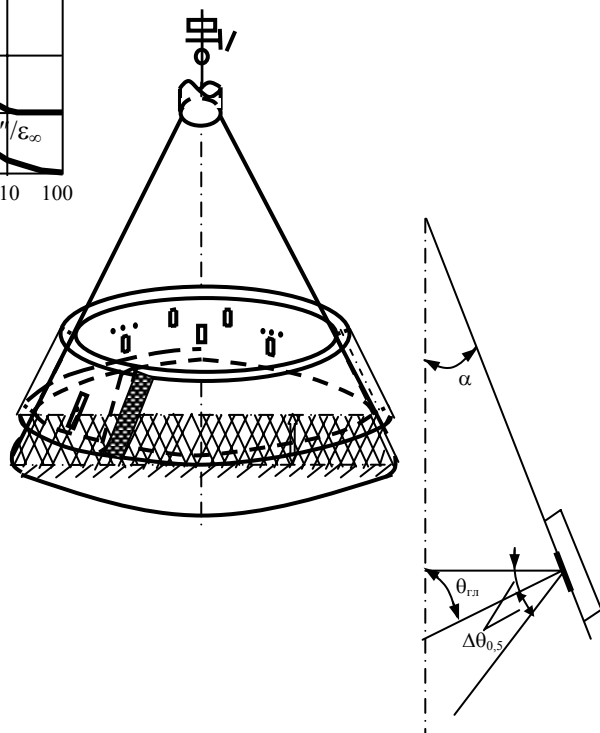
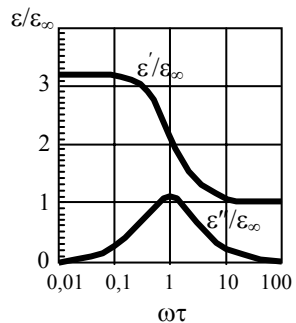


П.А. ФЕДЮНИН, Д.А. ДМИТРИЕВ,  
А.А. ВОРОБЬЕВ, В.Н. ЧЕРНЫШОВ

## МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЯ



МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2004

**П.А. ФЕДЮНИН, Д.А. ДМИТРИЕВ,  
А.А. ВОРОБЬЕВ, В.Н. ЧЕРНЫШОВ**

**МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЯ**

Под общей редакцией П.А. Федюнина

---

МОСКВА  
«ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ-1»  
2004

УДК 620.171.33  
ББК Ж108.9  
М59

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор  
*И.В. Кораблев*

Доктор технических наук, профессор  
*А.А. Чуриков*

**Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Воробьев А.А., Чернышов В.Н.**

М59 Микроволновая термовлагодетрия / Под общ. ред. П.А. Федюнина. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. 208 с.

Монография посвящена теоретическим и практическим аспектам разработки методов и средств оперативного контроля комплекса параметров, характеризующих влажность капиллярно-пористых материалов, и готовых изделий при одностороннем доступе их к поверхности. Представлены аналитические зависимости электрофизических характеристик влажных капиллярно-пористых (строительных) материалов, детально изложены теоретические основы проектирования аппаратных микроволновых средств термовлагодетрии. Особое внимание в книге уделено новым микроволновым термовлагодетрическим методам и реализующим их средствам, а также оригинальным методам

расчета параметров и конструкций волноводно-щелевых антенн, диаграмм направленности апертурных преобразователей термовлагодетрии.

Предназначена для инженеров и научных работников, а также для студентов технических вузов и курсантов военных институтов, специализирующихся в области электро- и радиофизики.

УДК 620.171.33  
ББК Ж108.9

ISBN 5-94275-166-8  
© Федюнин П.А., Дмитриев Д.А.,  
Воробьев А.А., Чернышов В.Н.,  
2004  
© «Издательство Машиностроение-1», 2004

Научное издание

ФЕДЮНИН Павел Александрович,  
ДМИТРИЕВ Дмитрий Александрович,  
ВОРОБЬЕВ Александр Анатольевич,  
ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич

МИКРОВОЛНОВАЯ  
ТЕРМОВЛАГОДЕТРИЯ

Монография

Редактор Т.М. Глинка  
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сынкова

Подписано к печати 25.12.2004  
Формат 60 × 84/16. Гарнитура Times. Бумага офсетная. Печать офсетная  
Объем: 12,09 усл. печ. л.; 11,5 уч.-изд. л.  
Тираж 400 экз. С. 867<sup>М</sup>

«Издательство Машиностроение-1»,  
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в издательско-полиграфическом центре  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН

---

- $C$  – удельная теплопроводность, Дж/кг · К;  
 $c$  – величина скорости электромагнитных волн в вакууме, м/с;  
 $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  
 $E_{mn}$  – электрические волны типа  $mn$ ;  
 $f$  – частота колебаний, Гц;  
 $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  
 $H_{mn}$  – магнитные волны типа  $mn$ ;  
 $k$  – комплексный коэффициент распространения, м<sup>-1</sup>;  
 $P$  – мощность излучения, нагрева, Вт;  
 $Q$  – количество тепла, Дж;  
 $\dot{R}$  – комплексный коэффициент отражения;  
 $R$  – активное сопротивление, Ом; расстояние, м;  
 $T$  – температура абсолютная, К;  
 $t$  – температура, °С;  
 $t_n$  – время нагрева, с;  
 $v$  – скорость фазовая (групповая), м/с;  
 $V_{вз}$  – объем взаимодействия, м<sup>3</sup>;  
 $W$  – энергия, Дж; объемная влажность, % объемные;  
 $W_n$  – поверхностная влажность, % объемные;  
 $Z_v$  – волновое сопротивление среды, Ом;  
 $Z_0$  – волновое сопротивление вакуума, Ом;  
 $\dot{Z}$  – комплексное сопротивление, Ом;  
 $A$  – затухание, дБ; коэффициент структуры материала;  
 $\alpha$  – коэффициент затухания, дБ/м; коэффициент структуры материала;  
 $\beta$  – коэффициент фазы, рад/м;  
 $\gamma_3$  – удельная электрическая проводимость среды, См/м;  
 $\gamma$  – замедление фазовой (групповой) скорости;  
 $\Delta$  – глубина проникновения поля в материал, м; приращение;  
 $\text{tg } \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  
 $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  
 $\epsilon_a = \epsilon_0(\epsilon' - j\epsilon'')$  – комплексная абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;  
 $\epsilon'$  – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости;  
 $\epsilon''$  – мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости;  
 $\theta_{гл}$  – главный угол апертуры, град;  
 $\Delta\theta$  – управляемое отклонение угла от главного, град;  
 $2\Delta\theta_{0,5}$  – ширина диаграммы направленности на уровне 0,5 от максимальной мощности, град;  
 $\lambda = \lambda_r$  – длина волны в свободном пространстве, м;  
 $\lambda_v$  – длина волны в волноводе, м;  
 $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  
 $\mu_a$  – комплексная абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м;  
 $v_3$  – коэффициент замедления (фазовый) групповой;  
 $\Pi$  – мгновенное значение вектора Пойнтинга, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  – текущее время, с;  
 $\Delta\phi, \phi$  – сдвиг фазы, рад;  
 $\omega$  – круговая частота колебаний, рад/с;

ВВЩА – волноводно-щелевая апертура;  
ДЗ – дальняя зона;  
ДН – диаграмма направленности;  
КБВ – коэффициент бегущей волны;  
КНД – коэффициент направленного действия;  
КСВ – коэффициент стоячей волны.

## ВВЕДЕНИЕ

---

В измерении влажности широкое распространение получили микроволновые (СВЧ) методы и устройства, теория которых достаточно хорошо разработана, из-за очевидных преимуществ:

- 1) реализация неразрушающего контроля;
- 2) приемлемая точность измерения;
- 3) безопасность из-за информативного взаимодействия маломощных микроволновых полей бегущих и стоячих волн с материалом, не сопровождающегося нагревом материала.

Однако практически все микроволновые методы и устройства имеют следующие недостатки:

- работают на одной (двух) стабилизированной частоте;
- не универсальные по виду и форме материала, чаще всего требуют индивидуальной тарировки по месту;
- во влагометрии строительных материалов не применимы двухапертурные методы свободного пространства на прохождение, а также резонаторные, волноводные и зондовые, позволяющие определять интегральную и среднюю влажности по зоне взаимодействия, апертурные методы к тому же в реализации стационарные, громоздки и дорогостоящие;
- одноапертурные методы на отражение пригодны не всегда, к тому же основной метод Брюстера позволяет определять только поверхностную влажность, не всегда имеются обоснования границ применимости методов отражения по толщине материала, отсутствуют согласования по волновым сопротивлениям – низкий КБВ и КПД;
- в известных устройствах нет сопряжения взаимодействия микроволновых полей с материалом и с возможностью их СВЧ-нагрева, процесс такого нагрева весьма информативен, дает возможность исследования, кроме влажности, совокупности других теплофизических характеристик материала, кинетики СВЧ-сушки, исследования термограмм. На наш взгляд, сопряжение информативных возможностей маломощного взаимодействия полей с исследуемым материалом и процесса микроволнового нагрева весьма перспективно;
- поверхностная влажность материала и влажность по объему взаимодействия не равны из-за нормального градиента влажности, обусловленного текущими процессами высушивания и увлажнения, необходимы комплексные измерения этих величин.

Кроме того, на данный момент не исследованы информативные аспекты дисперсии диэлектрической проницаемости влажных материалов – частотные зависимости, необходимо оперативное сканирование влажности больших поверхностей, существует неразрешенный вопрос оптимизации выбора полосы рабочих частот, а также отсутствует обоснованность в необходимости применения сложных адаптивных электронно-управляемых апертур.

Сущность предлагаемого нами микроволнового метода состоит в использовании зависимости изменения температуры влажного материала от влажности при поглощении его локализованным минималь-

ным и индицированным объемом определенной и фиксированной дозы микроволнового излучения бегущей волны, что явилось основанием назвать метод микроволновым термовлагодетрическим.

Разрешение противоречий и задач, указанных выше, позволило разработать бесконтактный оперативный микроволновый метод определения комплекса характеристик, включающего поверхностную влажность, влажность по объему взаимодействия, градиент влажности, с перспективой определения других теплофизических величин. Это стало возможным на основании изложенных в книге теоретических и практических разработок термовлагодетрического микроволнового метода.

## **1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ**

---

### **1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВЧ-ВЛАГОМЕРАХ**

Важнейшими достоинствами влагомеров СВЧ являются: возможность бесконтактных измерений (в свободном пространстве), высокая чувствительность, неограниченный верхний предел измерений, малое влияние на результаты измерений химического состава материала и некоторых других факторов [1].

Возможность применения радиоволновых методов в определении влажности в материалах и изделиях основывается на двух физических явлениях: поглощении и рассеянии радиоволн, что связано с наличием широкополосной вращательной релаксации полярных водяных молекул в области СВЧ [2, 3].

При прохождении радиоволн СВЧ через влажный материал происходят поглощение и рассеяние энергии электромагнитных волн частицами вещества (влаги и сухого скелета). Для получения информации о свойствах вещества можно использовать параметры прошедшего или отраженного излучения.

Информацию о влажности содержат амплитуда, фаза и угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны как отраженной, так и прошедшей через влажный материал.

Для увеличения эффективности влагомеров могут быть использованы двухчастотные методы, когда одна из частот находится в области резонансного поглощения электромагнитной энергии молекулами воды, или метод переменной частоты.

Большинство влагомеров СВЧ применяют для управления технологическими процессами в бумажной, строительной, пищевой, химической и других отраслях промышленности и для контроля материалов в свободном пространстве, преобразуя параметры прошедшей через материал волны в электрический сигнал. При этом конструкция и схема измерительного устройства определяются принятым способом локализации поля СВЧ в исследуемом материале.

Согласно принятой классификации существующие СВЧ-методы измерения влажности делятся на (рис. 1.1) [4]:

1) методы свободного пространства: а) с использованием проходящей волны; б) с использованием отраженной волны. В обеих модификациях измеряемой характеристикой могут служить затухание (модуль коэффициента передачи или коэффициента отражения), изменение амплитуды или фазы волны;

- 2) резонаторные методы;
- 3) волноводные методы;
- 4) зондовые методы.

Известны и некоторые другие методы, весьма перспективные. К ним относятся методы зондовые, поверхностной волны, которым посвящена наша монография [5], вращения плоскости поляризации.

## 1.2. МЕТОДЫ СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА

Методы измерения влажности в свободном пространстве широко применяют благодаря простоте, несложной методике измерения, отсутствию контакта с пробой и представительности последней, так как проба берется в большом объеме, достигающем десятков кубических дециметров.

В большинстве СВЧ-влажномеров используется измерение влажности по поглощению СВЧ-энергии (по затуханию). Измеряемым параметром является затухание  $A$  (дБ), которое в случае достаточно больших толщин слоя, когда можно пренебречь отражением от задней стенки, связано с влажностью приближенным соотношением [4].

$$A = 8,68\alpha_v W\rho kD + |R|. \quad (1.1)$$

Коэффициент затухания для воды (дБ/м)

$$\alpha_v = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{1}{2} \varepsilon' (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1) \right]^{1/2}. \quad (1.2)$$

Здесь для расчета  $\alpha_v$  значения  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  можно брать из [6], дБ/м;  $\rho$  – плотность влажного материала,

кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – эмпирическая константа, м<sup>3</sup>/кг;  $D$  – толщина материала, м;  $R$  – модуль коэффициента отражения поверхности раздела воздух – материал.

Выражение (1.1) является приближенным прежде всего потому, что поверхность взаимодействия организуют в ближней зоне, где фронт волны сферический. Это приводит к погрешности, учитываемой коэффициентом  $k$ . На результат измерения непосредственное влияние оказывает плотность, и поэтому стремятся компенсировать эту погрешность, например, используя  $\gamma$ -плотномеры или производя измерения на двух частотах. В [7] предлагается повысить чувствительность метода измерением затухания при двух значениях  $D$ , выбираемых из условия

$$D_1 - D_2 = \pi (2k - 1) / (\beta_v - \beta_0); \quad k = 1, 2, \dots,$$

где индекс «0» относится к свободному пространству;

$$\beta_v = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \frac{1}{2} \varepsilon' (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1) \right]^{1/2} - \quad (1.3)$$

фазовая постоянная, т.е. мнимая составляющая волнового числа.

При  $k = 1$  чувствительность максимальна (диапазон ограничен  $W_{\max}$ ), свыше которой нарушается однозначность измерений, а градуировочная характеристика близка к квадратической. Измеряемым параметром является разность затуханий в каналах. Диапазон измерений может быть достаточно велик, например, для хлопкового семени  $W = 4 \dots 10,4$  % ( $W_{\max} = 12,6$  % массовой влажности), при этом чувствительность возрастает по сравнению с методом «на просвет» от 3 ( $W = 4$  %) до 7 ( $W = 10,4$  %) раз для  $D_1 - D_2 = 9$  см. С уменьшением разности  $D_1 - D_2$  чувствительность метода возрастает. В реальных условиях толщина зависит от массы навески в кювете площадью  $0,2 \times 0,2$  м<sup>2</sup>, при этом в диапазоне  $4 \dots 10,4$  % погрешность не превышает 0,5 % влажности при доверительной вероятности 0,95. Измерения проводились на  $\lambda = 3$  см.

Для однородных материалов, когда  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  не зависят от координаты, общий сдвиг фазы волны, проходящий через материал:

$$\Delta\varphi = \left( \beta - \frac{2\pi}{\lambda} \right) D = \frac{2\pi D}{\lambda} \left[ \sqrt{\frac{\varepsilon'}{2} (1 + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta})} - 1 \right] \quad (1.4)$$

при постоянной толщине пробы  $D$  однозначно связан с влажностью.

Установка для экспериментального исследования фазовлажностных характеристик [9] содержит фазовращатель. Для измерения сдвига фазы, вносящего пробой, производят предварительную установку фазовращателя по минимуму показания регистрирующего прибора.

Как и для метода ослабления, фазовый сдвиг пропорционален объемной влажности, т.е. на результат измерения влияют толщина слоя и насыпная плотность материала. В [10] на примере естественных и искусственных цементных шламов показано, что при  $W > 7$  % массовой влажности состав твердой фазы на фазовлажностную характеристику не влияет.

Недостаток описанных влагометрических систем – зависимость результата измерения от плотности и толщины слоя, избежать которой в некоторых случаях можно одновременным измерением затухания и фазы [11]. Для однородной смеси возможно нахождение линейной формы, позволяющей посредством эмпирических коэффициентов исключить плотность и толщину слоя.

Коэффициенты существенно зависят от температуры, поэтому в устройство необходимо вводить канал температурной коррекции [12]. При погрешности измерения фазы 3° и амплитуды 0,1 дБ погрешность ( $T = \text{const}$ ) измерения влажности не превышает 0,25 %. Как и для всех фазовых методов, максимальное изменение фазы не должно превышать  $2\pi$ .

Метод свободного пространства позволяет размещать датчик по одну сторону измеряемого материала, что в некоторых случаях является важным преимуществом. Для этого можно использовать нормальное или наклонное падение луча, причем в первом случае достаточна одна совмещенная антенна. При нормальном падении и отсутствии отражения от задней поверхности ( $D \gg \lambda$  и затухание велико)



модуль коэффициента отражения  $|R|$  связан с  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  материала зависимостью [13]:

$$R = \left(1 - \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}\right)^2 / \left(1 + \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}\right)^2 ; \quad (1.5)$$

при полном отражении от заданной поверхности пробы ослабление

$$A = 8,65(2\pi/\lambda)\sqrt{\epsilon'}D \operatorname{tg} \delta . \quad (1.6)$$

В случае применения одной совмещенной антенны для приема волны нужен направленный ответвитель или двойной тройник, позволяющий получить более высокий уровень сигнала и лучшую развязку СВЧ-генератора с приемным трактом.

Сравнительный анализ методов свободного пространства на основе трехкомпонентной одномерной модели [14] показал, что в диапазоне волн от 1 до 3 см наибольшей чувствительностью обладает метод поглощения, на более низких частотах чувствительность трех методов примерно одинакова. Для наиболее часто применяемой длины волны 3 см амплитудный метод более чем в два раза чувствительнее фазового и в 6 раз чувствительнее метода отражения. Экспериментальные исследования метода поглощения показали, что для большинства водорастворимых материалов линия регрессии имеет излом при критической влажности 1...2 %, причем с ростом температуры значение критической влажности уменьшается. Поэтому некоторые авторы [15] рекомендуют проводить измерения при температуре 365...375 К, чтобы расширить применимость метода в области малых влагосодержаний.

Сверхвысокочастотный метод характеризуется сильной чувствительностью к изменению температуры, причем значение и знак этой чувствительности зависят как от влажности, так и от формы ее связи со скелетом вмещающего вещества.

При исследовании зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  воды от температуры получено [4], что в низкочастотной части диапазона действительная часть диэлектрической проницаемости убывает с ростом температуры, а в высокочастотной части возрастает. Эти результаты хорошо согласуются с выводами, приведенными в [16], где из диаграммы Коул – Коул получена частота релаксации, близкая к 18 ГГц. В зависимости от материала и влажности характер затухания от температуры может быть различным, приближаясь при больших влажностях к зависимости для воды. Таким образом, при разработке СВЧ-влагомеров необходимо для каждого вещества индивидуально определять температурную чувствительность  $S_T$ . Получение удовлетворительных метрологических характеристик возможно лишь при наличии температурной коррекции. Например, при чувствительности к влажности 11,3 дБ/% для удобрения аммофос [13] температурная чувствительность метода, приведенная к влажности, составляет 0,007 %/К на нижнем пределе и 0,04 %/К на верхнем пределе. Так как при эксплуатации приборов в цеховых условиях температура меняется от 280 до 340 К (для цеха по производству минеральных удобрений), то погрешность при отсутствии коррекции может превысить 1 %.

Влияние температуры на чувствительность фазовых СВЧ-влагомеров значительно ниже и для длины волны меньшей 3 см не превышает 20 % динамического диапазона [14].

Основной особенностью СВЧ-метода является то, что с его помощью можно измерить количество воды в зондируемом объеме, т.е. затухание в слое, толщина которого эквивалентна всей влаге в просвечиваемом сечении. Поэтому все изменения толщины слоя, плотности материала, связанные с вариациями состава, степенью уплотнения, вызывают пропорциональное изменение выходного сигнала. Избавиться

от указанной погрешности можно только прямой коррекцией по толщине и плотности, например используя  $\gamma$ -плотномер, или искусственными мерами, аналогичными описанному выше амплитудно-фазовому методу.

Влагомеры, основанные на измерении в свободном пространстве затухания или фазового сдвига проходящей волны, нашли наибольшее практическое применение. Исследуемый материал помещается между передающей и приемной антеннами при нормальном падении волны. На практике обычно используются рупорные антенны, хотя возможно применение направленных излучателей и других типов, например диэлектрических стержневых антенн.

Рассматриваемый метод дает интегральную (усредненную) оценку свойств материала на пути волны.

Выбор рабочей частоты представляет собой компромиссное решение. Переход к более коротким волнам повышает чувствительность влагомера; однако при этом уменьшается площадь исследуемого образца увеличиваются сложность и стоимость аппаратуры. Использование более длинных волн ухудшает метрологические свойства влагомера (чувствительность, погрешность от изменений состава материала), увеличивает массу и габариты прибора.

