$$

Далее магнитное поле начнет исчезать, так как нет тока, его поддерживающего, что вызовет появление ЭДС самоиндукции и тока, который будет стремиться поддержать исчезающее магнитное поле и будет направлен противоположно первоначальному току. Поэтому конденсатор будет перезаряжаться и между его пластинами вновь появится электрическое поле противоположного направления.

Через время, равное половине периода колебания, магнитное поле исчезнет совсем, а электрическое достигнет максимума, то есть энергия магнитного поля вновь превратится в энергию электрического поля.

Далее конденсатор вновь будет разряжаться на катушку и процесс повторится.

Для идеального случая, когда сопротивление контура равно 0, указанный процесс периодического превращения электрической энергии в магнитную и обратно будет продолжаться бесконечно долго, образуются незатухающие колебания. Частота незатухающих колебаний

$$f = 1/\sqrt{LC}. \quad (8.4)$$

В действительности сопротивление контура не равно 0, так как соединительные провода и катушка индуктивности обладают активным сопротивлением. Поэтому энергия, первоначально запасенная в контуре, будет расходоваться на нагрев, так что интенсивность электрических колебаний постепенно уменьшается и в конце концов колебания прекратятся (рис. 8.5).

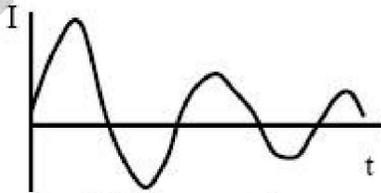


Рис. 8.5. Изменение колебаний энергии в колебательном L - C -контуре

Для нагрева материала необходимо иметь незатухающие колебания, которые получают с помощью ламповых генераторов.

Колебательный контур включен в цепь анода электронной лампы. В нагревательных генераторах чаще всего используют трех-

электродные лампы, которые по сравнению с тетрами и пентодами более просты и обеспечивают достаточную надежность и устойчивость генерации.

Принцип действия генератора заключается в следующем. При возникновении колебаний в колебательном контуре $C2-L2$ (рис.8.3) между обкладками конденсатора $C2$ возникает переменное напряжение. Такое же напряжение возникает между сеткой и катодом лампы VL , так как они соединены с обкладками конденсатора параллельно. Вследствие этого в цепи анода появляется переменный ток, протекающий через колебательный контур. Контур получит дополнительную энергию и ее затухание уменьшится. Получаемая энергия больше, чем затрачиваемая в контуре, поэтому колебания приобретают незатухающий характер.

Разделительный конденсатор $C1$ служит для предотвращения закорачивания источника питания UZ на катушку индуктивности $L2$ и не препятствует прохождению переменного тока, но является фильтром для постоянного.

Катушка индуктивности $L1$ служит для защиты питающей сети от токов высокой частоты, получаемых в контуре $C2-L2$.

Сеточный конденсатор $C3$ и сопротивление R_{Γ} (сопротивление гридлика) позволяют поддерживать на сетке небольшой отрицательный потенциал, тем самым устраняя ток сетки. Конденсатор $C3$ шунтирует R_{Γ} по высокой частоте, предохраняя его от нагрева током высокой частоты.

Помимо генераторов с автотрансформаторной обратной связью применяют генераторы с емкостной обратной связью (рис. 8.6).

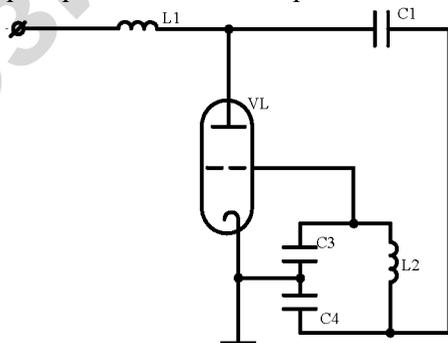


Рис. 8.6. Принципиальная электрическая схема генератора с емкостной обратной связью

Генераторы для нагрева имеют изменяющуюся в процессе нагрева нагрузку, вызванную непостоянством электрофизических свойств нагреваемых материалов. Для согласования загрузки с работой генератора в электрических схемах предусматривают регулирование резонансного сопротивления контура и изменение напряжения на сетке. Осуществляют это путем введения дополнительных конденсаторов или катушек индуктивностей, а так же переключением анодного, катодного и сеточного зажимов, соединяющих контур с лампой.

Ламповые генераторы для диэлектрического нагрева выпускают на более высокие частоты (1–100 МГц). Они состоят в основном из тех же элементов, что и генераторы для индукционного нагрева, но в отличие от последних нагрузкой в них является рабочий конденсатор, в который помещают нагреваемый материал.

Магнетроны. Для генерирования токов СВЧ обычные вакуумные триоды и тетроды непригодны. При частотах более 100 МГц уже заметно проявляется механическая инерция электронов, время пробега электрона между электродами лампы становится соизмеримым с периодом колебаний. Это существенно затрудняет управление электронным потоком с помощью управляющего электрода сетки и, следовательно, генерирование высокочастотных колебаний. Возникающие при таких частотах даже небольшие «паразитные» емкости и индуктивности в конструкционных элементах ламп вносят существенные погрешности в режим их работы. Малопригодны для этих целей и обычные колебательные контуры, имеющие на сверхвысоких частотах значительные потери на излучение.

Для устранения помех в радиодиапазоне от СВЧ-генераторов последние работают на частотах 0,461 ГГц, 2,45 ГГц, 5,8 ГГц, 22,1 ГГц.

Наиболее часто в технике СВЧ-нагрева применяют магнетроны непрерывного действия.

Магнетрон (рис. 8.7) представляет собой двухэлектродную лампу, в которой электроны движутся между электродами под действием не только электрического, но и магнитного полей.

Магнетрон состоит из рабочего анодного блока 1, представляющего медный цилиндр с центральным круглым сквозным отверстием и симметрично расположенными сквозными полостями 2, являющимися объемными резонаторами. Каждый из резонаторов соединен щелью с центральным отверстием, в котором расположен

катод 5. Резонаторы образуют кольцевую колебательную систему, которая имеет несколько резонансных частот.

Для стабильной работы магнетрона необходимо, чтобы ближайшая резонансная частота колебаний системы значительно отличалась от рабочей. В магнетронах с одинаковыми резонаторами эта разница не велика. Поэтому ее увеличивают введением связок в виде металлических колец 4, одно из которых соединяет все четные, а другое – все нечетные ламели анода. Либо применяют магнетроны с резонаторами разных размеров.

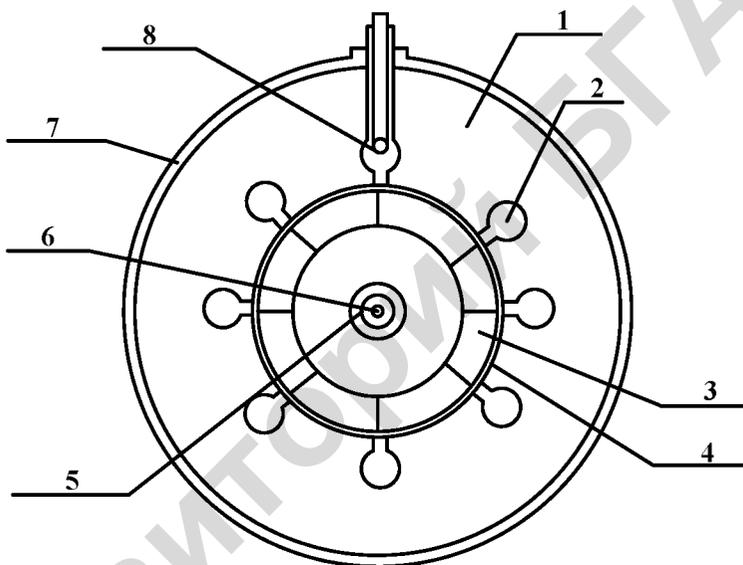


Рис. 8.7. Магнетрон:

- 1 – анодный блок с 8 резонаторами типа «щель – отверстие»; 2 – резонатор;
3 – щель анода; 4 – связка в виде кольца; 5 – катод; 6 – вывод подогрева катода;
7 – радиатор; 8 – петли для вывода СВЧ-энергии; 9 – стержень вывода СВЧ-энергии

В магнетронах движение электронов происходит в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях и в электромагнитном СВЧ-поле. Анодный блок помещают между полюсами рабочего магнита (постоянный магнит или электромагнит). На анод и катод подают постоянное напряжение. Под действием постоянного электрического поля электроны движутся от катода к аноду в радиальном направлении. Под действием магнитного поля электроны

отклоняются от радиального направления и движутся по сложной спиральной траектории (рис. 8.8). В пространстве между катодом и анодом образуется вращающееся электронное облако. Пролетая между щелей объемных резонаторов анода, электроны возбуждают в них высокочастотные колебания (резонатор – это колебательный контур).

