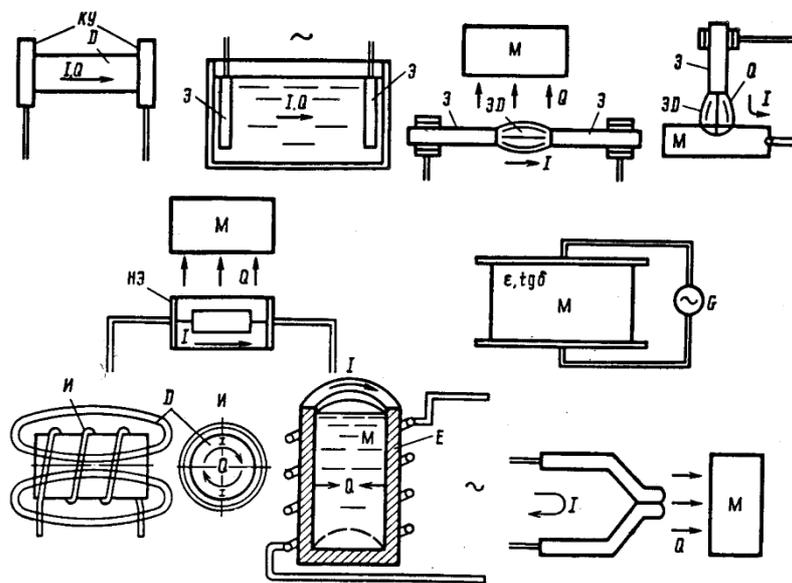


# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК



УДК 631.371:621.3(075.8)  
ББК 40.76  
ПЗ17

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой  
«Химическая инженерия»

*Н.Ц. Гагапова*

Составители:

*Е.А. Печагин,*

*Ж.А. Зарандия*

ПЗ17 Электрооборудование электротермических установок : методические указания / сост. : Е.А. Печагин, Ж.А. Зарандия. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 32 с. – 100 экз.

Даны методические указания к выполнению лабораторных работ для практического изучения наиболее распространенных способов воздействия электричества с целью технологического преобразования веществ и материалов.

Предназначены для студентов 4 курса специальности 110302 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства».

УДК 631.371:621.3(075.8)

ББК 40.76

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2008

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Светотехника и электротехнология»  
для студентов 4 курса специальности 110302  
«Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»



---

Тамбов  
◆ Издательство ТГТУ ◆  
2008

Учебное издание

# ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Методические указания

Составители:

ПЕЧАГИН Евгений Александрович,  
ЗАРАНДИЯ Жанна Александровна

Редактор Ю.В. Ш и м а н о в а

Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Корректор О.М. Ярцева

Подписано в печать 27.05.2008

Формат 60 × 84/16. 1,86 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 265.

Издательско-полиграфический центр

Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

*Цель работы.* Изучить устройство и принципы расчета электрических нагревателей сопротивления (НС), исследовать нагрузочные характеристики, коэффициенты среды и монтажа нагревателей.

## Методические указания

По литературе [1, с. 46 – 68; 2, с. 63 – 94] изучить материалы и конструкции нагревателей сопротивления, методы их теплового и электрического расчета.

Основная задача расчета резистивных нагревателей состоит в определении их сечения  $S$  и длины  $l$  для заданного напряжения электрической сети  $U$ , при котором будет выделена необходимая мощность  $P$ .

Сопротивление нагревательного элемента при рабочей температуре

$$R = \frac{U^2}{P} = \rho_t \frac{l}{S}, \text{ Ом,}$$

где  $\rho_t$  – удельное электрическое сопротивление (Ом · м) материала нагревателя при рабочей температуре  $t$ , °С.

Допустимая удельная поверхностная мощность нагревателя

$$P_d = \frac{P}{F} = \frac{P}{\Pi}, \text{ Вт/м}^2,$$

где  $F$  – площадь боковой поверхности нагревателя, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – периметр поперечного сечения нагревателя, м.

Из предыдущих выражений можно выразить:

$$l = \frac{U^2 S}{P \rho_t} = \frac{P}{\Pi P_d}, \text{ отсюда } \Pi S = \frac{P^2 \rho_t}{U^2 P_d}.$$

Для проволочного нагревателя круглого сечения

$$\Pi = \pi d; \quad S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

Выражаем диаметр нагревателя

$$d = \sqrt[3]{\frac{4P^2 \rho_t}{\pi^2 U^2 P_d}}, \text{ м.}$$

Длина нагревателя для данного диаметра

$$l = \frac{RS}{\rho_t} = \sqrt{\frac{PU^2}{4\pi \rho P_d^2}}, \text{ м.}$$

Аналогичным образом можно рассчитать параметры нагревателя любого другого сечения, например, для проводника в виде ленты:

$$S = a \cdot b; \quad \Pi = 2(a + b) = 2(m + 1)a,$$

где  $m = \frac{b}{a}$ ;  $a$  – толщина;  $b$  – ширина ленты.

Также можно производить приближенный расчет по допустимой плотности тока материала  $j_{\text{доп}}$  (для нихрома  $j_{\text{доп}} = 4 \dots 30 \text{ А/мм}^2$ ):

$$S = \frac{I}{j_{\text{доп}}}.$$

При превышении допустимой температуры резко возрастает процесс окислительного разрушения НС, и нагреватель выходит из строя. Для нихромов ориентировочно  $t_{\text{доп}} = 1100 \text{ °С}$ , фехрала –  $600 \text{ °С}$ , стальной проволоки –  $300 \text{ °С}$ .

Определение рабочей температуры нагревателя производится в тепловой части расчета. Тепловой расчет производится по формулам теории теплопередачи и для большинства случаев связан с известными трудностями и громоздкими вычислениями [1, с. 55 – 63; 2, с. 71 – 81]. Поэтому в практических расчетах часто применяют приближенные методы, основанные на использовании экспериментальных данных (в виде таблиц и графических зависимостей), которые отражают связь между силой тока нагрузки  $I$ , температурой, размерами сечения и диаметром. Графические зависимости или табличные данные [1, с. 65, табл. 3.9; 2, с. 93, табл. 6,7] получены для определенных (стандартных) условий, когда проволока натянута горизонтально в спокойном воздухе при температуре  $293 \text{ К}$ . Действительную температуру  $t_d$  поверхности приводят к расчетной  $t_p$  (табличной) при помощи коэффициентов монтажа и среды:  $t_p = t_d K_M K_c$ , где  $K_M$  и  $K_c$  – коэффициенты монтажа и среды. Для стандартных условий  $K_M = K_c = 1$ .

Коэффициент монтажа учитывает ухудшение теплоотдачи в реальном нагревателе по сравнению со стандартными условиями, в которых получены табличные данные ( $K_M \leq 1$ ). Для проволочной спирали в неподвижном воздухе  $K_M = 0,8 \dots 0,9$ ; для спирали на изоляционном каркасе (стержне)  $K_M = 0,7$ ; для спирали или провода в трубчатом электронагревателе (ТЭН), электрообогреваемом полу, почве, панели  $K_M = 0,3 \dots 0,4$ .

Коэффициент среды учитывает улучшение теплоотдачи по сравнению со стандартными условиями за счет воздействия нагреваемой среды ( $K_c \geq 1$ ). Для проволочной спирали, проволоки в подвижном воздухе  $K_c = 1,1 \dots 4,0$ ; для нагревателей защищенного и герметического исполнения в неподвижной воде  $K_c = 2,5$ ; для нагревателей в подвижной воде  $K_c = 2,8 \dots 3$ .

Таким образом, с помощью коэффициентов  $K_m$  и  $K_c$  осуществляется переход от табличных условий к реальным.

В лабораторной работе исследуются открытые нагреватели из нихрома Х20Н80: ЕК1 – спираль из проволоки диаметром 0,5 мм на керамической трубке; ЕК2 – спираль из проволоки диаметром 0,5 мм, подвешенной в свободном состоянии; ЕК3 – прямолинейный отрезок проволоки диаметром 0,5 мм; ЕК4 – прямолинейный отрезок проволоки диаметром 0,8 мм.

