

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ И МИКРОВОЛНОВЫЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ

*Методические рекомендации к практическим занятиям  
для студентов направления подготовки  
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»  
дневной формы обучения*



Могилев 2018



УДК 615.8  
ББК 30.16  
Т 34

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «22» мая 2018 г.,  
протокол № 10

Составители: д-р физ.-мат. наук, проф. В. И. Борисов;  
ст. преподаватель А. Н. Прудников

Рецензент канд. техн. наук, доц. Б. Б. Скарыно

Методические рекомендации разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Тепловизионные и микроволновые аппараты и системы» для студентов направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии».

Учебно-методическое издание

## ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ И МИКРОВОЛНОВЫЕ АППАРАТЫ И СИСТЕМЫ

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| Ответственный за выпуск | С. С. Сергеев    |
| Технический редактор    | А. Т. Червинская |
| Компьютерная верстка    | Н. П. Полевничая |

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2018



## Содержание

|  |    |
|--|----|
| 1 Практическое занятие № 1. Изучение особенностей распространения ИК-излучения в биологических тканях. Расчет коэффициентов отражения и прохождения ИК-излучения на границе двух сред..... | 4  |
| 2 Практическое занятие № 2. Изучение основ бесконтактного измерения температуры. Яркостные, цветовые и радиационные пирометры. Анализ современной технической базы пирометрии.....         | 10 |
| 3 Практическое занятие № 3. Изучение схем построения сканирующих визуализаторов тепловых полей.....  | 15 |
| 4 Практическое занятие № 4. Изучение особенностей строения современной тепловизионной техники.....   | 19 |
| 5 Практическое занятие № 5. Изучение схем построения электровакуумных источников СВЧ-излучений.....  | 25 |
| 6 Практическое занятие № 6. Изучение назначения элементов и устройств для обработки СВЧ-сигналов.....  | 31 |
| 7 Практическое занятие № 7. Изучение физических и биологических основ и аппаратуры индуктотермии.....  | 35 |
| 8 Практическое занятие № 8. Изучение схем строения СВЧ-томографов.....   | 39 |
| 9 Практическое занятие № 9. Изучение документов о безопасности медперсонала при микроволновой и тепловизионной диагностике и лечении пациентов.....  | 43 |
| Список литературы.....   | 48 |



# 1 Практическое занятие № 1. Изучение особенностей распространения ИК-излучения в биологических тканях. Расчет коэффициентов отражения и прохождения ИК-излучения на границе двух сред

**Цель работы:** изучить теоретические основы распространения теплового излучения.

## 1.1 Основные теоретические сведения

Тепловое излучение представляет собой процесс переноса теплоты в виде электромагнитных волн с двойным преобразованием тепловой энергии в лучистую и наоборот.

**1.1.1 Коэффициенты отражения, поглощения и пропускания.** Обычно тело участвует в лучистом теплообмене с другими телами. Энергия излучения других тел, попадая на поверхность данного тела извне, частично поглощается, частично отражается, а часть ее проходит сквозь данное тело. В соответствии с этим можно выделить падающий поток излучения  $\Phi_{\text{пад}}$ , отраженный поток излучения  $\Phi_{\text{отр}}$ , поглощенный поток излучения  $\Phi_{\text{погл}}$  и прошедший поток излучения  $\Phi_{\text{прош}}$ .

На основании закона сохранения энергии падающий поток излучения можно представить как сумму отраженного, поглощенного и прошедшего потоков излучения:

$$\Phi_{\text{пад}} = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{прош}}.$$

Связь между падающим потоком излучения и потоками отраженного, поглощенного и прошедшего излучения выражается с помощью интегральных характеристик, называемых коэффициентами отражения, поглощения и пропускания.

Коэффициентом поглощения излучения  $A$  называется величина, равная отношению поглощенного потока излучения к падающему:

$$A = \Phi_{\text{погл}} / \Phi_{\text{пад}}.$$

Коэффициент поглощения характеризует долю излучения, поглощенного телом. Для характеристики поглощенного излучения на разных длинах волн используется понятие спектрального коэффициента поглощения, который определяет долю поглощенного монохроматического потока излучения по отношению к падающему монохроматическому потоку излучения:

$$A_{\lambda} = \Phi_{\text{погл}\lambda} / \Phi_{\text{пад}\lambda}.$$

Коэффициент  $A_{\lambda}$  зависит от длины волны излучения. Между интегральным

и спектральными коэффициентами поглощения существует зависимость

$$A = \int_0^{\infty} A_{\lambda} \Phi_{e\lambda n\alpha d} / \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda n\alpha d}.$$

Коэффициентом отражения излучения  $R$  называется величина, равная отношению отраженного потока излучения к падающему потоку излучения:

$$R = \Phi_{e\text{отр}} / \Phi_{e\text{пад}}.$$

Этот интегральный коэффициент отражения определяет долю отраженного на всех длинах волн излучения по отношению к падающему излучению. Аналогично вводится спектральный коэффициент отражения, характеризующий отношение отраженного потока излучения к падающему на отдельной длине волны:

$$R_{\lambda} = \Phi_{e\lambda\text{отр}} / \Phi_{e\lambda\text{пад}}.$$

Связь между интегральным и спектральными коэффициентами отражения излучения определяется следующим соотношением:

$$R = \int_0^{\infty} R_{\lambda} \Phi_{e\lambda\text{отр}} / \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda\text{пад}}.$$

Коэффициентом пропускания излучения  $D$  называется величина, равная отношению отраженного потока излучения к падающему потоку излучения:

$$D = \Phi_{e\text{прош}} / \Phi_{e\text{пад}}.$$

Этот интегральный коэффициент пропускания определяет долю прошедшего через участок среды на всех длинах волн излучения по отношению к падающему на всех длинах волн излучению. Аналогично вводится спектральный коэффициент пропускания, характеризующий отношение доли прошедшего потока излучения к падающему на отдельной длине волны:

$$D_{\lambda} = \Phi_{e\lambda\text{прош}} / \Phi_{e\lambda\text{пад}}.$$

Связь между интегральным и спектральными коэффициентами пропускания излучения определяется следующим соотношением:

$$D = \int_0^{\infty} D_{\lambda} \Phi_{e\lambda\text{отр}} / \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda\text{пад}}.$$

Если падающее излучение подвергается только процессам поглощения, от-

ражения и прохождения, то между интегральными коэффициентами отражения, поглощения и пропускания существует связь  $A + R + D = 1$ , выражающая закон сохранения энергии

$$1 = \Phi_{\text{отр}} / \Phi_{\text{пад}} + \Phi_{\text{погл}} / \Phi_{\text{пад}} + \Phi_{\text{прош}} / \Phi_{\text{пад}}.$$

Для спектральных коэффициентов отражения, пропускания и поглощения также справедливо соотношение

$$A_{\lambda} + R_{\lambda} + D_{\lambda} = 1.$$

*1.1.2 Особенности теплового излучения.* В зависимости от значений коэффициентов поглощения, отражения и пропускания различные тела могут полностью или частично поглощать, отражать или пропускать падающее на них излучение. Рассмотрим некоторые характерные случаи.

1 Коэффициент поглощения  $A = 0$ . Значит тело не поглощает падающее на него излучение. Излучение теплового баланса для этого случая

$$R + D = 1.$$

Следовательно, все падающее на тело излучение будет отражаться или пропускаться в зависимости от коэффициентов пропускания и отражения.

2 Коэффициент поглощения  $A = 1$ . В этом случае тело поглощает все падающее на него излучение.

Тела, которые поглощают все падающее на них излучение, называются абсолютно черными. Зрительно такие тела воспринимаются черными. Абсолютно черное тело (АЧТ) может служить так называемой ловушкой излучения. Для таких тел уравнение теплового баланса имеет вид:

$$R + D = 0.$$

Тела, для которых спектральный коэффициент поглощения не зависит от длины волны, называются серыми. Для таких тел  $A_{\lambda} = \text{const}$ , но меньше единицы. Следовательно, серые тела поглощают не все падающее на них излучение. Часть падающего на такое тело излучения будет отражаться телом или пропускаться через него.

3 Коэффициент отражения  $R = 1$ . Тела, для которых коэффициент отражения равен единице, называются абсолютно белыми. Такие тела полностью отражают падающее на них излучение. Близким по своим отражательным свойствам к белым телам является снег. Уравнение теплового баланса для абсолютно белых тел принимает следующий вид:

$$A + D = 0.$$

4 Коэффициент пропускания  $D = 1$ . В этом случае тело пропускает все па-



дающее на него излучение. Тела, которые пропускают все падающее на них излучение, ничего не поглощая и не отражая, называются прозрачными или диатермичными. Примерами диатермичных тел могут служить тонкие слои сухого воздуха или слои одноатомных газов. Уравнение теплового баланса для таких тел имеет вид:

$$A + R = 0.$$

Тела, у которых  $0 \leq D \leq 1$ , называются полупрозрачными. Примерами таких тел являются стекло, кварц, сапфир и др.

5 Коэффициент пропускания  $D = 0$ . Тела, для которых коэффициент пропускания равен нулю, называются непрозрачными или атермическими. Уравнение теплового баланса для таких тел имеет вид:

$$A + R = 1.$$

### *1.1.3 Взаимодействие оптического излучения с биологическими тканями.*

При оценке особенностей лечебного действия оптического излучения, кроме его отражения, рассеяния, поглощения, необходимо учитывать корпускулярные эффекты, такие как фотохимический, фотоэлектрический, фотолитический и др.

В механизме фотобиологического действия оптического излучения определяющим является поглощение энергии световых квантов атомами и молекулами биологических тканей (закон Гротгуса-Дрейпера). В результате образуются электронно-возбужденные состояния с переносом энергии кванта (внутренний фотоэффект) и происходит электролитическая диссоциация и ионизация биологических молекул. При этом характер первичных фотобиологических реакций определяется энергией квантов оптического излучения. Так, в ИК-области энергии фотонов  $(1,6 \dots 2,4) \cdot 10^{-19}$  Дж достаточно только для увеличения колебательных процессов биологических молекул.

Видимое излучение, энергия фотонов которого составляет  $(3,2 \dots 6,4) \cdot 10^{-19}$  Дж, способно вызвать электронное возбуждение биологических молекул и их фотолитическую диссоциацию. Более жесткие кванты ультрафиолетового излучения с энергией  $(6,4 \dots 9,6) \cdot 10^{-19}$  Дж вызывают ионизацию молекул и разрушение ковалентных связей.

На следующем этапе энергия оптического излучения трансформируется в тепло или образуются первичные фотопродукты, выступающие пусковым механизмом фотобиологических процессов. Первый тип энергетических превращений присущ в большей степени инфракрасному излучению, а второй – ультрафиолетовому. Анализ природы происходящих процессов позволяет утверждать, что специфичность лечебных эффектов различных спектральных участков оптического излучения зависит от длины волны.

Степень проявления фотобиологических эффектов в организме зависит от интенсивности оптического излучения, которая подчиняется закону обратных квадратов, т. е. она обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до облучаемой поверхности. Поэтому в клинической практике определяют

не интенсивность, а дозу облучения на определенном расстоянии путем изменения времени облучения.

Таким образом, электромагнитные волны оптического диапазона имеют определенное пространственно-временное распределение энергии, которая при взаимодействии с биологическими тканями трансформируется в другие виды энергии (тепловую, химическую). Вызванные возбуждением или нагреванием биологических тканей организма процессы служат пусковым механизмом физико-химических и биологических реакций, которые формируют конечный терапевтический эффект. При этом каждый из типов излучений вызывает присущие только ему физико-химические процессы, которые определяют специфичность их лечебных эффектов и методов применения.

Общая классификация методов применения электромагнитных излучений оптического диапазона в лечебной практике приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Применение электромагнитных излучений в лечебной практике

| Характер излучения                               | Метод лечебного применения              |
|--|---|
| Инфракрасное излучение                           | ИК-облучение                            |
| Видимое излучение                                | Хромотерапия                            |
| Ультрафиолетовое излучение                       | УФ-облучение                            |
| Длинноволновое ультрафиолетовое излучение (ДУФ)  | Длинноволновое УФ-облучение             |
| Средневолновое ультрафиолетовое излучение        | Средневолновое УФ-облучение             |
| Коротковолновое ультрафиолетовое излучение (КУФ) | Коротковолновое УФ-облучение            |
| Монохроматическое когерентное излучение          | Лазеротерапия, фотодинамическая терапия |

При применении активных и пассивных ИК-систем часто необходимо учитывать полезные или мешающие свойства естественных источников. Основным таким источником является Солнце, излучение которого можно аппроксимировать излучением АЧТ при температуре 5787 К. Энергетическая освещенность Солнца на Земле составляет 1,4 кВт/м<sup>2</sup>.

Освещенность от Луны в 465000 раз меньше, чем от Солнца. Луна представляет собой излучатель типа АЧТ, нагретого до температуры 340...350 К.

При построении приборов теплового контроля на пути используемого ИК-излучения устанавливаются различные устройства, которые отражают и поглощают излучение, изменяя его спектральный состав.

При распространении ИК-излучения в воздухе в отдельных спектральных областях наблюдаются «окна прозрачности», где коэффициент поглощения значительно меньше, чем в других спектральных областях. Эти окна расположены от видимой области до 2,5 мкм, затем от 3 до 5 мкм. Широкая полоса прозрачности расположена от 8 до 14 мкм и от 15 до 24 мкм.

Обыкновенные и оптические стекла представляют собой соединения, главным компонентом которых является окись кремния. Такие стекла пропускают излучение до 2...2,5 мкм. Такое пропускание обусловлено поглощением групп ОН в стеклах. Если стекло переплавить в вакууме, то можно граничную



длину волны сдвинуть в длинноволновую область до 4,4 мкм.

Германатные и алюминатные стекла на основе германата и алюмината кальция пропускают до 5...6 мкм. Этот сдвиг обусловлен более низкими резонансными частотами более тяжелых компонентов стекол. Здесь также необходима спецобработка для удаления воды. Граница пропускания оксидных стекол примерно 6 мкм.

Более широким спектральным диапазоном пропускания обладают халькогенидные стекла на основе мышьяковистых соединений сернистого ( $As_2S_3$ ) и селенистого ( $As_2Se_3$ ) мышьяка. Эти стекла хорошо пропускают излучение с длинами волн до 8...14 мкм. Главным их недостатком является низкая температура размягчения, порядка 150 °С.

В качестве материалов, хорошо пропускающих ИК-излучение, широко используются природные монокристаллы хлористого калия, хлористого натрия, флюорита ( $CaF_2$ ), слюда. Изготавливаются также искусственные кристаллы фтористого лития, окиси алюминия  $Al_2O_3$  (корунда), бромистого калия, фтористого стронция, бромистого таллия.

Разработаны специальные марки стекол КРС-5 (TlBr-TlI), КРС-6 (TlBr-TlCl), КРС-13 (AgBr-AgCl). Граница пропускания этих материалов достигает десятков микрометров. Но трудность выращивания, гигроскопичность, ядовитость паров и порошков приводят к их ограниченному применению.

Монокристаллические полупроводники кремний, германий, теллуристый кадмий, сернистый цинк также широко используются в ИК-технике, т. к. они хорошо пропускают излучение дальнего диапазона ИК-излучения. Но трудности выращивания монокристаллов не позволяют их широко применять в технике.