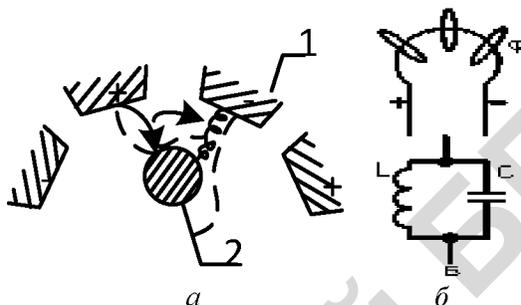


Рис. 8.8. Движение электронов в электромагнитном поле между анодом и катодом (а) и фрагмент резонатора (б):
1 – анод; 2 – катод

Энергия из магнетрона выводится через один из резонаторов с помощью индуктивной петли связи δ и подается к внешней нагрузке.

В общем виде частоту, генерируемую в резонаторе, определяют по формуле

$$f = aNH, \quad (8.5)$$

где N – количество резонаторов; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Магнетроны питаются от источников выпрямленного тока, упрощенная принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 8.9. Схема включает высоковольтный трансформатор $TV1$, трансформатор питания накала магнетрона $TV2$, высоковольтного выпрямителя UZ , электромагнит YA .

Установки малой мощности питаются от источников переменного тока. При этом магнетроны включают во вторичную обмотку высоковольтного трансформатора по схеме двухполупериодного выпрямления. В этом случае каждый из них работает один полупериод.

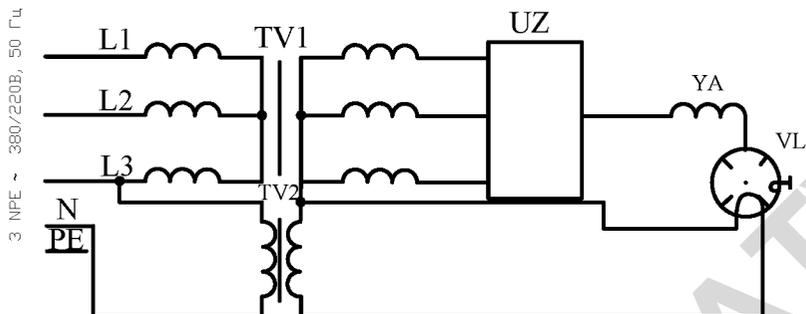


Рис. 8.9. Принципиальная электрическая схема питания магнетрона

Контрольные вопросы

1. Какие источники питания установок индукционного и диэлектрического нагрева существуют?
2. Обоснуйте выбор источника питания индукционной закалочной установки рабочей частотой 8000 Гц.
3. Назовите условия возбуждения лампового автогенератора и оптимального режима его работы.
4. При включении установки с ламповым автогенератором (например, изображенном на рис. 8.6) возможны случаи: генератор не включается; включается, но сразу же отключается; не возбуждается. Назовите причины.
5. Каково назначение элементов $L1$, $C1$, $C3$, R_r в схеме, изображенной на рис. 8.3?
6. Как возникают колебания в колебательном контуре?
7. Опишите устройство и принцип работы магнетрона.

9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВИДЫ НАГРЕВА

9.1. Общая характеристика

Электронно-лучевой, лазерный и ионный нагрев – специальные виды нагрева, позволяющие во многих случаях существенно изменять технологию процессов. Они различаются физической природой, но имеют и общие черты: высокая концентрация мощности; поверхностный ввод энергии, что определяет основные области их применения (сварка, пайка, прошивка отверстий, поверхностная термообработка и др.); воздействие на физико-химические свойства и структуру металлов; сложность оборудования; общность принципов источников питания.

Плотность мощности, Вт/м², при некоторых способах нагрева.

Сварка:

газовая	$5 \cdot 10^8$;
электрическая	10^9 .

Нагрев:

электронно-лучевой	$5 \cdot 10^{13}$;
лазерный, при непрерывном режиме	$5 \cdot 10^{12} - 10^{15}$;
при импульсном режиме	10^{22} .

9.2. Электронно-лучевой, ионный, лазерный нагрев

Принцип *электронно-лучевого* нагрева заключается в следующем. Два электрода – анод и катод размещают в вакууме. При нагреве катода до температуры более 2000 °С, его электроны под действием электрического поля направляются к аноду. В вакууме при давлении $10^{-2} - 10^{-3}$ Па нейтральные и положительно заряженные частицы практически отсутствуют, поэтому ток можно считать чисто электронным.

Ускоряющая электроны разность потенциалов U достаточно велика, поэтому при подходе к аноду, электроны приобретают такую скорость v и кинетическую энергию

$$W_k = m_e v^2 / 2 = eU, \quad (9.1)$$

где m_e , e – масса, кг, и заряд электрона, Кл, что оказываются способными разогревать анод своими ударами. При этом электрическая энергия превращается в тепловую в тонком поверхностном слое анода. Дальнейшее распространение теплоты происходит теплопроводностью.

При увеличении скорости электронов в результате бомбардировки электронным пучком возникает рентгеновское излучение.

Ускоряющее напряжение составляет:

5–15 кВ – при широком не сфокусированном пучке (установки с кольцевым катодом и радиальными пушками);

30–40 кВ – при сфокусированном пучке (установки с аксиальными пушками);

70–100 кВ – при работе с остро сфокусированным пучком (сварочные установки).

Мощность, выделяемая электронным пучком, в месте встречи с материалом

$$P = UI\eta, \quad (9.2)$$

где I – сила тока пучка, А; η – КПД установки.

Величина P изменяется в пределах от десятков до тысячи кВт/м³.

Площадь сечения луча на поверхности – 10^{-3} – 10^{-5} мм².

Электронно-лучевая установка (ЭЛУ) состоит из двух комплексов – энергетического и электромеханического.

Энергетический комплекс включает электронную пушку с блоками питания и управления электронным лучом.

Электронная пушка – устройство, в котором эмитируемый катодом пучок электронов формируется в электрическом и магнитном полях в луч, ускоряется в электрическом поле, выводится через отверстие в аноде и направляется на нагреваемый материал.

По особенностям формирования электронного луча, определяемым технологическим назначением ЭЛУ, электронные пушки подразделяют на аксиальные, радиальные и щелевые.

Наибольшее распространение получили ЭЛУ с аксиальными пушками, образующими сильно сфокусированный электронный луч (рис. 9.1).

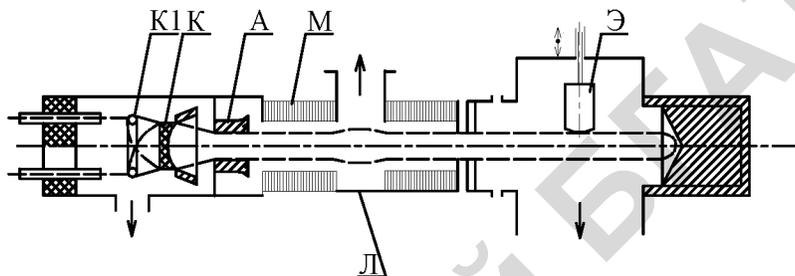


Рис. 9.1. Электронно-лучевая установка с аксиальной пушкой:

К – основной катод, К1 – вспомогательный катод, А – анод, Л – лучепровод,
Э – электрод, М – магнитная фокусировка

Пушка имеет два катода. Основной катод К, представляющий массивную, вогнутую снизу вольфрамовую пластину диаметром 2,4–4 см и нагреваемую до 2300–2500 °С, подвергается электронной бомбардировке от вспомогательного проволочного спирального катода К1 из вольфрама. Между катодами приложено напряжение 3,5–5 кВ. Вспомогательный электрод К1 имеет отрицательный потенциал относительно основного К, поэтому основной служит анодом для вспомогательного электрода.