На рис. 1.2 приведены структурные и функциональные схемы амплитудных влагомеров СВЧ, основанные на принципе ослабления

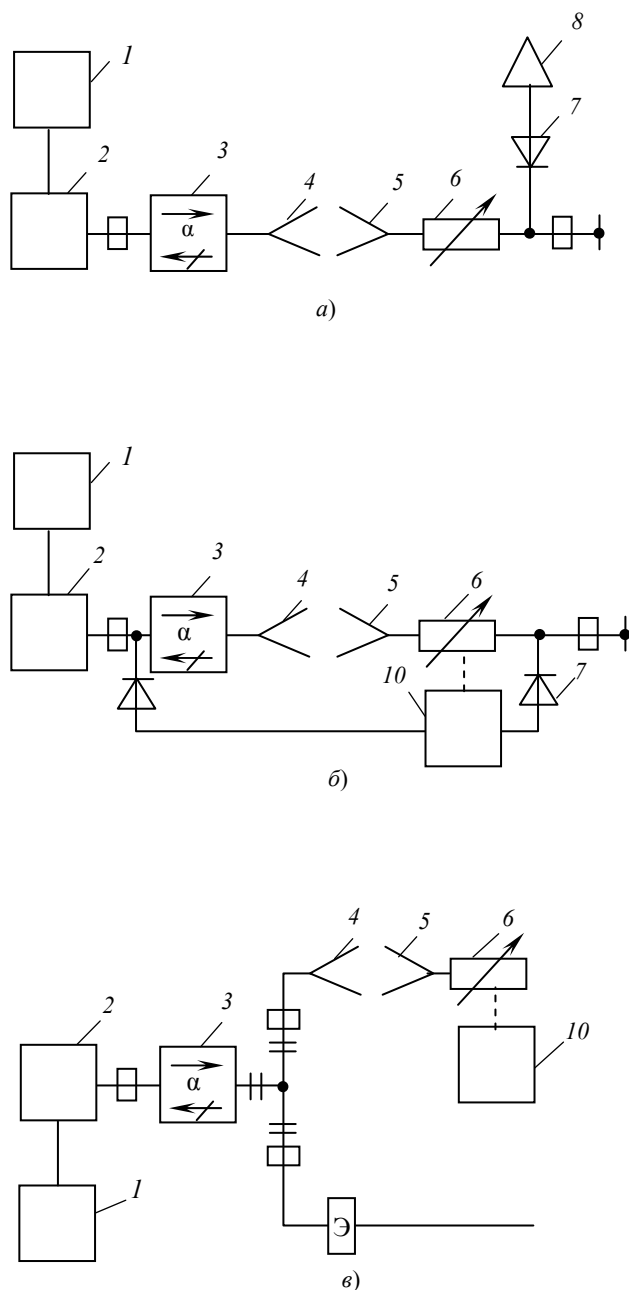


РИС. 1.2. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АМПЛИТУДНЫХ ВЛАГОМЕРОВ СВЧ

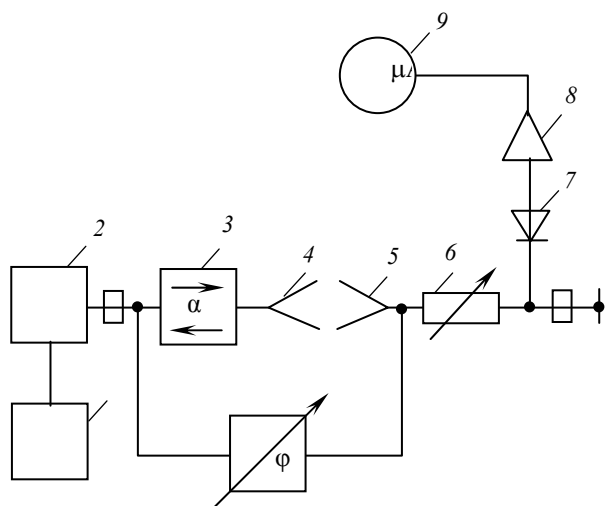
В неавтоматических влагомерах используют одноканальную схему по методам прямого преобразования (отсчет по шкале прибора) или замещения (отсчет по шкале аттенюатора). Установка (рис. 1.2, а) состоит из двух частей: приемно-измерительного тракта (приемная антенна 5, измерительный аттенюатор 6, детектор 7, усилительный блок 8, измерительный прибор 9) и передающего тракта (передающая

антенна 4 с клистронным генератором 2 и блоком питания 1 и вентилем 3), 10 – устройство управления аттенуатором.

Автоматические амплитудные влагомеры (рис. 1.2, б, в) строят по двухканальным схемам сравнения:

- 1) с опорной волноводной ветвью, содержащей эталон;
- 2) с опорным электрическим сигналом, полученным детектированием части подающей энергии СВЧ.

В фазовых влагомерах в отличие от амплитудных выходной величиной СВЧ-преобразователя является изменение фазы как функции влагосодержания материала. Принципиальная схема влагомеров этого типа приведена на рис. 1.3. Передающий тракт фазовых влагомеров состоит из СВЧ-генератора 2 с блоком питания 1, вентиля 3 и передающей антенны 4. Приемный тракт состоит из приемной антенны 5, аттенуатора 6, детектора 7, усилителя 8 и индикатора 9. Приемный и передающий тракты через тройники соединены между собой измерителем фазы.



**Рис. 1.3. Структурная схема фазового влагомера СВЧ**

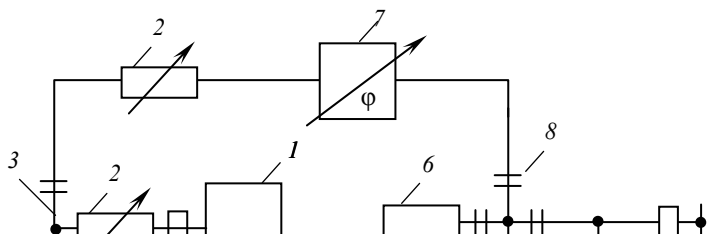
**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ (В ЧАСТНОСТИ, РЕЧНОЙ ПЕСОК, ГРАВИЙ) ОСНОВАНА НА ОСЛАБЛЕНИИ ПРОШЕДШЕЙ ВОЛНЫ, И В КАЧЕСТВЕ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ИЗМЕНЕНИЕ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА ПРИВЕДЕНА НА РИС. 1.4.**

Устройство состоит из генератора СВЧ 1, трех переменных аттенуаторов 2, тройника 3, двойного волноводного тройника 8, двух антенн 4 и 5, фазовращателя 7, детектора, согласованной нагрузки 6, усилителя 10 и индикатора 11. Работает оно по методу сравнения сигнала, прошедшего через влажный образец, и сигнала, прошедшего по волноводному тракту.

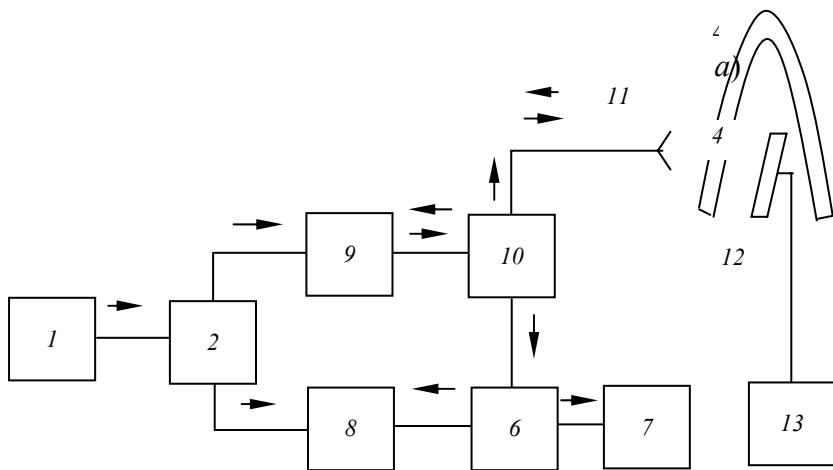
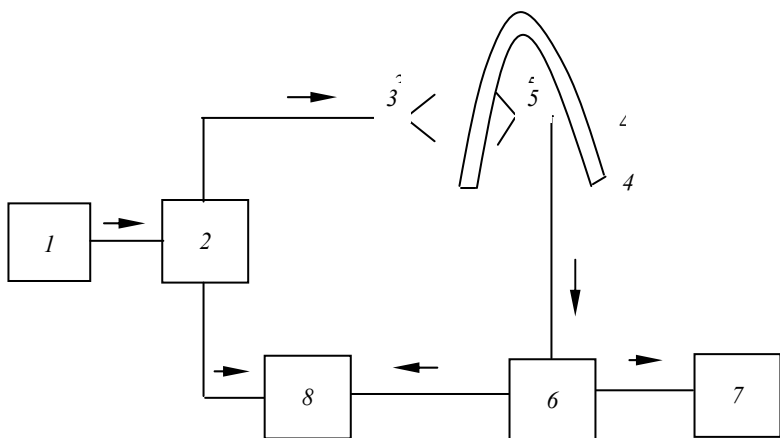
В выходном тройнике (сумматоре) сигналы сравниваются по амплитуде и по фазе. Разностный сигнал поступает на выход СВЧ-преобразователя. Необходимо проводить уплотнение материала на вибростенде перед измерениями.

В [17, 19, 20] показана реализация оригинального метода измерения модуля и аргумента комплексного коэффициента передачи стенки антенного обтекателя (АО), который в отличие от традиционного метода «на просвет» [18] (рис. 1.5, а), лишен его существенного недостатка – необходимости размещения СВЧ-тракта и одной из антенн (приемной или передающей) внутри АО. Схема устройства показана на рис. 1.5, б и реализует предложенный в [17] «метод модуляции коэффициента отражения».

Существуют влагомеры, основанные на принципе изменения волновых характеристик отраженной электромагнитной волны при изменении влажности материала.



**Рис. 1.4. Структурная схема амплитудно-фазового влагомера СВЧ**



б)

**Рис. 1.5. Схемы измерительных установок:**  
*a* – «на просвет»; *б* – «модулированное отражение»;  
 1 – СВЧ-генератор; 2, 6 – развязанные делители мощности;  
 3 – передающая антенна; 4 – АО; 5 – приемная антенна;

7 – измеритель ослабления; 8 – измеритель фазовых сдвигов;  
 9 – СВЧ-вентиль; 10 – направленный ответвитель;  
 11 – приемопередающая антенна; 12 – модулятор-отражатель (МО);  
 13 – НЧ генератор

В методе, основанном на отражении волны в свободном пространстве, также можно использовать амплитудные или фазовые измерения. Выходной величиной измерительного преобразователя является комплексный коэффициент отражения от исследуемого материала:

$$\dot{R} = |\dot{R}| e^{j\varphi}. \quad (1.7)$$

Преимуществом измерений по отражению по сравнению с измерениями по затуханию является одностороннее расположение приемопередающей системы СВЧ относительно объекта измерения. Считают также, что результат измерений по отражению не зависит от толщины образца. В действительности это справедливо лишь для таких толщин исследуемого образца, при которых волна полностью затухает, не выходя из материала, и, следовательно, исключается отражение от задней поверхности образца. В этих условиях и при нормальном падении волны модуль коэффициента отражения  $R$  по мощности, равный отношению отраженной мощности к падающей, связан с параметрами материала зависимостью:

$$|\dot{R}| = \frac{(1 - \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''})^2}{(1 + \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''})^2}. \quad (1.8)$$

При этом, однако, зондируются только поверхностные слои материала и невозможно получить информацию об его интегральной влажности. Если объектом измерения являются тонкие листовые материалы, не имеющие значительных градиентов влажности, поверхностная влажность достаточно точно характеризует среднюю влажность материала. Однако в этом случае (как и у других материалов при неполном затухании волны в их объеме) приходится учитывать многократные отражения от задней поверхности образца или от расположенного за ней металлического зеркала, которое иногда применяют. Выходной сигнал несет информацию об интегральной влажности материала, но зависит от его толщины.

Метод отражения реализуется практически следующими способами. При малых потерях в материале (область очень низких влагосодержаний) нашел некоторое применение оптический метод угла Брюстера, заключающийся в нахождении угла падения, которому соответствует минимум отражения поляризованной электромагнитной волны (параллельная поляризация, при которой вектор электрического поля параллелен плоскости падения) от плоской поверхности образца.

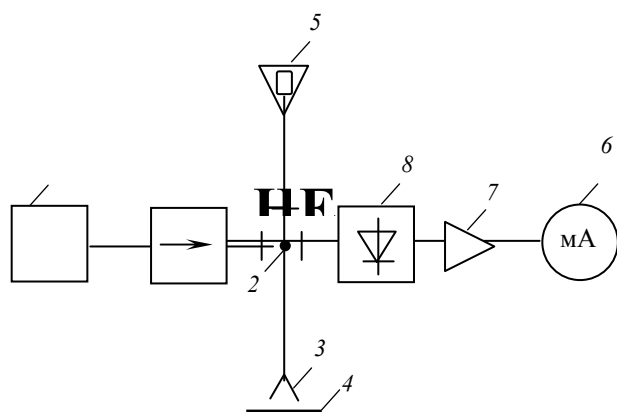
При потерях, близких к нулю, для угла Брюстера  $\theta_{\text{Бр}}$  имеет место соотношение

$$\varepsilon' = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}}. \quad (1.9)$$

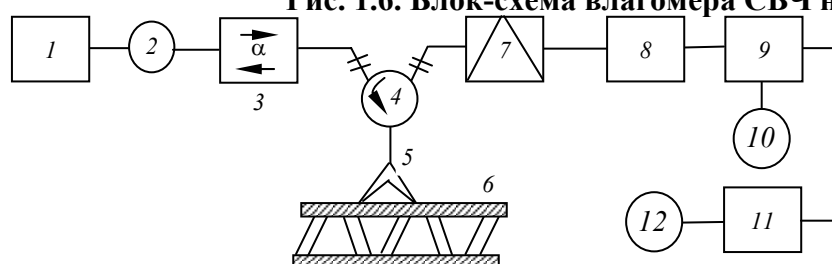
В методе отражения можно использовать наклонное или нормальное падение волны. Предпочтение обычно отдают нормальному падению, при котором используется одна приемопередающая антенна, в то время как для наклонного падения применяются измерительные устройства, основанные на оценке параметров стоячей волны, возникающей в результате суперпозиции падающей и отраженной волн. Для приема отраженной волны одной совмещенной антенной можно использовать в волноводном тракте направленный ответвитель или двойной тройник, позволяющие получить более высокий уровень сигнала и лучшую развязку генератора СВЧ от тракта.

На рис. 1.6 приведена мостовая схема автоматического влагомера на принципе отражения с двойным волноводным тройником. Генератор СВЧ 1 присоединен к  $H$ -плечу, детектор – к  $E$ -плечу двойного тройника 2. Одно из боковых плеч имеет рупорную антенну 3, направленную на поверхность исследуемого материала 4. Второе плечо (опорное) содержит эталон 5 (образец материала с постоянной влажностью, согласованная нагрузка). При равенстве модулей и фаз коэффициентов отражения  $R_x$  материала и  $R_0$  эталона напряженности отраженных волн в  $E$ -плече равны и находятся в противофазе; показания прибора 6, подключенного через усилитель 7 к детектору 8, равны нулю.

Если эталон идеально согласован ( $R_s = 0$ ), а характеристика детектора квадратична, показания индикатора приблизительно пропорциональны  $R_x$ . Для нагрузки, не полностью поглощающей ( $R_s \neq 0$ ), максимальное и минимальное значения мощности на детекторе будут равны  $P = \frac{1}{4}(|R_s| \pm |R_x|)^2$ .



**Рис. 1.6. Блок-схема влагомера СВЧ на принципе отражения**



**Рис. 1.7. Структурная схема ПРІЗ-1:**

- 1 – блок питания; 2 – генератор СВЧ-излучения; 3 – вентиль; 4 – циркулятор;  
 5 – антенна; 6 – обтекатель; 7 – модулятор; 8 – СВЧ-детектор;  
 9 – усилитель низкой частоты; 10 – измерительный прибор;  
 11 – компаратор; 12 – сигнальное устройство

С целью уменьшения погрешностей от рассогласования генератора и детектора с плечами тройника в его ветви вводят вентили или развязывающие аттенюаторы.

Следует отметить далее, что в качестве влагомеров на принципе отражения можно применить рефлектометры, т.е. устройства для измерения модуля коэффициента отражения при помощи двух односторонних направленных ответвителей, расположенных таким образом, что их выходные детекторы измеряют соответственно напряженности поля отраженной и падающей волн. Дополнив рефлектометр фазовым детектором, можно измерить также фазу коэффициента отражения исследуемого материала.

По схеме, подобной рис. 1.6, работает портативный радиочастотный измеритель затухания (ПРІЗ-1) [21], предназначенный для определения изменения радиопрозрачности обтекателей антенн самолетных РЛС, связанных с наличием влаги в поверхностных слоях и ячейках сотового каркаса обтекателя (рис. 1.7).

### **1.3. Резонаторные, волноводные и зондовые методы**

Резонаторный и волноводный методы в своих модификациях, применяемых для исследования диэлектриков, требуют введения исследуемого материала в полость волновода или резонатора, т.е. накладывают ограничения на размеры образца и по существу не являются бесконтактными в механическом смысле.

В то же время благодаря локализации волн в полости повышается чувствительность влагомера и создается возможность измерения характеристик материала при малых значениях влагосодержания и массы образца [3, 4].

В волноводных влагомерах используется влияние диэлектрических свойств материала, введенного в волновод, на характеристики, определяющие распространение радиоволн СВЧ в волноводе [3, 4].

Влагомеры резонаторного типа основаны на принципе измерения параметров резонатора при введении исследуемого материала.

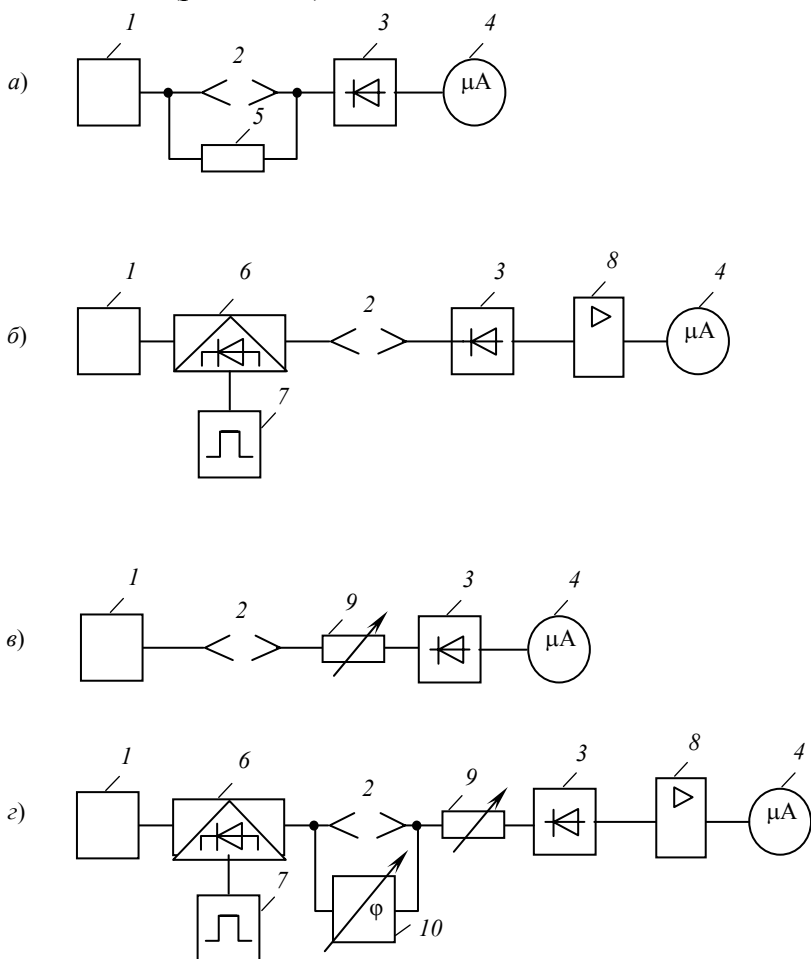
Из резонаторных влагомеров следует выделить такие, у которых конструкция резонатора позволяет измерять влажность материалов в потоке (резонаторы проточного, щелевого и открытого типа) [22 – 25].

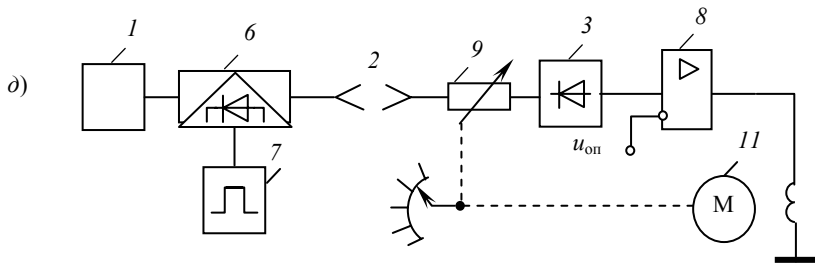
Из других методов следует отметить зондовые. Под зондами-датчиками понимают антенны, вводимые в материал и излучающие энергию непосредственно в материал [25, 26].

#### 1.4. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ СВЧ-ВЛАГОМЕРОВ

Наиболее распространены влагомеры, использующие методы измерения в свободном пространстве. Их характеризует простота технических решений, высокая чувствительность и широкий динамический диапазон. К недостаткам следует отнести влияние на измеряемый параметр, толщины слоя, плотности материала и температуры пробы. Для большинства СВЧ-влагомеров мощность генератора не превышает 20...50 мВт, что ухудшает отношение сигнал/шум при измерении больших влажностей и ограничивает предельную толщину слоя. Появление микропроцессоров позволило использовать весьма сложные алгоритмы компенсации мешающих факторов и тем самым упростить первичные измерительные преобразователи, создав реальную предпосылку для их унификации.

Из амплитудных влагомеров простейшими являются влагомеры с постоянным затуханием в приемном тракте (рис. 1.8, а), в котором информативным сигналом служит мощность детектированного сигнала. Часто влагомеры с подобной схемой содержат аттенуатор 5 с фиксированным затуханием, подключаемый с помощью волноводных переключателей для градуировки. Подобная схема использована во влагомерах фирмы AEI и Philips [27]. Для достижения динамического диапазона в 70 дБ необходима мощность СВЧ-генератора 2,5 Вт. Повысить чувствительность влагомеров можно модуляцией СВЧ-колебаний низкочастотным сигналом  $F$  с частотой в несколько килогерц (рис. 1.8, б). Улучшают отношение сигнал/шум с помощью избирательного усилителя 8, причем для расширения динамического диапазона его характеристика должна быть логарифмической. Основным источником погрешности измерительной схемы – нестабильность коэффициента передачи детектора 3 в диапазоне температур и детектируемой мощности, поэтому в большинстве приборов стараются применять схему замещения, при которой в приемный тракт вносится такое затухание, чтобы мощность на входе детектора оставалась неизменной (рис. 1.8, в).