На основе мелкокристаллических структур получен новый материал Иртран посредством горячего прессования мелкозернистых порошков на основе фтористого магния (Иртран-1) или сернистого цинка (Иртран-2). Первый пропускает излучение до 6 мкм, второй – до 13 мкм. Но технология их изготовления не позволяет изготавливать образцы размерами более нескольких сантиметров. Кроме этого, данные материалы обладают сильным рассеянием в коротковолновой области спектра.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Какое излучение называется тепловым?
- 2 Почему тепловое излучение является равновесным?
- 3 Какое тело называется: а) абсолютно черным; б) серым?
- 4 Объясните последовательность изменения цвета твердого тела при его нагревании.
- 5 Биологическое действие электромагнитных излучений СВЧ-диапазона на организм человека.

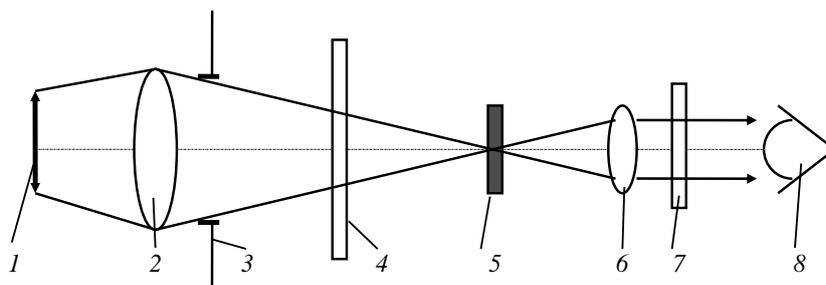


## 2 Практическое занятие № 2. Изучение основ бесконтактного измерения температуры. Яркостные, цветовые и радиационные пирометры. Анализ современной технической базы пирометрии

**Цель работы:** изучить методы и приборы пирометрии.

### 2.1 Основные теоретические сведения

По принципу действия различают яркостные, цветовые и радиационные пирометры. Яркостные пирометры используют для измерения температуры более 600 °С. Принцип их действия основан на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры. Наиболее распространённый способ оптического определения температуры базируется на сравнении излучения нагретого тела в одном определённом спектральном участке длин волн с излучением абсолютно чёрного тела той же длины волны. Это сравнение с наибольшим удобством осуществляется в пирометре с исчезающей нитью, схема которого приведена на рисунке 2.1.



1 – объект контроля; 2 – объектив; 3 – диафрагма; 4 – нейтральный светофильтр; 5 – нить пирометрической лампы; 6 – окуляр; 7 – красный светофильтр; 8 – наблюдатель

Рисунок 2.1 – Схема яркостного пирометра

Объектив 2 проектирует через диафрагму 3 и нейтральный светофильтр 4 светящуюся поверхность объекта контроля в плоскость 5, где расположена нить специальной пирометрической лампы, которая рассматривается наблюдателем 8 через красный светофильтр 7 с помощью окуляра 6. Наблюдатель видит одновременно изображение нити лампы и объекта контроля. Меняя ток, добиваются исчезновения нити (она становится невидимой) на фоне объекта контроля и по градуировочному графику или шкале определяют температуру. Фильтр 7 служит для выделения узкого участка длин волн, а светофильтр 4 вводится при больших яркостях.

Таким образом, измеряют яркостную температуру  $T_y$  такую, при которой спектральная плотность яркости  $L_v(\lambda, T_y)$  абсолютно чёрного тела для некоторой длины волны  $\lambda$  равна спектральной яркости  $L_v(\lambda, T_u)$  нечёрного излучателя при истинной температуре  $T_u$ .

Яркостная и истинная температуры связаны отношением

$$T_u = \frac{C_2}{\lambda} \left( \frac{C_2}{\lambda T_u} + \ln \varepsilon(\lambda, T_u) \right)^{-1}.$$

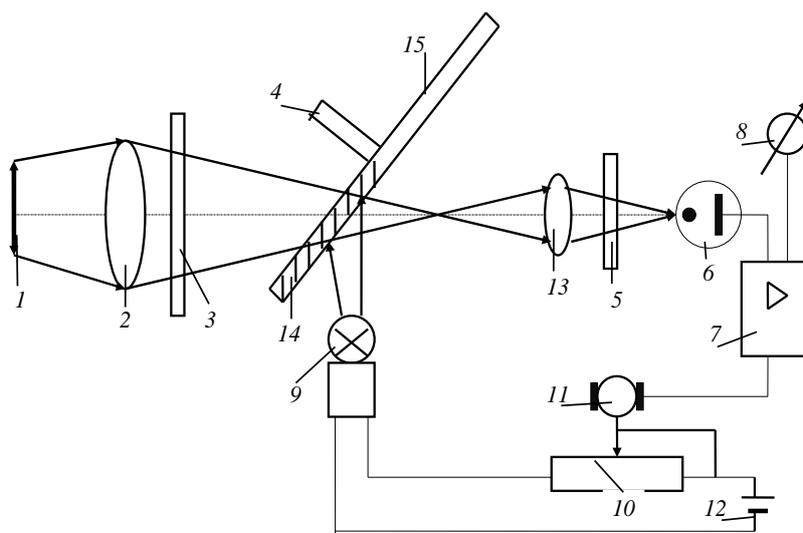
Серийно выпускаемые яркостные пирометры ОППИР-09, ОППИР-017 со встроенными показывающими приборами и автономным питанием от аккумуляторов. Фокусировка таких приборов производится от 0,7 м до бесконечности. Пределы измерений – 800...6000 °С. Точность – ±20 °С.

Выпускается также пирометр повышенной точности ОПК-57, определяющий температуру в диапазоне 700...6000 °С с точностью ±10 °С.

Микропирометры МОП-48 и ОМП-43 служат для измерения температуры малогабаритных изделий.

Для более точного определения температуры выпускаются образцовые пирометры ОП-48 и ЭОП-51М. Они имеют погрешность измерения ±1,6 °С при температуре 900 °С.

Использование в яркостных пирометрах вместо наблюдателя объективных приемников излучения типа электронно-оптических преобразователей и видеоконвекторов позволяет снизить регистрируемую температуру до 200 °С. Схема такого пирометра приведена на рисунке 2.2.



1 – объект контроля; 2 – объектив; 3 – контрольный светофильтр; 4 – модулятор; 5 – селективный светофильтр; 6 – приемник излучения; 7 – усилитель-компаратор; 8 – индикатор; 9 – пирометрическая лампа; 10 – реостат; 11 – электродвигатель; 12 – источник питания фотометрической лампы; 13 – объектив; 14 – зеркальная часть модулятора; 15 – пропускающая часть модулятора

Рисунок 2.2 – Схема пирометра с чередованием потоков

В этом пирометре зеркало 14 вращающегося модулятора 4 поочередно направляет на приемник 6 излучение от объекта контроля 1 и пирометрической лампы 9. Автоматическое регулирующее устройство 10, состоящее из потенциометра 10, источника питания 11 и реверсивного электродвигателя 12, регулирует (с помощью управления усилителем-компаратором 7) нагрев нити лампы с таким

расчетом, чтобы переменная составляющая тока на выходе приемника излучения была равна нулю, т. е. при этом достигается равенство яркостей объекта контроля и нити накала лампы. Индикатор 8 показывает измеряемую температуру.

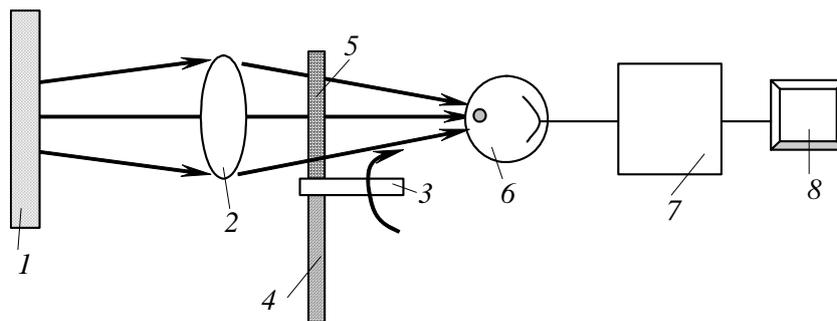
Главное достоинство таких пирометров – независимость измерений от наблюдателя. Точность контроля составляет  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Время измерения – 1 с.

В пирометре ФЭП-60 в качестве подводящей оптики используется волоконный световод.

Своеобразной модификацией яркостных пирометров являются фотографические пирометры, фиксирующие изображение объекта контроля и эталона на пленке с последующим сравнением. Однако недостаток таких пирометров – большое время на обработку фотоматериалов. Достоинство заключается в том, что получается документ.

Достоинством вообще всех типов пирометров является возможность регистрации температурных полей объектов контроля больших размеров с высокой временной и пространственной разрешающей способностью.

Если известно распределение энергии в спектре черного тела, то известно положение максимума, тогда температура определяется по закону Вина. Если излучающее тело не является черным, то применение формулы Вина не имеет смысла. Но иногда (для серых тел) распределение энергии в спектре таких тел можно практически отождествить с распределением энергии абсолютно черного тела с температурой  $T_c$ . Эта температура называется цветовой и изменяется цветовыми пирометрами, которые основаны на сравнении излучательной способности нагретого тела в двух спектральных диапазонах (обычно используются диапазоны с максимумами на длине волн 470 и 660 нм). Логарифм их отношения обратно пропорционален цветовой температуре объекта контроля. Оптическая схема цветowego пирометра приведена на рисунке 2.3.



1 – объект контроля; 2 – объектив; 3 – модулятор; 4, 5 – селективные светофильтры модулятора; 6 – приемник излучения; 7 – устройство обработки электрического сигнала; 8 – регистрирующий прибор

Рисунок 2.3 – Схема цветowego пирометра

Модулятор 4 обычно содержит два светофильтра, перекрывающие поочередно поток излучения в разных спектральных областях, и направляет данный поток на фотоприемник.

Метод цветовой пирометрии может быть распространен на инфракрасную

область. При соответствующем подборе приемника излучения, материалов проекционной оптики и светофильтров можно измерить температуру от 20...50 °С.

Цветовой пирометр определяет цветовую температуру. Цветовой температурой  $T_c$  серого излучателя с истинной температурой  $T_u$  называют такую температуру  $T_c$  абсолютно черного тела, при которой цветности их излучения одинаковы. Под цветностью понимают отношение излучательных способностей тела на разных длинах волн.

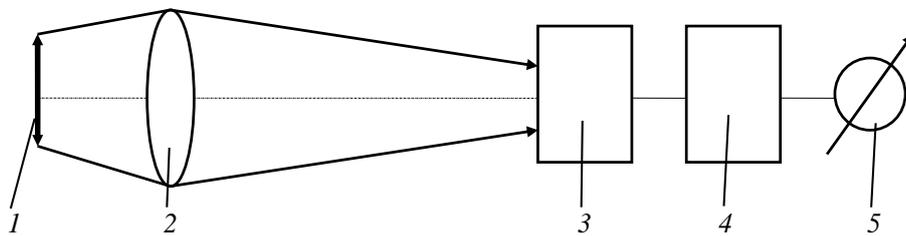
Цветовая температура  $T_c$  и истинная температура  $T_u$  связаны между собой соотношением

$$1/T_u = 1/T_c - \ln(\varepsilon(\lambda_1, T_u)/\varepsilon(\lambda_2, T_u))/C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1).$$

Так как коэффициент излучения слабо зависит от длины волны, то часть выражения с логарифмом практически равна нулю, поэтому цветовой пирометр фактически измеряет истинную температуру.

Один из цветковых пирометров марки ЦЭП-3 работает в диапазоне 1400...2800 °С и имеет погрешность  $\pm 1$  %.

Радиационными пирометрами или пирометрами полного излучения называют приборы, которые воспринимают излучение измеряемой поверхности во всем спектральном диапазоне и преобразовывают его в соответствующий сигнал (рисунок 2.4).



1 – объект контроля; 2 – объектив; 3 – приемник излучения; 4 – усилитель; 5 – индикатор

Рисунок 2.4 – Схема радиационного пирометра

Но поскольку линзы, окна, приемники излучения имеют ограниченный рабочий диапазон длин волн, строго говоря, в пирометре используется не полный спектр, а лишь ограниченная полоса, и его следовало бы называть пирометром частичного излучения. Тем не менее принято считать пирометр радиационным (полного излучения), если в нем используется не менее 90 % всего излучения, поступающего от измеряемого объекта. Действие радиационных пирометров основано на законе Стефана-Больцмана. Поэтому, если исследуется не абсолютно черное тело, то показания радиационного пирометра дают не истинную температуру, а радиационную  $T_p$ , под которой понимают температуру такого абсолютно черного тела, суммарная радиация которого равна радиации излучаемого тела.

Эти температуры связаны соотношением

$$T_{ц} = T_p / \sqrt[4]{Q_T},$$

где  $Q_T$  – отношение суммарной испускательной способности измеренного тела  $M_e(T)$  к испускательной способности абсолютно черного тела  $M_e^0(T)$  при данной температуре,  $Q_T = M_e(T)/M_e^0(T)$ .

Значения  $Q_T$  хорошо известны для многих технически важных материалов. Для «серых» тел  $Q_T = \varepsilon(T)$  – эффективный коэффициент излучения, т. к.  $Q_T$  всегда меньше единицы, то радиационная температура всегда меньше истинной.

Радиационными пирометрами измеряют температуру в диапазоне от  $-50 \dots 2000$  °С. Приемниками в них служат термопары или болометры. Для увеличения сигнала часто используют термобатареи или пироэлектрические приемники. Для слабонагретых тел применяют специальную оптику. Стеклянная оптика используется при измерениях температуры свыше 900 °С, для измерений температуры от 400 °С применяется кварцевая оптика, а использование оптики на основе материалов, пропускающих инфракрасное излучение (фтористый литий, фтористый барий), позволяет определять температуру начиная с 20 °С. Для расширения регистрируемого спектрального диапазона часто применяют зеркальную оптику. Основные параметры радиационных пирометров регламентированы ГОСТ 6923–81 и ГОСТ 10627–71.

Существенное влияние на показание радиационных пирометров оказывает состояние поверхности контролируемого объекта, поскольку от этого зависит коэффициент излучения.

Современные модели радиационных пирометров снабжаются встроенным микропроцессором, реализующим запоминание максимальной, средней и минимальной температур за время измерений, коррекцию излучательной способности, автокалибровку прибора и другие функции.

Современные модели пирометров оснащаются беспараллаксным многолучевым лазерным указателем, точно оконтуривающим поле зрения пирометра на любом расстоянии. Некоторые модели пирометров имеют электронную фотокамеру. Камера снабжена объективом, наводимым вручную по символам, и электронной фотовспышкой, что позволяет запоминать в момент измерения изображение-фотографию зоны измерения с фиксацией следа многолучевого лазерного прицела. Такой пирометр удобен для проведения повторяющихся измерений и для инспекционных целей, а программное обеспечение, прилагаемое к пирометру, дает возможность легко создавать отчеты по результатам измерений.