Анод А имеет специальную форму, служащую для создания электрического поля, которое фокусирует электронный пучок таким образом, чтобы он весь проходил через отверстие анода. Выйдя из анода, электронный пучок попадает в лучепровод Л, соединяющий катодную камеру с плавильной камерой установки. В последней находится электрод Э, который перемещается горизонтально: можно его вводить под пучок или выводить из него. Часть электронов пучка, проходя мимо электрода, попадает на поверхность жидкометаллической ванны.

Так как на своем пути через лучепровод электронный пучок расширяется, производят его дополнительную магнитную фокусировку (сжатие) с помощью магнитных линз (соленоидов).

ЭЛУ с аксиальными пушками работают при напряжении 30–40 кВ, а сварочные ЭЛУ – 70–100 кВ.

Электромеханический комплекс включает рабочую камеру, вакуумную систему, систему позиционирования и перемещения заготовки, системы наблюдения за ходом процесса, системы защиты от рентгеновского излучения и других вспомогательных устройств и механизмов.

Установки электронно-лучевой обработки применяют для сварки, плавки и испарения материалов, термообработке без изменения агрегатного состояния вещества.

Основные технологические особенности электронно-лучевой обработки: высокая концентрация мощности и возможность ее плавного регулирования; высокое качество процесса, обеспечиваемое нагревом материала в вакууме; малоразмерная зона воздействия луча, позволяющая выполнять термические операции на микродеталях; бесконтактность обработки.

К недостаткам установок относят высокую стоимость и сложность эксплуатации, опасность работы из-за наличия рентгеновского излучения, необходимость в высоком вакууме.

Лазеры (оптические квантовые генераторы) – источники оптического излучения, отличающегося высокой когерентностью, узкой направленностью, большой концентрацией мощности, высокой степенью монохроматичности, способностью к фокусированию.

Лазерное излучение является индуцированным. Его испускают возбужденные внешним источником энергии (системой накачки) атомы или молекулы оптически активных веществ, электроны которых при возбуждении переходят на более высокие энергетические уровни, а затем, возвращаясь в первоначальное состояние, отдают приобретенную энергию в виде лавины квантов, тождественных по направлению, частоте, фазе и поляризации фотонам возбуждающей энергии.

Энергия перехода электрона с верхнего на нижний энергетический уровень определяется законом Планка

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu, \quad (9.3)$$

где E_2, E_1 – энергия уровней, между которыми происходит переход; $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; ν – частота переходов, с^{-1} .

Энергия излучения, которую имеет единица объема активного вещества концентрацией частиц N_0 (м^{-3}), зависит от степени инверсии активного вещества – количества N возбужденных атомов, электроны которых могут находиться на верхнем энергетическом уровне. Инверсное состояние можно описать формулой, определяющей распределение атомов по энергетическим уровням,

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (9.4)$$

где E – энергия верхнего уровня; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – температура вещества обычно отрицательная, так как с понижением температуры генерация возникает при меньшей энергии накачки. Инверсное состояние называют также «состоянием с отрицательной температурой».

Энергия излучения, которую имеет единица объема активного вещества, Дж/м³,

$$W = \Delta E \cdot N. \quad (9.5)$$

Для инверсии применяют следующие виды накачки:
оптическую – за счет облучения вещества мощным световым потоком;

электрическую – за счет прохождения через вещество электрического тока;

химическую – за счет химической реакции, в которой принимает участие рабочее вещество.

Лазеры состоят из следующих основных элементов:
рабочего тела, состоящего из комбинации атомов или молекул, для которых может быть создана инверсия;
системы, позволяющей осуществить инверсию;
оптического резонатора;

устройства для вывода энергии из резонатора;
системы управления концентрацией энергии и пространственным положением полученного пучка света;
различных специальных систем, связанных с конкретным применением лазера.

Существующие лазеры по роду материалов, используемых для получения индуцированного излучения, классифицируют следующим образом:

- твердотельные с оптическим возбуждением;
- твердотельные полупроводниковые (инжекционные);
- жидкостные;
- газовые.

Твердотельный лазер с оптическим возбуждением представлен на рис. 9.2. Стержень 2 из плавленного алюминия с добавкой 0,04–0,05 % атомов трехвалентного хрома помещен между зеркалами 1, 3. Зеркало 1 отражает все падающие на него лучи, а зеркало 3 является полупрозрачным. Для накачки энергии используют газоразрядную лампу-вспышку 6, которая для эффективности облучения кристалла помещена вместе с ним внутри отражающего кожуха 4. Питание лампы осуществляют от импульсного высоковольтного источника 5.

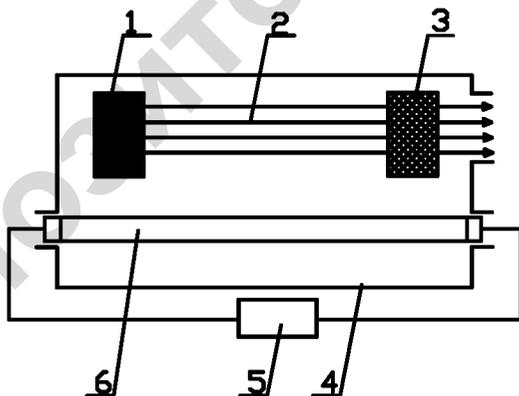


Рис. 9.2. Лазер твердотельный с оптической накачкой:
1, 3 – зеркала; 2 – рубиновый стержень; 4 – отражающий кожух; 5 – источник питания; 6 – газоразрядная лампа-вспышка

Энергия излучения изменяется в пределах от сотых долей до сотен джоулей.

КПД твердотельных лазеров невысок, так как значительная часть подводимой к лампе энергии превращается в теплоту.

Твердотельные полупроводниковые лазеры отличаются от предыдущего типа тем, что в качестве получающего свет вещества используют полупроводники. Недостатками их являются невысокая направленность излучения из-за малых размеров, трудность получения высокой монохромности.

Жидкостные лазеры созданы на основе растворов редкоземельных ионов в ряде неорганических жидкостей, а также растворов органических красителей. В резонатор помещают кювету с раствором. Инверсия осуществляется за счет накачки от импульсных ламп.

Устройство *газовых* лазеров проще рассмотренных. Стеклообразная трубка наполняется специальной газовой смесью. В ее торцы впаивают два электрода, на которые подают напряжение от источника питания. В трубке возбуждается газовый разряд. Для газовых лазеров подбирают специальные активные смеси, в качестве которых используют аргон, неон, криптон, ксенон, смеси гелия и неона, углекислый газ с добавкой азота и гелия. Газовые лазеры изготавливают на атомных, ионных, молекулярных переходах. Наибольшие мощность и КПД имеют лазеры на молекулярных переходах, работающие на углекислом газе.

Основные технологические особенности лазерного нагрева:

наивысшая плотность мощности;

возможность передачи энергии на расстояние, то есть бесконтактный нагрев;

плавность регулирования;

интенсивности излучения.

Технологические особенности и свойства лазерного нагрева во многом совпадают со свойствами электронно-лучевого нагрева, схожи и области их применения. Однако лазерный нагрев имеет свои преимущества: он осуществляется на воздухе и не сопровождается рентгеновским излучением; стоимость установок лазерного нагрева меньше и они проще в обслуживании. Лазерные установки применяют в машиностроении и на ремонтных предприятиях для пайки, сварки, сверления, резки металлов, нанесения покрытий, поверхностной закалки стальных деталей,

оплавления и прошивки отверстий в керамических изделиях, в голографии, для резки и раскроя неметаллических материалов.

Ионный нагрев металлических тел (рис. 9.3) осуществляют потоком положительных ионов низкотемпературной плазмы, создаваемой в вакууме тлеющим электрическим разрядом.

Нагреваемое тело (изделие) помещают в металлическую вакуумированную (давление 10^{-3} Па) камеру и подводят к нему отрицательный полюс источника питания постоянного тока, а к стенкам камеры – положительный. В камеру подают летучие вещества: газ (аммиак, бор и др.), твердые летучие вещества, пары металлов, которые получают в той же камере электродуговым испарением. Между изделием и стенками камеры возбуждают тлеющий электрический разряд.