**Рис. 1.8. Основные схемы влагомеров свободного пространства, работающих «на просвет»:**

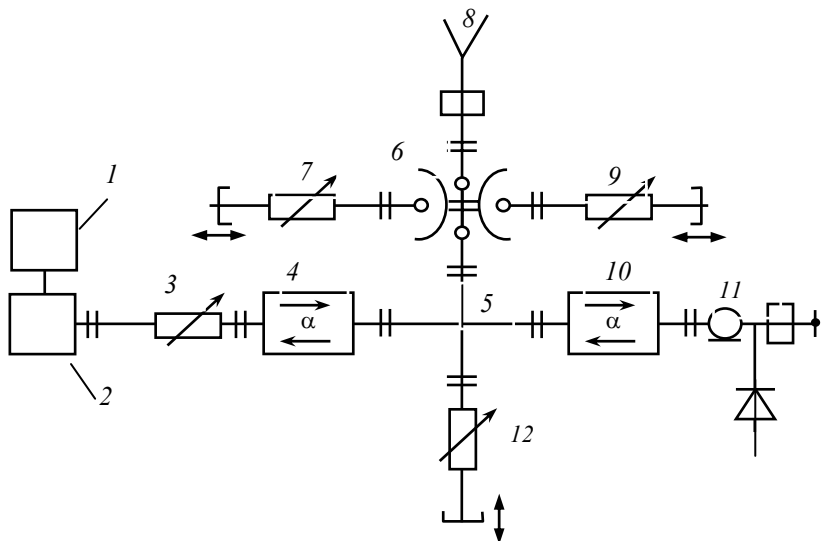
- 1 – СВЧ-генератор; 2 – датчик; 3 – ферритовый вентиль; 4 – индикатор;  
 5 – аттенюатор; 6 – модулятор; 7 – генератор модулирующей частоты;  
 8 – избирательный усилитель; 9 – регулируемый аттенюатор;  
 10 – фазовращатель; 11 – двигатель

Попытки совместить преимущества фазовых и амплитудных влагомеров привели к разработке измерительной схемы, показанной на рис. 1.8, *з*. Здесь фазу измеряют на частоте СВЧ-генератора, а затухание – на частоте модуляции [28].

Дальнейшее развитие схемы замещения привело к появлению схемы с автоматическим управлением аттенюатором 9 (рис. 1.8, *д*). Для этого используется опорный канал с генератора через аттенюатор с известным затуханием. Затухание определяется углом поворота двигателя уравнивания 11.

Подобная схема измерения применена в СВЧ-влагомере «Фосфор-К», принцип автоматического уравнивания – в СВЧ-влагомере ВХС-2 для хлопка-сырца. Уравнивание производится электронным аттенюатором на 10 *n-i-p-i-n*-диодах, включенных параллельно [29]. Сравнение производится по принципу развертывающего преобразования, при котором на вход аттенюатора подается линейно увеличивающееся напряжение, изменяющее его затухание. При достижении равенства напряжений в опорном и измерительном каналах процесс уравнивания прерывается. Отсчет ведут по счетным импульсам, подаваемым синхронно с линейно увеличивающимся напряжением. К недостаткам этой измерительной схемы прежде всего относят наличие двух детекторных секций, идентичность характеристик которых достичь практически невозможно.

На рис. 1.9 приведена структурная схема СВЧ-влагомера, предназначенного для измерения влажности жидких масс.





**Рис. 1.9. Структурная схема СВЧ-влажмера жидких масс**

Прибор построен по амплитудно-фазовой схеме, в которой используется зависимость коэффициента отражения от влажности. Принцип работы влагомера заключается в следующем. Мощность от клистронного генератора 2 с блоком питания 1 через аттенюатор 3 и развязывающий вентиль 4 поступает на двойной волноводный тройник 5, с помощью которого она делится пополам и поступает в эталонное плечо и измерительное.

Измерительное плечо нагружено на кювету 8, в которую наливают измеряемую жидкую массу. Отраженный сигнал через двойной тройник и развязывающий вентиль 10 поступает в детекторное плечо 11,

где сравнивается с опорным. Разностный сигнал пропорционален влажности.

Для калибровки прибора в измерительное плечо включен переключатель 6 с двумя нагрузками 7 и 9. Отраженный от них сигнал пропорционален верхнему и нижнему пределам измерения влажности. Кювета имеет температурную стабилизацию измеряемой массы.

Чтобы использовать весь динамический диапазон изменения полезного сигнала, в усилитель введен нормирующий узел, позволяющий проводить измерения по одной шкале.

В значительной мере от всех перечисленных недостатков свободен унифицированный СВЧ-влагомер [30] (рис. 1.10), в котором опорный и измерительный каналы используют один и тот же детектор 7. Его особенностью является коммутация опорного и сигнального каналов с частотой модуляции. Детектированный низкочастотный сигнал имеет амплитуду, пропорциональную расогласованию затуханий в каналах, и используется в астатической системе регулирования затухания в измерительном канале. Благодаря синхронному детектированию достигается высокое отношение сигнал/шум и улучшаются метрологические характеристики измерительного тракта.

В [31, 32] и в табл. 1.1. по [3] даны для сравнения технические характеристики серийно выпускаемых СВЧ-влажномеров.

## 1.5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный нами анализ микроволновых методов определения влажности позволил выявить основные их недостатки и сделать следующие выводы.

Резонаторный метод за счет локализации поля в полости резонатора обладает достаточно высокой чувствительностью, а также создается возможность измерения влагосодержания образцов малой массы. Однако, по существу метод не является неразрушающим, так как требует изготовления образца строгой формы и размера, который помещается в полость объемного резонатора (ОР), не позволяет контролировать влажность изделий больших размеров. Необходимость в настройке при изменении геометрических размеров ОР или волновода, вызванных изменением температуры окружающей среды, сложность процесса, а в некоторых случаях и невозможность непрерывных измерений влажности, применение поляризационных фильтров вырождения колебаний снижают добротность основного типа колебания и усложняют конструкцию первичного измерительного преобразователя (ПИП).

В СВЧ-способе определения влажности твердых образцов, основанном на измерении в свободном пространстве затухания или фазового сдвига проходящей через контролируемый материал волны, мерой влажности материала является ослабление мощности прошедшего сигнала в децибелах или изменение их фазы. В качестве недостатков способа следует отметить то, что точность измерений в данном случае

зависит от толщины исследуемого образца и плотности материала, кроме того, данному способу присущи низкая чувствительность и сложность определения влажности малой массы, большое рассеивание СВЧ-энергии.

СВЧ-способ определения влажности твердых материалов по углу Брюстера, который заключается в нахождении угла падения электромагнитной волны на поверхность контролируемого материала и при котором существует минимум отраженной горизонтально поляризованной электромагнитной волны от плоской поверхности образца, наиболее широко применяется для контроля влагосодержания твердых материалов в технологическом цикле их производства. Недостатками способа являются зависимость точности измерений от толщины исследуемого образца, исследование только поверхностных слоев материала, что исключает возможность получения информации об его интегральной влажности, зависимость точности измерений влажности от состояния и характера отражающих поверхностей и, наконец, низкая точность измерений больших значений влажности.

В настоящее время не существует микроволновых методов и устройств, позволяющих решить одновременно комплекс следующих задач влагометрии, т.е. их сочетания при соблюдении адеструктивности:

1) односторонний доступ к большеразмерным изделиям, особенно к строительным материалам в процессе их производства и эксплуатации;

2) одновременное измерение поверхностной влажности  $W_n$  и отличной от нее из-за градиента  $\text{grad } W$  (в текущих процессах увлажнения и сушки) величины влажности по локальному объему материала  $W$  (в зоне взаимодействия, причем с возможно минимальной величиной этой зоны). Это обеспечило бы возможность не только измерения точного значения локального распределения  $W_n$  и  $W$  по большим поверхностям, но также и оценку величины нормального к поверхности  $\text{grad } W$ , что позволило бы информативно обеспечить контроль текущего состояния материала в процессах увлажнения и сушки;

3) возможность, пусть и с относительно невысокой, но приемлемой точностью, измерять указанные выше величины для широкого класса материалов без тарировки, инвариантно к температуре окружающей среды и материала и его плотности;

4) возможность одноапертурных измерений – сочетание в одной апертуре приемно-передающих функций с минимальным расстоянием от апертуры до материала. При этом энергия микроволновых полей при падении на материал должна поглощаться им в дальней зоне при минимуме отраженной мощности, что обеспечивает безопасность персонала от облучения;

5) практическая работа всех известных устройств на одной частоте, определяемой для их реализации доступностью стандартной волноводной техники, сужает их функциональные возможности, т.е. не позволяет использовать информативные возможности частотной дисперсии влажных материалов. До

сих пор нет общей адекватной модели дисперсионно-частотных температурных характеристик свободной влаги и влажных материалов.

Нами [33] отмечена крайне высокая чувствительность изменения температуры образца, помещенного в многомодовый ОР (своего рода микроволновую печь с равномерным нагревом образца) от его влагосодержания  $W$ . Это объясняется возможностью локализации СВЧ-греющего поля в весьма малом объеме. Во многом разрешение указанных выше задач было бы возможно аппаратно, если излучающая система (апертура), работающая в отличие от многомодового ОР в режиме бегущих волн, позволяла бы локальный нагрев материала в минимальном и достаточно точно индицируемом объеме. Как справедливо отмечено в [34, с. 111]: «... Если мы хотим, чтобы вся имеющаяся СВЧ-энергия попала в диэлектрик, волновое сопротивление диэлектрика должно быть согласовано с волновым сопротивлением доминирующей волны, т.е. не должно быть отражения на поверхности диэлектрика. Таким образом, задача инженера-практика сводится к достижению наилучшего возможного согласования и сохранению его в процессе нагрева» и «для инженера-практика наибольший интерес представляют эффективные потери, которые проявляются в виде тепловой энергии, выделяющейся при этих процессах в диэлектрике...». Так, например в единице объема  $V$  (см<sup>3</sup>) при однородном электрическом поле бегущей волны в нем  $E$  (В/см) мощность потерь на нагрев влажного материала [6, с. 108]:

$$P_{\text{потерь}} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{см}}'' E^2 = 0,556 \cdot 10^{-12} \varepsilon_{\text{см}}'' E^2 f, \text{ Вт/см}^3, \quad (1.10)$$

где  $\varepsilon_{\text{см}}''$  – мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости влажного материала;  $f$  – частота, Гц.

В работе [34], где рассматриваются вопросы микроволновой сушки утверждается, что с ростом частоты (уменьшением длины волны) уменьшается глубина проникновения поля в материал  $\Delta$ , что ограничивает возможность нагрева СВЧ, так как волна прогревает его на глубину в несколько  $\Delta$ .

*Сущность предлагаемого нами метода: мера влажности – изменение температуры влажного материала при поглощении его локализованным минимальным и индицированным объемом определенной и фиксированной дозы микроволнового излучения бегущей волны, отчего метод был назван микроволновым термовлагодетрическим.*

В отличие от [34] увеличение частоты является положительным фактором, так как при этом уменьшается  $\Delta$  и, соответственно, объем локальной зоны взаимодействия. Кроме того, повышение температуры  $t$  в единице объема  $V$ :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 8 \cdot 10^{-12} \cdot E^2 f \frac{\varepsilon_{\text{см}}''}{\rho_{\text{см}} C_{\text{см}}}, \quad (1.11)$$

где  $\rho_{\text{см}}$  – плотность влажного материала, г/см<sup>3</sup>;  $C_{\text{см}}$  – его теплоемкость, кал/г-град, пропорционально частоте.

Известные устройства используют маломощные генераторы СВЧ. Так как для повышения температуры влажного материала весом  $G$  на  $\Delta t$  (°C) нужна выходная мощность  $P = 4,186 GC_{\text{см}} \Delta t$  (кВт), то для решения задач, поставленных выше, в микроволновой термовлагодетрии применяются достаточно мощные, перестраиваемые по частоте ГСВЧ: лампы обратной волны типа «О», магнетроны и отчасти – клистронные генераторы. Теоретическому и практическому решению задач микроволновой термовлагодетрии и посвящена данная работа.

## 2. ВЛАЖНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СВЧ-ПОЛЕ

---

### 2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

ВЛАГА ЯВЛЯЕТСЯ ОДНИМ ИЗ ОБЯЗАТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ БОЛЬШИНСТВА МАТЕРИАЛОВ. ОТ ВЛАЖНОСТИ ЗАВИСЯТ ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ, ХИМИЧЕСКИЕ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПРИМЕНЯЮТСЯ ПРОЦЕССЫ СУШКИ И УВЛАЖНЕНИЯ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛОВ. ПОЭТОМУ НЕОБХОДИМО КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ [37].

В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ОТ ВЛАЖНОСТИ ЗАВИСЯТ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ, ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ, КОНСТРУКЦИЙ И ОГРАЖДЕНИЙ И, СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ИХ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КАЧЕСТВА.

В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭКОНОМИИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ПОЛУЧЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ВЛАЖНОСТИ ИЛИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ ЭТОЙ ИНФОРМАЦИИ, МОГУТ РАССМАТРИВАТЬСЯ [1]:

А) УСТРАНЕНИЕ ИЛИ СОКРАЩЕНИЕ НЕПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТЕРЬ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ОТСУТСТВИЕМ ИНФОРМАЦИИ О ВЛАЖНОСТИ, ЕЕ НЕТОЧНОСТЬЮ ИЛИ НЕСВОЕВРЕМЕННЫМ ПОЛУЧЕНИЕМ;

Б) УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ДЛЯ КОТОРЫХ ВЛАЖНОСТЬ ЯВЛЯЕТСЯ СУЩЕСТВЕННЫМ ВЛИЯЮЩИМ ПАРАМЕТРОМ. В ТАКИХ ПРОЦЕССАХ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ ПОЗВОЛЯЕТ ПОВЫСИТЬ КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ, УМЕНЬШИТЬ РАСХОД СЫРЬЯ, ТОПЛИВА И ЭНЕРГИИ, СОКРАТИТЬ БРАК И ПОТЕРИ;

В) ЗАМЕНА РУЧНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ В МАССОВОМ МАСШТАБЕ ЦЕЛОЙ АРМИЕЙ ЛАБОРАНТОВ, ИЗМЕРЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ. БЛАГОДАря БЫСТРОДЕЙСТВИЮ И ДРУГИМ ДОСТОИНСТВАМ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИГАЕТСЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ СОКРАЩЕНИЕ ТРУДОВЫХ ЗАТРАТ, РАСХОДА ЭНЕРГИИ И Т.П.; ОДНАКО, ГЛАВНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭКОНОМИИ ЯВЛЯЕТСЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ОПЕРАТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ВЛАЖНОСТИ ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ, А ТАКЖЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕХ ОБЪЕКТАХ, ДЛЯ КОТОРЫХ ПРИМЕНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕВОЗМОЖНО ИЛИ ВЫЗЫВАЕТ БОЛЬШИЕ ЗАТРУДНЕНИЯ.

Из методов измерения влажности, применяемых в промышленности, только высокочастотная влагометрия может конкурировать по широте использования с СВЧ-методом [4]. Преимуществами СВЧ-влагометрии являются: возможность бесконтактного измерения, относительная простота и дешевизна аппаратуры, а в ряде случаев и хорошие метрологические характеристики. Различие высокочастотных и СВЧ-методов вызвано как соизмеримостью длины волны с минимальными характеристическими размерами объекта, так и особенностью поведения связанной воды в гигагерцевом диапазоне [6, 14, 38].

Одно из уникальных свойств волны – аномально высокая диэлектрическая проницаемость, вызванная тем, что оси О – Н в молекуле воды имеют угол, близкий к  $105^\circ$ . Эта особенность, обусловленная законами квантовой механики, приводит к тому, что даже в отсутствие внешнего электрического поля молекула воды обладает собственным дипольным моментом. Ориентация полярной молекулы во внешнем поле отлична от ориентации неполярной молекулы при электронной или ионной поляризации [38], когда деформируется только электронное облако. При дипольной поляризации молекула поворачивается как единое целое, поэтому на процесс поляризации влияют энергия связи воды со скелетом и температура. Вращение молекулы отстает от вращающего момента, вызванного переменным электромагнитным полем, за счет сил трения, уменьшающих также и амплитуду результирующей поляризации. Это отсутствие удобно характеризовать временем релаксации, которое для воды равно  $0,6 \cdot 10^{-11}$  с ( $T = 293$  К) и для льда  $10^{-5}$  с ( $T < 273$  К) [39]. Полимеризация воды со скелетом вблизи поверхности твердой фазы приводит к увеличению времени релаксации до  $10^{-9} \dots 10^{-7}$  с. При совпадении частоты внешнего поля с собственной частотой диполей (область дисперсии) возрастают потери и диэлектрическая проницаемость начинает зависеть от частоты:

$$\varepsilon(j\omega) = \varepsilon'_\infty + \sum_i [\Delta\varepsilon_i / (1 + j\omega\tau_i)]. \quad (2.1)$$

где  $\varepsilon'_\infty$  – диэлектрическая проницаемость, соответствующая упругой поляризации ( $\varepsilon'_\infty \approx 2$ );  $\Delta\varepsilon_i$  – вклад поляризации конкретного вида при  $\omega \rightarrow 0$ ;  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота;  $\tau_i$  – время релаксации  $i$ -го механизма поляризации ( $\tau_i \in [10^{-16}; 10^{-14}]$  с для электронной и  $\tau_i \in [10^{-14}; 10^{-12}]$  с для ионной поляризации, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только дипольную поляризацию).

Реально наблюдаемые зависимости (разве только для льда) уже нельзя характеризовать дискретным временем релаксации; для таких молекулярных систем имеет место спектр времени релаксации с функцией распределения  $G(\tau)$ , а соответствующие составляющие  $\varepsilon(j\omega)$ :

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \int_0^\infty G(\tau) d\tau / (1 + \omega^2 \tau^2); \quad \varepsilon'' = \int_0^\infty G(\tau) \omega \tau d\tau / (1 + \omega^2 \tau^2). \quad (2.2)$$

В [38] обобщены наиболее часто встречаемые функции распределения для полимерных материалов. О виде функции можно судить по годографу комплексной диэлектрической проницаемости (так называемой диаграмме Коул–Коул) [40]. Если распределение  $\tau$  дискретное (только одно время релаксации), то диаграмма имеет вид полуокружности с центром на оси абсцисс: при симметричной относительно центрального момента функции распределения диаграмма принимает вид полуокружности с центром, лежащим ниже оси абсцисс. Если функция распределения несимметрична, то годограф имеет вид несимметричной кривой (см. работы [16, 38]).

В [16] приведены сведения об измерении  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  для смесей с высоким влагосодержанием, где обнаружено наличие сильной релаксации со временем от  $10^{-9}$  до  $10^{-7}$  с. Только при очень высоких влагосодержаниях механизм релаксации определяют диполи свободной воды.

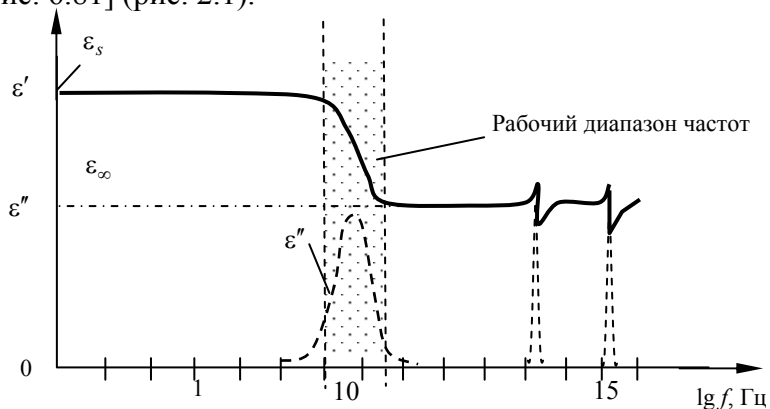
Учитывая, что частота дипольной релаксации возрастает с повышением температуры, можно заключить, что  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  уменьшаются при рабочих частотах ниже частоты релаксации, а при частотах выше частоты релаксации потери увеличиваются. Следовательно, у СВЧ-влагомеров, работающих в диапазоне свыше 3 ГГц и измеряющих влажность по затуханию при прохождении через слой материала, температурный коэффициент затухания для свободной воды отрицателен, а для связанной воды положителен.

Для описания линейных изотропных систем, к которым относится большинство дисперсных материалов, достаточно иметь одну пару параметров  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  или  $\varepsilon'$  и  $\text{tg } \delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ , которые связаны с поляризацией вещества в электромагнитном поле. Рассмотрим первоначально аналитическую модель характеристик свободной воды, перейдя далее к моделям этих характеристик для влажных капиллярно-пористых материалов.

## 2.2. Частотно-температурные электрофизические характеристики свободной воды

Под этими характеристиками будем понимать аналитические зависимости (с коррекцией по экспериментальным данным по литературным источникам) величин  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  и  $\text{tg } \delta$  от частоты  $\omega = 2\pi f$  (или длины волны  $\lambda_r$ ) – дисперсионные характеристики, и от  $t$ , °С или  $T$ , К – температурные характеристики.

В рабочем диапазоне частот дисперсионные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  определяются только ориентационной поляризацией молекул воды (только релаксационные явления) при гармоническом СВЧ-приложенном поле [41, с. 386, рис. 6.81] (рис. 2.1).