Также приборы фиксируют максимальную и минимальную температуры в цикле измерений, позволяют рассчитывать среднюю температуру и разности между максимальной и минимальной температурами. Они имеют аналоговый выход для записи на самописец и цифровой выход RS232 для постоянной связи с компьютером. К пирометру подключается поверхностная накладная термопара. Он имеет также возможность запоминания в памяти результатов измерений. Есть возможность устанавливать значения коэффициента теплового излучения с шагом 0,01. Имеется также встроенная корректируемая таблица коэффициентов теплового излучения распространенных материалов.



## Контрольные вопросы

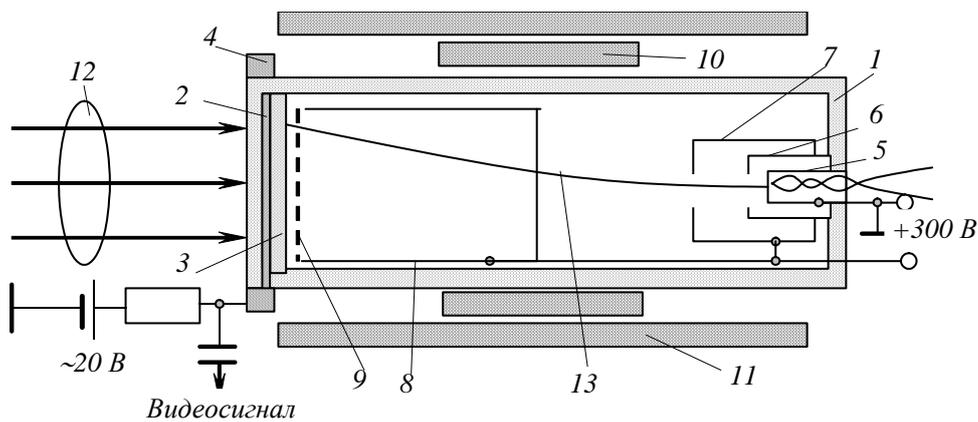
- 1 Какое тело называется абсолютно черным, серым?
- 2 Какие виды пирометров существуют?
- 3 На чём основаны пирометрические методы измерения температуры?
- 4 Что такое яркостная температура?
- 5 Для чего в цветном пирометре имеются два светофильтра?
- 6 Какие пирометры обладают наилучшей точностью измерения и почему?
- 7 Проанализируйте источники погрешности измерения для различного вида пирометров.
- 8 Какая температура выше: яркостная или истинная?
- 9 Какая температура выше: цветовая или истинная?

## 3 Практическое занятие № 3. Изучение схем построения сканирующих визуализаторов тепловых полей

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия сканирующих визуализаторов тепловых полей.

### 3.1 Основные теоретические сведения

**3.1.1 Видикон.** Видикон – прибор, визуализирующий тепловое поле со сканированием электронным лучом. Схема видикона приведена на рисунке 3.1.



1 – стеклянный баллон; 2 – сигнальная пластина; 3 – слой фотопроводника; 4 – металлическое кольцо; 5 – катод; 6 – управляющий электрод; 7 – первый анод; 8 – второй анод; 9 – мелкоструктурная сетка; 10 – отклоняющая пластина; 11 – фокусирующая система; 12 – объектив; 13 – электронный луч

Рисунок 3.1 – Схема видикона

Видикон представляет собой передающую телевизионную трубку. На входное окно стеклянной вакуумированной колбы 1 нанесена тонкая прозрачная ме-



таллическая пленка 2. На эту пленку нанесен слой фотопроводника толщиной в несколько микрометров, изменяющего свое сопротивление под действием света. Металлическая пленка 2 называется сигнальной пластиной и соединена с металлическим кольцом 4, приваренным к стеклянному баллону. На кольцо, а следовательно, и на металлическую пленку через резистор подается напряжение.

В противоположном конце стеклянного баллона расположен электронный прожектор, состоящий из подогревного катода 5, управляющего электрода 6 и первого анода 7. Между анодом и слоем фотопроводника размещен второй анод 8 в виде длинного металлического цилиндра. Возле торцевой части второго анода расположена мелкоструктурная сетка 9, создающая равномерное тормозящее поле вблизи слоя полупроводника. Для управления электронным лучом применяется магнитная отклоняющая система 10. Фокусировка электронного луча осуществляется магнитной системой 11 в виде длинного соленоида.

Рассмотрим принцип работы видикона. В светочувствительной мишени видикона используется высокорезистивный фотопроводник, чтобы не было растекания электрического заряда фотопроводника вдоль слоя. При отсутствии засветки мишени видикона слой фотопроводника, контактирующий с сигнальной пластиной, имеет потенциал, равный потенциалу источника, подключенного к металлическому кольцу 4 (порядка 20 В). Сторона фотопроводящего слоя, обращенная к электронной пушке, заряжена до потенциала катода, т. е. имеет потенциал, равный 0 В, т. к. катод заземлен (в некоторых типах видиконов, у которых отсутствует источник с напряжением 20 В, катод не заземляется). Слой фотопроводника представляет собой мелкую мозаику, которую можно рассматривать как совокупность маленьких конденсаторов, заряженных до напряжения 20 В. При проекции на мишень видикона изображения контролируемого объекта в инфракрасных лучах с помощью объектива 12 в тех местах, где попадает на фотопроводник излучение, происходит разрядка «конденсаторов» тем больше, чем интенсивнее поток ИК-излучения. Таким образом, при засветке мишени видикона на фотопроводнике образуется «рельеф» электрического заряда, соответствующий распределению теплового поля по поверхности контролируемого объекта. Считывание этого потенциального рельефа осуществляется сканирующим электронным лучом 13, который дозаряжает каждый элементарный конденсатор до исходного напряжения. В результате этого по нагрузочному резистору протекает ток зарядки и на нем наблюдается падение напряжения, представляющее собой видеосигнал. Такие электронно-лучевые трубки позволяют получать видимое излучение без механического сканирования и видеосигнал, пригодный для цифровой и логической обработки. Они обладают высоким быстродействием. Для улучшения параметров видиконов применяют мишени в виде мозаичных структур из большого количества кремниевых или германиевых фотодиодов.

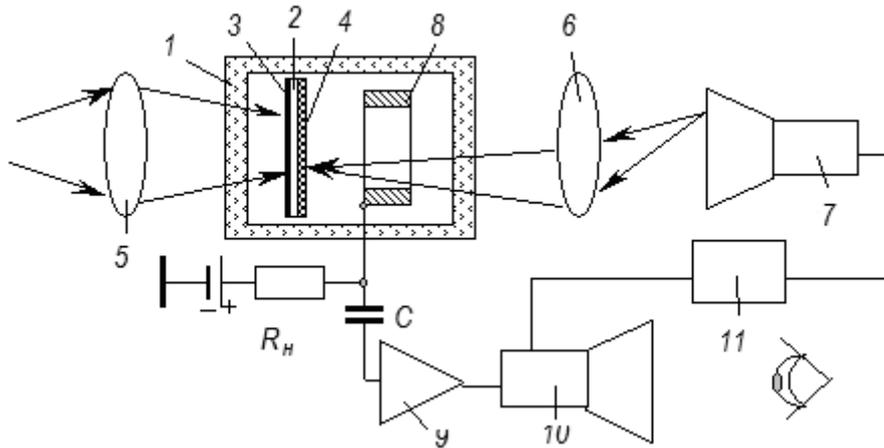
Для достижения чувствительности в области больших длин волн ИК-излучения применяют охлаждаемые мишени из PbS–PbO и слои фотопроводника из легированных примесей кремния и германия.

Разработаны видиконы с мишенью на основе *p-n*-переходов из арсенида галлия, у которых *n*-область облучается, а *p*-область сканируется электронным



лучом. Максимум чувствительности таких видиконов находится на длине волны 3,25 мкм.

**3.1.2 Термикон.** Еще одним типом ИК-визуализаторов с электронной разверткой изображения является термикон, использующий развертку световым пучком. Схема его приведена на рисунке 3.2.



1 – вакуумированная стеклянная колба; 2 – тонкая пленка-подложка фотокатода; 3 – поглощающий ИК-излучение слой; 4 – слой, эмиттирующий электроны; 5, 6 – объективы; 7 – электронно-лучевая трубка, создающая световой растр; 8 – коллектор фотоэлектронов; 9 – усилитель; 10 – ЭЛТ, воспроизводящая температурное поле; 11 – генератор разверток

Рисунок 3.2 – Схема термикона

Термикон содержит вакуумную трубку 1, внутри которой расположен фотокатод, представляющий собой тонкую пленку 2, с одной стороны покрытую слоем 3, поглощающим ИК-излучение, а с другой – специальным фотоэлектрическим, эмитирующим под действием света электроны, слоем 4, интенсивность эмиссии которого зависит от температуры.

Объектив 5 формирует на фотокатоде тепловое изображение поверхности контролируемого объекта. С обратной стороны трубки 1 расположен объектив 6, который проецирует на фоточувствительный слой 4 фотокатода яркую световую точку, которая образуется в электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) 7 при формировании на ее экране кадра электронным лучом. Эта световая точка на фотокатоде также прописывает растр, соответствующий растру, образуемому в ЭЛТ 7.

Световое пятно, движущееся по фотокатоду, производит за счет внешнего фотоэффекта эмиссию фотоэлектронов, которые собираются коллектором 8. Так как фотоэмиссия электронов зависит от температуры фотоэлектронного слоя 4, то величина фототока будет зависеть от температурного рельефа на поверхности контролируемого объекта. Полученный фототок формирует на нагрузочном сопротивлении  $R$  падение напряжения, которое через разделительный конденсатор  $C$  поступает на вход усилителя 9. Усиленный сигнал с выхода усилителя 9 поступает на управляющий электрод электронно-лучевой трубки 10, которая воспроизводит температурное поле поверхности контроли-

руемого объекта. Для синхронизации работы электронно-лучевых трубок 7 и 10 они управляются от одного генератора строчной и кадровой разверток 11.

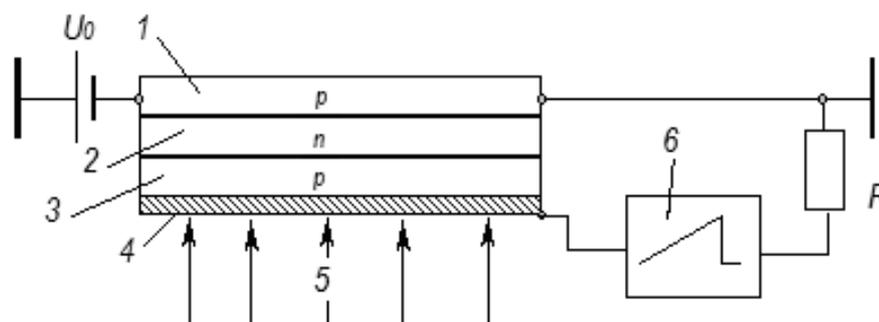
Изменение тока в цепи коллектора составляет 2...3 % на один градус перепада температуры. Разрешающая способность термикона невелика и составляет около 50 строк на кадр. Регистрируемый перепад температур  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ . Разрешающая способность по температуре определяется значением температурных градиентов, созданных на поверхности фотокатода, и теплопроводностью чувствительного слоя вдоль поверхности слоя.

**3.1.3 Твердотельные сканирующие ИК-приемники.** В последнее время проводятся интенсивные исследования по разработке безвакуумных твердотельных сканирующих ИК-приемников. Они используются в ближней ИК-области, строятся на базе чувствительных слоев из кремния и германия и их разработки ведутся по двум направлениям:

- создание мозаичных и матричных полупроводниковых структур;
- создание монокристаллических структур, снабженных каким-либо внутренним электромагнитным или электростатическим инструментом сканирования.

Разрабатываются также и другие монокристаллические сканирующие приемники излучения. Например, есть приемники, управляемые распространяющейся акустической волной, которая последовательно отпирает светочувствительный слой по мере своего распространения по структуре.

Одним из таких безвакуумных сканирующих приемников является сканистор, схема которого приведена на рисунке 3.3.



1 – полупроводниковый слой  $p$ -типа; 2 – полупроводниковый слой  $n$ -типа; 3 – высокорезистивный полупроводниковый слой  $p$ -типа; 4 – полупрозрачный слой проводника; 5 – ИК-излучение, формирующее температурное поле; 6 – генератор пилообразного напряжения

Рисунок 3.3 – Схема сканистора

Сканистор изготавливается из полупроводникового материала, составляющего трехслойную структуру. Первый (базовый) слой 1 полупроводника выполнен из полупроводника  $p$ -типа, слои 2 и 3 – из полупроводников  $n$ -типа и  $p$ -типа соответственно. Таким образом, сканистор представляет собой полупроводниковую структуру с двумя  $p$ - $n$ -переходами.  $P$ - $n$ -переход между слоями 1 и 2 образует диод, а между слоями 2 и 3 – фотодиод. Слой 1 выполнен из высокорезистивного полупроводника. К нему относительно общей точки при-

кладывается постоянное напряжение  $U_0$ , образующее вдоль этого слоя линейно спадающее напряжение.

Поверхность слоя 3 покрыта прозрачным проводящим слоем 4, к которому через сопротивление  $R$  относительно общей точки прикладывается пилообразное напряжение от генератора 6. Через прозрачный электрод 4 фотодиод засвечивается ИК-излучением, формирующим изображение температурного поля поверхности контролируемого объекта. При линейном нарастании пилообразного напряжения точки, в которых оказываются равными потенциалы слоев 1 и 3, равномерно передвигаются слева направо, открывая диоды  $p-n$ -перехода на границе слоев 1–2. В результате этого на сопротивлении  $R$  выделяется видеосигнал, пропорциональный интегралу от распределения интенсивности падающего излучения вдоль фотоприемника.

Дифференцированием этого сигнала по времени получается зависимость

$$U(t) = kI(x) \cdot dx/dt,$$

где  $U(t)$  – электрический сигнал с дифференцирующего устройства;

$k$  – коэффициент пропорциональности;

$I(x)$  – распределение интенсивности ИК-излучения вдоль сканистра;

$x$  – координата вдоль сканистра.

Поддерживая величину  $dx/dt$  постоянной, что соответствует постоянному наклону пилы пилообразного напряжения, можно получить электрический сигнал, пропорциональный интенсивности ИК-излучения.

Сканистры нечувствительны к электрическим и магнитным полям. Они имеют фотоэлектрическую чувствительность 10...15 А/Вт – для германиевых приборов и 3...5 А/Вт – для кремниевых.

**3.1.4 Тепловизоры.** Тепловизор в широком смысле – устройство, предназначенное для визуализации тепловых полей объектов. В узком смысле тепловизор представляет собой оптико-механический прибор, осуществляющий строчно-кадровое сканирование пространства и регистрирующий собственное тепловое излучение объектов в некотором интервале длин волн, определяемом типом используемого приемника излучения. В качестве сканирующего оптико-механического тепловизора можно привести модель ТВ-03.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Каковы структура и принцип работы видикона?
- 2 Недостатки видикона.
- 3 Устройство и принцип работы термикона.
- 4 Принцип действия сканисторов. Основные параметры сканисторов. Область применения сканисторов.
- 5 Процесс формирования кадра в тепловизоре ТВ-03.