Нагреватели расположены в воздуховоде перпендикулярно к направлению потока воздуха. На каждом нагревателе на стороне, обратной направлению потока воздуха, закреплены термодпары, подключаемые к прибору измерения температуры (милливольтметр типа Ш4500). Для изменения условий теплоотдачи служит вентилятор, осуществляющий подачу потока воздуха к нагревателям. Управление вентилятором производится с помощью переключателя, выведенного на переднюю панель стенда, при этом в положении «0» вентилятор отключен, а в положениях «1» и «2» осуществляется подача воздуха со скоростью соответственно 3 и 6 м/с (рис. 1).

Коэффициент монтажа  $K_m$  определяется для нагревателей ЕК1 и ЕК2 по отношению к нагревателю ЕК3 по экспериментальным значениям температуры при  $t_1, t_2, t_3$  соответственно нагревателей ЕК1, ЕК2, ЕК3 при заданном токе:

$$K_m = \frac{t_{1,2}}{t_3}$$

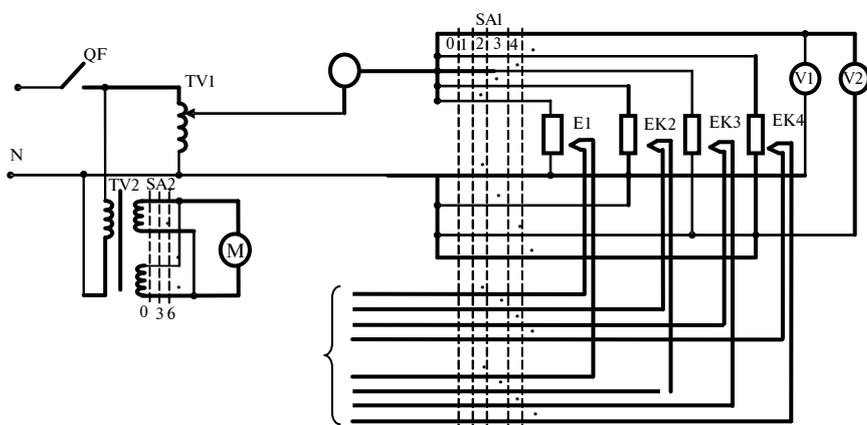


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лабораторного стенда

Коэффициент среды определяется для всех нагревателей при разных скоростях воздуха 3 и 6 м/с, при заданном токе:

$$K_c = \frac{t_0}{t_{3,6}}$$

где  $t_0, t_3, t_6$  – температура нагревателя при скорости воздуха  $v$  соответственно 0, 3, 6 м/с.

### Порядок выполнения работы

1. Ручку автотрансформатора TV1 перевести в крайнее левое положение, переключатель управления вентилятором SA1 – в положение «0».
2. Исследовать нагрузочные характеристики нагревателей – зависимость температуры  $t$  и удельной поверхностной мощности  $P_{уд}$  от величины тока  $I$ , который изменяется от 0 до 2 А с интервалом 0,25 А, при скоростях воздуха 0, 3, 6 м/с. Результаты измерений занести в табл. 1.
3. Вычислить расчетные величины табл. 1.
4. Построить зависимости  $t = f(I)$ ;  $P_{уд} = f(I)$  и сделать выводы по работе.

Таблица 1

| Нагреватель | Площадь активной поверхности $F \cdot 10^3 \text{ м}^2$ | Измеренные величины |                |                |  | Вычисленные величины |                                 |       |       |
|-------------|---|---------------------|----------------|----------------|--|----------------------|---------------------------------|-------|-------|
|             |   | $v, \text{ м/с}$    | $I, \text{ А}$ | $U, \text{ В}$ | $t_{\text{нар}}, \text{ }^\circ\text{С}$ | $P, \text{ Вт}$      | $P_{\text{уд}}, \text{ Вт/м}^2$ | $K_m$ | $K_c$ |
| ЕК1         | 9,77  |                     |                |                |  |                      |                                 |       |       |
| ЕК2         | 10,46   |                     |                |                |  |                      |                                 |       |       |
| ЕК3         | 0,94  |                     |                |                |  |                      |                                 |       |       |
| ЕК4         | 1,51  |                     |                |                |  |                      |                                 |       |       |

1. Из каких материалов изготавливают и какие бывают типы электрических нагревателей сопротивления по исполнению?
2. От чего зависит срок службы электрических нагревателей сопротивления?
3. В чем заключается тепловой и электрический расчеты нагревателей сопротивления?
4. Чем определяется температура нагревательного сопротивления?
5. Что такое коэффициенты монтажа и среды, как они определяются?
6. Область применения электрических нагревателей сопротивления.
7. Преимущества и недостатки изучаемых нагревателей.

## Лабораторная работа 2

### ЭЛЕМЕНТНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ

*Цель работы.* Изучить устройство и принцип действия, схемы управления элементных проточных и емкостных аккумулирующих водонагревателей; исследовать рабочие характеристики трубчатых электронагревателей (ТЭН) воды.

#### Методические указания

По литературе [1, с. 55 – 68, 103 – 111; 2, с. 150 – 154; 3, с. 108 – 113; 4, с. 107 – 113; 5, с. 9 – 22; 6, с. 40 – 45] изучить основы косвенного электронагрева воды; конструкции, технические характеристики и схемы управления элементных водонагревателей. При подготовке к работе сделать эскиз ТЭН.

Полезная мощность  $P_{\text{пол}} = VC\rho(t_k - t_n)/\tau_k$ , Вт.

Присоединенная мощность  $P = UI$ , Вт.

КПД,  $\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P} \cdot 100\%$ .

Производительность нагревателя  $L = V \cdot 3600 / \tau_k$ , л/ч.

Удельный расход электрической энергии

$$A_{\text{уд}} = \frac{P}{L(t_k - t_n)}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{л} \cdot \text{°C}.$$

Стоимость нагрева литра воды на 1 °С

$$C_{\text{уд}} = A_{\text{уд}} C_3, \text{ к./л} \cdot \text{°C}.$$

Здесь  $\tau_k$  – время нагрева воды до  $t_k$ ;  $C$  – удельная теплоемкость воды  $4,19 \cdot 10^3$  Дж/кг·°С;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $C_3$  – тариф на электрическую энергию, к./кВт·ч.

*Маркировка ТЭН по ГОСТ:*

#### ТЭН-123/456,

где **1** – развернутая длина: 0,25; 0,30; 0,35; 0,42; 0,50; 0,60; 0,70; 0,78; 0,85; 1,00; 1,20; 1,40; 1,70; 2,00; 2,40; 2,80; 3,50; 4,00; 4,75; 5,60; 6,30 (м); **2** – условное обозначение длины контактного вывода. Длина контактного стержня (мм) в заделе:

| А  | Б  | В   | Г   | Д   | Е   | Ж   | З   |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 40 | 65 | 100 | 125 | 160 | 250 | 400 | 630 |

**3** – наружный диаметр трубки: номинальные диаметры: 8; 9,5; 10; 12,5; 13; 16 (мм); **4** – номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ : 50; 60; 80; 100; 120; 160; 200; 250; 320; 400; 600; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 3500; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12000; 12500; 16000; 20000; 25000 (Вт); **5** – условное обозначение нагреваемой среды:

- вода, слабый раствор щелочей и кислот (кипячение) X, П, Р, Ю (в зависимости от удельной мощности);
- жиры и пищевые масла И (до 300 °С);
- щелочи, селитры Ш (до 600 °С) и плавление;
- олово, свинец, типографский сплав Ф (до 450 °С) и плавление;
- металлические формы (стальные и чугунные) М (ТЭН залиты в алюминий), нагрев до 200 °С;
- воздух и смеси газов:
  - С (в спокойном состоянии до 450 °С);
  - Т (450 °С – 700 °С);
  - О (среда движется со скоростью 6 м/с, 450 °С);
  - К (среда движется со скоростью 6 м/с, 450 °С – 600 °С);

**6** – номинальное напряжение: 12; 24; 36; 48; 55; 60; 110; 127; 220; 380 (В).

*Например:* ТЭН-32А10/0,4Р220.

Принципиальная электрическая схема проточного элементного водонагревателя типа ВЭП-600 показана на рис. 2.