**Рис. 2.1**

Таким образом, величина  $\dot{\varepsilon}$  и ее составляющие  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  определяются точно, согласно модели Дебая. Величина

$$\dot{\varepsilon} - \varepsilon_\infty = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \Rightarrow \dot{\varepsilon} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (2.3)$$

где при  $\omega = 0$

$$\varepsilon_s = \varepsilon'_s = 1 + \chi_{ts} + \chi_{ps} - \quad (2.4a)$$

вещественная величина (статическая  $\varepsilon'_s$ );  $\chi_{ts} + \chi_{ps}$  – суммарная статическая индуцированная и поляризованная восприимчивость;  $\varepsilon''_s = 0$ ;

при  $\omega \rightarrow \infty$

$$\varepsilon_\infty = \varepsilon'_\infty = 1 + \chi_{ts}; \quad \varepsilon''_\infty = 0. \quad (2.4b)$$

С учетом (2.3):

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}; \quad (2.5a)$$

$$\varepsilon'' = \omega\tau \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (2.5b)$$

Отметим, что

$$\varepsilon''_{\max} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \quad (2.5b)$$

и зависит только от температуры.

Предпочтительнее рассматривать критическую длину волны  $\lambda_{кр}$  (или  $f_{кр}$ , как некоторые авторы) вместо времени поляризационной релаксации  $\tau$ . Они вводятся через соотношения:  $\omega\tau = \frac{\lambda_{кр}}{\lambda} = \frac{f}{f_{кр}}$  и

$$\lambda_{кр} = \omega\lambda\tau = 2\pi C\tau \quad \text{или} \quad f_{кр} = (2\pi\tau)^{-1}. \quad (2.6)$$

Графическое представление (2.5) полезно для сравнения измеренных значений проницаемости с теоретическими. Нормированные величины  $\varepsilon'/\varepsilon_\infty$  и  $\varepsilon''/\varepsilon_\infty$  удобно выражаются в функции параметра  $\theta = \text{arctg } \omega\tau$ . Величина

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_\infty} = 1 + \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\infty} - 1 \right) e^{-j\theta} \cos\theta = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_\infty} - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_\infty} \quad (2.7)$$

представлена на рис. 2.2 [41, рис. 6.7.2] на комплексной плоскости с абсциссой  $\varepsilon'/\varepsilon_\infty$  и ординатой ( $\varepsilon''/\varepsilon_\infty$ ) (диаграмма Коул–Коул).

График функции (2.7) – полукруг с центром в точке  $\varepsilon'/\varepsilon_\infty = [(\varepsilon_s/\varepsilon_\infty) + 1]/2$  (т.е.  $\varepsilon'$  при максимальном значении  $\varepsilon''$  равно  $0,5(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)$  [34]) и радиусом  $[(\varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1)]/2$ ; он расположен на горизонтальной оси так, что  $\varepsilon/\varepsilon_\infty = \varepsilon_s/\varepsilon_\infty$  при  $\theta = 0$  и  $\varepsilon/\varepsilon_\infty = 1$  при  $\theta = \pi/2$ . Максимальное значение  $\varepsilon''/\varepsilon_\infty$ , равное  $[(\varepsilon_s/\varepsilon_\infty) - 1]/2$ , достигается при  $\theta = \pi/4$ . Графики  $\varepsilon'/\varepsilon_\infty$  и  $\varepsilon''/\varepsilon_\infty$  в функции  $\omega\tau$  представлены на рис. 2.3 [41, рис. 6.7.3]. Как видно, максимум  $\varepsilon''/\varepsilon_\infty$  находится в точке  $\omega\tau = 1$ ; в ее окрестностях функция  $\varepsilon'/\varepsilon_\infty$  быстро уменьшается от величины, близкой к  $\varepsilon_s/\varepsilon_\infty$ , до единицы.

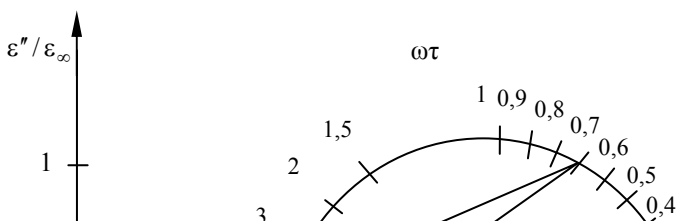


РИС. 2.2. КОМПЛЕКСНАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ  
полярной среды в комплексной плоскости:

$$\epsilon_s = 3,2\epsilon_\infty, \quad \hat{\epsilon} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}$$

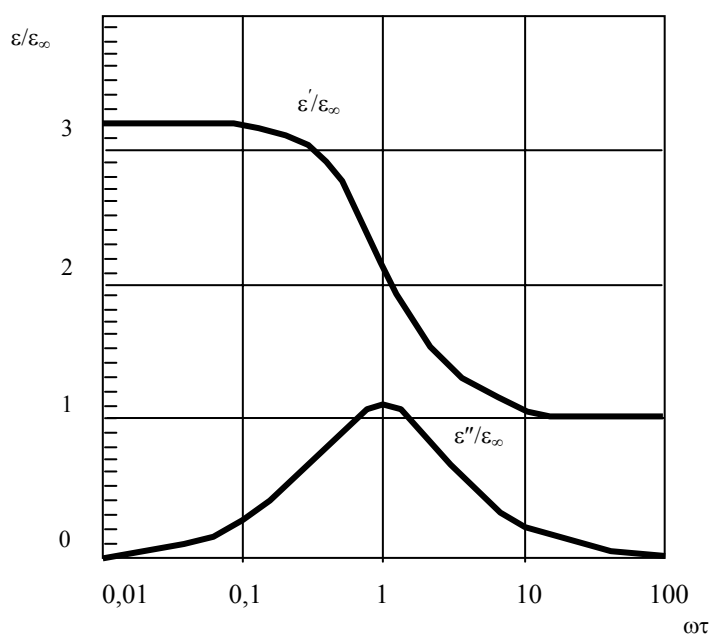


РИС. 2.3. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЛАКСАЦИИ  
при ориентационной поляризации:

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad \epsilon_s = 3,2\epsilon_\infty$$

Для свободной воды простые соотношения (2.5), содержащие одну релаксационную частоту, представляют хорошее приближение к экспериментально наблюдаемому поведению веществ. Аналитические выражения (2.5а) и (2.5б) с учетом (2.6) примут вид:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2}; \quad (2.8a)$$



$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\lambda_{кр}}{\lambda}}{1 + \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2}; \quad (2.8б)$$

при том, что

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon'. \quad (2.8в)$$

Релаксационная поляризация происходит прежде всего в диэлектриках, состоящих из полярных молекул. Она также наблюдается в материалах, состоящих из молекул с полярными радикалами из слабо связанных ионов, которые легко смещаются со своих нормальных положений в кристаллической решетке под действием теплового движения, и в материалах с электронными дефектами теплового происхождения. Во всех этих случаях поляризация, вызванная приложенным внешним полем, непосредственно связана с тепловым движением частиц и, следовательно, сильно зависит от температуры. Для релаксационной поляризации необходимы достаточно длинные времена возбуждения и релаксации, и поэтому дисперсия и поглощение возникают на сравнительно низких частотах. В общем случае время релаксации зависит от энергии активации, собственной частоты колебаний поляризованных частиц и от температуры. Оно определяется уравнением Больцмана

$$\tau = \tau_0 e^{E/kT}, \quad (2.9)$$

где  $E$  – энергия активации;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

С учетом того, что  $\lambda_{кр} = 2\pi c\tau$  выражение (2.9) примет вид:

$$\lambda_{кр} = \lambda_0 e^{E/kT}. \quad (2.10)$$

С целью определения величин  $\lambda_0$  и  $E/k$  для свободной воды воспользуемся аналитико-графическими данными [41, с. 394 – 396] (величина  $\lambda_{кр} = 1,74$  см при  $t = 20$  °С соответствует и данным [42]).

Аппроксимацию проводим для расчетного диапазона длин волн, определяемого для стандартных волноводов, выпускаемых промышленностью:  $\lambda_{кр} \in [0,6; 3,4] \cdot 10^{-2}$  м, диапазон температур  $t \in [0; 75]$  °С.

Подставляя в (2.9) предельные значения  $\lambda_{кр}$  (м) при соответствующей  $T$  (К), получим температурную зависимость  $\lambda_{кр} = f_1(T)$ :

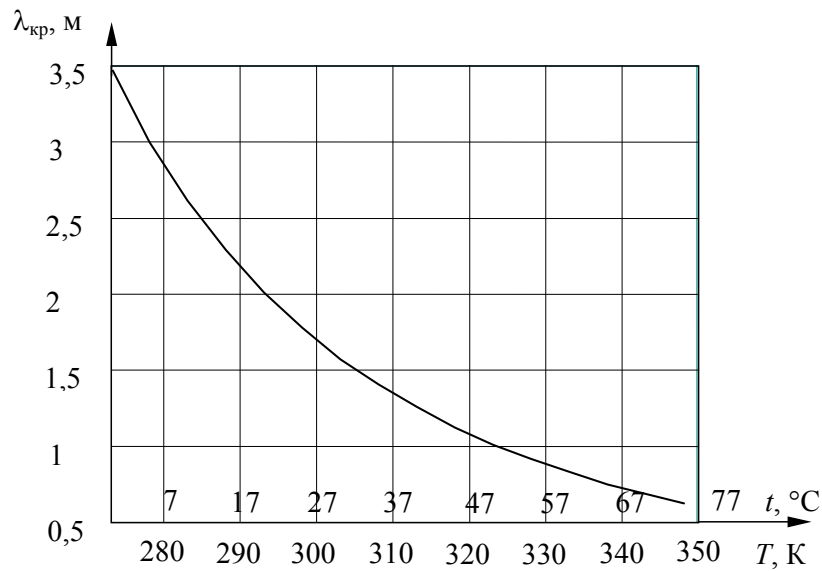
$$\lambda_{кр} = 1,21 \cdot 10^{-5} e^{\frac{2175}{T}}. \quad (2.11)$$

Графически аппроксимирующая зависимость (2.4) показана на рис. 2.4.

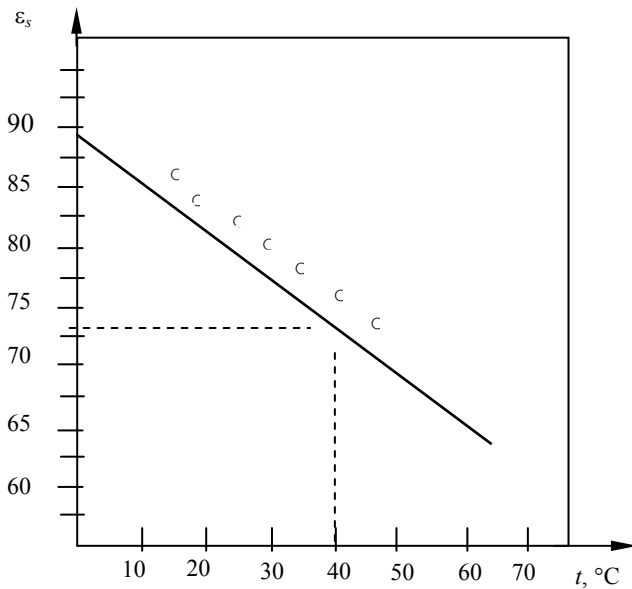
Согласно [41, с. 384, табл. 6.10.1] и [46, рис. 6.10.1], можно найти температурную зависимость  $\varepsilon_s = f_2(t)$  с учетом того, что величина  $\varepsilon_\infty = 5,5$  не зависит от температуры. Заметим, что по другим данным [37, с. 39]  $\varepsilon_\infty = 4,5; 4,9$ . Аппроксимация данных табл. 6.10.1 (линейная, методом МНК) дала выражение для зависимости (при  $t \in [0; 40]$  °С

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{s0} - \alpha t = 88,2 - 0,3775t, \quad (2.12)$$

где  $\varepsilon_{s0} = 88,2$  при  $t = 0$  (рис. 2.5).



**Рис. 2.4. Температурная зависимость критической длины волны**



**Рис. 2.5. Статическая диэлектрическая проницаемость воды в зависимости от температуры по данным табл. 6.10.1 [41]**

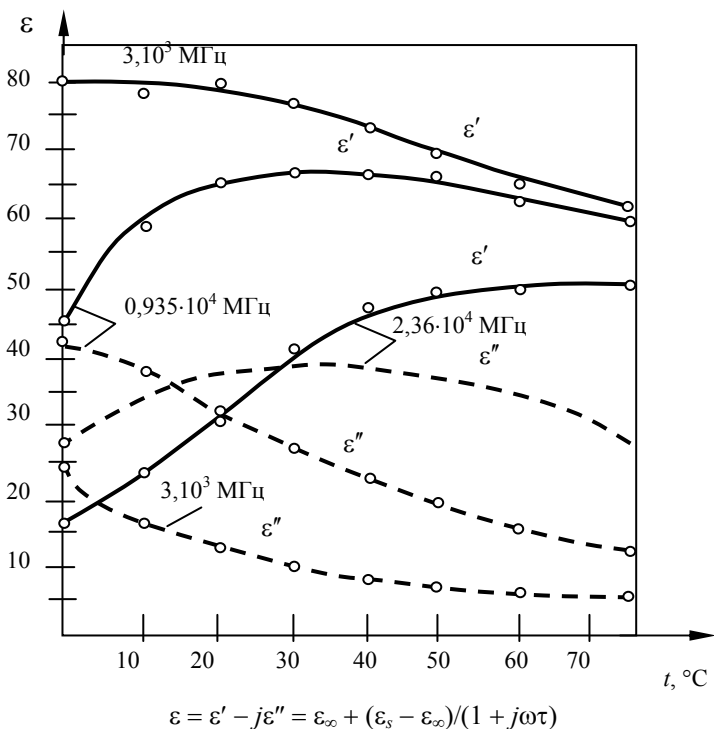
Величину  $\epsilon_s$  можно определить по трансцендентной формуле Кирквуда [41, (6.17)], например:  $\epsilon_s = 78,2$  при  $t = 25$  °C (измеренная величина 78,5). Это достаточно сложно, и возможно только численное решение.

С увеличением температуры совпадение с формулой Кирквуда ухудшается: при 83 °C теоретическая величина  $\epsilon_s$  равна 67,5, а измеренная величина составляет 59,5. При дальнейшем уточнении теории принимается в расчет разрыв отдельных связей, что приводит к значительно лучшим результатам при вычислении температурной зависимости  $\epsilon_s$ . Это видно из [41, табл. 6.10.1], где теоретические значения  $\epsilon_s$ , полученные в предположении разрыва 9 % связей при 0 °C, сравниваются с результатами интерполяции измерений. Выбор разорванных связей был произвольным и производился из соображений наилучшего совпадения с экспериментом, в результате очень хорошее совпадение было получено в весьма широком диапазоне температур. Результаты сравниваются с помощью графиков [41, рис. 6.10.1], где также изображена кривая для чистого льда.

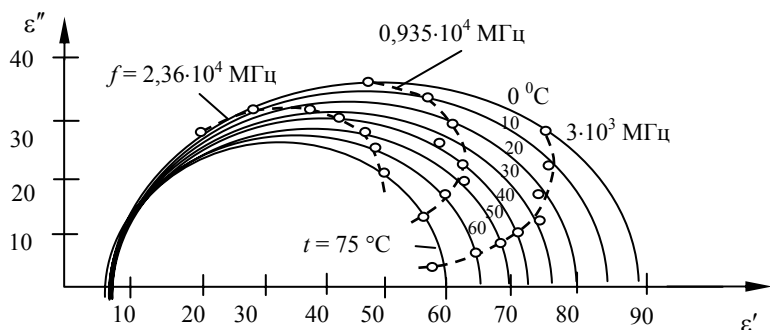
Подобно льду, вода имеет две широкие полосы поглощения и дисперсии в инфракрасном диапазоне частот (см. рис. 2.1). Относительная проницаемость в длинноволновом инфракрасном диапазоне близка к  $\epsilon' \approx 4,0$ , а в микроволновом радиодиапазоне  $\epsilon_\infty \approx 5,0 \pm 0,5$  при 25 °С. Отличие этих величин для чистого льда, по-видимому, объясняется наличием разорванных и нежестких связей в жидком состоянии.

Релаксационные свойства воды хорошо описываются формулой Дебая, содержащей одно значение времени релаксации. Однако максимальное поглощение во льду происходит на очень низких частотах, а в воде – в области микроволновых радиочастот. Время релаксации для воды при различных температурах дано в [41, табл. 6.10.1] и графически представлено в [41, рис. 6.10.2]. У воды значения времени релаксации намного меньше, чем у льда, для которого они приведены в [41, табл. 6.9.1]. Измеренные и теоретические значения  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$  воды для трех микроволновых частот и в интервале температур от 0 до 75 °С даны в [41, табл. 6.10.2] и графически изображены на рис. 2.6 [41, рис. 6.10.3].

Соответствующие круговые графики зависимости  $\epsilon''$  от  $\epsilon'$  для различных значений частотных и температурных параметров приведены на рис. 2.7 [41, рис. 6.10.4]. Как видно, экспериментальные точки располагаются очень близко от теоретических полуокружностей, рассчитанных по формуле Дебая.



**Рис. 2.6. Относительная диэлектрическая проницаемость воды в зависимости от температуры:**  
 --- — теоретические кривые; ○ — измерения Колли и др.



**Рис. 2.7. Экспериментальные данные, Колли, Хастед и Ритсон  
[Proc. Phys. Soc. London, 60, 145 (1948)]:**

— — теоретические кривые при  $t = \text{const}$ ;

----- — кривые постоянной частоты;  $\circ$  — измерения

Окончательно расчетные дисперсионно-температурные зависимости  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$ ,  $\text{tg } \delta$  для свободной воды:

$$\varepsilon' = 5 + \frac{83,2 - 0,3775t}{1 + \left( \frac{1,21 \cdot 10^{-5} \exp^{\frac{2175}{t+273}}}{\lambda} \right)^2}; \quad (2.13)$$

$$\varepsilon'' = \frac{[83,2 - 0,3775t] \frac{1,21 \cdot 10^{-5} \exp^{\frac{2175}{t+273}}}{\lambda}}{1 + \left( \frac{1,21 \cdot 10^{-5} \exp^{\frac{2175}{t+273}}}{\lambda} \right)^2}. \quad (2.14)$$

$$\text{tg } \delta = \varepsilon''/\varepsilon'. \quad (2.15)$$

Расчетные графики зависимостей (2.13) – (2.15) при  $\lambda \in [0,5; 6] \cdot 10^{-2}$  м и при  $t \in [0; 40]$  °С с шагом  $\Delta t = 5$  °С представлены на рис. 2.8 – 2.11.

Анализ зависимостей (2.11), (2.13), (2.14) и (2.15) с учетом рис. 2.4, 2.5 и 2.8 – 2.11 позволяет сделать адекватный выбор рабочей полосы длин волн во всем температурном диапазоне  $t \in [0; 40]$  °С по следующим критериям:

- критерию максимума чувствительности величины  $\varepsilon'$  к длине волны  $\lambda$  или  $\lambda_r$  к изменению  $\varepsilon'$  для метода определения поверхностной влажности  $W_p$  по углу Брюстера (гл. 4): ему соответствуют точки перегиба дисперсионных кривых  $\varepsilon'(\lambda_r)$  (рис. 2.1, 2.3 и 2.8);

- критерию максимума поглощения энергии падающей волны СВЧ-излучения, ему соответствуют точки максимумов дисперсионных кривых  $\varepsilon''(\lambda_r)$  (рис. 2.1, 2.3 и 2.10) равные по значениям длинам волн точек перегиба  $\varepsilon'(\lambda_r)$ .

Таким образом, оба критерия однозначно взаимосвязаны и совместно определяют диапазон рабочих длин волн (рис. 2.10, кривая  $\varepsilon''_{\text{max}}(\lambda_r, t)$ ).





## **2.3. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ВЛАГОЙ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ**

### **2.3.1. Электрические характеристики твёрдых строительных материалов**

Содержащие влагу материалы представляют собой многокомпонентные гетерогенные системы, в которых один из компонентов (вода) может находиться в различных фазовых состояниях. При измерениях влажности необходимо принимать во внимание физико-химические свойства системы,

которые определяются свойствами твердого скелета материала, количеством и свойствами влаги [37].

Естественные и промышленные влагосодержащие твердые материалы относятся к коллоидным, капиллярно-пористым или капиллярно-пористым коллоидным телам; наиболее многочисленной является последняя категория материалов. Тело считается капиллярно-пористым, а поры капиллярными, если капиллярный потенциал значительно больше потенциала поля тяжести; если оба вида потенциалов соизмеримы, тело является просто пористым. Сорбционная способность и водоудерживающие свойства капиллярно-пористого материала зависят от его пористой структуры и геометрии пористой системы – площади поверхности капилляров и их размеров.

Границей между микро- и макрокапиллярами условно считают радиус капилляра, равный 0,1 мкм. Капиллярно-пористые тела имеют поры разных размеров. Если дисперсия функции распределения пор по размерам равна нулю, структура тела монокапиллярна; это условие редко выполняется у реальных материалов, структура которых является поликапиллярной.

Для измерений влажности важное значение имеют виды и формы связи влаги с веществом, влияющие на свойства влагосодержащего материала.

Из известных классификаций видов и форм связи влаги чаще всего используется предложенная П.А. Ребиндером, основанная на величине энергии связи  $E$ . По этой классификации (с некоторыми дополнениями М.Ф. Казанского [44]) всю влагу коллоидного капиллярно-пористого тела можно разделить на следующие виды и формы (в порядке нарастания величины  $E$ ):

I Свободная вода.

II Влага капиллярно-связанная (влага физико-механической связи):

- 1) влага капиллярного состояния в макропорах;
- 2) стыковая влага макропор;
- 3) капиллярная влага микропор.

III Влага адсорбционно-связанная (влага физико-химической связи):

- 1) влага полимолекулярной адсорбции;
- 2) влага мономолекулярной адсорбции.

IV Вода химически связанная (влага химической связи).

Наиболее прочно удерживается химически связанная вода (гидратная или кристаллогидратная). Ее молекулы входят в состав основного вещества и освобождаются лишь химическим взаимодействием или прокаливанием.