## 4 Практическое занятие № 4. Изучение особенностей строения современной тепловизионной техники

**Цель работы:** изучить современные направления развития приборов теплового контроля.

### 4.1 Основные теоретические сведения

С развитием технологии производства матричных приемников излучения мировые фирмы перешли на выпуск приборов нового поколения, которые, по сути дела, являются ИК-телевизионными камерами. Фактически последним барьером, разделяющим тепловизоры и телевизионные установки, является меньшее число элементов в измерительных тепловизорах (во многих измерительных тепловизорах использована мозаичная матрица, состоящая из  $320 \times 240$  элементов, что эквивалентно принятому формату видеозаписи). Следует отметить, что проблема улучшения пространственного разрешения решается весьма быстро. В настоящее время уже имеются показывающие тепловизоры высокого разрешения (до  $1024 \times 1024$  элементов в кадре), а измерительные тепловизоры начинают приближаться к данному пределу.

**4.1.1 Электронный блок.** В электронном блоке тепловизора осуществляется ряд преобразований сигнала в реальном времени, а также вывод его в форме, удобной для его визуализации, чаще всего в телевизионном стандарте NTSC, PAL, SECAM, а также в виде цифрового 8-, 12- или 16-битового сигнала. В последних моделях тепловизоров, наряду со стандартными «медленными» каналами обмена цифровой информации (RS 232), применяют «быстрые» цифровые каналы типа «горячей шины» IEEE-1394. При использовании нескольких тепловизоров в одной сети сбор информации осуществляют по протоколу R-45 Ethernet.

Микропроцессорная обработка в режиме on line, как правило, предназначена для поддержания характеристик тепловизоров на требуемом уровне, реже – для выполнения каких-либо специфических процедур, на которых наиболее распространено усреднение по нескольким кадрам с целью снизить «белый» шум. Например, если в тепловизоре с паспортным разрешением  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  выбрать режим усреднения по четырем кадрам, то частота кадров уменьшится в 4 раза (т. е. изображение быстро двигающихся или быстроменяющихся объектов может быть смазано), однако температурное разрешение возрастет в  $\sqrt{4} = 2$  раза (т. е. станет равным  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Более глубокую обработку тепловизионной информации, в особенности при использовании быстродействующих тепловизоров, обычно осуществляют не в реальном времени, а с помощью специальных компьютерных программ, работающих в режиме off line.

Преобразование тепловизионного формата в телевизионный формат производят с целью облегчить стыковку тепловизора со стандартным телевизионным оборудованием. В большинстве современных тепловизоров имеется видеовыход, что позволяет записывать термоизображения с помощью видеоманитофона и показывать их на обычном телевизоре. Сами тепловизоры также снабжают чер-

но-белыми или цветными мониторами. Имеются модели передающих тепловизионных модулей, которые могут быть подключены к стандартным цифровым видеокамерам; при этом на мониторе видеокамеры наблюдают либо видимое, либо ИК-изображение (модель тепловизора 2003 г. ThermoVision A20 фирмы FLIR Systems). В тепловизоре ThermoCam P60 той же фирмы использован отсоединяющийся цветной монитор, что позволяет производить осмотр объектов в труднодоступных местах.

*4.1.2 Черно-белое и цветное представление термограмм.* Цветное представление термограмм осуществляют путем псевдоцветного кодирования температуры, т. е. одной и той же температуре по желанию оператора могут соответствовать различные цвета. В тепловизорах используют различные цветовые палитры, имеющие специфические названия, в частности, палитру «Радуга», которая позволяет отобразить две близкие температуры контрастными цветами. Это бывает необходимо для подчеркивания слабых температурных перепадов. Вместе с тем оператору зачастую бывает трудно ориентироваться в разнообразно окрашенных областях, подчеркивающих относительно слабые изменения температуры. Профессионалы применяют палитру «Радуга» при демонстрационных показах тепловизоров, а для практической работы предпочитают полутоновую «Серую» шкалу (Gray). В последнее время стала популярной палитра «Цвета каления» (Iron), которая совмещает в себе преимущества черно-белого и цветного представления изображений. Следует отметить, что в современных тепловизорах глубина оцифровки (от 12 до 16 бит) перекрывает весь динамический диапазон измерений, например от минус 20 до плюс 2000 °С, поэтому в процессе работы не требуется перестраивать уровень сигнала. В то же время динамический диапазон сигнала на мониторе тепловизора значительно уже, чем глубина производимой оцифровки, что позволяет оценивать слабые температурные перепады визуально, но может приводить к условному зашкаливанию температурных сигналов.

*4.1.3 Метрология тепловизоров и дополнительные возможности представления информации.* Высокие метрологические показатели тепловизоров достигаются использованием встроенных эталонов температуры и датчиков температуры отдельных критических (нагревающихся) узлов. Специальные микропроцессорные системы сохраняют цифровые отсчеты температуры стабильными во времени и независимыми (слабозависимыми) от колебаний температуры окружающей среды.

Зарубежные тепловизоры, поставляемые на российский рынок, помимо национального (и/или европейского) сертификата, должны иметь сертификат Госстандарта РФ для использования в качестве средства измерения температуры. Для большинства моделей тепловизоров заводская аттестация действительна в течение двух лет, после чего необходимо выполнить их поверку. Для этого используют аттестованные эталонные излучатели. Аналогичные сертификаты Госстандарта РФ или других ведомств имеет ряд моделей российских тепловизоров.

Измерение температуры с помощью тепловизора производится оператором либо непосредственно на экране монитора путем размещения соответствующе-



го маркера, либо расставляя характерные точки объекта контроля на термограмме при ее компьютерной обработке. Аппаратным или программным способом возможно профильное представление температуры вдоль выбранных направлений, а также измерение статистических характеристик распределений температуры в областях прямоугольной или овальной формы.

Следует отметить, что в тонких физических экспериментах, где требуется высокое температурное разрешение, а измерения проводят в течение длительного времени, проблема стабильности температурных отсчетов полностью не решена даже при использовании охлаждаемых детекторов излучения, а наибольшая нестабильность имеет место в случае неохлаждаемых болометрических матриц,

*4.1.4 Устройства записи и твердого копирования термограмм.* Термограммы регистрируют одним из следующих способов:

- посредством стандартной видеозаписи, в которой теряются абсолютные температурные значения (за исключением цифровой записи в некоторых ранних моделях тепловизоров);

- записью изображений на 3,5-дюймовую дискету с сохранением всех температурных значений. Обработку термограмм производят на персональном компьютере;

- записью изображений на PCMCIA или флэш-карту, вставляемую в соответствующий встроенный драйвер тепловизора. Затем термограммы обрабатывают на компьютере типа «лэптоп». Применение обычных персональных компьютеров требует специального интерфейса для чтения информации с малогабаритных дисков (в последнее время широко используют USB-порт);

- записью изображений на жесткий диск компьютера посредством специальной интерфейсной системы, включающей интерфейс и управляющую компьютерную программу;

- непосредственной записью изображения в реальном времени на быстродействующий жесткий диск, приобретаемый отдельно и являющийся дорогостоящим устройством. Примером такого тепловизора является система ThermaVision 900 (AGEMA Infrared System), которая используется преимущественно в научных исследованиях.

Компьютерные программы, поставляемые в комплекте с тепловизорами, помимо температурной калибровки и распечатки данных на стандартных принтерах, позволяют формировать и печатать отчеты по результатам ИК-съемки. Программы составлены таким образом, что они могут применяться при диагностике различных объектов в промышленности и медицине.

*4.1.5 Источники питания.* Тепловизоры могут питаться от сети переменного тока через специальный адаптер, а также от аккумуляторов, размещаемых на поясе оператора или непосредственно в тепловизоре. В ряде последних моделей используют стандартные аккумуляторы, применяемые в видеокамерах. Время работы тепловизора от заряженного аккумулятора может достигать нескольких часов.

*4.1.6 Программные средства для термографического анализа и составление отчетов.* Программные средства обеспечивают согласование тепловизора с

компьютером, стандартную или специализированную обработку изображений и составление отчетов. Например, фирма AGEMA Infrared System каждое новое поколение тепловизоров сопровождала соответствующим пакетом программ, что позволяло пользователю приобретать не только отдельно тепловизор, но и компьютерную термографическую систему. Кроме того, специально для выравнивания излучательной способности объекта контроля, т. е. для повышения точности абсолютных температурных измерений, фирма поставляла отдельную компьютерную программу EQUAL. Эта программа применима, главным образом, при испытаниях радиоэлектронной аппаратуры, поскольку требует предварительного нагрева объекта до фиксированной температуры.

Компьютерные программы позволяют проводить анализ термограмм, в частности, изменять основные установки тепловизора (коэффициент излучения, диапазон измерения и т. д.), определять среднюю температуру в областях различной формы, строить профили, изотермы, гистограммы и т. п. При составлении отчетов возможно введение видимых изображений, полученных с помощью видеокамеры или электронного фотоаппарата (в модели ThermaCam 695 фирмы FLIR Systems имеется встроенная видеокамера, позволяющая записывать видеоизображение объекта контроля практически в том же ракурсе, что и основное ИК-изображение). Программы дают возможность пользоваться стандартными функциями среды Windows, что делает их гибкими при написании и редактировании всевозможных документов. Из коммерческих программ, обладающих развитыми возможностями анализа, необходимо отметить программу ThermaCam Reseacher фирмы FLIR Systems, которая может обслуживать целый ряд моделей тепловизоров данной фирмы. Следует заметить, что для отечественного потребителя стоимость зарубежных компьютерных программ представляется завышенной, поэтому определенное распространение получили «доморощенные» программы обработки термограмм, в которых температурные значения могут не сохраняться, если формат кадра неизвестен. В последних моделях западных тепловизоров открытие файлов исходных изображений, в особенности с сохранением температурных отсчетов, затруднительно, поскольку фирмы-изготовители используют различные форматы записи, составляющие их ноу-хау. Например, тепловизоры фирмы FLIR Systems записывают изображения в формате .img, японская фирма NEC использует свой формат .svt, в то время как в США приобретает популярность публичный формат .fts, описание которого можно найти в сети Интернет. Последовательности термограмм могут быть записаны в виде отдельных файлов, однако в последние годы популярна запись всей последовательности в один большой файл, для разделения которого на отдельные термограммы необходима специализированная программа.

С линейно-сканирующими радиометрами применяют специальные программы обработки данных, которые позволяют получать цветные термограммы движущихся или вращающихся объектов.

*4.1.7 Классификация тепловизоров.* По техническим признакам тепловизоры подразделяются на:



- системы с линейным обзором (сканирующие радиационные пирометры) и системы с двухкоординатным обзором (собственно тепловизоры);
- оптико-механические (первое поколение) и использующие матричные приемники излучения (второе поколение);
- с охлаждаемым (с помощью жидкого азота, микрохолодильника Стирлинга, термоэлектрического холодильника) или с неохлаждаемым детектором;
- показывающие или измерительные;
- стационарные, портативные или выполненные в виде специального контейнера, размещаемого под летательным аппаратом;
- коротковолновые (область чувствительности в ближней ИК) и длинноволновые, чувствующие ИК-излучение в средней и дальней ИК-областях спектра.

Существует также коммерческая классификация тепловизоров. По этой классификации к первой категории относятся тепловизоры общего применения, использующие неохлаждаемые матричные приемники излучения. Типичным представителем данной категории является прибор Termavision 685 фирмы FLIR Systems (США).

Ко второй категории относятся тепловизоры с охлаждаемыми приемниками (например, из силицида платины), работающие в средневолновом ИК-диапазоне и предназначенные для измерения температуры пластмасс, в печах и т. д. Типичный представитель этой группы – TermaCam SC1000 фирмы FLIR Systems (США).

К третьей категории отнесены высокоскоростные тепловизоры гибкой конфигурации, предназначенные для научных исследований, например, TermaCam SC3000 фирмы FLIR Systems (США).

Современные тепловизоры второго поколения реализуют модульный принцип построения и используют матричные фотоприемники. Добавления к такому модулю ИК-объектива и телевизионного монитора превращают его в показывающий тепловизор. Введение измерительной функции уже требует значительных технических усилий, составляющих предмет ноу-хау фирм-изготовителей.

Ориентировочная отпускная цена на базовые комплекты показывающих тепловизоров высокого уровня составляет от 12000 до 30000 долл. США, измерительные приборы камкордерного исполнения могут стоить 35000...70000 долл. США, а стоимость специализированных моделей может превышать 150000 долл. На мировом рынке тепловизоры одного класса, но выпускаемые различными фирмами, имеют близкие цены, уровень колебания которых зависит от уровня сервиса и от комплектации.

В качестве аксессуаров фирмы-изготовители поставляют сменные объективы, спектральные фильтры (фильтр высоких температур или пламени, атмосферный фильтр, фильтр углекислого газа, солнечный фильтр, длинноволновой фильтр и фильтр для пластмасс), защитный чехол, предотвращающий перегрев корпуса тепловизора при работе в горячих помещениях, аккумуляторы, зарядные устройства, компьютерные программы, устройства совмещения видимого и ИК-изображений, портативные видеоманитофоны, микрофон для записи речевых комментариев.



В настоящее время в мире выпускается большое количество различных типов тепловизоров. Так, например, в России выпускается около 20 типов тепловизоров и около 60 моделей тепловизоров выпускается фирмами США, Японии, Канады, Германии и Китая.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Чем обусловлена высокая стоимость тепловизоров и почему так мало фирм их выпускают?
- 2 В какой области спектра работают тепловизоры?
- 3 На чем основано действие тепловизора?
- 4 Какова погрешность измерения температуры с помощью современных тепловизоров?
- 5 Укажите важнейшие технические параметры тепловизоров, определяющие эффективность их работы.
- 6 Классификация тепловизоров и пути их развития.

## **5 Практическое занятие № 5. Изучение схем построения электровакуумных источников СВЧ-излучений**

**Цель работы:** изучить устройство и принцип действия генераторов СВЧ-излучений.

### **5.1 Основные теоретические сведения**

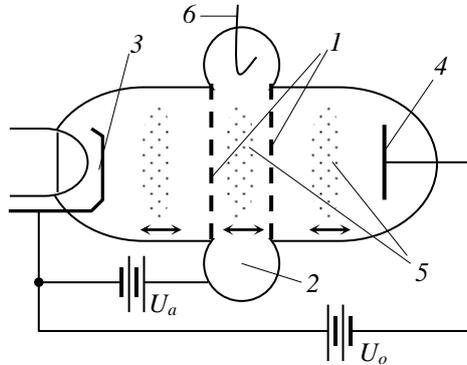
Радиоволновой диапазон, который используется для радиоволнового контроля (РВК), включает в себя электромагнитное излучение с длиной волны от 1 мм до 1 м. Все генераторы, генерирующие излучение в этом диапазоне, делятся на электронные генераторы сверхвысоких частот (СВЧ) (электровакуумные и полупроводниковые) и квантовые генераторы СВЧ (мазеры). К электронным относятся клистроны, магнетроны, платинотроны, митроны, лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа обратной волны (ЛОВ), полупроводниковые генераторы.

Все электронные СВЧ-генераторы используют взаимодействие электронного потока с электронным полем, которое сводится к трем физическим процессам: модуляция по скорости; модуляция по плотности; переход кинетической энергии сгустков в СВЧ-энергию. В одних приборах эти процессы разделены в пространстве и времени, а в других протекают одновременно.