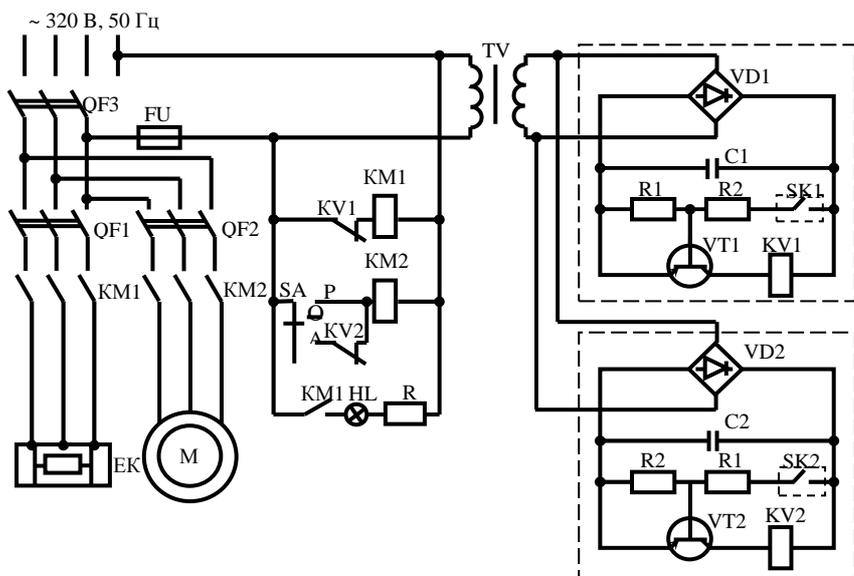


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема проточного элементного водонагревателя типа ВЭП-600

Водонагреватель (рис. 3) состоит из корпуса 1, снабженного теплоизоляцией 2, в который помещена вода 3. Для измерения температуры воды на крышке 6 смонтирована термопара 5. Нагрев воды осуществляется трубчатым электронагревателем 4. Подключение нагревателя к источнику питания осуществляется при помощи автоматического выключателя QF1. Контроль тока, протекающего в нагревателе, и напряжения на нем осуществляется при помощи амперметра А и вольтметра V, выведенных на переднюю панель стенда.

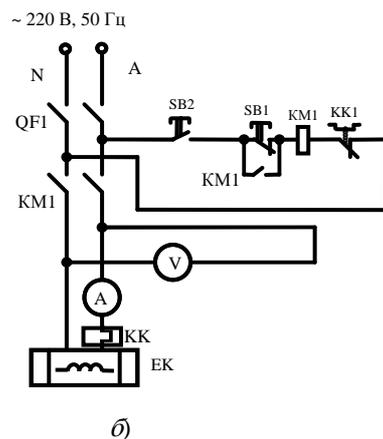
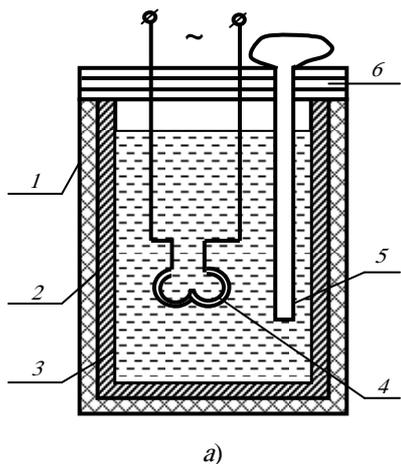


Рис. 3. Технологическая (а) и принципиальная электрическая (б) схемы исследуемого элементного водонагревателя

### Порядок выполнения работы

1. Заполнить бак водонагревателя водопроводной водой в количестве  $V = 3$  л. С помощью автоматического выключателя QF1, выведенного на переднюю панель стенда, подключить водонагреватель к источнику питания. Произвести измерение начальной температуры воды  $t_n$  в нагревателе. Включить кнопкой SB2 пускатель KM1 и снять кривую разгона водонагревателя  $t(\tau)$ . Измерение времени производить в моменты времени, когда стрелка вторичного прибора для измерения температуры проходит через оцифрованные деления (через  $10^\circ\text{C}$ ). Эксперимент закончить при достижении температуры воды  $t_k = 80^\circ\text{C}$ . Полученные данные занести в табл. 2.
2. Рассчитать рабочие и энергетические характеристики водонагревателя.
3. По результатам опыта построить кривую разгона (динамическую характеристику) водонагревателя  $t(\tau)$ .
4. Содержание отчета: схема лабораторной установки, протоколы испытаний, график динамической характеристики модели водонагревателя, выводы по результатам исследований, эскиз ТЭН.

| Измеренные величины        |             |  |                                     |                                  | Результаты расчетов                                      |  |   |   |  |  |
|----------------------------|-------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|--|--|---|---|--|--|
| Напряжение питания $U$ , В | Ток $I$ , А | Температура воды $t$ , °С              | Продолжительность $\tau$ нагрева, с | Объем воды в нагревателе $V$ , л | Полезная мощность водонагревателя $P_{\text{пол.}}$ , Вт | Присоединенная мощность водонагревателя $P$ , Вт | Коэффициент полезного действия $\eta$ , % | Производительность водонагревателя $\Omega$ , л/ч | Удельный расход электроэнергии $A_{\text{уд.}}$ , кВт·ч/л·°С | Стоимость нагрева литра воды на 1 °С, $C_{\text{уд.}}$ , к./л·°С |
|                            |             | $t_n$<br>20<br>30<br>...<br>$t_k = 80$ |                                     |                                  |  |  |   |   |  |  |

### Контрольные вопросы

1. Устройство и применение трубчатых электронагревателей.
2. Задача и принцип расчета трубчатых электронагревателей.
3. Выбор трубчатых электронагревателей.
4. Основные достоинства и недостатки элементных водонагревателей емкостного типа.
5. Основные энергетические характеристики установки, от чего они зависят?
6. Изменяется ли мощность и ток нагревателя в процессе нагрева и почему?
7. Какие мероприятия предусмотрены для обеспечения электробезопасности при работе с элементными водонагревателями?
8. В чем различие между проточным и емкостным водонагревателями?
9. Какие типы проточных элементных водонагревателей Вы знаете?
10. Какие типы емкостных аккумулялирующих водонагревателей Вы знаете?
11. В чем преимущества электрических водонагревателей от водонагревателей, использующих химическую энергию сжигаемого топлива?
12. Какие средства используются для автоматического управления работой электрических водонагревателей?
13. Как осуществляется регулирование температуры в водонагревательных элементных установках?
14. Что влияет на срок службы элементных электронагревателей?
15. Объяснить принцип действия электрической схемы водонагревателя ВЭП-600 по рис. 2.

### Лабораторная работа 3

#### ЭЛЕКТРОДНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ И ПАРОГЕНЕРАТОРЫ

*Цель работы.* Изучить устройство и принцип действия схемы управления электродных водонагревателей и парогенераторов; исследовать динамическую характеристику и зависимость рабочего тока, мощности и КПД от температуры воды.

#### Методические указания

По литературе [1, с. 34 – 36; 2, с. 48 – 52; 3, с. 113 – 125; 4, с. 113 – 127; 5, с. 118 – 136] изучить теоретический материал.

Чистые жидкости, а также водные растворы органических соединений электропроводностью почти не обладают. Но при растворении в воде неорганических веществ растворы (электролиты) приобретают заметную электропроводность. Носителями тока в растворах электролитов являются не электроны, а заряженные атомы или части молекул (ионы). Ионы появляются в растворе благодаря распаду на части молекул растворенного вещества под действием молекул растворителя (избыточный заряд за счет захвата одного или нескольких электронов одним из атомов – отрицательный ион и потери их другими – положительный ион). К положительному полюсу (аноду) подходят ионы с отрицательным зарядом, к отрицательному полюсу (катоду) подходят ионы с положительным зарядом, отдавая избыточный заряд, превращаясь в атомы.

В электролите ион оказывается окруженным молекулами растворителя (воды), обладающими значительными дипольными моментами. Взаимодействуя с ионом, каждые молекулы поворачиваются к нему своими концами, имеющими заряд, знак которого противоположен знаку заряда иона, поэтому упорядоченное движение иона в электрическом поле затрудняется и подвижность ионов не превышает  $3 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/В·с. Поэтому удельная электропроводность электролитов по сравнению с удельной электропроводностью металлов меньше и составляет  $10^2 \dots 10^3$  См/м.