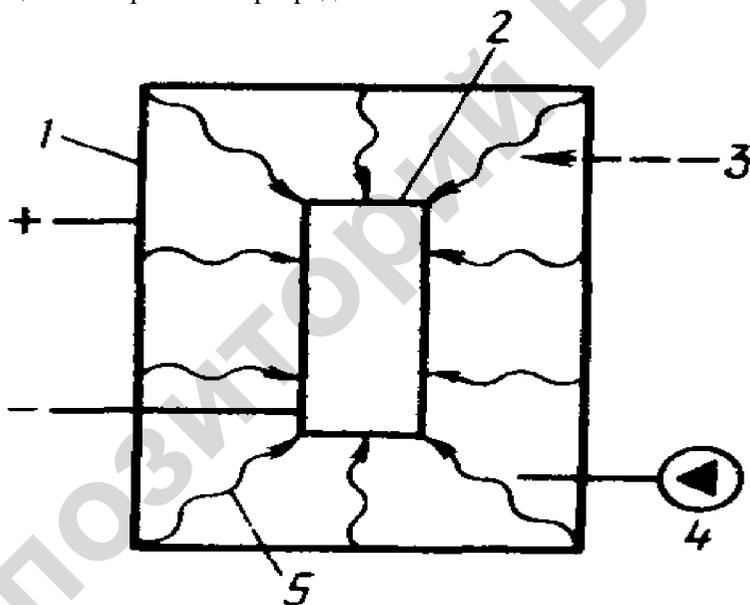


Рис. 9.3. Схема ионного нагрева:

1 – герметическая рабочая камера; 2 – обрабатываемое тело; 3 – подвод газа;
4 – вакуумная система; 5 – плазма

Катод-изделие нагревается потоком положительных ионов летучих присадочных веществ, извлекаемых из низкотемпературной плазмы. Ионы, движущиеся к изделию, не только нагревают

его, отдавая запасенную в электрическом поле энергию, но и вступают с поверхностью изделия в сложные взаимодействия, поэтому ионный нагрев используют в процессах химико-термической обработки металлов. Основные из них:

диффузное поверхностное упрочнение (азотирование, цементация, борирование и др.) металлических изделий (инструмента, шестерен, гильз двигателей внутреннего сгорания, коленчатых валов и др.);

поверхностное покрытие изделий путем ионно-плазменного напыления нитридов (молибдена, титана и др.), карбидов, карбонитридов и других веществ.

Установки ионного нагрева выпускают на мощности в десятки и сотни киловатт. Для возбуждения плазмы используют источники постоянного тока с выходным напряжением от десятков вольт до 1,5 кВ.

Преимущества ионно-плазменной обработки по сравнению с химико-термической обработкой в плазменных печах состоят в повышении производительности в 8–10 раз, уменьшении деформации и повышении износостойкости деталей в 1,5–3 раза, режущего инструмента – 2–10 раз, существенного снижения энергозатрат.

9.3. Источники питания установок

Установки высокоэнергетического нагрева питаются от источников постоянного тока. Они различаются мощностью и выходным напряжением: десятки и сотни вольт в установках ионного нагрева, единицы киловольт в установках лазерного нагрева, десятки киловольт в установках электронно-лучевого нагрева. Общий элемент источников питания (ИП) – преобразователь переменного тока в постоянный. Структурная схема источников питания включает следующие блоки:

преобразования напряжения сети в необходимое напряжение;
преобразования переменного тока в постоянный;
собственных нужд (системы накачки, поджига, фокусирования и др.);
управления, регулирования и контроля.

При общих принципах структуры источники питания установок каждого вида имеют особенности, обусловленные видом вольт-

амперных характеристик, спецификой работы, технологическими и другими требованиями.

Вольт-амперные характеристики электронных пушек электронно-лучевых установок возрастающие. В них возможны короткие замыкания между электродами, поэтому источники питания должны иметь жесткую внешнюю характеристику и быть устойчивыми к пробоям.

Основные требования к источникам питания:

возможность регулирования мощности;

устойчивость к коммутационным перенапряжениям;

обеспечение управления по заданному режиму или программе.

Схемы источников питания установок каждого вида нагрева весьма разнообразны.

Контрольные вопросы

1. Каковы физические принципы электронно-лучевого, лазерного и ионного нагрева, их технологические возможности и области применения?

2. Объясните принцип устройства аксиальной электронной пушки, твердотелого лазера с оптической накачкой, установки индукционного нагрева.

3. Что общего в источниках питания технологических установок электронно-лучевого, лазерного и ионного нагрева, в чем их различия и чем обусловлены?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнология : учеб. пособие / В. А. Карасенко [и др.]. – Москва : Колос, 1992. – 304 с.
2. Электротермическое оборудование сельскохозяйственного производства : учеб. пособие / Л. С. Герасимович [и др.]; под. ред. Л. С. Герасимовича. – Минск : Ураджай, 1995. – 416 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. Электротехнологические установки : лабораторный практикум / Е. М. Заяц, В. А. Карасенко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2010. – 180 с.
5. Электрические элементные нагреватели / А. Е. Заяц, В. С. Корко, Р. И. Кустова. – Минск : БГАТУ, 2011. – 180 с.
6. Прищепов, М. А. Основы термозависимого резистивного электронагрева в технологических процессах сельскохозяйственного производства / М. А. Прищепов. – Минск : БГАТУ, 1999. – 295 с.
7. Электротехнологии : лабораторный практикум / И. Б. Дубодел, В. П. Степанцов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2012. – 148 с.
8. Баранов, Л. А. Светотехника и электротехнология / Л. А. Баранов, В. А. Захаров. – Москва : КолосС, 2008. – 344 с.
9. Белавин, Ю. А. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением / Ю. А. Белавин, М. А. Евстигнеев, А. Н. Чернявский. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
10. Гайдук, В. Н. Практикум по электротехнологии / В. Н. Гайдук, В. Н. Шмигель. – Москва : Агропромиздат, 1989. – 175 с.
11. Живописцев, Е. Н. Электротехнология и электрическое освещение / Е. Н. Живописцев, О. А. Косицин. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 303 с.
12. Высокотемпературные нагреватели Лантерм. – <http://www.launterm.ru>. 2003.
13. Продукция ООО НПЦ «УВИКОМ». <http://www.ropnet.ru>. 2003.
14. Продукция завода «Углекомполит». <http://www.vugsite.dp.ua>. 2003.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Характеристики трансформаторов

Тип трансформатора	Мощность, кВА	Номинальные параметры на первой ступени трансформатора				
		Низшее напряжение х.х., В, при соединении вторичных обмоток		Ток, А, на стороне		
				высшего напряжения	низшего напряжения при соединении вторичных обмоток	
параллельно	последовательно		параллельно		последовательно	
ТПО-25/20/40	25	20	40	65,8	1250	625
ТПО-25/80/160	25	80	160	65,8	312,5	156,2
ТПО-40/20/40	40	20	40	105	2000	1000
ТПО-40/80/160	40	80	160	105	500	2500
ТПО-63/20/40	63	20	40	166	3150	1575
ТПО-63/80/160	63	80	160	166	788	394
ТПО-100/20/40	100	20	40	263	5000	2500
ТПО-100/80/160	100	80	160	263	1250	625
ТПО-160/20/40	160	20	40	421	8000	4000
ТПО-160/80/160	160	80	160	421	2000	1000
ТПО-250/40	250	40	-	658	6250	-
ТПО-250/80	250	80	-	658	3125	-
ТПО-250/160	250	-	160	658	-	1652,5

Приложение 2

Условное обозначение рабочей среды и допустимые удельные мощности ТЭНов (согласно ГОСТ 13268-88)

Условное обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Удельная мощность, 10^4 Вт/м ²	Материал оболочки ТЭН
Х	Вода, слабый раствор щелочей и кислот (рН от 5 до 9)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	9,0	Медь и латунь (с покрытием)
Э	Вода, слабый раствор кислот (рН от 5 до 7)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	15,0	Нержавеющая жаростойкая сталь
Р	Вода, слабый раствор кислот (рН от 7 до 9)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	15,0	Углеродистая сталь
Q	Вода, слабый раствор кислот (рН от 5 до 7)	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке 100 °С	9,5	Алюминиевые сплавы
S	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в спокойной газовой среде до температуры на оболочке ТЭН 450 °С	2,2	Углеродистая сталь
Т	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в спокойной газовой среде до температуры на оболочке ТЭН 450 °С	5,0	Нержавеющая жаростойкая сталь