При переходе к СВЧ-диапазону время пролета электронов в электровакуумных приборах и время прохождения через базу диодов и транзисторов становится соизмеримым с периодом колебаний, поэтому понятие «активный элемент» и электрическая цепь теряют смысл, т. к. эти элементы трудно выделить, поэтому генераторы СВЧ-колебаний, в целом, представляют собой системы с распределенными параметрами.



**5.1.1 Клистронные генераторы и усилители СВЧ-волн.** Одним из наиболее распространенных генераторов СВЧ-излучения является генератор на отражательном клистроне. Он представляет собой вакуумированную электронную лампу и служит для генерации маломощного СВЧ-излучения. Схема такого клистрона приведена на рисунке 5.1.



1 – сетки объемного резонатора; 2 – тороидальная полость резонатора; 3 – катод; 4 – отражатель; 5 – «сгустки электронов»; 6 – элемент связи

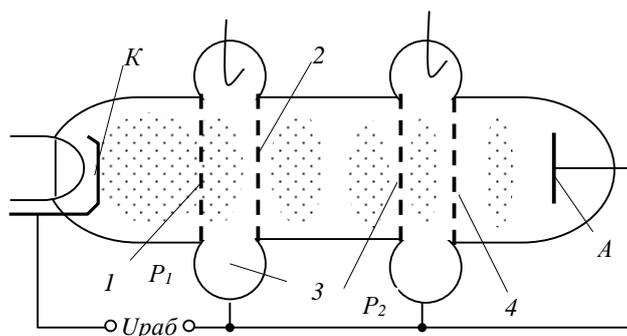
Рисунок 5.1 – Схема отражательного клистрона

Вывод генерируемого излучения из резонатора клистрона осуществляется с помощью элемента связи б типа петли, штыря или щели.

Достоинством отражательных клистронов является возможность электронной перестройки частоты генерации путем изменения напряжения на отражателе, что связано с изменением времени пролета электронов от центра резонатора к отражателю и обратно. Практически девиация частоты может быть реализована на 10...20 МГц – для генераторов с длиной волны генерации 10 см и на 20...50 МГц – для генераторов с длиной волны 3 см. Крутизна электронной перестройки составляет 1 МГц/В на  $\lambda = 10$  см и 5 МГц/В на  $\lambda = 3$  см. Достоинством электронной перестройки является отсутствие при этом потребления энергии. Большой диапазон перестройки частоты генерации осуществляется за счет механической перестройки резонансной частоты резонатора (10...20 % от частоты генерации).

Главным недостатком отражательных клистронов является их низкий КПД, составляющий 2...3 %. Эти приборы применяются в качестве генератора в различных приборах радиоволнового неразрушающего контроля, в качестве гетеродина различных приемников в измерительной аппаратуре и в передатчиках радиорелейных линий.

Мощность отражательных клистронов составляет от единиц милливатт в миллиметровом диапазоне длин волн и до долей и единиц ватт в сантиметровом. По виду и размерам они напоминают обычные электронные радиолампы. Для получения больших мощностей генерации и возможности усиления СВЧ-сигналов применяются многорезонаторные пролетные клистроны, характерным представителем которых является двухрезонаторный клистрон, схема которого приведена на рисунке 5.2.



1, 2 – сетки первого резонатора клистрона  $P_1$ ; 3, 4 – сетки второго резонатора  $P_2$ ;  $K$  – катод;  $A$  – анод

Рисунок 5.2 – Схема двухрезонаторного пролетного клистрона

Теоретический КПД многорезонаторных клистронов составляет 73,8 %, но реальный не выше 50 %, а коэффициент усиления мощности достигает несколько десятков тысяч. Для усиления слабых сигналов в приемниках клистроны мало пригодны, так как они имеют высокие собственные шумы. Для мощных импульсных клистронов требуется напряжение питания в десятки или даже в сотни киловольт. Размеры таких клистронов могут превышать человеческий рост.

Пролетный клистрон можно превратить в генератор, если соединить выход с входом коаксиальной линией. Иногда в двухрезонаторных клистропах с резонаторами, имеющими общую стенку, делают отверстие связи.

5.1.2 Лампы бегущей и обратной волны типа  $O$ . На практике иногда требуются усилители СВЧ-колебаний с полосой усиления до десятков процентов от средней частоты. Клистроны в силу своей узкополосности не могут обеспечить такую полосу усиления. Эти недостатки устраняются в лампе бегущей волны (ЛБВ) и лампе обратной волны (ЛОВ). Схема лампы бегущей волны приведена на рисунке 5.3.

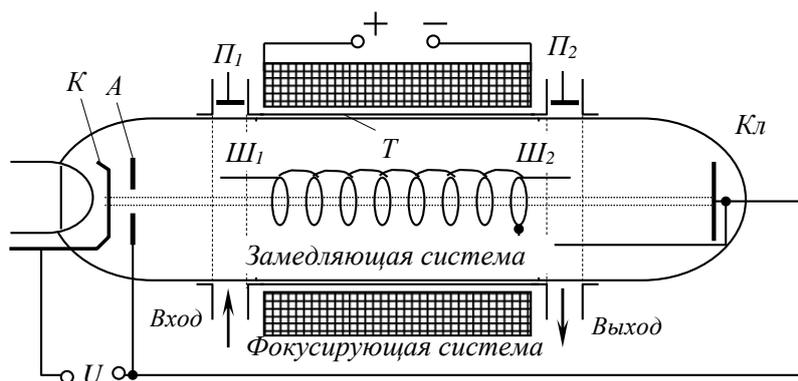


Рисунок 5.3 – Схема лампы бегущей волны

В настоящее время разработано большое количество различных типов ЛБВ. Коэффициент усиления ЛБВ достигает значения 20...40 дБ; ширина полосы усиления – 20...50 % от средней частоты; КПД – 20...35 %.

Принцип работы ЛБВ послужил основой для создания ламп обратной вол-

ны (ЛОВ), которые называли также карсинотронами. Эти лампы, в отличие от ЛБВ, используются главным образом для генерации СВЧ-излучения. В ЛОВ применяются такие же замедляющие системы и системы фокусировки, как и в ЛБВ, но волна и электронный поток движутся навстречу друг другу. Она имеет вход около коллектора, а выход – около катода. Усиление в такой лампе получается лишь в узкой полосе частот, причем частота генерации зависит от постоянного ускоряющего напряжения  $U$ , изменяя которое можно осуществить электронную перестройку. Значительно более широкое применение находят генераторные ЛОВ. У них около коллектора расположено не входное устройство, а поглощающее устройство, которое поглощает волну, отраженную от выходного конца замедляющей системы. Частота генерации зависит от питающего анодного напряжения. Возможная область перестройки частоты генерации с коэффициентом перекрытия 1,5...2. В генераторных ЛОВ сантиметрового диапазона изменение частоты при электронной перестройке составляет единицы мегагерц на один вольт ускоряющего напряжения. Выходная мощность генераторных ЛОВ – от десятков милливатт до единиц ватт. КПД – несколько процентов. Ускоряющее напряжение – сотни или тысячи вольт, а ток пучка – от единиц до десятков миллиампер.

Разновидностью генераторных ЛОВ являются резонансные ЛОВ, в которых отсутствует поглотитель, а замедляющая система замкнута накоротко около коллектора, а поэтому является резонатором. В таких ЛОВ возможна не только электронная, но и механическая перестройка частоты. Такие лампы обладают более высоким КПД и более высокой стабильностью частоты.

**5.1.3 Магнетроны.** Магнетроны представляют собой важнейшие электронные приборы для генерации колебаний СВЧ большой мощности. Они применяются в передатчиках радиолокационных станций, в ускорителях заряженных частиц, для высокочастотного нагрева в СВЧ-печах и др.

По своей конструкции магнетрон представляет собой двухэлектродную электронную лампу, имеющую катод и анод и помещенную в магнитное поле (рисунок 5.4).

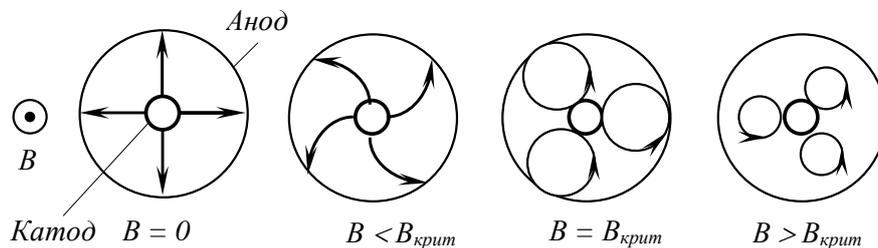
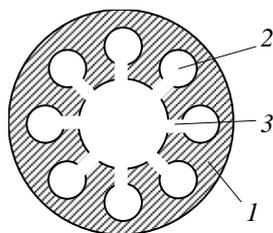


Рисунок 5.4 – Схема движения электронов в магнетроне при различных значениях индукции магнитного поля

Вакуумное пространство между анодом и катодом называется пространством взаимодействия. Анод изготавливается в виде массивного медного блока, в котором размещается четное число резонаторов, представляющих собой цилиндрические отверстия, соединенные с пространством взаимодействия щелью, как видно на рисунке 5.5.



1 – анод; 2 – цилиндрический резонатор; 3 – щель

Рисунок 5.5 – Схема анодного блока магнетрона

Для импульсной работы в дециметровом диапазоне магнетроны строят на мощность десятки тысяч киловатт, а в сантиметровом – тысячи киловатт. В самых мощных магнетронах анодное напряжение в импульсе достигает десятков киловольт, а анодный ток – сотни ампер. Магнетроны для непрерывного режима имеют мощность в десятки киловатт на дециметровых волнах и единицы киловатт – на сантиметровых. КПД мощных магнетронов, работающих в дециметровом диапазоне, достигает более 70 %, а в сантиметровом снижается до 30...60 %.

**5.1.4 Митроны.** Однако существует особый тип магнетронов, митроны, в которых изменением анодного напряжения и, соответственно, анодного тока можно получить даже двухкратное изменение частоты.

Конструктивно митрон отличается от многорезонаторного магнетрона тем, что в его анодном блоке имеется лишь один резонатор. Но для того, чтобы в однорезонаторном блоке обеспечивалось требуемое число зазоров с напряжением, сдвинутым по фазе на  $180^\circ$ , применяют встречно-штыревую конструкцию, в которой четные и нечетные штыри подсоединяют к противоположным концам контура (резонатора). Катод выносят из пространства взаимодействия, а на его место устанавливают цилиндрическое тело, которое называется холодным катодом. Он необходим для сохранения радиального поля в пространстве взаимодействия. Катод с ускоряющим электродом располагают на оси прибора. Электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля.

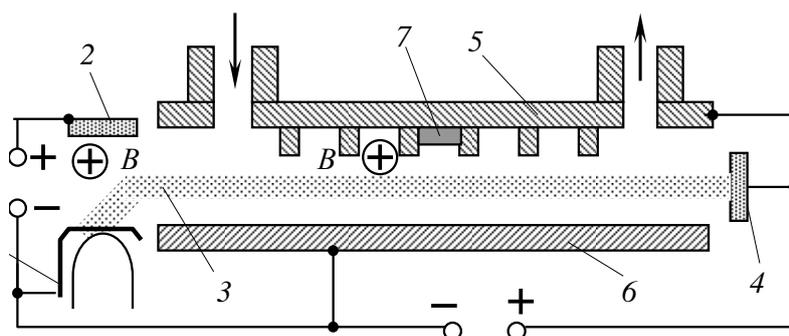
**5.1.5 Платинотроны.** Платинотрон отличается от магнетрона тем, что его замедляющая система, представляющая цепь связанных резонаторов, не замкнута, а имеет отдельный вход и выход. Чтобы устранить возможность самовозбуждения  $\pi$ -колебаний, в платинотроне делают нечетное число резонаторов. В платинотроне также, как и в магнетроне, возникает вращающееся электронное облако. Но направление вращения электронных «спиц» противоположно направлению распространения электромагнитной волны в замедляющей системе.

Платинотрон, работающий в режиме усиления сигналов, называется амплинотроном (амплитроном). Он применяется для усиления сравнительно мощных сигналов. Его КПД достигает величины до 70...85 %. В непрерывном режиме выходная мощность до 500 кВт, а в импульсном – до 10 МВт.

Платинотрон используется также и для генерации колебаний. С этой целью на его входе устанавливается согласованная нагрузка или вход закорачивается накоротко, а на выходе выходного тракта включается неоднородность для отра-

жения части СВЧ-излучения обратно (положительная обратная связь). Для подстройки фазы в выходном волноводе устанавливается фазовращатель. При такой схеме, которую еще называют карматроном, частота генерации определяется параметрами платинотрона, стабильность и избирательность которых невысока.

**5.1.6 Лампа бегущей и обратной волны типа М.** Магнетроны дают большую выходную мощность и обладают высоким КПД, но их недостатком является узкополосность. В свою очередь лампы бегущей и обратной волны широкополосны и обладают возможностью электронной перестройки частоты генерации, но имеют сравнительно малый КПД и невысокую выходную мощность. Поэтому были разработаны СВЧ-приборы, сочетающие в себе достоинства магнетронов и ламп бегущей и отраженной волны. Их называют лампами бегущей и отраженной волны типа М. К примеру, на рисунке 5.7 приведена схема лампы бегущей волны типа М (ЛБВМ) прямой конструкции. Электроны, эмитированные подогревным катодом 1, попадают в постоянное электрическое поле  $E$ , созданное напряжением анода 2, и перпендикулярное плоскости чертежа постоянное магнитное поле индукцией  $B$ , созданное внешней магнитной системой, не показанной на рисунке 5.7.



1 – катод; 2 – анод; 3 – электронный пучок; 4 – коллектор; 5 – замедляющая система; 6 – холодный катод; 7 – поглотитель

Рисунок 5.7 – Схема прямой лампы бегущей волны типа М

Коэффициент полезного действия ЛБВМ при большом входном сигнале доходит до 50...70 %. Их мощность в непрерывном режиме достигает несколько киловатт, а импульсных – несколько мегаватт.

### Контрольные вопросы

- 1 Назначение генератора высокочастотных колебаний.
- 2 Чем отличается генератор с внешним возбуждением от автогенератора?
- 3 Как определяется КПД генератора?
- 4 Основные физические процессы, происходящие в отражательном клистроне.
- 5 В чем состоит принцип работы генератора на лампе бегущей волны?
- 6 Назначение основных элементов ЛБВ.
- 7 Назначение и основные свойства замедляющих систем.

## 6 Практическое занятие № 6. Изучение назначения элементов и устройств для обработки СВЧ-сигналов

*Цель работы:* ознакомиться с устройствами СВЧ-техники.

### 6.1 Основные теоретические сведения

Для создания устройств радиоволнового контроля, кроме источников, необходимо использовать различные устройства для передачи и преобразования СВЧ-волн. К таким устройствам можно отнести волноводы, приемные устройства, аттенуаторы, вентили, фазовращатели, направленные ответвители, детекторные и смесительные секции, циркуляторы, волноводные мосты, турникетные соединения, резонаторы, измерительные линии, антенны, тройники, согласованные нагрузки, отрезки волноводов специальной формы и волномеры.