Таким образом, в электролитах допустимы незначительные плотности тока и небольшие напряженности электрических полей, при которых подвижность ионов практически постоянна и, следовательно, электролиты подчиняются закону Ома.

При повышении температуры электролита упорядоченная ориентация диполей растворителя вокруг ионов ухудшается под влиянием усилившегося беспорядочного движения молекул, поэтому дипольная оболочка частично разрушается, подвижность ионов и проводимость раствора увеличиваются (см. рис. на обложке).

Полезная мощность

$$P_{\text{полн}} = \frac{VC\rho(t_i - t_{i-1})}{\tau_i - \tau_{i-1}}, \text{ Вт},$$

где  $V$  – объем нагреваемой воды (5 л);  $C$  – удельная теплоемкость воды (4,19 кДж/кг · °С);  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $t_i, t_{i-1}$  – начальная и конечная температуры.

Полная мощность (присоединенная)

$$P_i = UIi, \text{ Вт}.$$

КПД  $\eta = \frac{P_{\text{полн}}}{P_i} \cdot 100 \%$ .

Производительность водонагревателя

$$\Omega = \frac{V \cdot 3600}{\tau_k}, \text{ л/ч}.$$

Удельный расход электроэнергии

$$A_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ср}}}{\Omega(t_k - t_n)} = \frac{P_k + P_n}{2\Omega(t_k - t_n)}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/л}\cdot\text{°С}.$$

Стоимость нагрева на 1 °С

$$C_{\text{уд}} = A_{\text{уд}} C_3, \text{ к./л}\cdot\text{°С}.$$

Здесь  $\tau_k, \tau_n$  – время начала и окончания нагрева, ч;  $P_n, P_k$  – мощность, присоединенная в начале и окончании нагрева, кВт;  $C_3$  – тариф на электрическую энергию, к./кВт · ч.

Для исследования динамических и энергетических характеристик электродных систем в лабораторном стенде использован однофазный электродный водонагреватель (рис. 4), технологическая и принципиальная электрические схемы которого представлены на рис. 5.

Водонагреватель (см. рис. 5, а) состоит из корпуса 1, снабженного изоляцией 2, в который помещена вода 3. Для измерения температуры воды на крышке б смонтирована термопара 5.

Водонагреватель имеет два плоских параллельных электрода 4 шириной  $b = 30$  мм и высотой  $h = 70$  мм. Расстояние между электродами  $l = 85$  мм. Подключение нагревателя к источнику питания осуществляется при помощи автоматического выключателя QF2. Контроль тока, протекающего между электродами, и напряжения на электродах водонагревателя EK2 осуществляется при помощи приборов pA2 и pV2, выведенных на переднюю панель стенда.

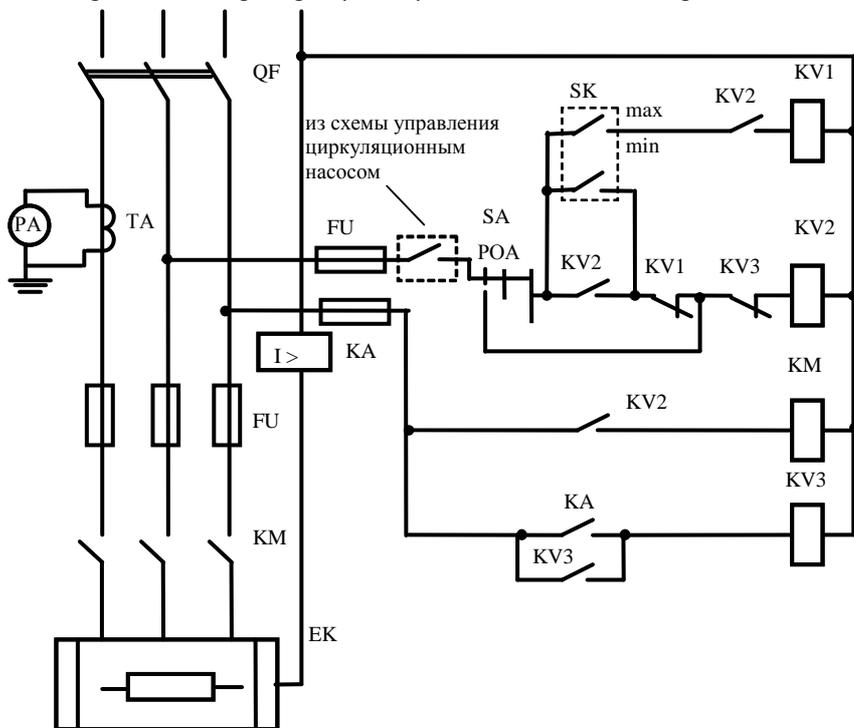


Рис. 4. Электрическая схема управления электродного водонагревателя ЭПЗ-100

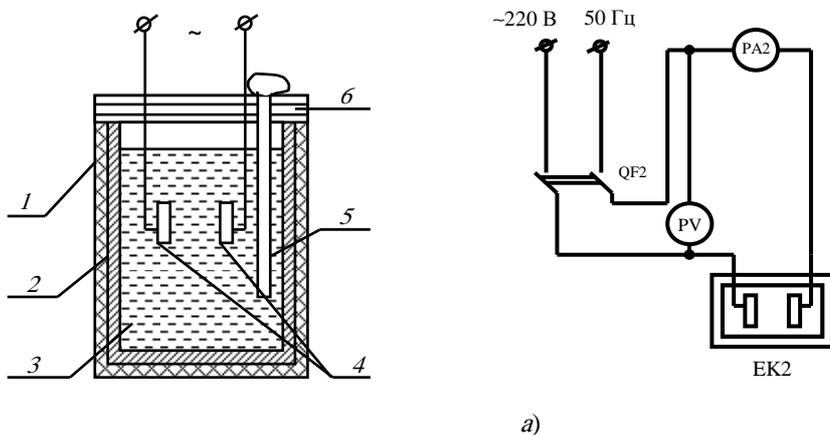


Рис. 5. Технологическая (а) и принципиальная электрическая (б) схемы исследуемого электродного водонагревателя

При подготовке к работе необходимо определить геометрический коэффициент электродной системы (см. прил.), пределы регулирования мощности котла ЭПЗ-100. Рассчитать полную мощность котла, приняв для воды  $G_{20} = 0,03 \text{ См}\cdot\text{м}^{-1}$ ,  $\alpha = 0,025^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $t_{\text{хол}} = 15^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{гор}} = 95^\circ\text{C}$ . Привести эскиз электродной системы и схему подключения к сети.

### Порядок выполнения работы

1. Исследовать динамические характеристики однофазного электродного водонагревателя (см. рис. 5) при указанном преподавателем напряжении в сети.

Бак водонагревателя необходимо заполнить водопроводной водой в количестве  $V = 5 \text{ л}$ . С помощью автоматического выключателя QF2, выведенного на переднюю панель стенда, подключить водонагреватель к источнику питания.

Произвести измерение начальной температуры воды  $t_{\text{н}}$  в нагревателе.

Включить автомат QF2. Произвести измерение изменения во времени  $\tau$  температуры воды  $t$  и тока между электродами  $I$ .

Измерения производить в моменты времени, когда стрелка вторичного прибора для измерения температуры проходит через оцифрованные деления (через  $10^\circ\text{C}$ ), фиксируя при этом значения тока и времени нагрева до данной температуры. Эксперимент закончить при достижении температуры воды  $t_{\text{к}} = 80^\circ\text{C}$ . Полученные данные занести в табл. 3.