Условное обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Удельная мощность, 10^4 Вт/м^2	Материал оболочки ТЭН
O	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭН 450 °С	5,5	Углеродистая сталь
K	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭН 450 °С	6,5	Нержавеющая жаростойкая сталь
R	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭН 450 °С	3,5	Углеродистая сталь
N	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с, до температуры на оболочке ТЭН 450 °С	5,1	Нержавеющая жаростойкая сталь
Z	Жиры и масла	Нагрев в ваннах и других емкостях	3,0	Углеродистая сталь
V	Щелочь, щелочноселитровая смесь	Нагрев и плавление с температурой на оболочке ТЭН до 600 °С	3,5	Углеродистая сталь
W	Легкоплавкие металлы: олово, свинец и др.	Нагрев и плавление с температурой на оболочке ТЭН до 450 °С	3,5	Углеродистая сталь

Условное обозначение нагреваемой среды	Нагреваемая среда	Характер нагрева	Удельная мощность, 10^4 Вт/м^2	Материал оболочки ТЭН
L	Литейные формы, пресс-формы	ТЭН вставлен в отверстие, гарантированный контакт с нагреваемым металлом. Нагрев с температурой на оболочке ТЭН до $450 \text{ }^\circ\text{C}$	5,0	Углеродистая сталь
У	Металлические плиты из алюминиевых сплавов	ТЭН залит в изделие. Работа с термоограничителями. Температура на оболочке ТЭН до $320 \text{ }^\circ\text{C}$	13,0	Углеродистая сталь
Op	Воздух и прочие газы и смеси газов	Нагрев в среде, движущейся со скоростью не менее 6 м/с , до температуры на оболочке ТЭН $450 \text{ }^\circ\text{C}$	11,0	Углеродистая сталь с оребрением
Кр	Воздух и прочие газы и смеси газов	Воздух и прочие газы и смеси газов	13,0	Нержавеющая сталь с оребрением
T	Вода, раствор щелочей и кислот	Нагревание, кипячение с максимальной температурой на оболочке $100 \text{ }^\circ\text{C}$	13,0	Титан

Приложение 3

Зависимость температуры проволоки из нихрома, подвешенной горизонтально в спокойном воздухе при 20 °С, от силы тока и диаметра

Проволока		Температура, проволоки, °С						
Диаметр, мм	Сечение, мм ²	200	400	600	700	800	900	1000
		Сила тока, А						
5,00	19,60	52,0	83,0	105,0	124,0	146,0	173,0	206,0
4,00	12,60	37,0	60,0	80,0	93,0	110,0	129,0	151,0
3,00	7,07	22,3	37,5	54,5	64,0	77,0	88,0	102,0
2,50	4,91	16,6	27,5	40,4	46,6	57,5	66,5	73,0
2,00	3,14	11,7	19,6	28,7	33,8	39,5	47,0	51,0
1,80	2,54	10,0	16,9	24,9	29,0	33,1	39,0	43,2
1,60	2,01	8,0	14,4	21,0	24,5	28,0	32,9	36,0
1,50	1,71	7,9	13,2	19,2	22,4	25,7	30,0	33,0
1,40	1,54	7,3	12,0	17,4	20,0	23,3	27,0	30,0
1,30	1,33	6,6	10,9	15,6	17,8	21,0	24,4	27,0
1,20	1,13	6,0	9,8	14,0	15,8	18,7	21,6	24,3
1,10	0,95	5,4	8,7	12,4	13,9	16,5	19,1	21,5
1,00	0,78	4,8	7,7	10,8	12,1	14,3	16,8	19,2
0,90	0,63	4,2	6,7	9,3	10,4	12,3	14,5	16,5
0,80	0,30	3,7	5,7	8,1	9,1	10,8	12,3	14,0
0,75	0,44	3,4	5,3	7,5	8,4	9,9	11,2	12,8
0,70	0,38	3,1	4,8	6,9	7,8	9,1	10,3	11,8
0,65	0,33	2,8	4,4	6,3	7,1	8,2	9,3	10,7
0,60	0,28	2,5	4,0	5,7	6,5	7,5	8,5	9,7
0,55	0,23	2,2	3,5	5,1	5,8	6,7	7,6	8,7
0,50	0,19	2,0	3,1	4,5	5,2	5,9	6,7	7,7
0,45	0,15	1,7	2,7	3,9	4,4	5,2	5,8	6,7
0,40	0,12	1,5	2,3	3,3	3,8	4,4	5,0	5,7
0,35	0,09	1,3	1,9	2,8	3,3	3,7	4,1	4,7
0,30	0,85	1,0	1,6	2	2,7	3,0	3,4	3,8
0,25	0,14	0,8	1,3	1,8	2,1	2,4	2,7	3,1
0,20	0,13	0,6	1,0	1,4	1,6	1,8	2,0	2,3
0,15	0,11	0,5	0,6	1,0	1,1	1,3	1,4	1,4
0,10	0,008	0,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Приложение 4

Значения коэффициентов монтажа k_m и среды k_c

Конструктивное исполнение нагревателя	k_m
Проволока, натянутая горизонтально	1,0
Проволочная спираль	0,8–0,9
Проволочная спираль на огнеупорном держателе	0,7
Проволока, навитая на огнеупорный держатель	0,6–0,7
Спираль между двумя слоями тепловой изоляции (закрытые электроплитки, трубчатые электронагреватели)	0,5
Нагревательное сопротивление с мощной тепловой изоляцией (электронагреватели в обогреваемых полах)	0,3–0,4
Окружающая (нагреваемая среда)	k_c
Нагреватель в потоке воздуха, скорость которого, м/с:	
0	1,0
3	1,8
5	2,1
10	3,1
Нагреватель в воде неподвижной	2,5
в потоке воды	3,0 и более

Приложение 5

Основные размеры электрокалориферов СФО (рис. П.5.1)

Тип электрокалорифера	Размеры, мм			
	H	H ₁	C	B
СФО-5/1Т-И1	140	220	184	185
СФО-10/1Т-И1				
СФО-16/1Т-И1				
СФО-25/1Т-И1	170	250	215	244
СФО-40/1Т-И1	305	385	350	
СФО-60/1Т-И1	440	520	484	
СФО-100/1Т-И1	575	655	620	

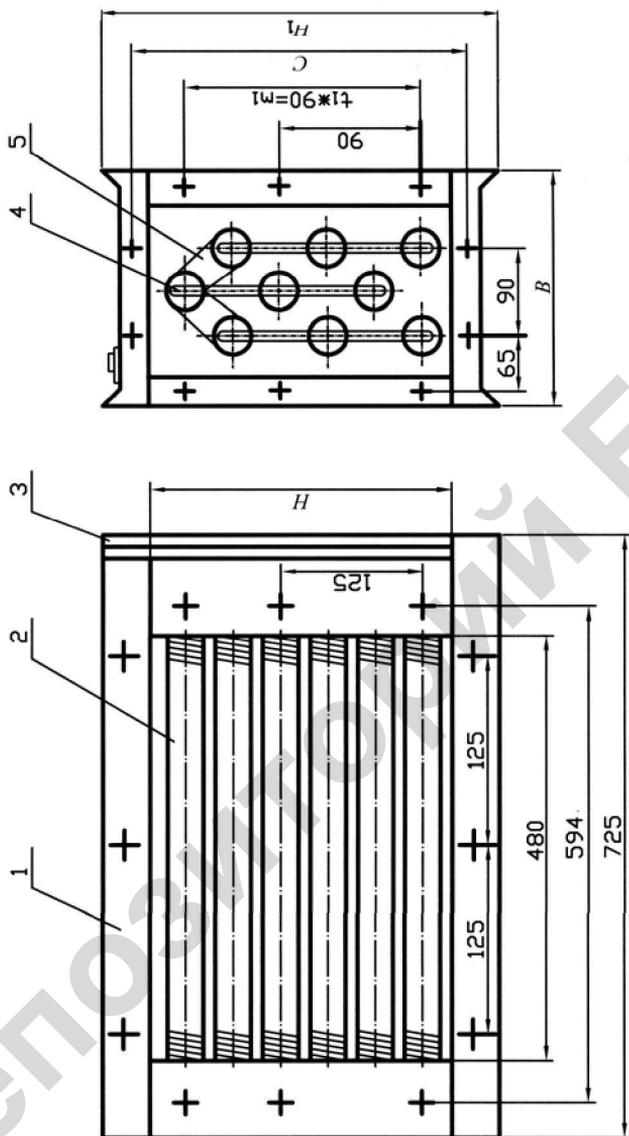


Рис. П.5.1. Конструктивная схема электрокалорифера СФО:

1 – каркас; 2 – трубчатый электронагреватель (ТЭН); 3 – крышка вывода; 4 – пина соединения ТЭНов; 5 – скоба

Приложение 6

Техническая характеристика ТЭНов электрокалорифера СФО

P_1 , кВт	$d_{\text{тр.нар}}$, 10^{-3} м	D_p , 10^{-3} м	S_p , 10^{-3} м	L_k , 10^{-3} м	A_1 , м ²	h_p , 10^{-3} м
1,6	13	40	3,5	40	0,26	11
2,5	16	40	3,5	40	0,30	14

Приложение 7

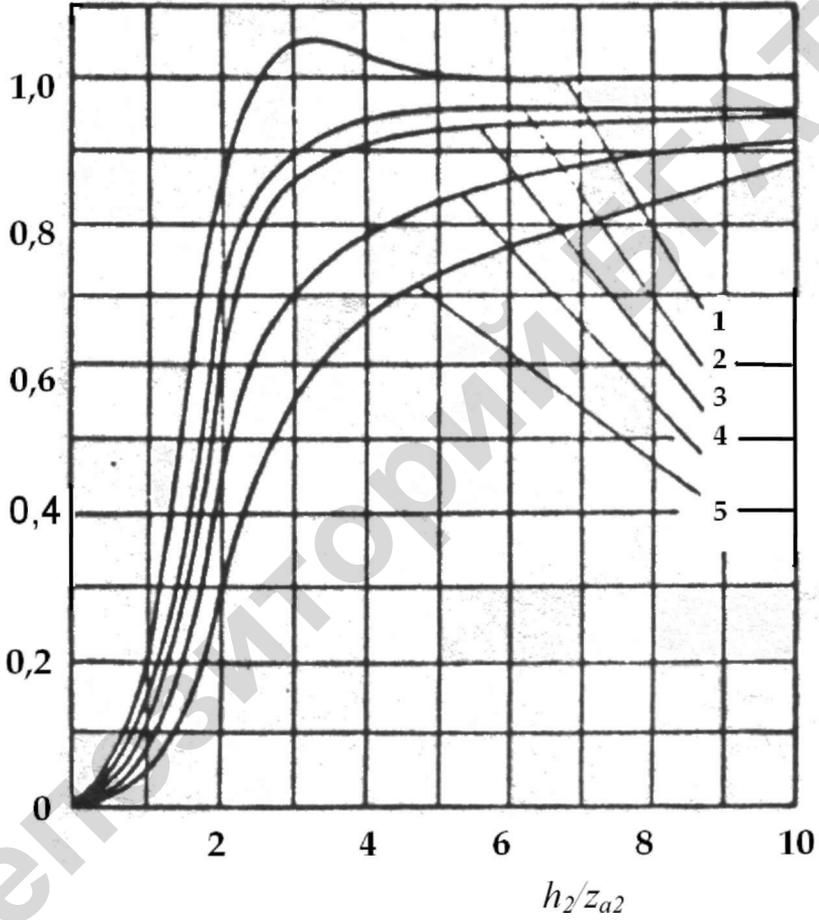
Рекомендуемые параметры для расчета электрообогреваемых полов

Вид животных	Рекомендуемая температура пола, °С	Поверхностный тепловой поток, Вт/м ²	Удельная обогреваемая площадь пола, м ² / гол.	Рекомендуемый шаг укладки нагревательного провода, м
Цыплята	35–40	150–300	0,015–0,08	0,05–0,1
Поросята	25–30	100–200	1–1,5*	0,1–0,15
Свиньи на откорме	18–20	80–150	2,25	0,15–0,2
Телята	20–24	100–150	1,5	0,1–0,15
Коровы (больные маститом или артритом)	26–29	150–200	-	0,15–0,2

* На приплод.

Функция G: 1 - $b_2/h_2 = \infty$; 2 - $b_2/h_2 = 4$; 3 - $b_2/h_2 = 10$; 4 - $b_2/h_2 = 2$; 5 - $b_2/h_2 = 1$

G



Приложение 9

Значения Z_{ae} , μ_e для углеродистой стали при $\rho = 0,18 \cdot 10^{-6}$ Ом·м

$H_e, 10^4$ А·м ⁻¹	μ_e	$H_e^2 \sqrt{\mu_e}$	Глубина проникновения $Z_{ae}, 10^{-2}$ м								
			50	500	1000	2500	4000	8000	10 кГц	70 кГц	440 кГц
1	128	$11,6 \cdot 10^8$	0,27	0,084	0,059	0,037	0,0296	0,021	0,0189	0,71·10 ⁻²	0,28·10 ⁻²
2	67	$32,6 \cdot 10^8$	0,37	0,12	0,083	0,052	0,0410	0,029	0,0261	0,99·10 ⁻²	0,394·10 ⁻²
4	35,2	$95 \cdot 10^8$	0,51	0,16	0,11	0,072	0,0565	0,04	0,0360	1,4·10 ⁻²	0,544·10 ⁻²
6	24,2	$176 \cdot 10^8$	0,61	0,19	0,14	0,087	0,0680	0,049	0,0435	1,63·10 ⁻²	0,655
8	18,4	$274 \cdot 10^8$	0,70	0,22	0,16	0,1	0,0780	0,056	0,0500	1,87·10 ⁻²	0,753
10	15,0	$386 \cdot 10^8$	0,78	0,25	0,17	0,11	0,0865	0,062	0,0550	2,1·10 ⁻²	0,833
12	12,7	$512 \cdot 10^8$	0,85	0,27	0,19	0,12	0,0940	0,067	0,0650	2,26·10 ⁻²	0,906
14	11,0	$650 \cdot 10^8$	0,91	0,29	0,2	0,128	0,101	0,072	0,0645	2,4·10 ⁻²	0,975
16	9,67	$793 \cdot 10^8$	0,97	0,31	0,22	0,137	0,107	0,077	0,0687	2,6·10 ⁻²	1,04
18	8,65	$953 \cdot 10^8$	1,02	0,32	0,23	0,144	0,114	0,081	0,0727	2,72·10 ⁻²	1,10
20	7,9	$11,2 \cdot 10^{10}$	1,07	0,34	0,24	0,151	0,119	0,085	0,0760	2,87·10 ⁻²	1,15
24	6,63	$14,8 \cdot 10^{10}$	1,17	0,37	0,26	0,165	0,129	0,092	0,0830	3,14·10 ⁻²	1,25
28	5,75	$18,8 \cdot 10^{10}$	1,25	0,40	0,28	0,177	0,139	0,099	0,0893	3,35·10 ⁻²	1,35
32	5,08	$23,8 \cdot 10^{10}$	1,34	0,42	0,3	0,19	0,148	0,106	0,0950	3,6·10 ⁻²	1,43
36	4,55	$27,7 \cdot 10^{10}$	1,41	0,45	0,315	0,2	0,156	0,112	0,1000	3,78·10 ⁻²	1,51
40	4,53	$36 \cdot 10^{10}$	1,42	0,46	0,32	0,205	0,157	0,115	0,100	3,8·10 ⁻²	1,52