Излучающие и приемные устройства (антенны), используемые в СВЧ-технике, могут быть выполнены в виде рупоров, открытого среза волновода, щелей или волновода с диэлектрической вставкой.

Антенна в виде открытого среза волновода проста в изготовлении, но обладает большой расходимостью излучаемых волн и плохой локализацией при проведении контроля.

Щелевые антенны улучшают локальность контроля, но уменьшают чувствительность аппаратуры, что связано со значительным отражением СВЧ-волн от щелей антенны.

Диэлектрические антенны обычно используются как вставки в металлические волноводы. Они представляют собой отрезки круглых или прямоугольных волноводов, которые суживаются к одному концу, что улучшает локальность проводимого радиоволнового контроля. Кроме этого, такие вставки препятствуют проникновению посторонних предметов в антенные устройства.

Фокусирующие антенны в виде сферических, эллиптических, параболических и гиперболических металлических зеркал редко используются из-за сложности изготовления и больших размеров. Но СВЧ-линзы нередко применяют для коррекции волнового фронта излучения на выходе рупорных или других антенн.

Антенные устройства могут быть использованы как в виде излучающих, так и в виде приемных.

Канализирующие устройства (волноводы) передают энергию СВЧ-колебаний от генератора к излучателю и от приемного устройства к первичному преобразователю.

В СВЧ-технике используются различные типы волноводов: коаксиальный; в виде симметричной полосковой линии; полый металлический прямоугольного сечения; полый металлический кругового сечения; круглый диэлектрический; диэлектрический прямоугольного сечения.

Коаксиальная линия служит для передачи СВЧ-энергии на небольшие расстояния, полосковая линия хорошо сочетается с технологией изготовления печатных электронных плат. Чаще других в радиоволновом неразрушающем кон-



троле применяют металлические волноводы. При их изготовлении требуется особая тщательность в обработке внутренних полостей и покрытие их слоями высокопроводящих металлов (золото и серебро).

В диапазоне миллиметровых длин волн применяются диэлектрические волноводы. Используются СВЧ-волноводы прямоугольного и кругового сечения.

Качество волновода определяется коэффициентом стоячей волны

$$КСВ = (1 + r)/(1 - r),$$

где  $r$  – коэффициент отражения волны.

Хорошая линия имеет коэффициент стоячей волны, не превышающий 1,02...1,03. Для поддержания в прямоугольном волноводе только основной моды размер малой стороны выполняется примерно равным половине длины волны.

При соединении волноводов необходимо следить за соосностью отдельных секций и отсутствием зазора между волноводами. Для изгибов волноводов в сантиметровом диапазоне служат гофрированные секции, а в миллиметровом – изгибные участки диэлектрических и полосковых волноводов. Малые потери на изогнутых участках наблюдаются при радиусах изгиба, составляющих десять-двадцать длин волн.

Аттенюатор (ослабитель) мощности служит для дискретной или плавной регулировки амплитуды СВЧ-сигналов путем изменения размеров поперечного сечения волноводов, вставок или использования поляризаторов. Наиболее часто аттенюатор представляет собой отрезок волновода с находящейся внутри его пластиной, на которую напылено поглощающее энергию СВЧ-покрытие.

Вентиль (невзаимный элемент) пропускает СВЧ-энергию только в одном направлении, что обеспечивает работу радиоволнового тракта в режиме бегущей волны и устраняет влияние нагрузки на генератор. Существует несколько типов вентилях, различающихся физическим принципом работы: резонансный вентиль, вентиль на эффекте смещения поля, вентили, использующие эффект Фарадея.

Для вентилях характерными параметрами являются полоса рабочих частот, коэффициент стоячей волны (КСВ) и температурные зависимости параметров.

Фазовращатель дает возможность изменять фазу СВЧ-волны дискретно или плавно и представляет собой отрезок длинной линии регулируемой длины или с изменяемыми электрическими параметрами ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ), что позволяет регулировать электрическую длину отрезка и приводит к дополнительному набегу фазы волны. Фазовращатели бывают сжимного типа, когда при изменении толщины волновода изменяется эффективный показатель преломления волноводной моды, пластинчатого типа, когда в волновод вводятся ферритовые пластины и тромбонного типа, когда изменяется длина составного волновода, состоящего из двух труб, одна из которых имеет возможность вдвигаться в другую.

Направленный ответвитель имеет один вход и два выхода. Излучение, падающее на вход, дальше делится на два выхода в определенной пропорции. Такие устройства используются как делители СВЧ-мощности, а также для сложения или вычитания сигналов. Ответвитель представляет собой сочленение двух волноводов боковыми стенками, в которых проделаны отверстия связи на



расстоянии половины длины волны СВЧ-излучения. Количество отверстий и их размеры определяют коэффициент деления. Схема распределения СВЧ-мощности в направленном ответвителе (а) и его обозначение на схемах (б) приведены на рисунке 6.1.

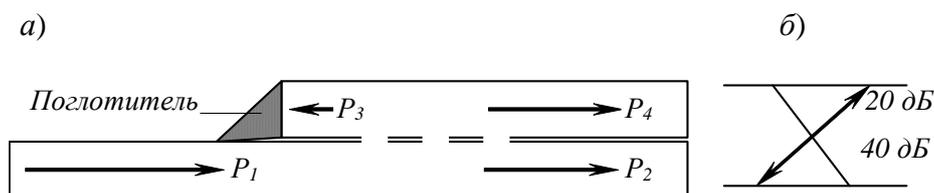


Рисунок 6.1 – Схема распределения СВЧ-мощности в направленном ответвителе (а) и его обозначение на схемах (б)

Верхнее число (рисунок 6.1, б) определяет коэффициент связи  $S$ , равный  $10\lg(P_4/P_1)$ , а нижнее – направленность  $D$ , равную  $10\lg(P_4/P_3)$ .

Детекторная секция преобразует СВЧ-колебания в постоянный ток или в сигналы огибающей промодулированного СВЧ-излучения. Они выполняются на базе СВЧ-диодов. Для увеличения значения сигнала детекторная секция содержит резонаторную часть, настраиваемую специальным поршнем в режим резонанса на рабочей частоте. К детектору подключается индикатор или усилитель.

Смесительная секция подобна детекторной, но имеет два входа, к которым подводятся два сигнала разных частот. В результате на выходе образуется сигнал разностной частоты, много меньшей, чем частота СВЧ-колебаний, обработка сигналов не которой значительно проще.

Тройники имеют три волноводных ответвления и служат для разделения потока СВЧ-излучения или для суммирования или вычитания СВЧ-сигналов. Используются Е-тройники и Н-тройники (рисунок 6.2).

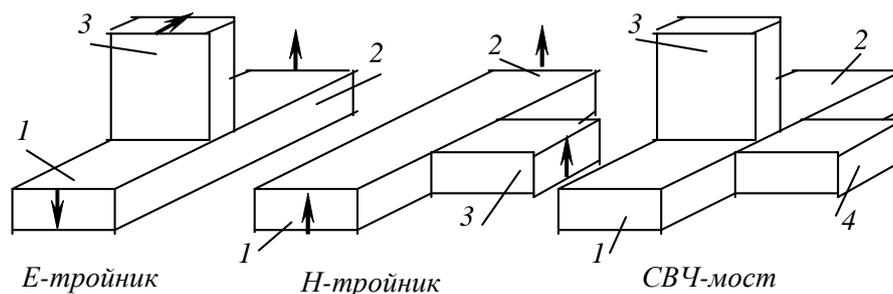


Рисунок 6.2 – Схемы Е-тройника, Н-тройника и СВЧ-моста (двойного тройника)

Если на вход 3 Е-тройника направить линейно поляризованное излучение, как показано на рисунке, то на выходах 1 и 2 появится излучение в противофазе. При возбуждении Н-тройника на выходах 1 и 2 излучение появляется в фазе. В СВЧ-мосте излучение из входа 3 не проходит во вход 4, а сигнал в 3 и 4 появляется лишь при появлении на выходах 1 и 2 сигналов разной амплитуды или в противофазе. При применении поляризационных радиоволновых методов для анализа параметров эллиптически поляризованной волны используют турникетное соединение, схема которого приведена на рисунке 6.3.

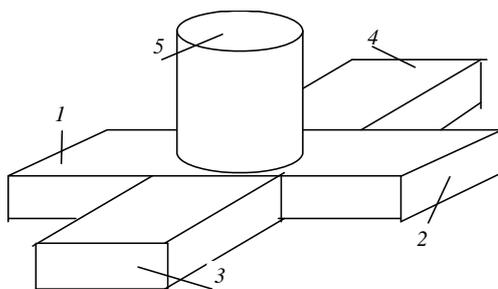


Рисунок 6.3 – Схема турникетного соединения

Из рисунка 6.3 видно, что это соединение представляет собой крестообразное соединение четырех прямоугольных СВЧ-волноводов, к которому присоединен волновод круглого сечения. При возбуждении круглого волновода 5 в зависимости от поляризации падающего излучения в плечах 1, 4 появляется излучение разной амплитуды и фазы. Анализ этого излучения позволяет определить свойства падающего на круглый волновод излучения.

Резонаторы по своей физической сути являются резонансными контурами, с помощью которых можно выделять требуемую частоту, согласовывать различные узлы. Перестройка резонаторов осуществляется с помощью штырей, плунжеров, короткозамыкающих поршней, пластин и гибких диафрагм.

Согласованные нагрузки предназначены для подключения в СВЧ-тракт, чтобы поглощать падающую волну и тем самым обеспечивать режим бегущей волны в измерительном тракте. Они выполняются в виде глухого отрезка линии, который имеет активное сопротивление, равное волновому сопротивлению линии. Маломощные нагрузки изготавливаются из гетинаксовых пластин, покрытых слоем угольной суспензии. Для поглощения мощного излучения применяются объемные нагрузки, изготавливаемые в виде стержней из металлокерамики, в состав которой входит порошковое железо.

Измерительные линии представляют собой отрезок волновода с прорезью, в которую вставляется зонд детекторной секции, который перемещается вдоль волновода контролируемым образом с помощью микрометрического винта.

Волномеры представляют собой устройства для определения частоты длины волны и в простейшем случае – это короткозамкнутые измерительные линии с калиброванными размерами элементов.

Циркулятор представляет собой развязывающее устройство в виде системы волноводных каналов и расположенных внутри ферритовых элементов. Выпускаются трехплечие и четырехплечие циркуляторы. Излучение, введенное в одно из плеч циркулятора, выводится только в соседнее плечо, расположенное, к примеру, по часовой стрелке.

Для соединения элементов часто применяются скрутки и изгибы волноводов. Их оптимальные характеристики получаются при длинах, кратных половине длины волны используемого СВЧ-излучения.

Переходы на другие размеры и форму волноводов требуют применения специальных трансформаторов мод.

Параметрические диоды используются в параметрических малошумящих

усилителях. Их работа основана на изменении электрических параметров под действием излучения.

Умножительные диоды применяются для умножения частоты.

Модуляторные диоды используются для модуляции СВЧ-излучения.

Для переключения СВЧ-цепей находят применение переключаательные диоды.

В качестве измерителей мощности СВЧ-излучения применяются также термоэлементы и болометры, которые обычно включаются в мостовые схемы.

Для визуализации СВЧ-полей применяют методы и преобразователи, характерные для тепловых полей, так как эти методы основаны на нагреве индикаторов под действием СВЧ-излучения.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Назначение, конструкция и принцип действия волноводов.
- 2 Назначение, конструкция и принцип действия направленных ответвителей.
- 3 Поясните назначение, конструкцию и принцип действия аттенюаторов.
- 4 Назначение, конструкция и принцип действия фазовращателей.

## **7 Практическое занятие № 7. Изучение физических и биологических основ и аппаратуры индуктотермии**

**Цель работы:** изучить основы индуктотермии.

### **7.1 Основные теоретические сведения**

Индуктотермия (inductio – возбуждение; therme – жар, теплота), или высокочастотная магнитотерапия, – метод электролечения, в основе которого лежит воздействие на организм магнитным полем (точнее, преимущественно магнитной составляющей электромагнитного поля) высокой частоты. Суть метода заключается в том, что по расположенному на теле больного кабелю или специальной спирали, называемым индуктором, протекает высокочастотный ток, в результате чего вокруг них образуется действующее на организм переменное магнитное поле высокой частоты.

**7.1.1 Физические и биофизические основы метода.** При индуктотермии на организм чаще воздействуют переменным магнитным полем частотой 13,56 МГц, что соответствует длине волны 22,12 м.

Как известно, магнитные поля, пересекая проводники, наводят (индуктируют) в них электрический ток. В теле человека при действии высокочастотных магнитных полей возникают хаотические вихревые токи (токи Фуко). Одним из наиболее характерных их свойств является высокое теплообразование. Количество тепла, образующегося под действием высокочастотного магнитного поля, согласно закону Джоуля-Ленца, прямо пропорционально квадрату частоты колебаний, квадрату напряженности магнитного поля и удельной проводимости



ткани. В связи с этим при индуктотермии больше тепла образуется в тканях с хорошей электропроводностью, т. е. в жидких средах (кровь, лимфа) и хорошо кровоснабжающихся тканях (мышцы, печень и др.). Под влиянием индуктотермии в зависимости от параметров воздействия температура тканей повышается на 2...5 °С на глубину до 8...12 см, а температура тела пациента – на 0,3...0,9 °С. Для обеспечения более равномерного нагрева тканей при индуктотермии процедуры проводятся с воздушным зазором в 1...2 см.

Неотъемлемым от теплового является осцилляторный компонент действия индуктотермии, который проявляется физико-химическими изменениями в клетках и тканях, субклеточных структурах. Максимальные магнитоиндуцированные механические эффекты возникают в жидкокристаллических фосфолипидных структурах мембран, в надмолекулярных белковых комплексах. Чем выше интенсивность воздействия, тем осцилляторный эффект проявляется слабее.

*7.1.2 Физиологическое и лечебное действие индуктотермии.* Повышение температуры тканей и физико-химические сдвиги в них, происходящие при индуктотермии, сопровождаются прежде всего раздражением нервной системы. При интенсивных воздействиях повышается возбудимость нервов, скорость проведения по ним возбуждения. При более продолжительных воздействиях отмечается усиление тормозных процессов в ЦНС, вследствие чего индуктотермия оказывает седативное и болеутоляющее действие, вызывает сонливость и вялость.

В результате образования внутритканевого тепла и повышения температуры тканей происходят расширение кровеносных сосудов, усиление кровообращения и лимфооттока, увеличение числа функционирующих капилляров, небольшое снижение артериального давления, улучшается кровоснабжение внутренних органов в зоне воздействия, ускоряется формирование артериальных коллатералей и анастомозов в микроциркуляторном русле.

Под влиянием индуктотермии повышаются проницаемость гистогематических барьеров и клеточных мембран, скорость метаболизма, что благоприятно сказывается на течении обменно-трофических процессов, приводит к обратному развитию дегенеративно-дистрофических нарушений, определяет ее рассасывающее и противовоспалительное действие. При индуктотермии повышается синтез антител, увеличивается содержание в крови компонентов гуморального иммунитета, усиливается фагоцитарная способность лейкоцитов, активность фибробластов и макрофагов.