Таблица 3

| Измеренные величины        |   |                                      |             | Результаты расчетов              |   |                |   |   |  |  |
|----------------------------|---|--------------------------------------|-------------|----------------------------------|---|----------------|---|---|--|--|
| Напряжение питания $U$ , В | Температура воды $t$ , $^\circ\text{C}$ | Продолжительность нагрева $\tau$ , с | Ток $I$ , А | Объем воды в нагревателе $V$ , л | Полезная мощность водонагревателя $P_{\text{пол}}$ , Вт | КПД $\eta$ , % | Производительность водонагревателя $\Omega$ , л/ч | Удельный расход электроэнергии $A_{\text{уд}}$ , кВт·ч/(л· $^\circ\text{C}$ ) | Стоимость нагрева воды $C_{\text{уд}}$ , (к./л· $^\circ\text{C}$ ) | Присоединенная мощность нагревателя $P$ , Вт |
|                            | $t_{\text{н}}$                          |                                      |             |                                  |   |                |   |   |  |  |
|                            | 20                                      |                                      |             |                                  |   |                |   |   |  |  |
|                            | 30                                      |                                      |             |                                  |   |                |   |   |  |  |
|                            | ...                                     |                                      |             |                                  |   |                |   |   |  |  |
|                            | $t_{\text{к}} = 80$                     |                                      |             |                                  |   |                |   |   |  |  |

2. Рассчитать для каждого значения температуры величины, заполнить табл. 3.

3. По результатам опыта построить кривую разгона (динамическую характеристику) водонагревателя  $\varrho(\tau)$ , зависимость тока  $I$ , полезной  $P_{\text{пол}}$  и полной  $P$  мощностей нагревателя и КПД  $\eta$  от температуры воды.

4. Содержание отчета: техническая характеристика и эскиз водонагревателя ЭПЗ-100; схема управления ЭПЗ-100; схема лабораторной установки; протоколы испытаний; графики динамических, рабочих и энергетических характеристик водонагревателя; выводы по результатам исследований.

### Контрольные вопросы

1. Сущность электродного нагрева. Для каких материалов он используется?
2. Задача и содержание расчета электродных систем.
3. Чем объясняется изменение мощности и тока водонагревателя в процессе нагрева?
4. Объяснить рабочие и энергетические характеристики электродного водонагревателя.
5. Из каких условий выбирается длина изолирующей вставки?

6. Какие материалы используются в качестве электродов в электродных водонагревателях и почему?
7. Какие мероприятия предусмотрены для обеспечения электробезопасности при работе с электродными водонагревателями?
8. Преимущества и недостатки электродных водонагревателей.
9. Объяснить с физической точки зрения процессы, происходящие в жидкости при электродном нагреве.
10. Расскажите, как работает электрическая схема водонагревателя ЭПЗ-100 на рис. 4.

## Лабораторная работа 4

### ИНДУКЦИОННЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ

*Цель работы.* Изучение устройства, принципа действия и конструкций индукционных нагревателей, исследование энергетических характеристик индукционного нагревателя типа «многовитковый индуктор в ферромагнитной трубе».

#### Методические указания

Изучить по литературе [1, с. 73 – 77; 2, с. 124 – 126; 3, с. 83 – 91; 4, с. 200 – 249; 5, с. 22 – 39] устройство, принцип действия и конструкцию индукционных нагревателей.

Плотность потока активной мощности, выделяемой в виде теплоты, и плотность потока реактивной мощности, характеризующая скорость превращения электромагнитной энергии из электрической в магнитную, обратно пропорциональны квадрату ампервитков и коэффициенту поглощения  $\sqrt{\rho\mu f}$ .

Потребляемая мощность и  $\cos\phi$  будут изменяться в процессе нагрева, так как  $\rho$  и  $\mu$  зависят от температуры (рис. 6).

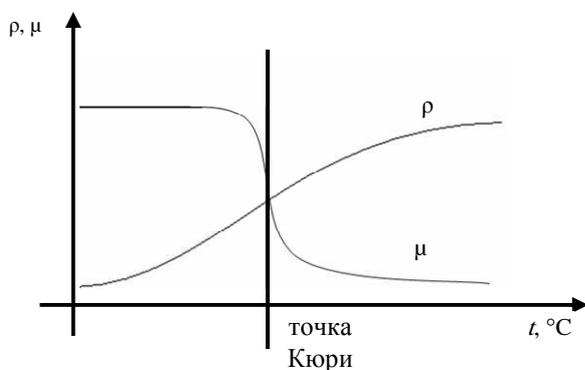


Рис. 6. График зависимости  $\rho$  и  $\mu$  (нагреваемого материала) от  $t$  °С

В результате наличия Скин-эффекта индукционный нагрев можно использовать не только для глубинного нагрева, но и для поверхностной закалки.

$\cos\phi$  системы индуктор-загрузка низок, колеблется в пределах 0,3 – 0,8. При подключении индукторов к трехфазной сети необходимо принимать меры, исключающие перенос мощности из одного индуктора в другой за счет связи магнитных потоков, что приводит к неравномерной нагрузке трехфазной сети и неравномерности нагрева. Индукторы должны устанавливаться далеко друг от друга или защищаться ферромагнетиками или электромагнитными экранами.

По рабочей частоте различают установки:

- промышленной частоты (50 Гц);
- средней частоты (500...2400 Гц);
- высокой частоты (2,4...10 кГц) мощностью от 25 кВт до 20 000 кВ·А.

В лабораторной работе исследуется индукционный нагреватель типа «многовитковый индуктор в ферромагнитной трубе» (рис. 7), представляющий собой ферромагнитную трубу 1, внутри которой расположена индуктирующая одно- или многожильная обмотка 2, выполняемая из стержней, установочного провода или контрольного кабеля.

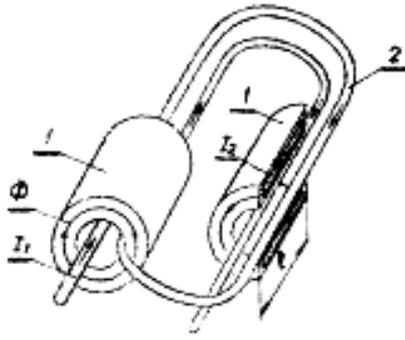


Рис. 7. Многовитковый индуктор в ферромагнитной трубе

Ферромагнитная труба является одновременно приемником энергии магнитного поля и генератором теплоты, служит несущей конструкцией и защищает обмотку индуктора от механических повреждений.

В генерировании тепловой энергии участвуют только активные сопротивления. Активное сопротивление индуктора  $R_n$  является величиной постоянной и зависит от удельного сопротивления материала, длины индуктора, сечения и числа витков, определяется по формуле

$$R_n = \rho l W / S,$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала жилы, Ом·м;  $l$  – длина индуктора, м;  $W$  – число витков индуктора;  $S$  – сечение жилы, м<sup>2</sup>.

Активное сопротивление трубы  $R_T$  из-за наличия поверхностных эффектов не является величиной постоянной и в значительной степени зависит от магнитной проницаемости, которая зависит от напряженности магнитного поля, частоты, удельного сопротивления, длины нагревателя и определяется по формуле

$$R_T = l / \pi \sqrt{\mu_0 \omega \rho_T} \left[ \sqrt{\mu_{вн}} / D_{вн} + \sqrt{\mu_{н}} / D_{н} \right],$$

где  $l$  – длина труб, м;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума ( $12,56 \cdot 10^{-7}$  Г/м);  $\omega$  – угловая частота источника питания;  $\rho_T$  – удельное сопротивление материала трубы, Ом·м;  $\mu_{вн}$ ,  $\mu_{н}$  – относительная магнитная проницаемость внутреннего и наружного слоя труб;  $D_{вн}$ ,  $D_{н}$  – внутренний и наружный диаметры труб, м.

В лабораторной установке по концам отрезков труб имеются переключки, поэтому сопротивление находится по формуле

$$R_T = l / \pi \frac{\sqrt{\mu_0 \mu_{вн} \omega \rho_T}}{D_{вн}}.$$

Общее активное сопротивление нагревателя  $R_n = R_n + W^2 R_T$ .

Мощность нагревателя определяется по формуле  $P_n^2 = I^2 R_n$ .

Мощность, выделяемая в индукторе,

$$P_n = 2 I \rho_n l W / S.$$

Мощность, выделяемая в трубе,  $P_T = P_n - P_n$ .

Полная мощность  $S = UI$ .

Коэффициент мощности  $\cos \phi = P_n / S$ .

Сопротивление трубы  $R_T = P_T / I^2$ .