Адсорбционно-связанная вода образуется в результате действия молекулярно-силового поля. На начальном этапе сорбции на внешних и внутренних поверхностях тела создается мономолекулярный слой, наиболее прочно связанный с поверхностью адсорбента; затем он собирает второй слой, третий и т.д.; последующие слои связаны менее прочно.

К физико-химической относится и осмотическая связь – слабая обратная связь, имеющая место у растительных клеток с концентрированным раствором, в который через полупроницаемую перегородку проникает вода из окружающей среды с менее концентрированным раствором.

Капиллярно-связанная вода образуется в микрокапиллярах поглощением воды из влажного воздуха или непосредственным соприкосновением, в сквозных макрокапиллярах – непосредственным соприкосновением. Причиной возникновения данной формы связи является капиллярное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости в капиллярах. К этой же категории относится связь смачиванием при непосредственном соприкосновении с поверхностью тела вследствие действия поверхностного натяжения. Считается, что в отличие от адсорбционно-связанной вода физико-механической связи удерживается в неопределенных соотношениях и в основной массе сохраняет свои исходные свойства.

Известные методы измерения влажности по-разному реагируют на формы связи влаги. Метод высушивания (и ряд других аналитических методов) не учитывает химически связанной воды. Для диэлектрического метода существенно то обстоятельство, что химически связанная вода имеет значительно меньшую диэлектрическую проницаемость (по данным некоторых исследователей  $\epsilon_{св} = 4,5 \dots 5,8$ ), чем свободная [41, табл. 6.10.2],  $\epsilon_{св}$  не зависит от частоты электрического поля и температуры материала.

Большинство нормативных документов, применяемых на практике (стандарты, технологические инструкции и т.п.), основано на учете только свободной влаги. Однако во многих случаях возникает необходимость получения информации о влаге различных видов связи. Это относится не только к экспе-



риментальным исследованиям в ряде областей науки, но и к многочисленным физическим и технологическим процессам, как, например, твердение цемента и бетона, связывание влаги целлюлозой, искусственными волокнами, глиной и т.д.

Задача количественного анализа влаги различных форм связи достаточно сложна; дополнительные затруднения вызывает и то, что в ряде процессов одна форма связи постепенно переходит в другую.

Механизм переноса влаги в капиллярно-пористых телах весьма сложен. Влага перемещается в виде пара и жидкости, причем следует различать влагоперенос внутренний и внешний – с поверхности тела в окружающую среду. Теория процессов массо- и теплопереноса разработана А.В. Лыковым и другими исследователями.

У многих капиллярно-пористых материалов область дисперсии значительно шире, чем по Дебаю, и критическая частота материала в целом отличается от критической частоты воды, являющейся включением в непроводящую и нерелаксирующую среду (сухое вещество). Иногда наблюдается больше одной области дисперсии и больше одного максимума  $\varepsilon''$ .

В гетерогенных системах, содержащих воду, необходимо дополнительно принять во внимание следующие факторы:

а) наличие двойного поляризованного слоя частиц, следствием которого могут являться значения  $\varepsilon$  более высокие, чем у воды;

б) высокая поверхностная проводимость частиц или включений.

В диапазоне СВЧ (выше  $10^9$  Гц) основным видом являются релаксационные потери, связанные с поляризацией свободной воды.

Ряд исследователей дополнил теорию Дебая и предложил соотношения, лучше описывающие поляризацию в гетерогенных системах, содержащих полярные молекулы; эти соотношения в некоторых случаях применимы и к влажным материалам. В качестве примера укажем на диаграмму Коул–Коула, т.е. круговую диаграмму в координатах  $\varepsilon''$  ( $\varepsilon'$ ), соответствующую уравнению

$$\dot{\varepsilon} - \varepsilon_{\infty} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{(1 + j\omega\tau)^{1-\alpha}},$$

где  $\alpha$  – эмпирическая постоянная ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), описывающая расширение релаксационной области.

Диаграмма представляет собой дугу окружности, центр которой лежит ниже действительной оси, образуя с ней угол  $\pi/2$  (для уравнения Дебая  $\alpha = 0$ ). Была доказана возможность применения этой диаграммы для построения частотно-влажностных характеристик многих материалов [1].

Строительные материалы представляют собой сложные структуры, состоящие из различных материалов, входящих в самых различных пропорциях. В состав строительных материалов входят, в частности, так называемые породообразующие минералы: кальцит, доломит и кварц, а также влага. Диэлектрические свойства минералов не полностью изучены, однако известно, что кальцит, доломит и кварц имеют структуру одноосных кристаллов с несколько различающимися значениями относительной диэлектрической проницаемости вдоль двух взаимно перпендикулярных главных осей [41]. Для материалов в сухом состоянии значения проницаемости при  $20^\circ\text{C}$  даны в [45].

Для песчаника  $\varepsilon$  имеет значение от 3,96 до 4,66 [45]. Метаморфические породы, такие, как мрамор и кварцит, сходны по своим диэлектрическим свойствам с осадочными породами. Для кварцита  $\varepsilon$  лежит в пределах от 4,36 до 4,85, а для мрамора – от 8,22 до 8,37.

Многие строительные материалы анизотропны. Они характеризуются различными значениями проницаемости вдоль разных осей кристаллической (или слоистой) структуры.

### **2.3.2. Электрофизические характеристики влажных строительных материалов как сложных смесей «сухой» матрицы материала со связанной водой и свободной влаги**

Микроволновый нагрев имеет дело с неоднородными веществами, состоящими из нескольких компонентов с различными диэлектрическими свойствами, т.е.  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$ , причем величина  $\varepsilon'$  необходима для определения поверхностной влажности  $W_n$  (по углу Брюстера) (см. гл.4) .

Для характеристики таких гетерогенных материалов удобно пользоваться усредненными параметрами, которые должны учитывать реальную структуру материала и свойства его отдельных компонентов. Формулы, дающие связь между средним значением комплексной диэлектрической проницаемости и диэлектрическими проницаемостями компонентов гетерогенного диэлектрика, называются формулами смеси – зависимостями, связывающими диэлектрическую проницаемость  $n$ -фазной смеси с диэлектрическими проницаемостями и объемными концентрациями отдельных компонентов. Приведем те из них, которые использовались в работах по измерениям влажности. Теоретические предположки, на которых основаны эти формулы, рассмотрены в литературе по физике диэлектриков [43, 46 – 48].

Примем следующие обозначения:  $\epsilon_{см}$ ,  $\epsilon_2 \cong \epsilon'_2$  (так как  $\epsilon''_2 \approx 0$ );  $\epsilon_1$  – диэлектрические проницаемости соответственно смеси, дисперсионной среды («сухой» материал со связанной влагой) и дисперсной фазы (свободной воды);  $W = V_1/V$  – объемная концентрация дисперсной фазы (влажность  $W$ ;  $V, V_1$  – объемы смеси и дисперсной фазы соответственно).

При рассмотрении  $n$ -компонентной смеси индексы  $i, n$  относятся к  $i$ -му,  $n$ -му компонентам.

Рассмотрим диэлектрик с проницаемостью  $\epsilon'_2$ , внутри которого содержатся включения диэлектрика с  $\epsilon'_1 \gg \epsilon'_2$ . Исходное электрическое поле  $E_0$  в диэлектрике считаем однородным. Известна объемная концентрация включений  $W$  – отношение суммарного объема включений (свободной воды) к объему всего тела. Форма включений соответствует одной из разновидностей эллипсоида, показанных на рис. 2.13 [49]. Распределение включений по объему тела достаточно равномерное.

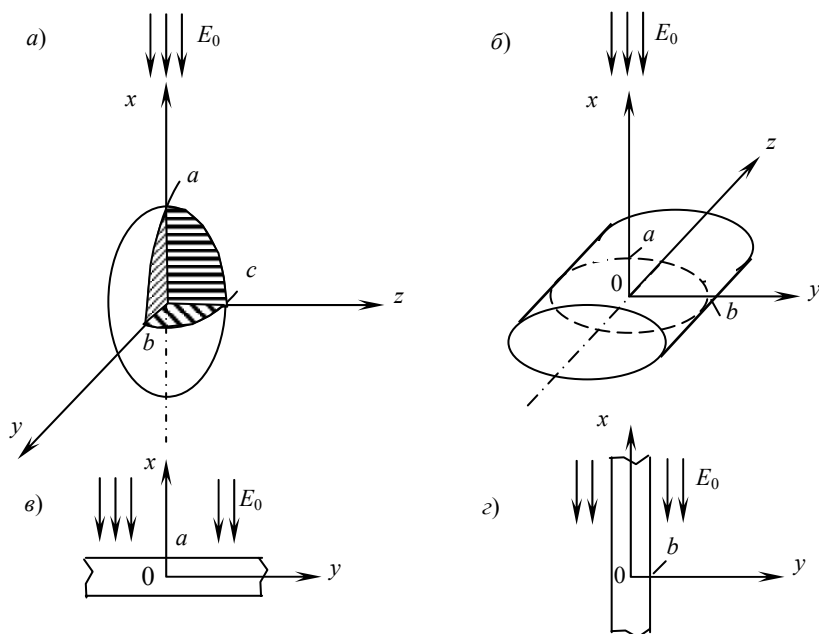
Простейшими формулами в этом случае являются [2, 3] следующие.

*Формула Вагнера:*

$$\epsilon'_{см} = \epsilon'_2 \left( 1 + 3W \frac{\epsilon'_1 - \epsilon'_2}{\epsilon'_1 + 2\epsilon'_2} \right). \quad (2.16)$$

*Формула Винера, Лоренц-Лорентца, Клаузиуса-Моссотти:*

$$\epsilon'_{см} = \epsilon'_2 \left( 1 + \frac{3W}{\frac{\epsilon'_1 + \epsilon'_2}{\epsilon'_1 - \epsilon'_2} - W} \right). \quad (2.17)$$



**Рис. 2.13. Эллипсоид и его разновидности**

Винер О. предложил учитывать расположение частиц дисперсной среды относительно направления электрического поля «коэффициентом смеси»  $n$  ( $0 \leq n \leq \infty$ ) и показал эмпирическим путем, что относи-

тельная проницаемость  $\dot{\epsilon}_{\text{см}}$  смеси двух диэлектриков с комплексными относительными проницаемостями  $\dot{\epsilon}_1$  и  $\dot{\epsilon}_2$  приблизительно определяется из уравнения [41]

$$\frac{\dot{\epsilon}_{\text{см}} - 1}{\dot{\epsilon}_{\text{см}} + u} = W \left( \frac{\dot{\epsilon}_1 - 1}{\dot{\epsilon}_1 + u} \right) + (1 - W) \left( \frac{\dot{\epsilon}_2 - 1}{\dot{\epsilon}_2 + u} \right), \quad (2.18)$$

где  $W$  – часть полного объема, занятая средой 1 (свободная влага);  $u$  – число, зависящее от формы частиц этой среды.

Предполагается, что остальной объем занят однородной изотропной окружающей средой 2.

Экстремальными значениями  $\dot{\epsilon}_{\text{см}}$  являются:

а) Минимальное при  $u = 0$ . Если среда 1 состоит из длинных пластинок с границами, перпендикулярными электрическому полю, формула (2.18) упрощается к виду

$$\dot{\epsilon}_{\text{см}}^{-1} = W \dot{\epsilon}_1^{-1} + (1 - W) \dot{\epsilon}_2^{-1}. \quad (2.19)$$

Этой формуле соответствует эквивалентная схема из двух последовательно включенных конденсаторов.

б) Максимальное при  $u \rightarrow \infty$ , соответствующее расположению дисперсных частиц (цилиндрических, плоских, эллипсоидальных) с большой осью параллельной полю и вместо (2.18) получается другая простая формула

$$\dot{\epsilon}_{\text{см}} = W \dot{\epsilon}_1 + (1 - W) \dot{\epsilon}_2, \quad (2.20)$$

которой соответствует эквивалентная схема из двух конденсаторов, включенных параллельно. Наконец, если среда 1 состоит из сфер, то  $u \approx 2$ , и формула (2.18) принимает вид

$$\frac{\dot{\epsilon}_{\text{см}} - 1}{\dot{\epsilon}_{\text{см}} + 2} = W \left( \frac{\dot{\epsilon}_1 - 1}{\dot{\epsilon}_1 + 2} \right) + (1 - W) \left( \frac{\dot{\epsilon}_2 - 1}{\dot{\epsilon}_2 + 2} \right).$$

Для продолговатых частиц с преобладанием ориентации вдоль поля выполняется общая формула (2.18) со значениями  $u$  в пределах  $2 < u \leq \infty$ . Если преобладает направление частиц, перпендикулярное электрическому полю, то  $0 \leq u < 2$ .

*Формулы Бруггемана.* Экспериментальные значения  $\epsilon$  даны в зависимости от формы дисперсных частиц при их произвольном расположении относительно поля.

Для случая сферических частиц:

$$\frac{\epsilon'_1 - \epsilon'_{\text{см}}}{\epsilon'_1 - \epsilon'_2} = (1 - W) \sqrt[3]{\frac{\epsilon'_{\text{см}}}{\epsilon'_2}}; \quad (2.21)$$

для частиц в форме плоских дисков:

$$\frac{\epsilon'_1 - \epsilon'_{\text{см}}}{\epsilon'_1 - \epsilon'_2} = (1 - W) \frac{2\epsilon'_1 + \epsilon'_{\text{см}}}{2\epsilon'_1 + \epsilon'_2}, \quad (2.22)$$

$\epsilon'_1, \epsilon'_2$  отличаются более чем в 4 раза;  $W > 0,2$ .

*Формулы Максвелла.* Так как в результате появления включений диэлектрика с  $\epsilon'_1 > \epsilon'_2$  проницаемость вещества возросла с  $\epsilon'_2$  до среднего значения проницаемости смеси  $\epsilon_{\text{см}}$ :

$$\epsilon'_{\text{см}} = \epsilon'_2 \left[ 1 + \frac{(\epsilon'_1 - \epsilon'_2) W}{\epsilon'_2 + (\epsilon'_1 - \epsilon'_2) N_x} \right]. \quad (2.23)$$

Эта формула для сферических включений ( $N_x = 1/3$ ) называется формулой Максвелла. Очевидно, что она справедлива только при малой концентрации  $W$  включений, когда возмущения поля, вносимые включениями, не влияют друг на друга.

Связанные заряды, находящиеся на поверхности включений, с ростом концентрации начинают частично нейтрализовать друг друга. Поляризация включений уменьшается, так как поле  $E_d$  соседних включений ослабляет внешнее электрическое поле  $E_0$ . Влияние уменьшения поляризации включений на величину  $\varepsilon_{cp}$  можно характеризовать введением в формулу (2.23) эффективного коэффициента деполяризации  $N_{эфф} = k(W) N_x$ , где значение  $k(W) < 1$  должно уменьшаться с ростом концентрации включений. Этому требованию удовлетворяет  $k(W_n) = 1 - W$ .

Заменяя в формуле Максвелла геометрический коэффициент деполяризации  $N_x$  на эффективный, получаем формулу Лоренца–Лорентца [49]

$$\varepsilon'_{cm} = \varepsilon'_2 \left[ 1 + \frac{(\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2) W}{\varepsilon'_2 + (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2)(1 - W) N_x} \right]. \quad (2.24)$$

Иной способ учета зависимости поляризации включений от концентрации заключается в том, что включения диэлектрика с  $\varepsilon'_1$  считаются помещенными в среду, имеющую проницаемость не  $\varepsilon'_2$ , а уже  $\varepsilon_{cm}$ . В этом случае формула имеет вид, предложенный В.И. Оделевским.

*Формула Оделевского.* Обобщенная проводимость гетерогенной системы, представляющей собой многофазную статическую смесь невытянутых частиц, вычисляется из уравнения

$$\sum_i \frac{\Lambda_i - \Lambda}{\Lambda_i + 2\Lambda} W_i = 0. \quad (2.25)$$

Формула Оделевского в записи для двухфазной системы:

$$\varepsilon'_{cm} = \frac{h + \sqrt{h^2 + 4\varepsilon'_1\varepsilon'_2(1 - N_x)N_x}}{2(1 - N_x)}, \quad (2.26)$$

где  $h = \varepsilon'_2 + (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2) W - N_x(\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2)$ .

Формулы смеси (2.24) и (2.26) допускают оба предельных перехода:  $\varepsilon'_{cm} = \varepsilon'_2$  при  $W = 0$  и  $\varepsilon'_{cm} = \varepsilon_1$  при  $W = 1$ .

Среднюю диэлектрическую проницаемость удобно использовать и для расчетов эквивалентных параметров слоистых диэлектриков, состоящих из двух или более слоев диэлектрика с различной диэлектрической проницаемостью.

Если включение имеет форму плоского слоя, расположенного поперек электрического поля (рис. 2.13, в), то  $N_x = 1$  и формула Лоренца–Лорентца (2.24) преобразуется в вид (2.19).

При продольном расположении слоев диэлектрика (рис. 2.13, з) коэффициент  $N_x = 0$  и формула (2.24) приобретает вид (2.20)

$$\varepsilon_{cm} = \varepsilon'_1 W + \varepsilon'_2 (1 - W). \quad (2.27)$$

Обе последние формулы допускают обобщение на  $n$  слоев диэлектрика с различными свойствами. При последовательном соединении поперечных относительно поля слоев диэлектрика (рис. 2.13, в)

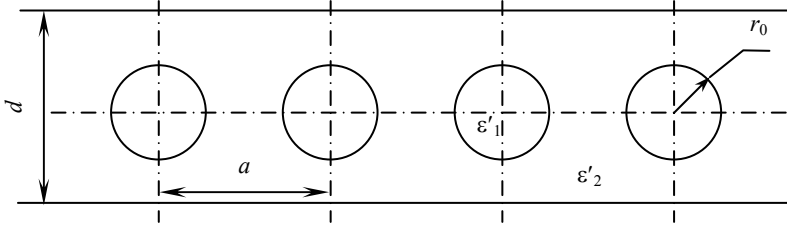
$$\frac{1}{\varepsilon'_{cm}} = \sum_{k=1}^n \frac{V_k}{\varepsilon'_k}; \quad (2.28)$$

при параллельном соединении продольных относительно поля слоев (рис. 2.13, з)

$$\varepsilon_{cm} = \sum_{k=1}^n V_k \varepsilon_k. \quad (2.29)$$

У пакета из плоских слоев объемная концентрация  $k$ -го диэлектрика  $V_k = d_k / d$ , где  $d_k$  – толщина  $k$ -го слоя, а  $d$  – суммарная толщина пакета (рис. 2.14).

Из полученных соотношений видно, что  $\epsilon_{\text{см}}$  для слоистого диэлектрика имеет различные значения в зависимости от направления электрического поля, т.е. такой диэлектрик является анизотропным. Анизотропными являются и все волокнистые материалы типа ткани, содержащие цилиндрические включения – волокна. Величина  $\epsilon_{\text{см}}$  в направлении вдоль волокон подсчитывается по формуле (2.27), а поперек волокон – по формуле (2.24) при  $N_x = 1/2$ , если волокна имеют круглое поперечное сечение.



**Рис. 2.14. Система параллельных цилиндров в плоском конденсаторе**

Совершенно иной подход к выводу формул смеси (статический), не использующий понятие о коэффициенте деполяризации, был предложен Лихтенеккером [49].

*Формула Лихтенекера.* Распространенной формулой для расчета обобщенной проводимости  $\Lambda$  (например, электрической проводимости  $\sigma$ , диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , теплопроводности  $\lambda$ ) является степенная или логарифмическая:

$$\Lambda^k = \sum_{i=1}^n W_i \Lambda_i^k, \quad (2.30)$$

на основании которой для случая двухкомпонентной смеси получаем

$$\lg \epsilon_{\text{см}}' = W \lg \epsilon'_1 + (1 - W) \lg \epsilon'_2 \quad (2.31)$$

или

$$\epsilon'_{\text{см}} = \epsilon_1'^W \epsilon_2'^{(1-W)}. \quad (2.32)$$

Эта формула легко обобщается для смеси  $n$  компонентов

$$\epsilon'_{\text{см}} = \prod_{k=1}^n \epsilon_k'^{V_k}. \quad (2.33)$$

Влияние содержания воды на диэлектрические свойства материала определяется формой связи между водой и материалом. Если вода входит в материал как свободная (гигроскопическая) вода, то ее диэлектрическая проницаемость составляет примерно 80 единиц до частоты около  $10^{10}$  Гц, которая является частотой релаксации. Для воды, адсорбируемой в виде монослоя, диэлектрическая проницаемость равна 2,5. При увеличении содержания адсорбируемой воды наступает момент, когда адсорбция прекращается и наряду со связанной водой появляется свободная вода, вследствие чего диэлектрическая проницаемость увеличивается.

Диэлектрические свойства материала, содержащего свободную воду, существенно зависят от распределения воды по его объему. Причем для увлажненного материала характерен случай, когда сухой компонент и вода находятся не в виде ярко выраженной статической или матричной смеси, а в виде смеси промежуточного типа. Свойства смесей промежуточного типа хорошо описываются эмпирическим уравнением на основе формулы Лихтенекера [50]:

$$\lg \varepsilon_{\text{см}} = W^\alpha \lg \varepsilon_1 + (1 - W^\alpha) \lg \varepsilon_2, \quad (2.34)$$

где  $\alpha = 0,5 \dots 1$ .

Это уравнение удобно тем, что охватывает все типы неупорядоченных смесей при изменении одного коэффициента  $\alpha$ . При  $\alpha = 1$  уравнение сводится к соотношению (2.31) и описывает статистические смеси. При  $\alpha = 0,5$  уравнение описывает свойства матричной смеси, в которой компонент с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$  находится в виде включений.

Все формулы смеси, рассмотренные выше, являются приближенными, выведенными на основании сделанных допущений. Анализ этих формул, выполненный А.В. Нетушилом [49], показал, что формулу Лоренца–Лорентца (2.24) следует применять при равномерном распределении включений по объему основного диэлектрика, а формулу Оделевского (2.26) – при хаотичном распределении. Формула Лихтенеккера дает правильный результат для мелкодисперсных смесей при близких концентрациях входящих в нее компонентов.