Индуктотермия нормализует деятельность внутренних органов, включая и их секреторную активность. Особенно благоприятно она влияет на вентиляционно-дренажную функцию бронхов, улучшает отделение мокроты, снижает ее вязкость, снимает бронхоспазм и ликвидирует воспалительные изменения в бронхолегочной системе. Индуктотермия стимулирует фильтрационную функцию почек, способствует выведению продуктов азотистого распада и увеличению диуреза. Она повышает желчеобразование и желчевыделение.

Воздействие индуктотермии на область надпочечников сопровождается усилением синтеза глюкокортикоидов, уменьшением уровня катехоламинов в плазме крови и моче. Одновременно увеличивается в крови уровень свободных



кортикостероидов, а также использование их тканями. Она также стимулирует гормонсинтетические процессы в поджелудочной и щитовидной железах.

Индуктотермия может вызывать некоторое повышение активности свертывающей системы крови, особенно при сегментарно-рефлекторных воздействиях. Высокочастотное магнитное поле стимулирует регенерацию костной ткани и ускоряет эпителизацию ран. Оно способствует расслаблению мышц, снятию их спазма, повышает функциональную активность суставов.

Таким образом, для лечебного применения индуктотермии наибольшее значение имеет ее противовоспалительное, сосудорасширяющее, болеутоляющее, антиспастическое, трофическое и миорелаксирующее действие.

*7.1.3 Аппаратура. Техника и методика индуктотермии.* В настоящее время в лечебной практике для индуктотермии используют аппарат ИКВ-4 со ступенчатой регулировкой мощности. Максимальная выходная мощность 200 Вт, рабочая частота – 13,56 МГц + 0,05 %. Аппарат снабжен двумя резонансными индукторами-дисками (диаметрами 22 и 12 см), двумя кабельными индукторами и может комплектоваться специальными гинекологическими индукторами, подключаемыми через согласующее устройство.

Процедуры проводят на деревянной кушетке (или стуле) в удобном для больного положении. Воздействовать можно через легкую одежду, сухие марлевые или гипсовые повязки. В области индуктотермии и на рядом расположенных участках тела не должно быть металлических предметов, тканей, содержащих металл.

Индуктор выбирают в зависимости от локализации и площади воздействия. Индуктор-диск обычно используют для проведения процедур на ровные участки тела. Устанавливают его с зазором в 1...2 см от кожной поверхности. При использовании индуктора-кабеля зазор в 1...2 см создают с помощью тонкого одеяла или махрового полотенца. Как правило, из кабеля формируют спираль (плоскую, цилиндрическую, коническую) из двух-трех витков, что повышает эффективность индукции. При приготовлении спирали расстояние между витками должно быть 1...2 см и они не должны непосредственно пересекаться. Для воздействия по ходу нервов и сосудов применяют индуктор-кабель в виде петли.

Во время процедуры пациент испытывает чувство приятного тепла в тканях. Ощущение тепла должно быть равномерным по всей площади воздействия.

В соответствии с тепловыми ощущениями различают слаботепловую (малую), тепловую (среднюю) и сильнотепловую (большую) дозировки. На аппарате ИКВ-4 слабые ощущения тепла пациенты испытывают при положении переключателя мощности на первом-третьем делениях, средние – на четвертом-пятом и сильные – на шестом-восьмом делениях.

Продолжительность воздействий, проводимых ежедневно или через день, составляет от 15 до 30 мин. На курс лечения назначают 10...15 процедур. Детям применяют слабые и средние тепловые дозировки продолжительностью 10...20 мин ежедневно или через день, на курс – 8...10 процедур. Индуктотермия детям назначается с 5 лет.



*7.1.4 Показания и противопоказания к индуктотермии.* Основными показаниями для индуктотермии являются подострые и хронические воспалительные процессы в различных органах и тканях, посттравматические состояния и заболевания опорно-двигательного аппарата, заболевания сердечно-сосудистой системы, травмы и воспалительные заболевания периферической нервной системы, спастические состояния, бронхиальная астма, язвенная болезнь, мочекаменная болезнь, зудящие дерматозы, склеродермия, хроническая экзема и др.

*Противопоказания* для индуктотермии: лихорадочные состояния, острые гнойно-воспалительные заболевания, кровотечение или склонность к нему, активный туберкулез, выраженная гипотензия, декомпенсация сердечно-сосудистой деятельности, нарушения температурной чувствительности, злокачественные и доброкачественные опухоли, беременность, наличие металлических предметов (осколки, штифты) и кардиостимуляторов в зоне воздействия.

*7.1.5 Индуктотермоэлектрофорез.* Сочетанное воздействие индуктотермией и лекарственным электрофорезом носит название индуктотермоэлектрофореза. Совместное применение этих методов обеспечивает потенцирование их действия, а также способствует поступлению в организм большего количества вещества и на большую глубину.

При индуктотермоэлектрофорезе над активным электродом с гидрофильной и лекарственной прокладкой, смоченной раствором лекарственного вещества (концентрация не выше 3 %), с зазором в 1...2 см устанавливается индуктор-диск. При использовании кабельного индуктора поверх электрода для лекарственного электрофореза накладывается клеенка, а затем размещается цилиндрическая спираль из кабеля. В целях уменьшения экранирующего действия в токонесущем металлическом электроде делается несколько щелей или отверстий. При проведении процедуры вначале включают аппарат для индуктотермии, а затем, через 1...2 мин, – аппарат для гальванизации. Выключают аппараты в обратном порядке. Физические факторы дозируют так же, как и при отдельном использовании индуктотермии и лекарственного электрофореза. Процедуры продолжительностью от 15 до 30 мин проводят ежедневно или через день.

Наиболее часто для индуктотермоэлектрофореза из лекарственных веществ используют антибиотики, новокаин, витамины, препараты йода, хлора, меди, магния, кальция и др.

Индуктотермоэлектрофорез успешнее всего применяют при подострых и хронических воспалительных, травматических и обменных поражениях суставов, спаечных процессах в брюшной полости, хронических воспалительных процессах женских половых органов, воспалительных процессах в бронхолегочной системе.

Кроме индуктотермоэлектрофореза, в лечебной практике из сочетанных методов используют гальваноиндуктотермию и грязьиндуктотермию.

*7.1.6 Ультравысокочастотная индуктотермия.* Под ультравысокочастотной индуктотермией (УВЧ- индуктотермией) понимают воздействие на организм ультравысокочастотным переменным магнитным полем. В известном смысле метод представляет собой комбинацию индуктотермии и УВЧ-терапии.



По технике проведения – это индуктотермия, осуществляемая с помощью аппаратов для УВЧ-терапии.

Действующим физическим фактором является магнитное поле катушки, возбуждаемое ультравысокочастотным генератором (40,68 или 27,12 МГц) аппаратов УВЧ-терапии. Для его получения выпускаются специальные электроды (ЭВТ-1), называемые резонансными индукторами, или индукторами с настроенным контуром. Они бывают трех размеров: диаметром 6 и 9 см – рассчитаны на мощность аппаратов УВЧ-терапии до 40 Вт; диаметром 16 см – рассчитаны на мощность до 100 Вт.

При проведении процедур резонансный индуктор крепится на одном из держателей аппарата УВЧ-терапии, а его провода подключаются к УВЧ-генератору в те же гнезда, что и фидера конденсаторных пластин. Воздействие осуществляется с зазором в 1,0...1,5 см. Продолжительность воздействия составляет 8...12 мин, курс лечения – 8–10 процедур. Важным достоинством метода является то, что он может применяться у детей с 6- месячного возраста.

По своему действию на организм метод соответствует индуктотермии, но обладает более выраженным противовоспалительным и противоотечным действием. Поэтому УВЧ-индуктотермия наиболее показана при лечении острых и подострых воспалительных заболеваний кожи, подкожной клетчатки, ЛОР-органов, периферической нервной системы, бронхов и других внутренних органов, особенно у детей.

Противопоказания для нее такие же, как и для индуктотермии.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое индуктотермия: частота, глубина воздействия, действие, аппараты?
- 2 Каковы механизмы физиологического и лечебного действия индуктотермии?
- 3 Назовите аппаратуру и методики индуктотермии.
- 4 Перечислите показания и противопоказания для индуктотермии.

## **8 Практическое занятие № 8. Изучение схем строения СВЧ-томографов**

**Цель работы:** изучить проблематику СВЧ-томографии.

### **8.1 Основные теоретические сведения**

Томография (от греч. *τομή* – сечение) – метод послойного исследования внутренней структуры объекта посредством его многократного просвечивания в различных пересекающихся направлениях. В классической трактовке под томографией понимается метод исследования, с помощью которого можно производить снимок слоя, лежащего на определенной глубине исследуемого объекта.

Достижения в области томографии с использованием любого вида излу-



ний основаны на применении математических методов и алгоритмов восстановления внутренней структуры объекта по проекционным данным.

С точки зрения взаиморасположения источника зондирующего излучения, объекта и детектора томографические методы могут быть разделены на следующие группы:

- трансмиссионные – регистрируется зондирующее внешнее излучение, прошедшее через пассивный (неизлучающий) объект, частично ослабляясь при этом;
- эмиссионные – регистрируется излучение, выходящее из активного (излучающего) объекта с некоторым пространственным распределением источников излучения;
- комбинированные трансмиссионно-эмиссионные (люминесцентные, акустооптические, оптоакустические и др.) – регистрируется вторичное излучение от источников, распределённых по объёму объекта и возбуждённых внешним излучением;
- эхозондирование — регистрируется зондирующее внешнее излучение, отражённое от внутренних структур пассивного объекта.

Радиотомограф – прибор, использующий электромагнитное излучение радиодиапазона и позволяющий на основе данных радиозондирования восстанавливать внутреннюю электрофизическую структуру объекта исследований. Метод радиотомографии призван расширить диапазон контролируемых параметров и органически дополнить известные методы рентгеновской, ядерно-магнитно-резонансной (ЯМР) и ультразвуковой томографии. Вплоть до настоящего времени реально действующих радиотомографов, пригодных для использования на практике, не создано.

Главная трудность на пути создания радиотомографа состоит в сложности интерпретации результатов зондирования в случае, когда длина волны излучения соизмерима с размерами неоднородностей. Объективно существующие эффекты дифракции, интерференции, поглощения и многократного взаимодействия затрудняют однозначное решение обратной задачи, т. е. восстановление внутренней структуры объекта исследований по наблюдаемым возмущениям поля.

Для томографических систем линейного взаимодействия эффективны алгоритмы, основанные на инверсном преобразовании Радона многоакурсных результатов регистрации. Такие алгоритмы хорошо разработаны в медицинской рентгеновской реконструктивной вычислительной томографии.

Однако при взаимодействии радиоволн СВЧ-диапазона вследствие дифракционных искажений при прохождении волн через объект методы преобразований, разработанные для целей медицинской томографии, утрачивают свою эффективность. С разной точностью приближений эти проблемы решают методами эйконала и в приближении М. Борна и Г. М. Рытова.

Разработанный для рентгеновского излучения алгоритм непосредственно использовать здесь нельзя, поскольку траектории, по которым измеряются нелинейные интегралы, неизвестны и, следовательно, требуется нелинейная процедура восстановления. М. Тасто и Г. Шомберг предложили простой метод обобщения хорошо известного алгебраического метода реконструкции на нелинейный случай. Вначале задают некий исходный профиль проводимости (ди-



электрической проницаемости, плотности), а затем методом конечных разностей рассчитывают потенциал (напряженность электрического поля), подчиняющийся заданной системе граничных условий. Если для реконструкции изображения используют итеративную процедуру, то вычисление может производиться после каждой итерации, а траектории должны соответствующим образом изменяться.

Очередной шаг в развитии методики восстановления радиоизображения в СВЧ-диапазоне заключается в следующем. Получают двумерное изображение сечения в дискретизованной форме, используя алгоритмы линейного восстановления с помощью автоматического сканирующего рентгеновского томографа. Это изображение используется для указания размеров и относительного положения неоднородностей в области данного сечения объекта. Затем составляют уравнения электромагнитного поля, учитывающие размеры и формы неоднородностей, и решают их численно с помощью метода моментов. Процедура решения состоит в разбиении сечения на небольшие элементы и вычислении электрического поля в центре каждого элемента с помощью метода моментов. Во всех случаях максимальный размер элемента находится между  $0,1\lambda\sqrt{\epsilon}$  и  $0,2\lambda\sqrt{\epsilon}$  (где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость элемента). Затем передатчик перемещают по окружности объекта контроля и вычисления производят при различных положениях приемника. При повышении частоты передатчика повышается разрешающая способность и, следовательно, можно получить более точную информацию о распределении диэлектрической проницаемости. Нужно к этому добавить, что можно получить более высокую чувствительность, если восстановление будет основываться не на амплитуде, а на фазе сигнала.

Еще одним направлением в разработке томографических систем на СВЧ является применение доплеровского метода. Пусть имеется СВЧ-антенна, которая используется для облучения вращающегося объекта с некоторой заданной мощностью излучения на одной частоте. Эта же антенна используется и для приема отраженных сигналов. Исследуемый объект поворачивается на угол  $360^\circ$ , при этом при каждом угле наблюдения записываются амплитуда и фаза сигналов.

Необходимо заметить, что можно было бы записывать только амплитуду сигналов и все же получить томографическое изображение. Поскольку исследуемый объект поворачивается относительно неподвижной антенны, центры рассеяния энергии облучения внутри объекта дают отраженные сигналы, сдвинутые по частоте относительно исходной частоты на величину, зависящую от скорости перемещения отдельных отражателей (неоднородностей). Если объект вращается с постоянной угловой скоростью, то центры рассеяния, лежащие на линии постоянной поперечной дальности, будут иметь одинаковую составляющую скорости в направлении на антенну. Таким образом, в данный момент времени все эти центры рассеяния будут отражать сигнал и все отраженные ими сигналы будут иметь один и тот же доплеровский сдвиг частоты. Измеряя выходной сигнал приемника на некоторой частоте, получим сумму (линейный интеграл) рассеянного излучения на данной поперечной дальности, соответствующей этой частоте. Амплитуда отраженных сигналов на других частотах



дает линейные интегралы для рассеивателей на других поперечных дальностях. График зависимости мгновенной амплитуды от частоты можно интерпретировать как томографическую проекцию. Через некоторое время исследуемый объект повернется в новое положение и будут получены новые проекции и т. д. Иными словами, за полный оборот исследуемого тела будет получено много отдельных проекций. Алгоритм томографической реконструкции по данным, получаемым из этих проекций, дает изображение распределения центров рассеяния в облучаемом объекте. При анализе можно прийти к различным способам обработки данных, в которых используют фазу и амплитуду отраженных сигналов, но не их спектры. С помощью такого подхода можно получать томографические изображения с передаточной функцией точки в 2,5 раза острее функции, соответствующей обычному рэлеевскому разрешению.

Один из этапов восстановления изображения по когерентной доплеровской томограмме состоит в вычислении двумерного преобразования Фурье. Такое восстановление возникает вполне естественно не только при когерентной доплеровской томографии, но и при решении других задач визуализации томографических изображений.