Глубина проникновения тока в металл

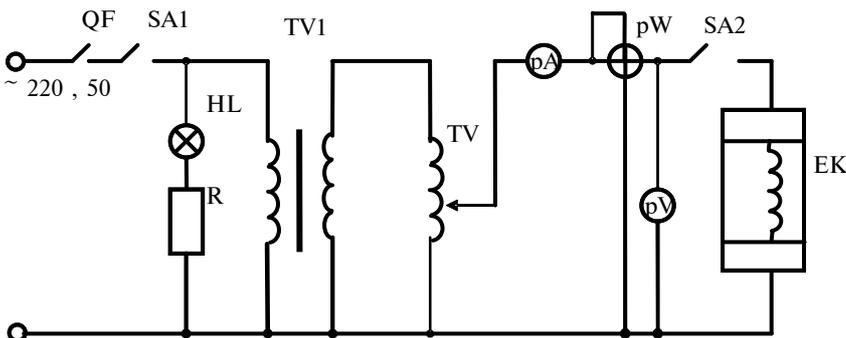
$$\Delta = \frac{\rho_T l}{\pi R_T} \left( \frac{1}{D_{вн}} + \frac{1}{D_{н}} \right), \text{ мм.}$$

Напряженность магнитного поля

$$H = IW / \pi D_{вн}, \text{ А/м.}$$

Принципиальная электрическая схема лабораторного стенда представлена на рис. 8.

Питание индукционного нагревателя ЕК осуществляется от регулятора напряжения TV. Для защиты от коротких замыканий и перегрузок служит автоматический выключатель QF, расположенный на задней панели стенда.



**Рис. 8. Принципиальная электрическая схема лабораторного стенда**

На передней панели стенда расположены тумблеры SA1 и SA2 подключения соответственно питания TV1 и нагревателя ЕК и щитовые приборы рА, рV и рW для измерения тока, напряжения и мощности, потребляемой индукционным нагревателем.

Для измерения температуры нагревателя внутри ферромагнитной трубы расположена термопара, подключенная к мультиметру типа Ш 4500, установленному на передней панели стенда.

Техническая характеристика нагревателя:

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| длина секции трубы .....           | $l = 1,85 \text{ м}$   |
| количество секций .....            | 2  |
| наружный диаметр трубы .....       | $D_{\text{н}} = 21 \text{ мм}$                                   |
| внутренний диаметр трубы .....     | $D_{\text{вн}} = 10 \text{ мм}$                                  |
| марка провода индуктора ПМФЛ ..... | 1×0,2  |
| материал провода – медь .....      | $\rho_{\text{м}} = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ |
| число витков .....                 | $W = 24$   |
| сечение провода .....              | $S = 0,2 \text{ мм}^2$   |
| термостойкость изоляции .....      | 130 °С   |
| материал трубы – сталь .....       | $\rho_{\text{т}} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  |

**Порядок выполнения работы**

1. Переключатели SA1 и SA2 установить в положение «0» (рис. 8). Ручку ЛАТРа TV перевести в крайнее левое положение. Включить автоматический выключатель QF, при этом на передней панели стенда должна загореться сигнальная лампа HL.
2. Измерить начальную температуру нагревателя  $t_{\text{н}}$  и занести в табл. 4.
3. Исследовать зависимость мощности нагревателя  $P_{\text{н}}$  в холодном состоянии от намагничивающей силы (ампервитков  $IW$ ) индуктора. Для этого переключатели SA1 и SA2 установить в положение «1». Вращая ручку ЛАТРа TV последовательно установить значения тока  $I$  от 0 до 5 А с интервалом в 0,5 А через 30 с. Показания напряжения и мощности занести в табл. 4.

Таблица 4

| Состояние нагревателя | Измеренные величины |         |         |                     |                     | Вычисленные величины |                     |                     |           |               |                     |               |           |  |
|-----------------------|---------------------|---------|---------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------|---------------|---------------------|---------------|-----------|--|
|                       | $\tau$ , мин        | $I$ , А | $U$ , В | $P_{\text{н}}$ , Вт | $t_{\text{н}}$ , °С | $IW$ , А             | $P_{\text{н}}$ , Вт | $P_{\text{т}}$ , Вт | $S$ , В·А | $\cos\varphi$ | $R_{\text{т}}$ , Ом | $\Delta$ , мм | $H$ , А/м |  |
| Холодный              | 0...5               |         |         |                     |                     |                      |                     |                     |           |               |                     |               |           |  |
| Нагрев                | 5...50              |         |         |                     |                     |                      |                     |                     |           |               |                     |               |           |  |
| Горячий               | 50...55             |         |         |                     |                     |                      |                     |                     |           |               |                     |               |           |  |

4. Исследовать изменение тока и мощности от температуры нагревателя при неизменном напряжении источника питания, соответствующем максимальному току предыдущего пункта. Измерения производить с интервалом в 5 мин до момента достижения установившегося режима. Результаты опыта занести в табл. 4.

5. Исследовать зависимость характеристик нагревателя от намагничивающей силы (ампервитков  $IW$ ) индуктора в горячем состоянии. Вращая ручку TV, уменьшать ток от 5 А до 0 ступенями в 0,5 А через 30 с.

6. Произвести определение расчетных параметров и занести их в табл. 4.

7. Построить зависимость температуры нагревателя  $t_{\text{н}}$  от времени нагрева  $\tau$ .

8. Построить зависимости  $P_{\text{н}}$ ,  $P_{\text{т}}$ ,  $P_{\text{н}}$ ,  $P_{\text{т}}$ ,  $R_{\text{т}}$ ,  $\Delta$ ,  $\cos\varphi$  от намагничивающей силы  $IW$  и температуры нагревателя  $t_{\text{н}}$ .

**Контрольные вопросы**

1. В каких отраслях промышленности и с какой целью может быть использован индукционный нагрев металлов?
2. От чего зависит интенсивность нагрева металлов в индукторах?
3. Какие конструкции индукторов находят наиболее широкое применение?
4. Что представляет собой многовитковый индуктор в ферромагнитной трубе?
5. Чем определяется глубина проникновения токов в металл?
6. Какие частоты применяются для поверхностной закалки деталей, а какие для глубинного нагрева при использовании индукционных нагревателей?
7. Выгодно ли индукционным методом нагревать детали из цветного металла?
8. Как изменяется мощность, выделяемая в индукционном нагревателе при повышении его температуры?
9. Оказывают ли индукционные установки влияние на окружающую среду и человека?
10. Каким образом в индукционных установках происходит преобразование электрической энергии в тепловую?

## ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАГРЕВ

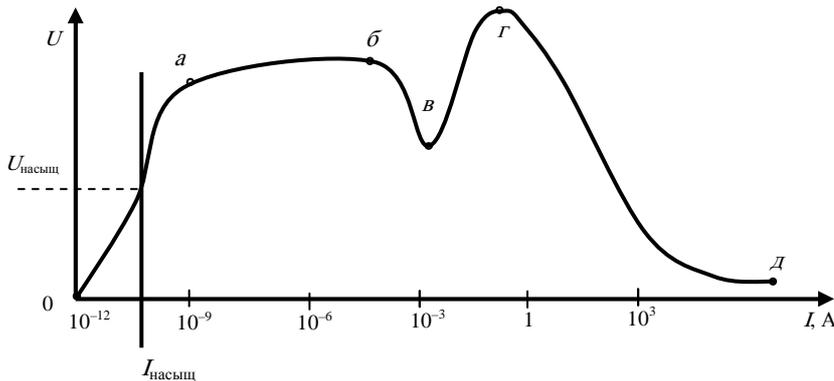
**Цель работы.** Изучение устройства, принципов действия установок электродугового нагрева; исследование способов регулирования тока источников питания установок электродугового нагрева; экспериментальное определение внешних и энергетических характеристик сварочного трансформатора в зависимости от длины электрической дуги.

### Методические указания

Изучить по литературе [1, с. 70 – 73; 2, с. 108 – 123; 3, с. 64 – 84; 4, с. 127 – 139; 5, с. 40 – 91] соответствующие изучаемой теме разделы.