Наилучший результат для частного случая строго опорядоченного расположения круговых цилиндров, показанного на рис. 2.14, дает формула А.В. Нетушила, выведенная с учетом взаимного влияния полей связанных зарядов на поляризацию каждого цилиндра и с последующим применением метода средних потенциалов [49]. Эта формула имеет вид

$$\varepsilon'_{\text{см}} = \varepsilon'_2 d / (d - 2\pi\xi), \quad (2.35)$$

где  $\xi = 3ar_0^2 k_\varepsilon / (3a^2 + \pi^2 r_0^2 k_\varepsilon)$ ;  $k_\varepsilon = (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2) / (\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2)$ .

Размеры  $a$ ,  $d$ ,  $r_0$  показаны на рис. 2.14.

Формулы смеси справедливы и для комплексных значений  $\dot{\varepsilon}$ . По этим формулам можно рассчитывать  $\dot{\varepsilon}_{\text{см}} = \varepsilon'_{\text{см}} - j\varepsilon''_{\text{см}}$  и находить  $\text{tg } \delta_{\text{см}} = \varepsilon''_{\text{см}} / \varepsilon'_{\text{см}}$ .

Если известны частотные характеристики компонентов  $\dot{\varepsilon}_1$  и  $\dot{\varepsilon}_2$ , то по формулам смеси можно выполнять частотный анализ эквивалентных параметров гетерогенного диэлектрика. Пусть, например, в идеальном диэлектрике с  $\varepsilon_2$  находятся сферические включения с  $\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon'_1 - j\gamma / (\omega\varepsilon_0)$ . Подставив эти величины и  $N_x = 1/3$  в формулу Лоренца–Лорентца (2.24), после ряда формальных преобразований получим, что  $\dot{\varepsilon}_{\text{см}}$  можно рассчитывать по формуле

$$\dot{\varepsilon}_{\text{см}} = \varepsilon_{\infty\text{см}} + \frac{\Delta\varepsilon_{\text{рел}}}{1 + (\omega\tau)^2} + j \frac{\Delta\varepsilon_{\text{рел}}\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2},$$

если принять

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\infty\text{см}} &= \varepsilon_2 \left[ 1 + \frac{3W_n(\varepsilon'_1 - \varepsilon_2)}{3\varepsilon_2 + (\varepsilon'_1 - \varepsilon_2)(1 - W_n)} \right]; \\ \Delta\varepsilon_{\text{рел}} &= \varepsilon_2 \frac{1 + 2W_n}{1 - W_n} - \varepsilon_{\infty\text{см}}; \\ \tau &= \frac{\varepsilon_0}{\gamma} \left( \frac{3\varepsilon_2}{1 - W_n} + \varepsilon'_1 - \varepsilon_2 \right). \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Таким образом, идеальный диэлектрик с проводящими включениями ведет себя как диэлектрик с релаксационной поляризацией, имеющий одну частоту релаксации  $\omega_0 = 1/\tau$ . Частотные характеристики  $\varepsilon'_{\text{см}}$ ,  $\varepsilon''_{\text{см}}$  и  $\text{tg } \delta_{\text{см}}$  описываются формулами (2.13) – (2.15). Видно, что они резко отличаются от частотных характеристик компонентов смеси.

В поперечном электрическом поле аналогичные частотные характеристики имеет двухслойный материал, состоящий из идеального диэлектрика и диэлектрика, обладающего сквозной проводимостью.

За счет неоднородности структуры диэлектрическая проницаемость смеси может значительно превосходить проницаемости отдельных компонентов. Если в предыдущем примере принять  $\varepsilon_2 = \varepsilon'_1 = 80$ , удельную электрическую проводимость включений  $\gamma = 0,1$  См/м, а концентрацию включений  $W = 0,8$ , то по формулам (2.36) найдем  $\varepsilon_{\text{см}} = 80$ ;  $\Delta\varepsilon_{\text{рел}} = 960$  и  $\tau = 1,06 \cdot 10^{-7}$  с.

Недостатком формул Лихтенекера и Оделевского является их симметрия относительно обеих фаз, противоречащая экспериментальным данным, согласно которым при обращении фаз двухфазной системы (например, эмульсия вода–масло) происходит резкое изменение ее диэлектрической проницаемости.

Остальные приведенные формулы, а также ряд других (формулы Релея, Пьекара, Фрадкиной, Бетхера и т.д.) имеют аналогичную структуру и мало отличаются друг от друга. В этом можно убедиться, применив для них единую форму записи в виде степенного ряда по величине  $W$  [51]; как правило, расхождения появляются лишь, начиная с члена третьего порядка, т.е. при больших влагосодержаниях.

Близость основных формул диэлектрических смесей позволяет рассматривать их как частные случаи одной общей формулы, отличающейся только приближениями, сделанными при их выводе. Такая обобщенная формула, предложенная Рейнольдсом и Хью, имеет форму

$$\varepsilon'_{\text{см}} = \varepsilon'_2 + \varepsilon'_2 W_{\text{св.в}} (\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2) [\varepsilon'_2 + A(\varepsilon'_1 - \varepsilon'_2)]^{-1}, \quad (2.37)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от отношения осей эллипсоидальной частицы и ее ориентации относительно поля;  $W_{\text{св.в}}$  – постоянная величина объемной влажности связанной воды (0,05).

Для сфер  $A = 1/3$  и (2.37) превращается в известную формулу Максвелла.

На основе проведенного обзора можно сделать вывод об отсутствии в настоящее время универсальной аналитической модели диэлектрических свойств гетерогенных систем вообще и дисперсных влагосодержащих тел в частности. Лишь в отдельных простых случаях экспериментальные данные хорошо совпадают с результатами расчетов по тем или иным формулам смеси. Так, например, в [51] была обоснована возможность применения соотношения (2.17) при расчетной градуировке диэлькометрических влагомеров для жидких нефтепродуктов.

Одна из основных причин неудовлетворительности известных формул смеси при их применении к капиллярно-пористым влажным материалам – отсутствие учета влияния видов и форм связи влаги на электрические свойства материала. Эти формулы соответствуют лишь грубой бинарной модели «сухое вещество – свободная влага». Необходимость учета указанного важнейшего фактора (одним из первых ее отметил О.Д. Куриленко) нашла выражение в ряде работ. Пальмер [52] предложил для глины модель в виде равномерно распределенных частиц твердой фазы в воздушной матрице. По мере увлажнения глины вода вытесняет воздух, а диэлектрическая проницаемость воды  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  изменяется от  $\varepsilon_x = 3$  (для химически связанной влаги) до  $\varepsilon_{\text{св}} \approx 80$  (для свободной) в функции влагосодержания  $u$  по экспоненциальному закону

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = \varepsilon_{\text{св}} - (\varepsilon_{\text{св}} - \varepsilon_x) \alpha^{-\alpha u}, \quad (2.38)$$

где  $\alpha$  – постоянный коэффициент, зависящий от сорта глины (например,  $\alpha = 0,044$ ).

При использовании (2.38) экспериментальные зависимости  $\varepsilon(u)$  для глины хорошо совпадали с результатами расчета по формуле Бруггемана.

## 2.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛАГОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Характеристиками, используемыми в термовлагометрическом методе, являются зависимости  $\varepsilon'_{\text{см}}$ ,  $\varepsilon''_{\text{см}}$ ,  $\text{tg } \delta$  материала от его влажности, свойств и состояния, а также от условий измерения:

а) влажностные характеристики параметров материала – зависимости  $\varepsilon'_{\text{см}}$ ,  $\varepsilon''_{\text{см}}$ ,  $\text{tg } \delta$  от его влажности  $W$  при постоянных значениях частоты поля  $f$  (длины волны), температуры материала  $t$ , степени уплотнения (для дисперсных материалов) и других величин, влияющих на результаты измерения;

б) частотные характеристики – функции  $\varepsilon'_{\text{см}}(f)$ ,  $\varepsilon''_{\text{см}}(f)$ ,  $\text{tg } \delta(f)$  (или от  $\lambda_r$ ) при постоянстве  $W$ ,  $t$  и других величин, характеризующих состояние материала;

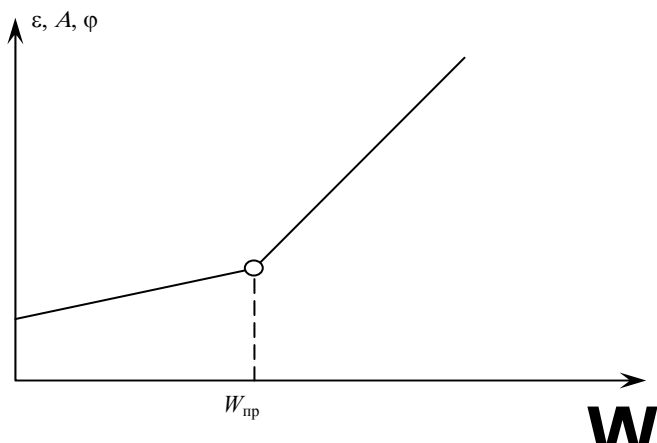
в) температурные характеристики – функции  $\varepsilon'_{\text{см}}(t)$ ,  $\varepsilon''_{\text{см}}(t)$ ,  $\text{tg } \delta(t)$  при постоянстве  $W$ ,  $f$  ( $\lambda$ ) и других факторов;

г) характеристики, описывающие зависимость электрических параметров материала от его состава, плотности, распределения влаги и т.д.

*Влажностные характеристики* служат основой градуировки влагомеров и в значительной степени определяют их метрологические свойства. Линейные влажностные характеристики имеют лишь немногие материалы. К ним относятся некоторые жидкие диэлектрики, у твердых материалов такой характер зависимости встречается реже и только для узких диапазонов влагосодержания.

У подавляющего большинства материалов  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  увеличиваются с ростом влажности быстрее, чем следовало бы при наличии линейного закона; относительная крутизна характеристики  $\operatorname{tg} \delta (W)$ , как правило, больше, чем характеристики  $\epsilon'_{\text{см}}(W)$ ,  $\epsilon''_{\text{см}}(W)$ .

Зависимости  $\epsilon'_{\text{см}}(W)$ ,  $\epsilon''_{\text{см}}(W)$  при разных условиях измерения можно описать монотонно возрастающими функциями. В широком диапазоне влагосодержаний их можно аппроксимировать ломаной прямой, состоящей из двух отрезков с одной сопрягающей – «критической» влажностью  $W_{\text{кр}}$  (рис. 2.15). На участке  $W < W_{\text{кр}}$  крутизна характеристики (и соответствующая ей чувствительность влагомера) значительно меньше, чем на участке  $W > W_{\text{кр}}$ . Такой характер был установлен для зависимостей  $\epsilon'(W)$  и  $\epsilon''(W)$  многих материалов при частотах СВЧ, а также для зависимостей от влажности ослабления  $A$  и фазового сдвига проходящей волны сантиметрового диапазона. Это отражает зависимость электрических свойств материала от состояния и форм связи влаги. Сингулярная точка (с абсциссой, равной  $W_{\text{кр}}$ ) приблизительно соответствует переходу от мономолекулярного слоя к влаге полимолеку-



**Рис. 2.15. Типичная влажностная характеристика капиллярно-пористых материалов**

лярной адсорбции. В области  $W < W_{\text{кр}}$  энергия связи воды весьма значительна и диэлектрическая проницаемость, определяемая в основном электронной и атомной поляризацией, мала и зависит главным образом от  $\epsilon'_2$  сухого вещества. В области преобладания свободной влаги ( $W > W_{\text{кр}}$ ) происходит плавное уменьшение энергии связи, увеличение подвижности молекул воды и связанное с этим увеличение диэлектрической проницаемости системы.

Характеристики материалов, состоящих из компонентов, различных по своим водоудерживающим свойствам (и соответствующим им энергиям связи воды), могут иметь больше одной сингулярной точки. На положение этой точки оказывают некоторое влияние также степень дисперсности системы и частота поля.

Что касается абсолютных значений  $\epsilon'_{\text{см}}$ ,  $\epsilon''_{\text{см}}$ , то при постоянной частоте они определяются (особенно в области  $W > W_{\text{кр}}$ ) не столько электрофизическими параметрами сухого вещества, сколько его водоудерживающими свойствами и пористой структурой.

При сравнении зависимостей  $\epsilon'_{\text{см}}(W)$ ,  $\epsilon''_{\text{см}}(W)$  различных категорий твердых материалов (макропористых, поликапиллярно-пористых, коллоидных-капиллярно-пористых и коллоидных) наблюдается перемещение этих характеристик в сторону оси  $W$  по мере увеличения активной поверхности (площади поверхности микро- и макрокапилляров).



Частотные характеристики влагосодержащих материалов имеют форму, обусловленную неодинаковым влиянием частоты на разные виды поляризации. Это влияние различно в зависимости от содержания, состояния и форм связи влаги в материале; ввиду этого целесообразно рассматривать комбинированные частотно-влажностные характеристики материалов.

Характеристика природы диэлектрических потерь в широком диапазоне частот показывает, что в области низких частот преобладающее значение имеют потери, связанные со сквозной проводимостью. В этом диапазоне значения  $\epsilon$  определяются главным образом медленными видами поляризации; большое значение имеет поверхностная проводимость.

По мере роста частоты возрастает роль релаксационных процессов. В диапазоне от  $10^5$  до  $(10^7 \dots 0,5 \cdot 10^8)$  Гц с ростом частоты наблюдается плавное уменьшение  $\epsilon$ , сначала резкое, а затем замедленное (на СВЧ).

Эталонное вещество должно быть абсолютно чистым, обладать высокой химической устойчивостью с минимальной электропроводимостью и не вступать в химические реакции с материалами датчика. Практически для калибровки используются чаще всего сухой воздух и бензол. Для воздуха  $\epsilon = 1,00058 \pm 0,00001$  при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0 °С. Диэлектрическая проницаемость чистого бензола при 20 °С равна 2,2826, температурный коэффициент  $\Delta\epsilon/\Delta t = -0,0019$ . Кроме того, используются смеси диоксана с водой [53], позволяющие в зависимости от отношения компонентов получить любую величину  $\epsilon$  от 2,235 (для чистого диоксана) примерно до 81 (вода), а также некоторые другие жидкости, перечисленные в табл. 2.1.

Рассмотрим влияние на эти характеристики возмущающих воздействий, связанных с изменениями свойств объекта измерения, которое зависит от параметров апертуры и измерительных устройств и определяет дополнительные погрешности термовлагомеров.

Таблица 2.1

Эталонная жидкость	$\epsilon$ при 20 °С	Эталонная жидкость	$\epsilon$ при 20 °С
Четыреххлористый углерод	2,24	Пиридин	12,4
Трихлорэтилен	3,43	Бензальдегид	13,8
Хлороформ	4,81	О-нитротолуол	27,1
Монохлорбензол	5,54	Метанол	33,8
Хлористый этилен	10,5	Нитробензол	35,7

Температурные характеристики отражают то обстоятельство, что у влагосодержащих материалов температура является второй (после влажности) величиной по степени влияния на электрофизические свойства. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости (относительное изменение на 1 °С), равный  $(1/\epsilon)(\Delta\epsilon/\Delta t)$  для большинства твердых тел положителен и имеет величину, близкую к  $10^{-4}$  град<sup>-1</sup>. Для воды в диапазоне температур  $0 < t < 100$  °С часто используют упрощенное уравнение:  $\epsilon'_{t2} = \epsilon'_{t0} - 0,4(t - t_0)$ .

Коэффициент  $\alpha$  можно считать постоянным в узких пределах изменений влажности  $W$  и температуры  $t$ ; если диапазон изменения этих величин велик, то  $\alpha = f(W, t)$ .

Другим фактором, влияющим на температурные характеристики, является частота  $f(\lambda_r)$  электрического поля. Температурно-частотные характеристики ряда материалов показывают, что понижение частоты усиливает относительное влияние температуры на величину  $\epsilon'_{cm}$ . При всех частотах влияние температуры увеличивается с ростом влажности материала. Такое же влияние оказывает изменение частоты на температурные характеристики  $\text{tg } \delta$  или  $\epsilon''_{cm}$ .

Если рассматривать более широкий диапазон частот, то у многих материалов можно выделить значения (или интервал) частот, для которых влияние температуры на  $\epsilon'_{cm}$ ,  $\epsilon''_{cm}$  минимально.

При измерении влажности твердых материалов температурная поправка прибавляется к результату измерения, если  $t < t_0$ , и вычитается при  $t > t_0$ . Величины температурных коэффициентов определяют экспериментом при градуировке влагомера; иногда целесообразно значения  $k_t$  дифференцировать по диапазонам измеряемой влажности.

При измерениях на СВЧ в свободном пространстве [54] было показано, что для материалов различной структуры и физико-химических свойств справедливо соотношение

$$A = kWR, \quad (2.39)$$

где  $A$  – затухание в материале;  $W$  – влажность;  $R = \rho d$  – массовая толщина;  $k$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий исследуемый материал и не зависящий от  $R$ .

При постоянстве толщины  $d$  слоя материала (размера, параллельного направлению распространения волны) выражение (2.39) можно записать в виде

$$A = k_1 W_{об}, \quad (2.40)$$

ГДЕ  $W_{об}$  – ОБЪЕМНАЯ ВЛАЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА, ХАРАКТЕРИЗУЮЩАЯ В ДАННОМ СЛУЧАЕ МАССУ ВОДЫ, ОТНЕСЕННУЮ К ЕДИНИЦЕ ПЛОЩАДИ «ПРОСВЕЧИВАЕМОГО» МАТЕРИАЛА.

При измерениях на СВЧ размеры частиц (точнее, их соотношение с длиной волны  $\lambda_r$ ) оказывают влияние на отражение, рассеяние и поглощение ими энергии. Считается, что частицы с диаметром больше  $\lambda_r/4$  приводят к повышенному ослаблению. Имеющиеся данные о влиянии рассматриваемого параметра противоречивы.

Наиболее сложным является вопрос о влиянии химического состава материала.

Экспериментальные данные, относящиеся к твердым материалам, свидетельствуют о сильном влиянии химического состава (включая состав непроводящих компонентов) материала на его влажностные характеристики.

Значительно более эффективен переход к измерениям на СВЧ в области сантиметровых и миллиметровых волн. Физически это обосновано превалярованием в указанной области диэлектрических потерь в свободной воде над всеми другими видами потерь и подтверждается рядом экспериментальных данных ( $\omega \epsilon_0 \epsilon''_{см} \gg \gamma_{сквозное}$ ).

## 2.5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАЖНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ «СМЕСЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК»

### 2.5.1. Расчет «смесевых» характеристик $\epsilon'_{см}(W, \lambda, t)$

«Смесевые» характеристики влажностных материалов как системы «сухой материал со связанной влагой – свободная (объемная) влага» рассчитываются по скорректированной формуле Лихтенекера (2.34). Величина  $\alpha$  выбирается из следующих соображений:

1) Все влажные материалы – неупорядоченные смеси (за исключением прямослойной древесины и некоторых других упорядоченно-пористых материалов), и поэтому  $0,5 < \alpha < 1$ . Они представляют среднее между статистическими и матричными смесями.

2) Выбор  $\alpha \approx 0,7$  основан на наилучшем приближении результатов расчета характеристик  $\epsilon'(W, \lambda_r, t)$  для теоретических и экспериментальных зависимостей  $W(\lambda_r, t)$  (см. гл. 5).

Величина  $\epsilon'_1(\lambda_r, t)$  свободной влаги в (2.34) определяется по полученному нами выражению (2.13), а для «сухого» материала со связанной влагой  $\epsilon'_2$  по формуле Рейнольдса–Хью (2.37) как смесевая характеристика системы «сухой материал – связанная влага»:

$$\epsilon'_2 = \epsilon'_{2см} = \epsilon'_{2сух} + \epsilon'_{2сух} W_{св.в} (\epsilon'_{1св.в} - \epsilon'_{2сух}) [\epsilon'_{2сух} + A(\epsilon'_{1св.в} - \epsilon'_{2сух})]^{-1}, \quad (2.41)$$

где  $\epsilon'_{2 \text{ сух}}$  – величина  $\epsilon$  для сухого материала (табл. 2.2);  $\epsilon'_{1 \text{ св.в}}$  – диэлектрическая проницаемость связанной влаги ( $\epsilon'_{\text{св.в}} \in [4,5; 5,8]$ ).

В отличие от величины  $\epsilon'_1(\lambda_{\Gamma}, t)$ , величина  $\epsilon'_2$  инвариантна  $\lambda_{\Gamma}$  и  $t$ , так как:

а) величина  $\epsilon'_{1 \text{ св.в}}$  инвариантна  $\lambda_{\Gamma}$  и  $t$ ;

б) так как температурный коэффициент действительной части диэлектрической проницаемости ТК  $\epsilon'_2$  сухого материала порядка  $10^{-4} 1/^\circ\text{C}$ , то изменением температуры  $\pm 20^\circ\text{C}$  от номинальной ( $t_{\text{ном}} \approx 20^\circ\text{C}$ ) с погрешностью менее 0,2 % можно пренебречь, поляризационная дисперсия же в микроволновом диапазоне СВЧ отсутствует. Величина  $W_{\text{св.в}}$  не превышает 0,05 [55].

Величина деполаризационного фактора  $A = 0,33$  для неорганических строительных материалов наилучшим образом по разным экспериментальным данным соответствует распределению связанной влаги в сухом материале. Данные по расчету величин  $\epsilon'_{2\text{см}}$  и другие вспомогательные величины сведены в табл. 2.2.

### 2.5.2. Расчет величин $\epsilon'_{\text{см}}$ и $\epsilon''_{\text{см}}$ строительных материалов на основе «смесевых» характеристик

Для «сухого» материала со связанной влагой расчет величины  $\epsilon'_{2\text{см}}$  проводится по (2.41), результаты для указанных материалов сведены в табл. 2.2 (величина  $A = 0,33$  для неорганических строительных материалов наилучшим образом по разным данным соответствует распределению связанной влаги в сухом строительном материале). Величина  $\epsilon'_{2\text{см}}$  инвариантна  $\lambda_{\Gamma}$  и  $t$ .