Главное преимущество когерентной доплеровской томографии в том, что она обладает высоким пространственным разрешением, которое можно получить при непрерывном излучении, не прибегая к использованию широкополосных сигналов. К недостаткам относится наличие больших боковых лепестков у передаточной функции точки, которые ограничивают динамический диапазон и ухудшают разрешение в случае, когда точки объекта не могут наблюдаться под большими углами.

В настоящее время наибольший прогресс в обращении волнового уравнения, необходимого для количественной оценки такой характеристики, как диэлектрическая проницаемость и проводимость исследуемого объекта, достигнут в реконструктивной томографии при работе в трансмиссионном режиме. Примером такого подхода являются методы СВЧ-томографии, основанные на принципах СВЧ-радиовидения и многочастотной радиоголографии.

В СВЧ-томографии могут использоваться при сборе данных механические и электрические системы сканирования. Первые системы (механические), в свою очередь, могут быть с круговым вращением исследуемого объекта или его линейным перемещением. Электрические системы основаны либо на электрическом сканировании электромагнитного луча, либо на многоэлементном сборе полезной информации.

К томографическим СВЧ-устройствам можно отнести широко используемые на практике георадары для зондирования грунтов. Применяемые в последующем программы RADAN позволяют производить анализ глубины залегания неоднородностей, осуществлять масштабирование и привязку к объектам на местности, получать трехмерные изображения на основе серии параллельных профилей.

СВЧ-томография находится еще на начальном этапе своего развития, однако первые опыты обнадеживают, предвещая значимые перспективы.

Известны публикации о лабораторных экспериментах с СВЧ-вычислительными томографами. Пока это сложные устройства, работающие с генераторами на 1...5 ГГц. Для регистрации радиоволн, отражаемых объектом во все

стороны, в лабораторном макете, созданном американскими исследователями, используется 22000 дипольных антенн. Предполагается, что диагностическая ценность принципиально новой информации о человеческом организме, добытая с помощью этого метода, с лихвой перекроет стоимость его разработки. Во-первых, СВЧ-излучение менее вредно для живых организмов по сравнению с рентгеновским. Во-вторых, СВЧ-излучение наиболее перспективно для диагностики патологий на ранней стадии их развития. Дело в том, что с изменением водосодержания тканей при заболевании сильнее всего изменяется их диэлектрическая проницаемость. Часто плотность вещества еще не успевает измениться, а диэлектрическая проницаемость здоровых и патологических тканей уже заметно контрастирует.

Основная причина, препятствующая развитию микроволновой томографии, заключается в трудностях интерпретации измеряемых искажений параметров излучения при его взаимодействии с неоднородными средами. Исследования показывают, что при прохождении микроволнового излучения, например, через биологические ткани, оказываются существенными эффекты многократного взаимодействия волн (рассеяния, поглощения, отражения, дифракции, деполяризации и т. д.). В случае, когда характерные размеры неоднородностей соизмеримы с длинами волн используемого излучения (а в данном диапазоне это условие почти всегда выполняется), теория многократного взаимодействия достаточно сложна для описания процесса распространения излучения в исследуемой среде, что не дает возможности решить обратную задачу восстановления структуры распределения неоднородностей.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Что такое томография, каковы ее разновидности?
- 2 СВЧ-томография, ее диагностические возможности.
- 3 Преимущества СВЧ-томографии.

## **9 Практическое занятие № 9. Изучение документов о безопасности медперсонала при микроволновой и тепловизионной диагностике и лечении пациентов**

**Цель работы:** изучить требования безопасности при эксплуатации медицинской тепловизионной и СВЧ-техники.

### **9.1 Основные теоретические сведения**

ГОСТ 12.2.025–75 предусматривает деление всех изделий медицинской техники на четыре типа:

- H* – нормальная степень защиты;
- B* – повышенная степень защиты;
- BF* – повышенная степень защиты и изолированная рабочая часть;



*CF* – наивысшая степень защиты и изолированная рабочая часть.

К типу *H* относятся изделия без рабочей части: лабораторные приборы, стерилизаторы и т. п.

К типу *B* относятся приборы с рабочей частью, которая может иметь электрический контакт с телом пациента, за исключением непосредственного контакта с сердцем: электрокардиографы, ультразвуковые аппараты и т. д.

К типу *BF* относятся приборы, отличающиеся от типа *B* наличием изолированной от корпуса рабочей частью: стимуляторы, низкочастотная электролечебная аппаратура.

К типу *CF* относятся приборы, рабочая часть которых имеет непосредственный контакт с сердцем: внешние электрокардиостимуляторы, измерители давления в полости сердца и др.

Помимо перечисленных типов изделий, ГОСТ регламентирует еще две категории изделий медицинской техники.

Изделие категории *AP* – изделие или часть изделия, удовлетворяющие требованиям к конструкции, маркировке и документации, предписанным с целью исключить источник поджига воспламеняющейся смеси анестетика с воздухом.

Изделие категории *APG* – изделие или часть изделия, удовлетворяющие требованиям к конструкции, маркировке и документации, предписанным с целью исключить источник поджига воспламеняющейся смеси анестетика с кислородом или закисью азота.

При проведении процедур ДМВ- и СМВ-терапии имеет место рассеяние в окружающее пространство некоторого количества энергии. При СМВ-терапии в зависимости от поверхностных слоев тканей от 25 до 75 % падающей на тело энергии отражается. При ДМВ-терапии эти величины составляют от 35 до 65 %. Кроме того, часть энергии рассеивается, не доходя до облучаемой поверхности.

Хроническое облучение микроволнами вызывает функциональные сдвиги в некоторых органах и системах организма. Функциональные изменения нервной системы не имеют четкой специфики и протекают по типу астенических реакций. В составе периферической крови отмечаются колебания количества лейкоцитов как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Сердечно-сосудистая система отвечает на хронические облучения микроволнами малой интенсивности брадикардией, сосудистой гипотонией и др.

Все эти функциональные сдвиги имеют, как правило, обратимый характер. Особый характер имеет действие микроволновой энергии на хрусталик глаза, что связано с отсутствием в глазном яблоке кровотока, уносящего избыток тепла. Это приводит к возможности образования катаракты в результате кратковременного интенсивного облучения глаз либо после многократного облучения средней интенсивности.

На основе экспериментальных данных о действии на организм микроволн различной интенсивности для медицинских лечебных учреждений утверждены «Правила устройства, эксплуатации и безопасности физиотерапевтических отделений (кабинетов)».

В «Правилах устройства, эксплуатации и безопасности физиотерапевтических отделений (кабинетов)» оговорены условия эксплуатации аппаратов для

ДМВ- и СМВ-терапии, предусматривается эксплуатация аппаратов для микроволновой терапии в отдельном, специально выделенном помещении, указаны предельно допустимые величины интенсивности поля в месте нахождения обслуживающего персонала:

- при облучении в течение всего рабочего дня – не более  $0,01 \text{ мВт/см}^2$ ;
- при облучении до 2 ч за рабочий день – не более  $0,1 \text{ мВт/см}^2$ ;
- при облучении в течение 15...20 мин за рабочий день – не более  $1 \text{ мВт/см}^2$  при условии пользования защитными очками.

Основным фактором, требующим учета при определении мер по обеспечению безопасности эксплуатации магнито-резонансных томографов (МРТ), являются воздействия статического, высокочастотного и быстроизменяющихся градиентных магнитных полей.

Последствия воздействия статического магнитного поля МТ-томографа на организм человека определяются главным образом величиной индукции поля.

В случае влияния полей с индукцией менее 2 Тл при их регулярном воздействии возрастает вероятность нарушения сердечно-сосудистых функций. Кратковременное воздействие полей, индукция которых превышает 4 Тл, может оказать вредное влияние на здоровье, проявляющееся в виде головокружения и рвоты. Статическое магнитное поле представляет опасность для людей, имеющих устройства поддержания жизни (имплантированные кардиостимуляторы и др.).

Следствием воздействия высокочастотного поля (обычно частотой выше 1 МГц) является нагревание отдельных участков или всего тела пациента. Для характеристики воздействия высокочастотного поля используют удельный коэффициент поглощения (УКП), который является функцией частоты, типа и количества высокочастотных импульсов, продолжительности и периода их повторения, а также зависит от проводимости и удельного веса ткани, исследуемой анатомической зоны, типа ткани и массы тела пациента.

Наиболее ощутимыми реакциями человеческого организма на нагревание тела высокочастотным полем являются реакции терморегуляции, включающие учащение сердцебиения и кровотока кожи при одновременном незначительном падении артериального давления. Эти реакции достигают максимума, если температура тела поднимается более чем на  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расчетным путем определено и экспериментально подтверждено, что температура тела пациента в легкой одежде при нормальной терморегуляции повысится не более чем на  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , если УКП равен  $4 \text{ Вт/кг}$ . При УКП, равном  $1,5 \text{ Вт/кг}$ , какого-либо вредного воздействия на здоровье при чрезмерном местном или регулярном нагревании тела пациента не отмечалось. Предел в  $1,5 \text{ Вт/кг}$  рекомендуется как допустимый УКП для всех пациентов, независимо от их состояния здоровья.

При работе с аппаратурой СВЧ необходимо выполнять требования ГОСТ 12.1.006–84 *Электромагнитные поля радиочастот* и Санитарные правила и нормы *Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона*.

Облучение в интенсивном поле СВЧ живых тканей приводит к изменению их свойств, при этом различают две группы эффектов: интегральные, связанные с интенсивностью облучения, и резонансные, проявляющиеся в слабых полях на определенных частотах.



Максимально излучаемая мощность СВЧ-приборами и максимальная плотность мощности излучения в зоне присутствия обслуживающего персонала приводятся в технических условиях на конкретные типы приборов.

Электромагнитное излучение в диапазоне частот 0,3...300 ГГц оценивается поверхностной плотностью потока энергии и создаваемой им энергетической нагрузкой, представляющей собой суммарный поток энергии, проходящей через единицу облучаемой поверхности в течение времени облучения. При необходимости проведения работ в условиях, отличающихся от установленных нормами, следует пользоваться защитными средствами и материалами.

Защита персонала от опасного воздействия СВЧ-излучения, также и от других видов излучений, обеспечивается путем проведения ряда мероприятий. Это уменьшение мощности источника, экранирование источника и рабочего места, применение поглотителей излучения и индивидуальных средств защиты. Приборы неразрушающего радиоволнового контроля имеют, как правило, маломощные источники СВЧ-излучений, поэтому вопросы обеспечения безопасной работы персонала решаются достаточно просто. При этом надо следить, чтобы максимум излучаемой СВЧ-энергии был направлен в область, где невозможно нахождение людей. Уменьшение мощности излучения всегда желательно, чтобы меньше загрязнять окружающую среду и создавать лучшие гигиенические условия, но эта мера ведет к понижению амплитуды СВЧ-сигналов, что и ограничивает минимальный уровень СВЧ-энергии.

Наиболее эффективным общим средством защиты от СВЧ-излучения являются экраны из хорошо проводящих материалов (алюминий, латунь, сталь и др.) в виде листов толщиной 0,5...2 мм или сетки с ячейками размером в несколько миллиметров. Экраны не должны иметь отверстий и щелей, соизмеримых с длиной волны СВЧ-излучения и резко ухудшающих защитные свойства. Сеточные экраны дают меньшее экранирование СВЧ-излучения, но сквозь них видно аппаратуру, они пропускают воздух и могут быть легко демонтированы.

Чтобы устранить возможность облучения многократно отраженным излучением, используют поглощающие материалы из резины с повышенным содержанием сажи, ферромагнитный порошок со связующим диэлектриком, пенополистирол или волокнистые материалы, пропитанные графитом, и другие слабопроводящие материалы. Наилучшие результаты получаются при нанесении на металлический экран поглощающего материала с ребристой многократно отражающей и поглощающей поверхностью, что приводит к увеличению коэффициента поглощения СВЧ-излучения.

Индивидуальные средства (защитные очки, защитные халаты, фартуки, комбинезоны и защитные капюшоны) применяются для защиты человека или отдельных его органов при работе в электромагнитных полях большой интенсивности, когда другие меры не могут обеспечить необходимого ослабления излучения. Защитная одежда шьется из радиоткани, которая имеет переплетенные металлические нити, а защитные очки армированы металлической сеткой или имеют специальное поглощающее покрытие.

Организационные меры защиты заключаются в правильном расположении оборудования, оборудовании рабочего места и организации труда. В первую



очередь необходимо стремиться увеличить расстояние до источника излучения («защита расстоянием»), так как интенсивность излучения уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника, и сократить время пребывания персонала в электромагнитном поле («защита временем»).

При проведении неразрушающего контроля радиоволновым методом обычно достаточно применения мер организационного характера и использования поглотительного материала с экраном в зоне работы оборудования. Это позволяет защитить в достаточной степени персонал, работающий с оборудованием, и устранить загрязнение окружающей среды.

В связи с тем, что при микроволновом облучении наблюдается рассеивание энергии в окружающую среду, при проведении процедур ДМВ- и СМВ-терапии необходимо соблюдать некоторые меры предосторожности и правила техники безопасности. Это в основном касается работы на стационарных аппаратах с использованием дистанционных методик воздействия.

Аппараты стационарные должны эксплуатироваться в экранированной комнате или в кабине, огражденной специальной защитной тканью с экранирующими свойствами (или мелкоячеистой сеткой).

Для защиты глаз пациента и обслуживающего персонала следует применять защитные очки типа ОРЗ-5. Во время процедуры пациент должен находиться на максимально возможном расстоянии от экранирующих поверхностей, что позволяет уменьшить воздействие отраженной энергии. Рабочую поверхность излучателей необходимо обрабатывать дезинфицирующими растворами, а защитные колпачки полостных излучателей стерилизовать путем кипячения.

Медперсонал, работающий с источниками СВЧ-излучений, один раз в год должен проходить медицинский осмотр.

Проведение тепловизионных процедур не представляет никакой опасности для обслуживающего персонала, так как при этом не проводится никакого облучения пациента.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 В чем состоит особенность воздействия СВЧ-излучения на организм человека?
- 2 Как следует обеспечивать безопасность работы с установками, являющимися генераторами СВЧ-излучения?
- 3 Назовите основные методы и средства защиты от СВЧ-излучения.
- 4 Какие физические явления используются при экранировании и каковы принципы работы отражающих и поглощающих экранов?



## Список литературы

1 **Корневский, Н. А.** Биотехнические системы медицинского назначения : учебник / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителев. – Старый Оскол : ТНТ, 2013. – 688 с.

2 **Корневский, Н. А.** Биотехнические системы медицинского назначения : учебник / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителев. – Старый Оскол : ТНТ, 2016. – 688 с. : ил.

3 **Корневский, Н. А.** Эксплуатация и ремонт биотехнических систем медицинского назначения : учебное пособие / Н. А. Корневский, Е. П. Попечителев. – Старый Оскол : ТНТ, 2013. – 432 с.

4 **Ершов, Ю. А.** Биотехнические системы медицинского назначения : учебник для бакалавриата и магистратуры : в 2 ч. Ч. 1 : Количественное описание биообъектов / Ю. А. Ершов, С. И. Щукин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2017. – 180 с.

5 Лучевая диагностика и лучевая терапия : учебное пособие / А. И. Алешкевич [и др.]. – Минск : Новое знание, 2017. – 382 с. : ил.