В отличие от жидкостей, где носителями зарядов являются положительные и отрицательные ионы, в газе процессы усложняются тем, что носителями могут быть не только ионы, но и свободные электроны. Влияние давления и температуры на условия движения частиц в газе гораздо сильнее, чем в жидкости или твердом теле, а зависимость силы тока от внешних условий сложнее и типы разрядов более разнообразны (рис. 9):

- участок 0–*a*: **несамостоятельный разряд** (поддерживается ионизацией: нагревание; ультрафиолетовые и рентгеновские лучи) – возможно слабое свечение;



**Рис. 9.** Вольтамперная характеристика электрических разрядов в воздухе

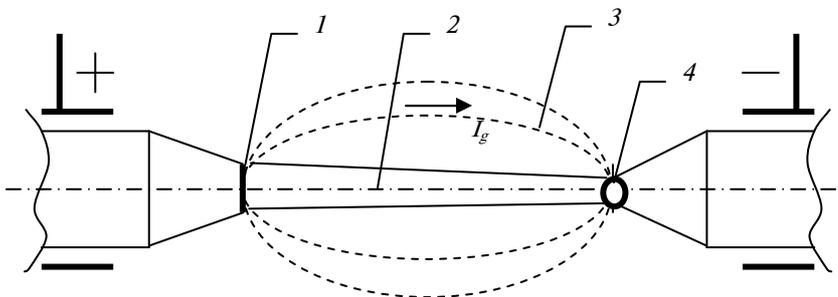
- участок *a*–*б*: **начало самостоятельного разряда** (бомбардировка ионами катода вызывает термоэлектрическую эмиссию – катод испускает электроны, участвующие в создании тока) – возникает устойчивое свечение газа, действующее как ионизатор;

- участок *б*–*в*: **нормальный тлеющий разряд** (поставщиком электронов становится катод) – свечение заполняет межэлектродное пространство (лампы дневного света, неоновые лампы, рекламные длинные трубки разноцветного свечения);

- участок *в*–*г*: **аномальный тлеющий разряд** (неустойчивое состояние) – анодный светящийся столб суживается, катодное свечение стягивается в небольшое пятно;

- участок *г*–*д*: **дуговой разряд** – сильное свечение газа при больших токах: электросварка, источники уличного освещения ламп ДРЛ, ДНаТ (рис. 10).

**Искровой разряд** – неустойчивый разряд между двумя электродами в газе при атмосферном давлении и однородном электродном поле  $\sim 30$  кВ/см – ветвящиеся, узкие светящиеся нити, сливающиеся в яркий светящийся канал (искру), который гаснет, и процесс возобновляется (молния – гигантский искровой разряд, где сила разрядного тока достигает сотен килоампер).



**Рис. 10.** Электрическая дуга постоянного тока:

1 – анодный кратер; 2 – столб дуги; 3 – светящаяся оболочка; 4 – катодное пятно

**Коронный разряд** – не полностью развившийся искровой разряд (в сильно неоднородных полях у заостренных концов металлических тел, а второй электрод расположен далеко, чтобы не развился искровой разряд) – если на острие отрицательный потенциал, электронные лавины движутся наружу, а при положительном потенциале корона имеет более размытое сечение (в электрофильтрах, на молниеотводах облегчает попадание разряда молнии).

**Плазма** – полностью или частично ионизированный газ, в котором плотность зарядов обоих знаков одинакова (любое вещество, нагретое до весьма высокой температуры  $\sim 10^6$  К, когда при соударениях беспорядочно движущиеся молекулы распадаются на атомы и ионизируются). Примеры плазмы: верхние слои атмосферы, канал дугового и искрового разряда, положительный столб тлеющего разряда.

Источник питания сварочной дуги должен обеспечивать надежное зажигание дуги, ее устойчивое горение и регулирование тока.

В статическом состоянии баланс напряжения в сварочной цепи имеет вид

$$U_0 = I_g R_n + U_g,$$

где  $U_0$  – напряжение холостого хода источника питания;  $I_g$  – ток дуги;  $R_n$  – сопротивление цепи источника питания.

При изменении тока в сварочной цепи (рис. 11) баланс мгновенных напряжений следующий:

$$U_0 = I_g R_n + U_g + L \left( \frac{di}{dt} \right),$$

где  $L$  – индуктивность сварочного контура;  $L \frac{di}{dt}$  – ЭДС самоиндукции контура с дугой.

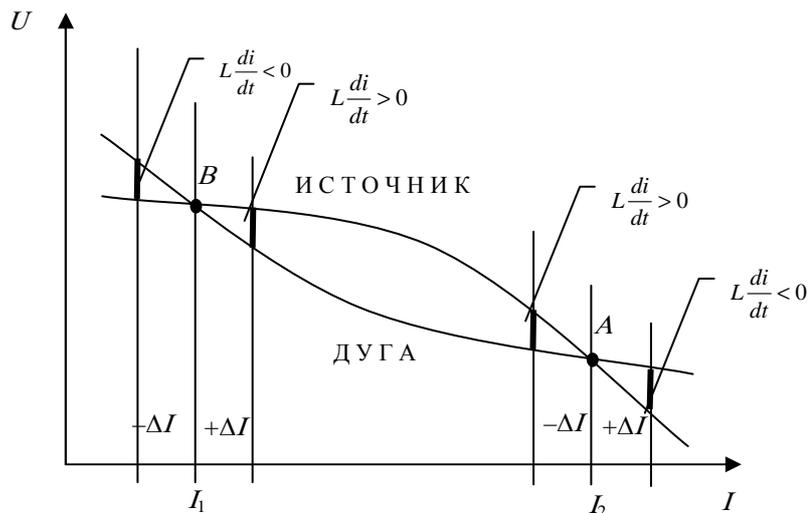


Рис. 11. Внешняя характеристика источника питания и сварочной дуги

Отсюда  $L \frac{di}{dt} = U_0 - I_g R_n - U_g$ .

В точке  $B$  возможно погашение дуги (см. рис. 11), так как при  $L \frac{di}{dt} < 0$  ток будет стремиться к нулю.

Точка  $A$  устойчива к погашению, так как при  $L \frac{di}{dt} < 0$  ток примет значение  $I_2$ .

В лабораторной работе исследуются характеристики сварочного трансформатора, позволяющего производить изменение сварочного тока с помощью ЛАТРа TV. Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 12. На передней панели стенда расположены амперметры  $pA_1$  и  $pA_2$  и вольтметры  $pV_1$  и  $pV_2$  соответственно первичной и вторичной цепей, ваттметр  $pW$  для измерения активной мощности  $P_1$ , потребляемой установкой из сети, и автоматический выключатель QF для подачи питания к сварочному трансформатору.

Переключатель SA1 предназначен для подключения к выходным зажимам сварочного трансформатора угольных электродов, между которыми горит электрическая дуга S, или магазина сопротивлений, имитирующих сопротивление электрической дуги. В положении «\*» переключателя

SA1 к вторичной обмотке трансформатора подключены угольные электроды, а в положениях 1, ..., 5 – нагрузка, соответственно в 0,1, ..., 0,5 Ом для обеспечения возможности измерения внешних и энергетических характеристик (рис. 12).



|  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  | 0,6 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 0,8 |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 1   |  |  |  |  |  |  |  |  |

### Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая дуга? Из каких участков она состоит?
2. Классификация источников питания сварочного тока.
3. Требования к источникам сварочного тока.
4. Условия устойчивости системы источник питания – дуга.
5. За счет чего обеспечивается падающая внешняя характеристика?
6. Способы регулирования сварочного тока.
7. Объяснить изменение энергетических параметров трансформатора в зависимости от нагрузки.
8. Перечислить виды электрических разрядов в газах.
9. В каких установках применяются действия электрических разрядов?
10. Чем отличаются коронный и дуговой разряды?