Приложение 12

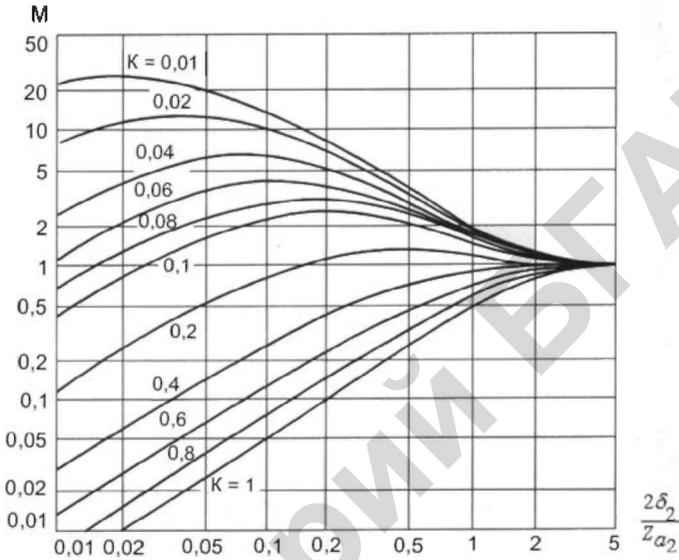
Значения ϕ и ψ

m	ϕ	ψ	m	ϕ	ψ
0	0	0	3,2	0,785	1,05
1	0,086	0,69	3,4	0,8	1,03
1,2	0,144	0,815	3,6	0,81	1,02
1,4	0,218	0,92	3,8	0,82	1,01
1,6	0,305	1,0	4,0	0,825	1,0
1,8	0,4	1,06	5,0	0,855	1,0
2,0	0,49	1,09	6,0	0,88	1,0
2,2	0,57	1,1	7,0	0,895	1,0
2,4	0,64	1,11	8,0	0,91	1,0
2,6	0,69	1,09	9,0	0,92	1,0
2,8	0,735	1,07	10,0	0,93	1,0
3,0	0,765	1,06		1,0	1,0

Примечание. $m = \sqrt{2 R_2 / Z_{s2}}$ – относительный радиус

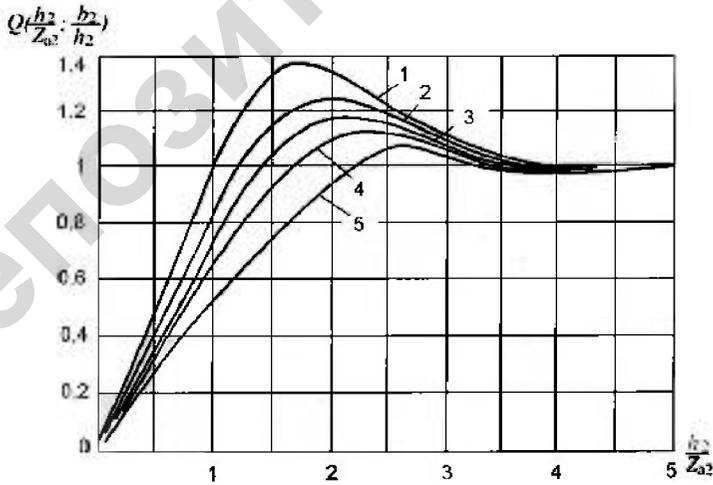
Приложение 13

Функция М при $K = Z_{a2}/(R_2 - \delta_2)$



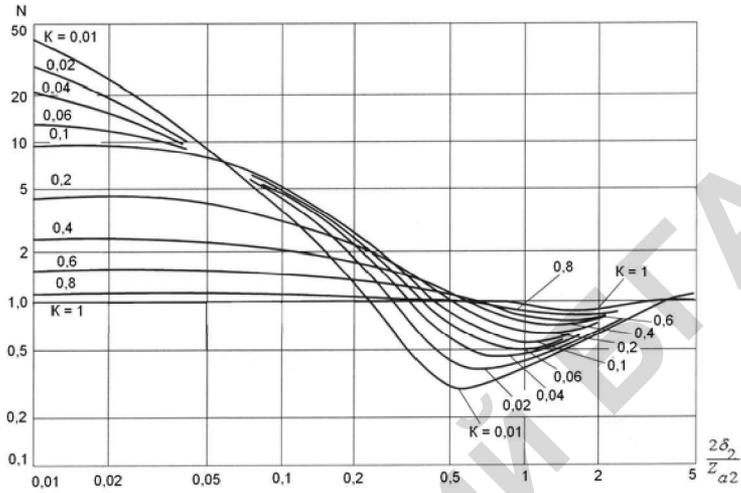
Приложение 14

Функция N при $K = Z_{a2}/(R_2 - \delta_2)$



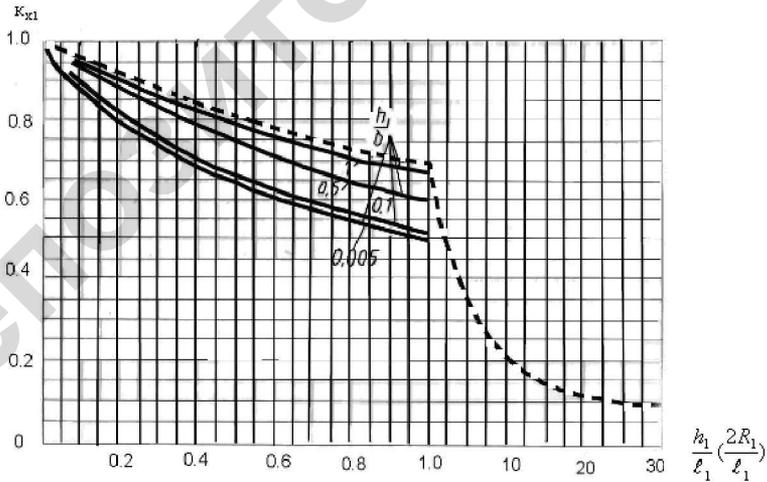
Приложение 15

Функция Q при отношении b_2/h_2 равном: 1 – ∞; 2 – 10; 3 – 4; 4 – 2; 5 – 1



Приложение 16

Значение K_{x1} : --- для цилиндров; — для индукторов
прямоугольного сечения



Приложение 17

Индукционные закалочные установки с машинными преобразователями

Характеристики	ИЗ1-30/8	ИЗ3-100/2.4	ИЗ4-100/8	ИЗ3-200/2.4	ИЗ4-200/8
Тип преобразователя	ВПЧ-30/8	ВПЧ-100/2.4	ВПЧ-100/8	ВПЧ-100/2.4	ВПЧ-100/8
Кол-во преобразователей	1	1	1	2	2
Мощность электродвигателя, кВт	50	140	140	2×140	2×140
Мощность на высокой частоте, кВт	30	100	100	2×100	2×100
Частота тока, Гц	8000	2400	8000	2400	8000
Напряжение, В	400	800	800	800	800
Поверхность одновременного нагрева, м ²	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04
Глубина закаленного слоя, мм	1,3–5	2,5–10	1,3–5	2,5–10	1,3–5

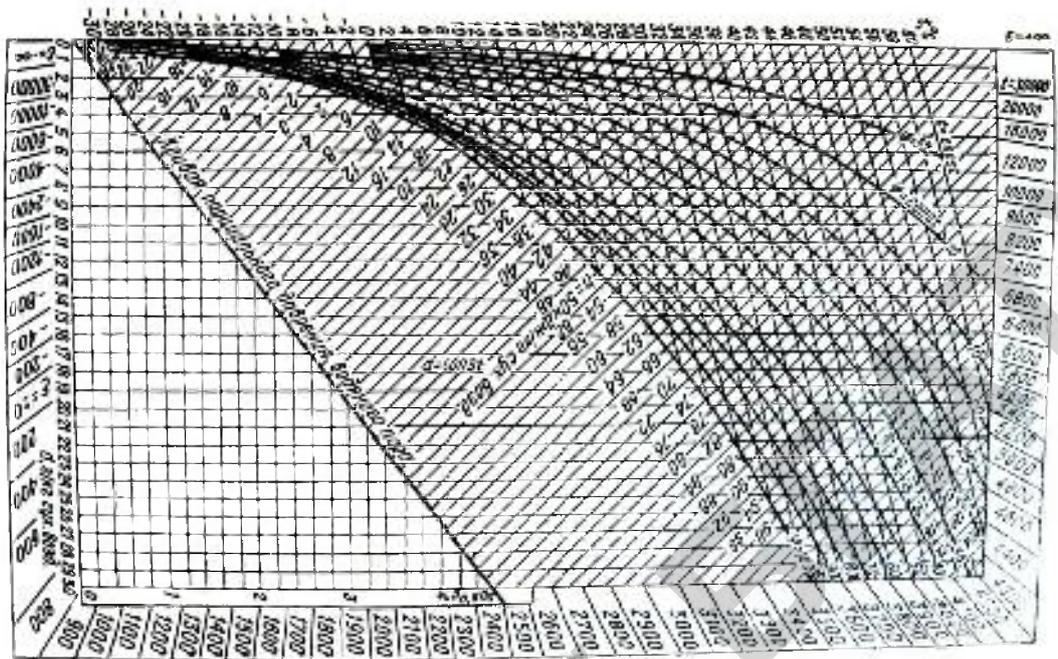
Приложение 18

Индукционные установки с ламповыми генераторами

Характеристики	ВЧИ-10/0,44	ВЧИ-25/0,44	ВЧИ-63/0,44	ВЧИ2-100/0,066	ВЧИ3-100/0,066
Мощность, потребляемая из сети, кВт	14	37	90	140	200
Мощность на высокой частоте, кВт	10	25	63	100	160
Частота тока, кГц	440	440	400	66	66
Вторичное напряжение анодного трансформатора, кВ	6,0	8,4	8,4	8,4	8,4