Величина  $\epsilon'_{\text{см}}$  материала со свободной влагой, т.е. с влажностью  $W \in [0,05; 0,3]$  рассчитывается по модифицированному выражению (2.34) с учетом выражения  $\epsilon'(\lambda_{\Gamma}, t)$  для свободной воды (2.13):

$$\epsilon'_{\text{см}}(W, \lambda_{\Gamma}, t, \alpha) = \epsilon'_{1}(\lambda_{\Gamma}, t, \alpha)^{W\alpha} \epsilon'_{2\text{см}}(1 - W\alpha). \quad (2.42)$$

Ниже приведем расчетные зависимости для влажных образцов кирпича (красного). В прил. П1 дан расчетный справочный материал для разных строительных материалов для зависимостей  $\epsilon'_{\text{см}}$  от  $W, \lambda, t$ , согласно табл. 2.2.

На рис. 2.16. показаны частотные характеристики  $\epsilon'_{\text{см}}(\lambda_{\Gamma})$  при  $t_{\text{ном}}$  и разной величине  $W$  (сравните с рис. 2.8, где они даны для чистой воды).

Очевидна необходимость минимизации величин рабочих длин волн.

Важнейшие влажностные характеристики  $\epsilon'_{\text{см}}(W)$  при  $t_{\text{ном}}$  и для разных длин волн рабочего диапазона показаны на рис. 2.17. Характеристики весьма близки к линейным: тем к ним ближе, чем выше частота (меньше  $\lambda_{\Gamma}$ ).

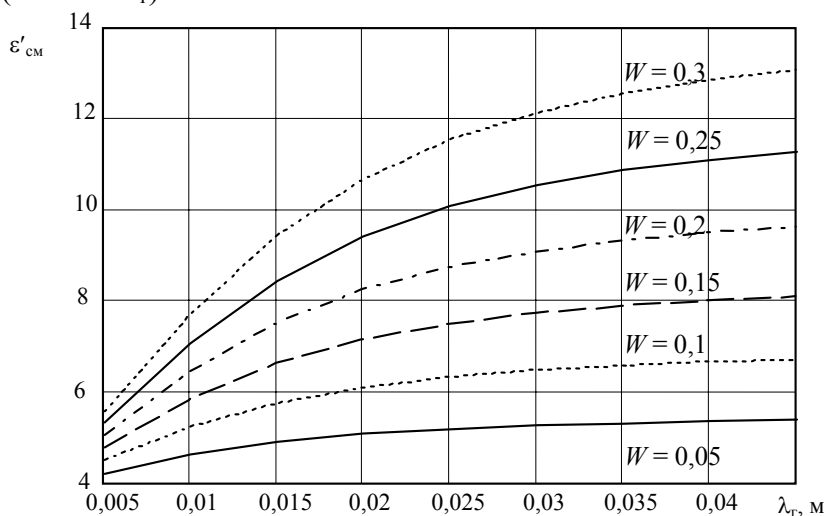


РИС. 2.16. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  $\epsilon'_{см}(\lambda_{Г})$

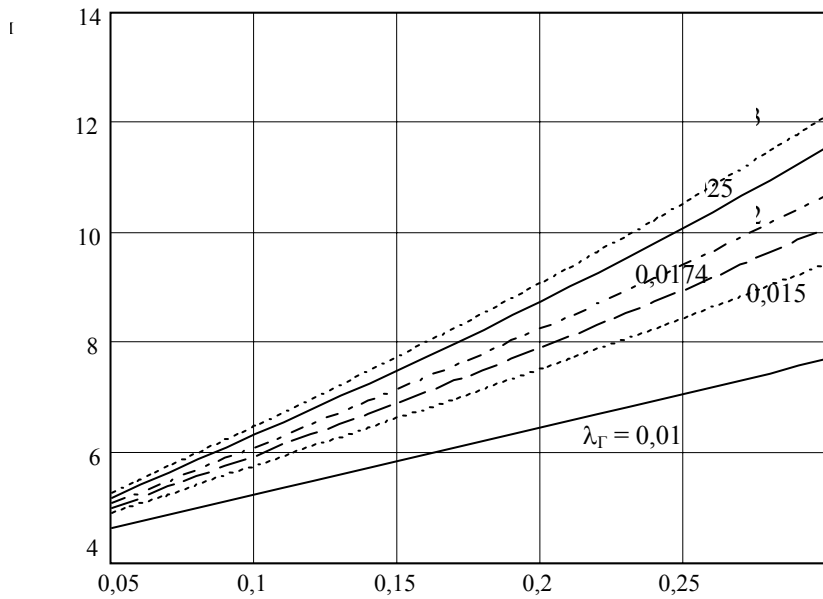


РИС. 2.17. ВЛАЖНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  $\epsilon'_{см}(W)$

Для критической длины волны ( $\lambda_{кр} = 0,0174$  м) на рис. 2.18 показаны влажностно-температурные зависимости  $\epsilon'_{см}$ . Работа в диапазоне  $\lambda_{Г}$ , близких к  $\lambda_{кр}$ , которая зависит только от температуры, обеспечивает максимальное поглощение энергии падающей волны в материал, т.е. близкое к максимальному значению величины смесевой характеристики  $\epsilon''_{см}$ , и, следовательно, минимальное значение глубины зоны проникновения (зоны нагрева).

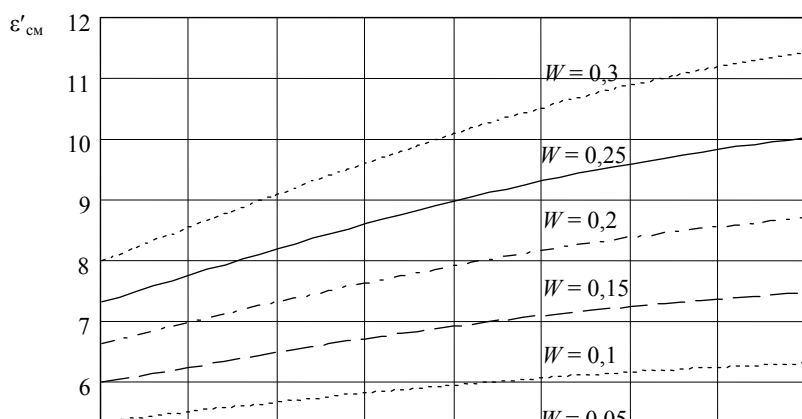
Температурные зависимости  $\epsilon'_{см} = f(t)$  при  $\lambda = 0,0174$  м и  $W \in [0,05; 0,3]$  показаны на рис. 2.19.

Смесевые характеристики поглощения материалом энергии падающей волны, т.е. зависимости  $\epsilon''_{см}(W, \lambda_{Г}, t)$ .

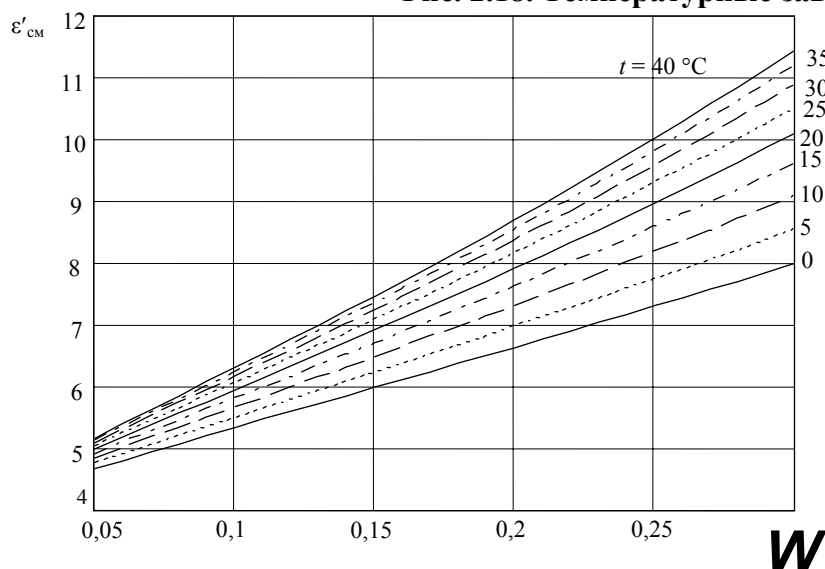
Величина  $\epsilon''_{см}$  определяет потери СВЧ-энергии на нагрев влажного материала и, следовательно, информативную величину  $\Delta t = \Phi(W)$ , где  $W$  – средняя влажность по объему нагрева (взаимодействия). Так как омическими (сквозная проводимость) потерями в сухом материале можно пренебречь (см. далее) с учетом того, что  $\text{tg } \delta$  (табл. 2.2) у всех материалов много меньше 1, то очевидно, что величина  $\epsilon''_{см}$  и потери прямо пропорциональны объему свободной влаги в материале, т.е. величина объемной влажности:

$$\epsilon''_{см} = k\epsilon'' = W\epsilon'', \quad (2.43)$$

где величина  $\epsilon''$  определяется выражением (2.14).



**Рис. 2.18. Температурные зависимости  $\epsilon'_{см}(t)$**



**Рис. 2.19. Влажностные характеристики  $\epsilon'_{см}(W)$  при разной температуре**

Заметим, что максимально возможное значение  $W$  определяется пористостью материала  $P$ , %, т.е.  $W_{max} = P$ , приведем примеры  $W_{max}$  для некоторых строительных материалов по [56].

Так, например для кирпича красного при  $\rho = 2100 \text{ кг / м}^3$ :  $W_{max} = P = 20\% = 0,2$ ; кирпича шлакового при  $\rho = 1100 \text{ кг / м}^3$ :  $W_{max} = P = 0,57$  и т.д.

Естественно такая величина  $W_{max}$  практически недостижима, т.е. заявленный верхний предел  $W_{max} = 0,3$  вполне адекватен.

### 2.5.3. Определение границ применимости термовлагодетрического микроволнового метода по минимуму необходимой толщины строительных материалов

Понятие «глубины проникновения» микроволнового поля «плоской волны» во влажном строительном материале является основополагающим в разработанных нами методах микроволновой термовлагодетрии [57]. Через величину глубины проникновения определяется величина локального объема взаимодействия (глубина зоны взаимодействия), температура которой функционально связана с объемной влажностью материала (при постоянной мощности падающей волны СВЧ-нагрева и при минимуме отраженной мощности, соответствующей углу падения Брюстера).

Потери в «сухом» стройматериале (со связанной водой) пренебрежимо малы по сравнению с потерями проводимости  $\gamma_{п.т}$  воды по постоянному току. «Сухой» материал практически изолятор:  $\gamma_{сух} \ll \gamma_{п.т}$ , даже для дистиллированной воды, у которой  $\gamma_{п.т} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$ , не говоря уж об обычной природной воде с ее  $\gamma_{п.т} \approx 10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ См/м}$ . Предельно возможная  $\gamma_{п.т}$  морской воды (мы не говорим о растворах щелочей

и кислот) при максимальной солености 10 г соли/кг воды при  $t = 30$  °С составляет 6,6 См/м. По [41, т. I, с. 398, 399] интегральная проводимость (сквозная + релаксационная):

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{п.т} + \omega \varepsilon''_{см} \varepsilon_0. \quad (2.44)$$

Оценим соотношение между величинами  $\gamma_{п.т}$  и  $\omega \varepsilon''_{см} \varepsilon_0$ . Минимальная частота диапазона  $f_{\min} = 10^{10}$  Гц = 10 ГГц ( $\lambda_{\Gamma} = 3$  см);  $\varepsilon_0 = 10^{-9} / 36\pi$  Ф/м; величина  $\varepsilon''_{см \min}$  (см. график  $\varepsilon''_{см} = \Phi(\lambda_{\Gamma}, t)$ )  $\varepsilon''_{см \min} \approx 23$  (при  $t = 0$  °С,

$\lambda_{\Gamma} = 3$  см), откуда  $\omega_{\min} \varepsilon_0 \varepsilon''_{см \min} = 2\pi f_{\min} (10^{-9} / 36\pi) \varepsilon''_{см \min} = 12,8 \gg \gamma_{п.т \max} = 10^{-2}$ , таким образом можно считать  $\gamma_{\Sigma} \approx \omega \varepsilon''_{см} \varepsilon_0$ .

Если же нет данных о проводимости свободной воды  $\gamma_{п.т}$ , то следует проводить контрольные контактные измерения величины  $\gamma_{п.т}$  кондуктометрическими методами постоянного тока или рассчитывать  $\gamma_{п.т}$  смеси «сухой» материал + свободная влага по оптимально выбранной формуле смешения.

«Глубина» проникновения поля плоской волны в материал с потерями определяется по известному выражению [2] для немагнитных материалов:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \gamma_{\Sigma}}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{см}}} = \frac{0,225 \lambda_{\Gamma}}{\sqrt{\varepsilon''_{см}}}, \text{ м}. \quad (2.45)$$

Минимальная толщина материала  $b$  (м) должна обеспечивать полное поглощение СВЧ-поля преломленной «плоской» волны. Учитывая, что волна затухает в « $e = 2,718...$ » раз на пути в  $\Delta$ , примем, что  $b_{\min} \geq 5\Delta_{\max}$ , где  $\Delta_{\max}$  соответствует  $\varepsilon''_{см \min}$  и  $\lambda_{\max}$ .

Величина  $\lambda_{\max} = 3 \cdot 10^{-2}$  м, а  $\varepsilon_{см \min}$  соответствует  $W_{\min} = 0,05$ , и тогда  $\varepsilon_{см \min}$  определяется по (2.43), где  $\varepsilon''_{см \min} > 1,8$ . Примем для страховки  $\varepsilon''_{см \min} \approx 1$ .

Затухание поля на расстоянии  $5\Delta_{\max}$  составляет величину  $e^5 > 100$  или  $20 \lg e^5 = 43,43$  дБ, т.е. полем на большей глубине (и потерями его на нагрев на расстоянии больше  $5\Delta_{\max}$ ) можно пренебречь. Таким образом,  $b_{\min} \geq 5\Delta_{\max} \approx 3,375 \cdot 10^{-2}$  м и минимальная величина образцов материала должна быть больше 3,5 см. Это сильно завышенная оценка, так как рабочая  $\lambda_{\Gamma}$  должна быть как можно меньше (из условия применения стандартных волноводов прямоугольного сечения и удобства изготовления щелевых противофазных излучателей:  $\lambda_{\text{раб}} \in [1; 2] \cdot 10^{-2}$  см). Кроме того общепринятой величиной «пути полного затухания» является  $3\Delta$ . Следовательно, реальная величина  $b_{\min} \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$  м.

Для более тонких материалов применяется разработанный нами метод поверхностных волн [5]. На рис. 2.20 показаны частотные зависимости высоты зоны нагрева при различных величинах влажности и температуры.

Расчет производился по (2.45) с учетом (2.43) и (2.14). Практически высота зоны  $h$  в области длин волн, близких к критическим, инвариантна температуре, это еще один критерий выбора рабочего диапазона длин волн генератора.

$h = 5\Delta \leq b_{\min}, \text{ м}$

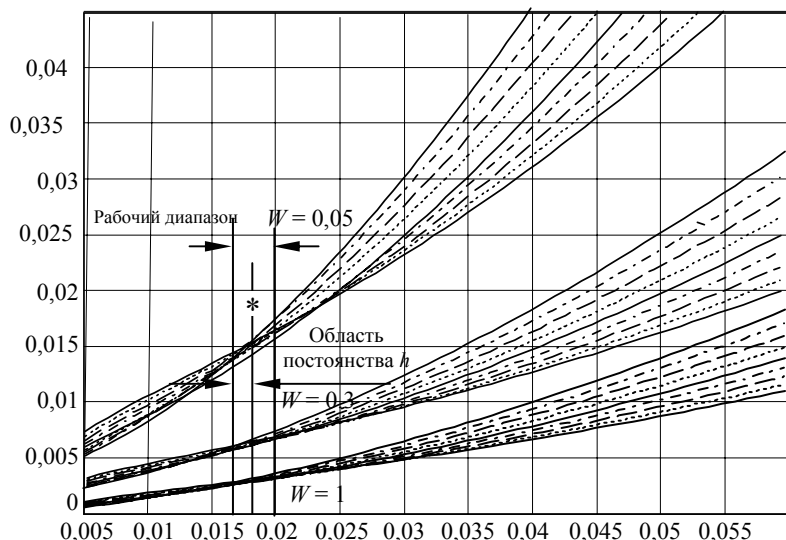


Рис. 2.20. Частотная зависимость высоты зоны нагрева  $h$ 

<b>3. ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И НАПРАВЛЕННОСТИ</b>	<b>ПРОЕКТИРОВАНИЕ С УПРАВЛЕНИЕМ ЧАСТОТНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ</b>	<b>ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ АПЕРТУРНЫХ СКАНИРОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ</b>
---	--	---

Данная глава написана на основе большого количества источников и адаптирована для разработчиков апертурных систем, позволяющих управлять размерами и местом локализации зоны информативного взаимодействия поля СВЧ с исследуемым материалом (библиография дана в подзаголовках).

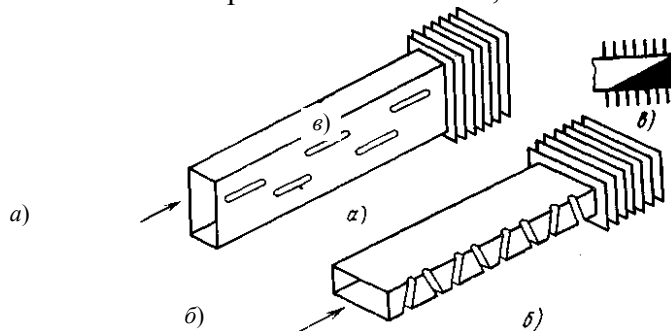
### 3.1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ [58 – 61]

Антенны с электронным управлением лучом позволяют с большой скоростью менять положение диаграммы направленности (ДН) по углу  $\theta$  в требуемом секторе без громоздких механических устройств, необходимых в антеннах при неэлектрическом управлении лучом.

Частотное управление лучом антенны является одним из способов электрического управления и основано на изменении электрического расстояния между излучателями, возбуждаемыми бегущей волной, при изменении частоты генератора или  $\lambda_r$ . При этом способе управления лучом для осуществления «качания» ДН в достаточно большом секторе требуется генератор с электрической перестройкой частоты в широком диапазоне.

В антеннах СВЧ с частотным управлением лучом излучатели, как правило, расположены непосредственно на возбуждающей системе. На рис. 3.1 показаны линейные решетки излучателей, прорезанные на одной из стенок прямоугольного волновода. Для получения управляемой «карандашной» (с малой величиной ширины ДН –  $2\Delta\theta_{0,5}$ ) диаграммы направленности необходима двумерная решетка излучателей. Подобную решетку можно создать из линейных решеток, расположенных определенным образом на заданной поверхности. Некоторые возможные варианты таких антенн показаны на рис. 3.2.

В антеннах, представляющих собой линейные решетки излучателей, возбуждение чаще всего осуществляется по последовательной или параллельной схемам, показанным на рис. 3.3.



**Рис. 3.1. Волноводно-щелевые решетки излучателей:**

*a* – с продольными щелями на широкой стенке;  
*б* – с наклонными щелями в узкой стенке; *в* – согласующая нагрузка

Направление излучения линейной решетки при эквидистантном расположении излучателей (рис. 3.3) определяется уравнением

$$\sin \theta = \frac{l_d}{d} \gamma - p \frac{\lambda_r}{d}, \quad (3.1)$$

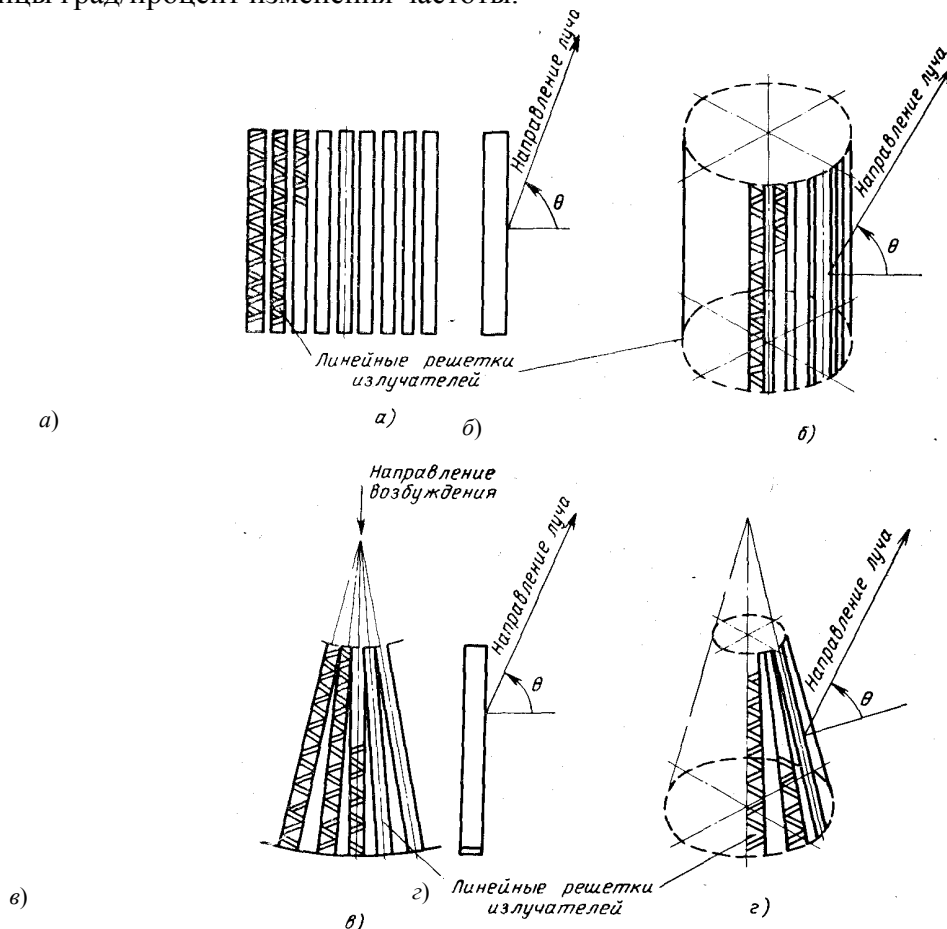
где  $\theta$  – угол отклонения луча от нормали к оси решетки излучателей;  $\gamma = c/V$  – замедление фазовой скорости  $v$  в канализирующей системе, возбуждающей излучатели;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;  $\lambda_r$  – длина волны генератора;  $p = n + (\Phi/2\pi)$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  – номер луча;  $\Phi$  – фиксированный сдвиг по фазе между соседними излучателями, обусловленный включением дополнительных фазовращателей (рис. 3.3, *в*);  $l_d$  – геометрическая разность длин канализирующих систем двух соседних излучателей;  $d$  – расстояние между излучателями.