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЗНАНИЙ

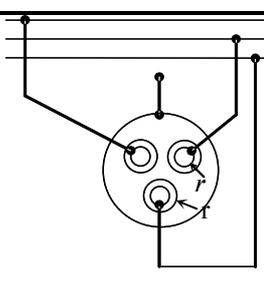
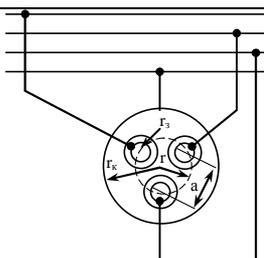
1. Электронагревательные устройства (ЭНУ) какого типа наиболее распространены в сельском хозяйстве?
2. Каким свойством должен обладать материал нагревателя?
3. Как изменить мощность шести нагревателей при переключении их с последовательной цепи на параллельную?
4. Какие параметры определяют при электрическом расчете ЭНУ?
5. С какой целью ТЭН для электрокалориферов выполняют с алюминиевым оребрением?
6. Из какого материала изготавливают спирали ТЭН?
7. Какие материалы используют в качестве наполнителя в ТЭН?
8. Что означают цифры, отмеченные звездочкой, в условном обозначении трубчатого нагревателя ТЭН-25А10/0,5Р220?
9. Что означают цифры, отмеченные звездочкой, в условном обозначении трубчатого нагревателя ТЭН-25А10/1,0Р220?
10. Что означают цифры, отмеченные звездочкой, в условном обозначении трубчатого нагревателя ТЭН-25А10/0,1Р220?
11. Как зависит мощность нагревателя от приложенного напряжения?
12. Сколько термических сопротивлений необходимо учитывать при определении мощности потерь через двухслойную стенку?
13. На основе какого закона определяют удельную поверхностную мощность нагревателя при лучистом теплообмене?
14. Как зависит мощность лучистого потока от температуры излучателя?
15. Какие параметры определяют при тепловом расчете ЭНУ?
16. В какой последовательности рассчитывают нагреватели по рабочему току?
17. Как изменится мощность, потребляемая тремя нагревателями, при переключении их со звезды на треугольник?
18. Как изменится мощность, потребляемая нагревателем при увеличении его длины и диаметра в 2 раза, и неизменном напряжении питания?
19. Как изменится мощность, потребляемая нагревателем, при увеличении подводимого напряжения в 2 раза?
20. По какому из выражений определяют мощность электромагнитной энергии, поглощаемой в объеме проводника, при прохождении тока?
21. Как изменится мощность, потребляемая электродным водонагревателем, при повышении температуры воды от 20 до 100 °С?
22. Какой из способов чаще всего используют для регулирования мощности электродных водонагревателей?
23. Когда электродный паровой котел потребляет наибольшую мощность?
24. Как изменится удельное сопротивление воды при повышении ее температуры от 20 до 100 °С?
25. В чем заключается опасность работы электродного водонагревателя на двух фазах?
26. Как удельное сопротивление воды зависит от температуры?
27. Каковы причины выхода из строя элементных водонагревателей при их включении в сеть без воды?
28. Что является причиной выхода из строя электрокалорифера при остановке вентилятора?
29. Какой из способов наиболее широко применяют для обогрева почвы в парниках и теплицах?
30. Как должны быть соединены емкость С, вентиль VD и формирующий промежуток F в устройстве для получения электрогидравлического эффекта в рабочей жидкости?
31. Какова вольтамперная характеристика открытой дуги?
32. Какой должна быть внешняя характеристика трансформатора для ручной сварки открытой дугой?
33. Назовите значения частоты, используемой в установках диэлектрического нагрева.
34. Назовите значения частоты, применяемой в установках индукционного нагрева для поверхностной закалки.
35. Зачем в установке индукционного нагрева параллельно индуктору (или ВЧ трансформатору) подключают конденсатор?
36. От каких свойств материала зависит глубина проникновения тока при индукционном нагреве?

37. От каких характеристик материала не зависит интенсивность диэлектрического нагрева?
38. Как зависит теплота, получаемая от термоэлектрического теплового насоса, от силы тока термобатареи?
39. При каком условии частица оторвется от вращающегося электрода коронного барабанного электросепаратора?
40. Что такое коронный разряд в межэлектродном промежутке?
41. Как выражается начальная напряженность коронного разряда (эмпирическая формула Пика)?
42. Что такое подвижность ионов  $k$  и как обозначают единицу ее измерения?
43. Чем опасно включение электродного водонагревателя при неработающем циркуляционном насосе?
44. Что означают цифры в условном обозначении электрического водонагревателя САОС-1600/90?
45. Какое соединение емкости  $C$ , индуктивности  $L$  и сопротивления  $R$  является аналогом электрического водонагревателя?
46. Что является аналогом мощности водонагревателя на электрической схеме-аналоге?
47. Назовите диапазон частот ультразвука.
48. Чему равна напряженность электрического поля в воздушном промежутке плоского конденсатора, частично заполненного параллельным слоем диэлектрика?

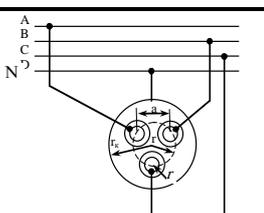
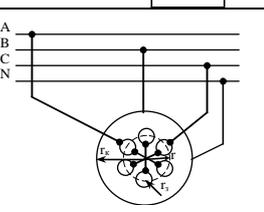
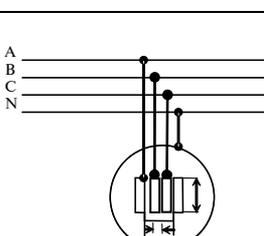
### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнология / А.М. Басов, В.Г. Быков, А.В. Лаптев и др. – М. : Агропромиздат, 1985. – 256 с.
2. Кудрявцев, И.Ф. Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – М. : Колос, 1975. – 384 с.
3. Живописцев, Е.Н. Электротехнология и электрическое освещение / Е.Н. Живописцев, О.А. Косицын. – М. : Агропромиздат, 1990. – 302 с.
4. Гершензон, Е.М. Электродинамика / Е.М. Гершензон, Н.Н. Мелов, А.Н. Мансуров. – М. : Издательский центр «Академия», 2002. – 252 с.
5. Шеховцов, В.П. Электрическое и электромеханическое оборудование / В.П. Шеховцов. – М. : Форум. Инфра-М, 2004. – 407 с.
6. Шевель, Д.М. Электромагнитная безопасность / Д.М. Шевель. – Киев : НТИ, 2002. – 432 с.
7. Миронов, Ю.М. Электрооборудование и электроснабжение электротехнических, плазменных и лучевых установок / Ю.М. Миронов, А.Н. Миронова. – М. : Энергоатомиздат, 1991.

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ  
ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ И  
ПАРОВЫХ КОТЛОВ

| Конструктивная схема электродной системы   | Основная (дополнительная) эквивалентная электрическая схема | Геометрический коэффициент   | Максимальная напряженность поля   | Примечание  |
|--|---|--|---|---|
|  | Y   | $\frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_H}{r_B}$   | $E_{\max} = \frac{U_{\phi}}{r_B \ln \frac{r_H}{r_B}}$                               | Оптимальное соотношение $r_B/r_H = 0,368$                         |
|  | $\Delta(Y)$   | $\frac{1}{4\pi} \ln \left[ \frac{3r^2(r_K^2 - r^2)^2}{r_3^2(r_K^6 - r^6)} \right]$ | $E_{\max} = \frac{0,43U_{\text{л}}}{\sqrt{3}r_3 \lg \frac{2r_3 + a}{r_3 \sqrt{3}}}$ | Оптимальное соотношение размеров $r = 0,51r_K$ , $r_3 = 0,21 r_K$ |

Продолжение прил.

| Конструктивная схема электродной системы   | Основная (дополнительная) эквивалентная электрическая схема | Геометрический коэффициент   | Максимальная напряженность поля           | Примечание |
|--|---|--|---|------------|
|  | Y( $\Delta$ )   | $(0,33...0,5) \frac{1}{4\pi} \ln x$<br>$x \left[ \frac{3r^2(r_K^2 - r^2)^3}{r_3^2(r_K^6 - r^6)} \right]$ | $E_{\max} = kU_{\phi}/a$ ,<br>$k > 1$     | -          |
|  | $\Delta(Y)$   | $\frac{1}{8\pi} \ln \left[ \frac{3r^2(r_K^4 - r^4)^2}{r_3^2(r_K^8 - r^8)} \right]$                       | -   | -          |
|  | Y( $\Delta$ )   | $a/b$  | $E_{\max} = kU_{\text{л}}/a$ ,<br>$k > 1$ | -          |