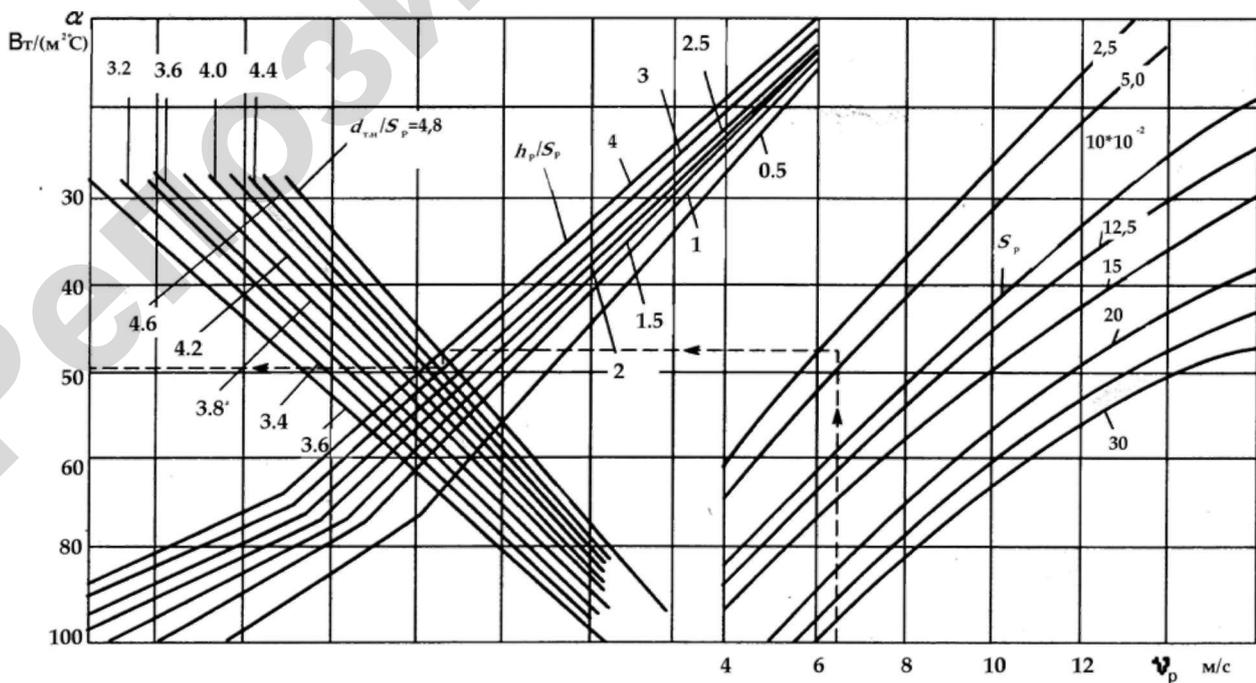
Приложение 19

Диаграмма влажного воздуха



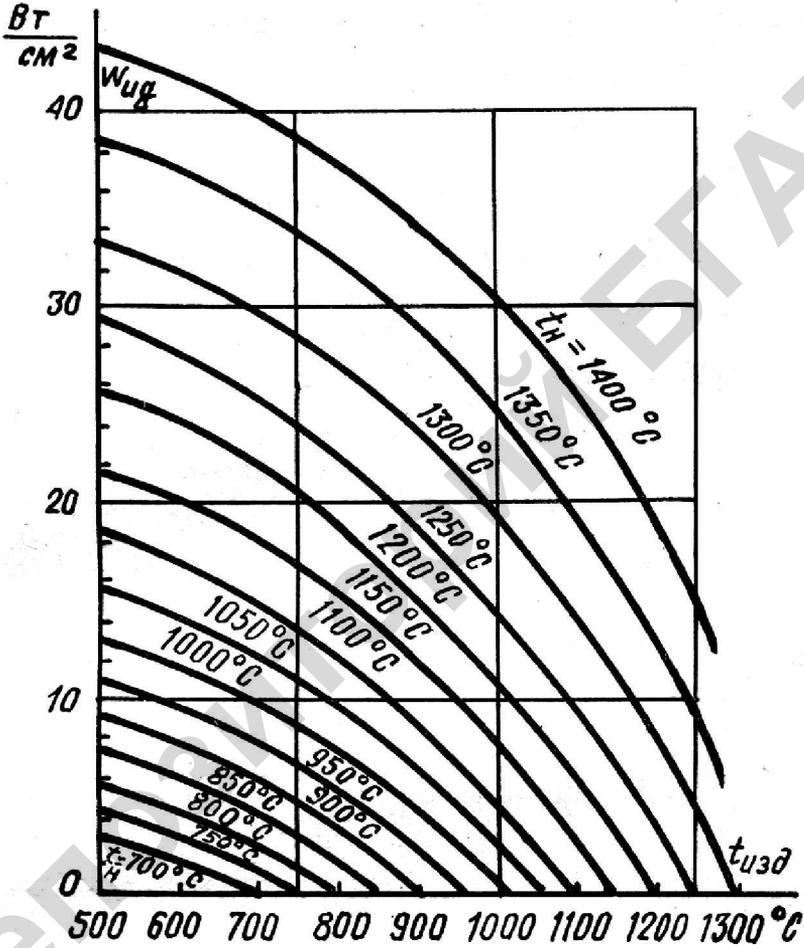
Приложение 20

Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи от оребренных трубчатых электронагревателей, обтекаемых поперечным потоком воздуха



Приложение 21

Кривые удельной поверхностной мощности идеального абсолютно черного нагревателя



Приложение 22

Технические данные некоторых высокочастотных установок с ламповыми генераторами для нагрева диэлектриков

Назначение	Тип	Потребляемая мощность, кВт	Колебательная мощность, кВт	Частота, Гц	Анодное напряжение, кВ	Технологические показатели	
						масса загрузки, кг	время нагрева, с
Нагрев материалов перед прессованием	ВЧД1-1/40	2,2	1,0	40,68	3	0,06-0,3	15-55
	ВЧД2-1,6/40	3,4	1,6	40,68	4	0,21-0,3	30-40
	ВЧД4-4/40	8,2	4,0	40,68	5	0,10-0,5	30-60
	ВЧД2-2,5/40	5,2	2,5	81,36	5	0,25-0,6	30-60
	ВЧД3-6/81	12,0	6,0	81,36	5	0,6-1,5	30-60
	ВЧД8-10/13	20,0	10,0	13,56	5	2	50
Сварка термопласта	ВЧД-0,63/40-СП	1,2	0,6	40,68	2,5	16 (площадь шва, см ²) 40 60	1-5
	ВЧД-1,6/40-СП	3,5	1,6	40,68	4		2-5
	ВЧД-2,5/40-СП	5,3	2,5	40,68	6		2-6
Склеивание древесины	ВЧД-2,5/13-СД	5,4	2,5	13,56	5	420 (площадь шва, см ²) 3300	80
	ВЧД-40/5-СД	18,5	10	5,28	8		
Сушка порошков	ВЧД12-60/13*	105	60	13,56	10		

* Производительность установки при относительной влажности материала 30 % – 100 кг/ч, максимальная температура сушки – 168 °С.

Учебное издание

**Зяц Евгений Михайлович,
Карасенко Владимир Алексеевич,
Баран Александр Николаевич и др.**

ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ

Учебное пособие

Ответственный за выпуск *В. П. Степанцов*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *Н. А. Антипович*

Подписано в печать 7.05.2014 г. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 15,63. Тираж 200 экз. Заказ 210.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».

ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.

ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.

Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.