При изменении частоты генератора вследствие зависимости  $\gamma$  и  $\lambda_r/d$  от частоты  $f$  угол излучения меняется, и луч антенны движется в пространстве.

Углочастотной чувствительностью антенны называют скорость изменения положения луча антенны в пространстве при изменении частоты (длины волны) и выражается она в градусах на процент изменения частоты (длины волны):

$$A = \frac{\partial \theta}{\partial \lambda_r / \lambda_r} = \frac{0,573}{\cos \theta} \left( -\frac{l_d}{d} \gamma_{гр} + \sin \theta \right), \quad (3.2)$$

где  $\gamma_{гр} = c/V_{гр}$  – замедление групповой скорости  $V_{гр}$  волны, распространяющейся в канализирующей системе; коэффициент 0,573 служит для перевода углочастотной чувствительности из безразмерных единиц в единицы град/процент изменения частоты.





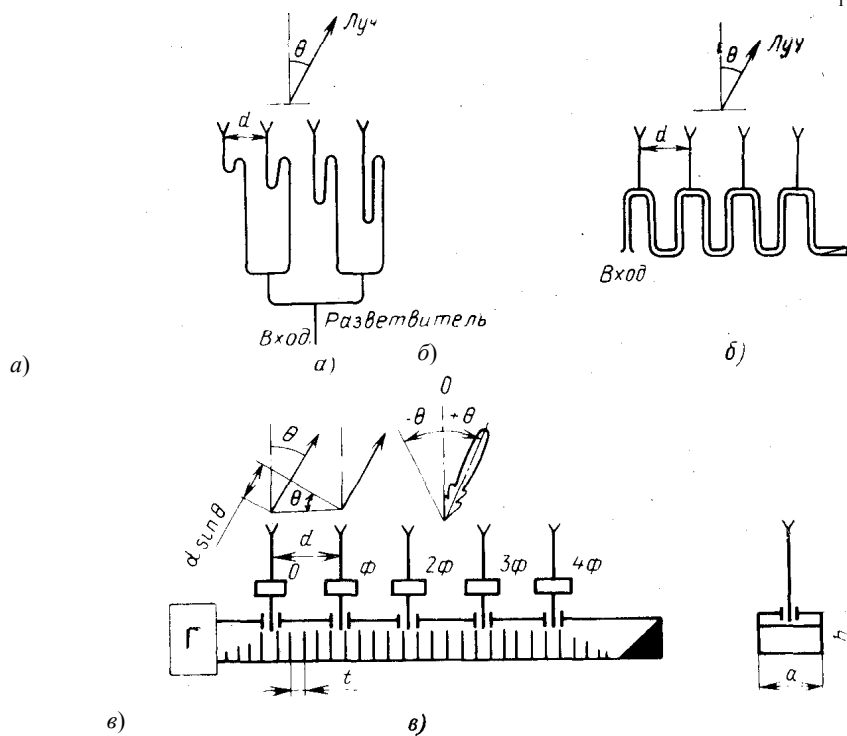
**Рис. 3.2. Антенны, образованные линейными решетками излучателей:**

*a* – плоская двумерная решетка; *б* – двумерная решетка, расположенная на цилиндрической поверхности; *в* – плоская «веерообразная» двумерная решетка; *г* – двумерная решетка, расположенная на конической поверхности

Из выражения (3.2) следует, что углочастотная чувствительность зависит от положения луча, дисперсионных свойств системы и соотношения  $l_d / d$ . Чем больше  $\theta$  и  $(l_d / d)\gamma_{гр}$ , тем выше углочастотная чувствительность.

Замедления групповой и фазовой скоростей связаны выражением

$$\gamma_{гр} = \gamma - \lambda_{г} \frac{d\gamma}{d\lambda_{г}} \quad (3.3)$$



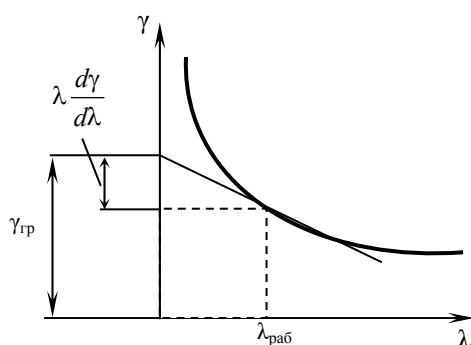
**Рис. 3.3. Линейная решетка излучателей с возбуждением:**

*a* – по параллельной схеме; *б* – по последовательной схеме; *в* – возбуждение излучателей периодической замедляющей системой

Если известна дисперсионная характеристика канализирующей системы  $\gamma = \gamma(\lambda_{г})$  (рис. 3.4), то  $\gamma_{гр}$  определяется графически отрезком на оси ординат, отсекаемым касательной к кривой  $\gamma(\lambda_{г})$ , проведенной через точку, соответствующую величине  $\gamma$  в системе, как это показано на рис. 3.4.

Повышение углочастотной чувствительности антенны требует использования канализирующих систем с высоким значением  $\gamma_{гр}$ .

Ширина диаграммы направленности и КПД зависят также от закона распределения излучаемой мощности вдоль решетки. На практике получили растространение законы распределения: экспоненциальный, когда каждый излучатель излучает одинаковую долю подходящей к нему мощности бегущей волны; равномерный, когда каждый излучатель излучает одинаковую мощность, и другие специальные виды распределения (например, симметричное относительно центра решетки и спадающее к ее краям).



**Рис. 3.4. Дисперсионная характеристика  $\gamma(\lambda_r)$  замедляющей системы**

Ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности при излучении вблизи нормали к оси решетки определяется по формуле

$$2\Delta\theta_{0,5} = 50,7 \frac{\lambda_r}{l}, \quad (3.4)$$

где  $l$  – длина решетки.

Ширина диаграммы направленности зависит от относительной величины мощности, доходящей до конца решетки. При  $P_l / P_0 = 0,05$  (коэффициент использования раскрыва при этом равен 0,83):

$$2\Delta\theta_{0,5} = 54,4 \frac{\lambda_r}{l}. \quad (3.5)$$

Как следует из выражения (3.1), направление луча решетки излучателей в пространстве зависит от дополнительного фиксированного фазового сдвига  $\Phi$  в возбуждающем устройстве между соседними излучателями.

Достаточно просто можно реализовать дополнительный фазовый сдвиг  $\pi$ . Например, при использовании в качестве канализирующей системы прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  фазовый сдвиг, равный  $\pi$ , можно получить, применив излучающие щели, переменного-фазно связанные с полем волновода.

При перемещении луча в пространстве происходит изменение формы главного лепестка диаграммы направленности. По мере отклонения к оси решетки главный лепесток расширяется и становится несимметричным относительно направления  $\theta$ . Изменение ширины главного лепестка будет небольшим при сканировании в угловом секторе вблизи нормали к оси решетки и резко возрастает по мере приближения к оси решетки. Сохранить неизменной ширину главного лепестка при широкоугольном сканировании теоретически возможно, но практически трудно.

Ширина главного лепестка на уровне половинной мощности с учетом его несимметрии для решетки длиной  $l \gg \lambda_r$  с равномерным распределением излучаемой мощности может быть оценена по соотношению

$$2\Delta\theta_{0,5} = \arcsin\left(\frac{0,443\lambda_r}{l} + \sin\theta\right) + \arcsin\left(\frac{0,433\lambda_r}{l} - \sin\theta\right). \quad (3.6a)$$

При осевом излучении ширина главного лепестка оказывается в  $2,14\sqrt{l/\lambda_r}$  раза больше ширины главного лепестка при излучении по нормали.

Изменение ширины главного лепестка при его движении может быть объяснено изменением эффективной длины (под эффективной длиной понимается длина равномерной синфазной линейной решетки, дающей на уровне половинной мощности диаграмму направленности такой же ширины, что и рассматриваемая решетка)  $l_{\text{эф}}$  решетки излучателей и амплитудного распределения вдоль нее. Величина  $l_{\text{эф}}$  в первом приближении для углов  $\theta < 70 \dots 75^\circ$  (в зависимости от длины решетки  $l$ ) может быть определена как проекция длины решетки  $l$  на направление, перпендикулярное к главному максимуму направленности:

$$l_{\text{эф}} \cong l \cos\theta. \quad (3.6б)$$

При  $l/\lambda_r \geq 10$  это допущение уже хорошо оправдывается. Так, ошибка в определении  $l_{эф}$  по формуле (3.6а) при  $l/\lambda_r = 10$  и  $\theta = 70^\circ$  составляет  $\sim 1,5\%$  по отношению к значению  $l_{эф}$ , определенному по более строгой формуле (см. [58, с. 354]).

В некоторых случаях допустимое расширение главного лепестка может ограничивать сектор сканирования.

Неотъемлемой частью антенны с частотным сканированием является перестраиваемый по частоте генератор. Точность определения положения луча в пространстве зависит от стабильности и точности установки заданной частоты в таком генераторе. В настоящее время имеются генераторы сантиметрового диапазона волн, электрически перестраиваемые в достаточно широком диапазоне частот (от  $\pm 10\%$  до октавы). Диапазон частотной перестройки генератора в значительной мере зависит от его мощности и рабочей частоты. Соответственно имеются и широкополосные усилители, которые могут быть использованы в приемном устройстве.

В ряде случаев для возбуждения антенны можно использовать возбудители, выполненные по сложной схеме и содержащие генератор сравнительно небольшой мощности с широкой электронной перестройкой частоты и широкополосные мощные усилители. В тех случаях, когда требуемый диапазон частот нельзя перекрыть одним усилителем, используют несколько усилителей, при этом каждый из них работает в отведенной ему части диапазона рабочих частот. Такой способ может быть использован в случае, когда требуется менять направление луча в пространстве при сохранении сектора его качания.

Однако при проектировании антенны с частотным сканированием следует помнить, что использование широкого диапазона частот потребует применения излучателей, переходных и развязывающих элементов и т.п., имеющих широкую полосу пропускания и обладающих в этой полосе малым затуханием. Иначе могут наблюдаться значительные изменения излучаемой антенной мощности и формы диаграммы направленности при изменении частоты.

### **3.2. Канализирующие системы антенн с частотным сканированием [59]**

В конструкциях антенн сантиметрового диапазона волн с частотным сканированием излучатели, как правило, расположены непосредственно на возбуждающих канализирующих системах (например, линейная решетка щелевых излучателей, прорезанных в одной из стенок прямоугольного волновода), которые могут выполняться на основе волноводов, коаксиальных линий и т.п. Электрические свойства этих канализирующих систем оцениваются замедлением фазовой скорости  $\gamma$ , дисперсионной характеристикой  $\gamma = \gamma(\lambda_r)$  и коэффициентом затухания  $\alpha$ .

Основные требования к канализирующим системам можно свести к следующим.

1. Величина замедления фазовой скорости  $\gamma$  не должна быть большой, так как с ростом  $\gamma$  увеличиваются потери в канализирующей системе и требуется большая точность изготовления системы. Последнее связано с тем, что незначительные относительные изменения  $\gamma$  могут привести в ряде случаев к нарушению нормальной работы антенны.

2. Коэффициент затухания  $\alpha$  должен быть возможно меньшим в связи с тем, что от его величины зависит КПД антенны, а также возможная ширина диаграммы направленности (при заданном КПД).

3. Канализирующая система должна допускать расположение излучателей на расстоянии  $d \approx \lambda_r / 2$  в осевом направлении во избежание многолепестковости диаграммы направленности при отклонении главного лепестка к оси решетки.

4. В двумерной решетке поперечные размеры канализирующих систем должны допускать такое взаимное расположение систем в антенне, чтобы расстояние между излучателями соседних линейных решеток не превышало  $\lambda_r$ . В противном случае диаграмма направленности будет многолепестковой.

5. Канализирующая система должна иметь по возможности малые вес и габариты. Это особенно важно практически (см. разд. 4.3) для антенн летательных аппаратов.

Рассмотрим наиболее приемлемые для реализации волноводные канализирующие системы (рис. 3.5).

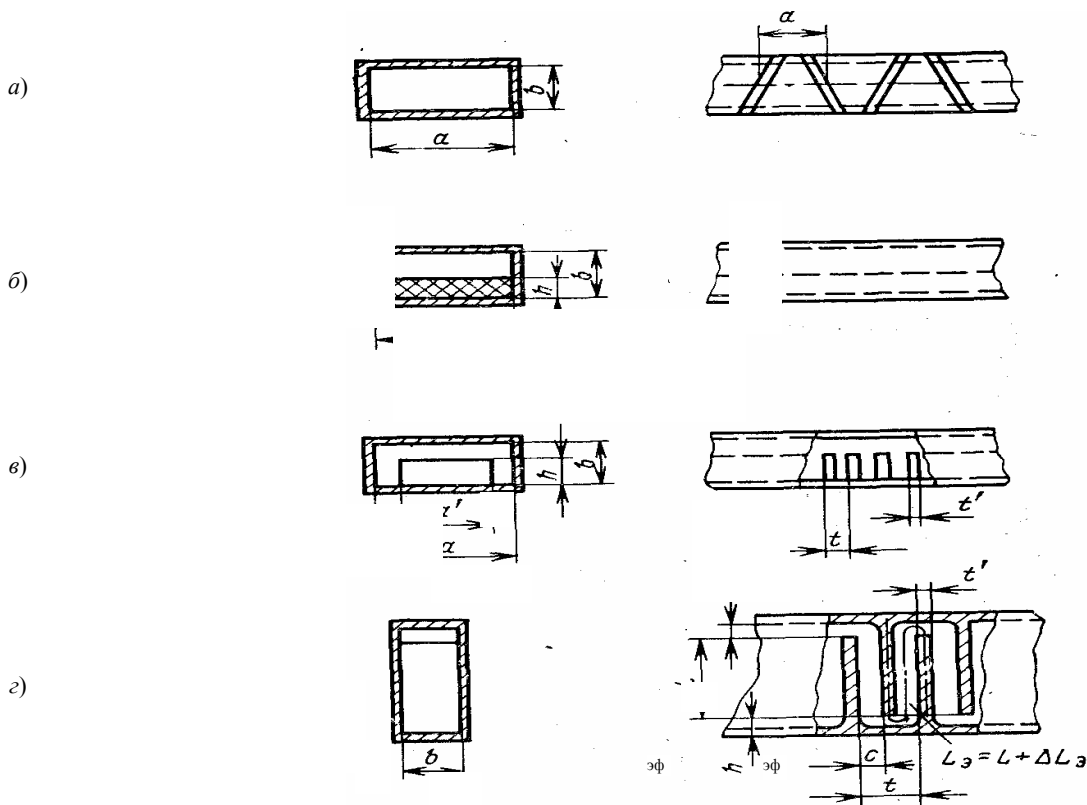


РИС. 3.5. ВОЛНОВОДНЫЕ КАНАЛИЗИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ АНТЕНН С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ:

*a* – прямоугольный волновод со щелями, переменнo-фазно связанными с полем волны  $H_{10}$  волновода; *б* – прямоугольный волновод, частично заполненный диэлектриком; *в* – прямоугольный волновод с помещенной в него ребристой структурой; *г* – змейковый прямоугольный волновод

а) Прямоугольный волновод с волной  $H_{10}$ . Замедление  $\gamma$  лежит в пределах от 0 до 1. Практически используемый диапазон  $\gamma = 0,36 \dots 0,86$ . Углочастотная чувствительность волновода невелика и в среднем колеблется от десятых долей до единиц градусов на процент изменения частоты. Коэффициент затухания в 3-сантиметровом диапазоне волн составляет около 0,5 дБ/м, что при КПД  $\eta_A = 90\%$  позволяет получить ширину диаграммы направленности порядка  $1^\circ$ . Использовался нами на волне  $\lambda_r = 2$  см.

б) Прямоугольный волновод, частично заполненный диэлектриком. Замедление  $\gamma$  может регулироваться толщиной диэлектрика и величиной его диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Обычно величина замедления лежит в пределах  $0,7 \dots 1,5$ . Коэффициент затухания в несколько раз больше, чем у регулярного волновода ( $\alpha$  порядка 1,2 дБ/м в 3-сантиметровом диапазоне волн), и зависит от угла потерь диэлектрика и толщины  $h$ . Недостатком этой системы является требование однородности диэлектрических свойств используемого диэлектрика и трудности изготовления (нами не применялся).

в) Волновод с ребристой структурой. Замедление  $\gamma > 1$  и практически может быть получено любым способом. Система имеет большую дисперсию и высокую углочастотную чувствительность. Коэффициент затухания в 3-сантиметровом диапазоне при малых  $\gamma$  ( $\gamma = 1 \dots 2$ ) составляет около 2 дБ/м. Система имеет большой вес по сравнению с регулярным волноводом и требует высокой точности изготовления. Использовался нами при предварительных исследованиях на волне  $\lambda_r = 3$  см.

г) Змейковый волновод. Замедление  $\gamma > 1$  и может регулироваться в значительных пределах изменением длины  $(L + \Delta L_э)$ , при этом в широких пределах регулируется углочастотная чувствительность. Коэффициент затухания в этой системе в 3-сантиметровом диапазоне волн меньше, чем в системах с такой же величиной углочастотной чувствительности (например, волновод с ребристой структурой), и составляет при  $\gamma \approx 2,5$  около 0,7 дБ/м. К недостаткам системы следует отнести значительный вес, большой размер  $(L + \Delta L_эф)$  и сложность изготовления (не применяли из-за технологических трудностей).

Канализирующая система типа прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  имеет ряд ценных качеств: малые потери, относительно небольшие вес и габариты, хорошо освоенную технологию изготовления. Поэтому в антенной технике линейные решетки излучателей, возбуждаемые такого вида канализирующей системой, получили широкое распространение. Максимальный теоретический сектор сканирования волноводной антенны с излучателями, переменнo-фазно связанными с полем волновода без учета час-

тотных свойств излучателей и элементов связи с ними, составляет угол от  $-90^\circ$  до  $+14^\circ$  при изменении замедления от 0,22 до 0,867 и отношения  $\frac{\lambda_r}{2a}$  от 0,975 до 0,5. Указанному сектору сканирования соответствуют изменение длины волны в 1,95 раза и средняя углочастотная чувствительность –  $1,61^\circ$  на 1%. Коммутация направления бегущей волны в такой антенне позволяет перекрывать сектор сканирования, равный  $180^\circ$ .

Ниже приводятся основные соотношения и методика расчета волноводно-щелевой антенны с частотным сканированием, в которой в качестве канализирующей системы используется регулярный прямоугольный волновод с волной  $H_{10}$ .

### 3.3. ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ [59, 61]

Волноводно-щелевая антенна (апертура) (ВВЩА) показана на рис. 3.1. В качестве канализирующей системы такой антенны используется прямоугольный регулярный волновод с волной  $H_{10}$ . Излучателями антенны являются щели, прорезанные в одной из стенок волновода.

С одного конца эта антенна возбуждается от генератора, а к другому концу присоединяется согласующая нагрузка для обеспечения работы антенны в режиме бегущей волны.

Основные характеристики регулярного волновода с волной  $H_{10}$  (рис. 3.5, а) определяются следующими соотношениями.

#### 1. Замедление фазовой скорости

$$\gamma = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_r}{2a}\right)^2}, \quad (3.7)$$

где  $\lambda_r$  – длина волны генератора, см;  $a$  – размер поперечного сечения волновода в плоскости  $H$ , см.

#### 2. Замедление групповой скорости

$$\gamma_{гр} = \frac{1}{\gamma}. \quad (3.8)$$

Это следует из известного соотношения для волновода  $V_{гр}V = c^2$  или  $\gamma_{гр}\gamma = 1$ .

#### 3. Углочастотная чувствительность

$$A = \frac{\partial \theta}{\partial \lambda_r / \lambda_r} = \frac{0,573}{\cos \theta} (-\gamma_{гр} + \sin \theta) = \frac{0,573}{\cos \theta} \left( -\frac{1}{\gamma} + \sin \theta \right). \quad (3.9)$$

Согласно формуле (3.7) замедление фазовой скорости может меняться от 0 до 1 и, казалось бы, что углочастотную чувствительность можно получить сколь угодно большой. Однако диапазон изменения  $\gamma$ , который можно реализовать, значительно уже. Это объясняется тем, что при  $\lambda_r \rightarrow \lambda_{кр} = 2a$  ( $\gamma \rightarrow 0$ ) резко возрастают потери и падает мощность  $P_{пред}$ .

Нижний предел  $\gamma$  можно найти, если допустить увеличение потерь примерно в два раза по сравнению с обычным волноводом. При этом  $\lambda_r \approx 1,9a$  или  $\lambda_r / 2a = 0,95$  и  $\gamma_{мин} = 0,36$ . Верхний предел  $\gamma$  связан с требованием подавления волны типа  $H_{20}$ , возникающей при условии  $\lambda_r = a$  или  $\lambda_r / 2a = 0,5$ . При этих условиях  $\gamma_{макс} = 0,867$ . Таким образом, замедление фазовой скорости  $\gamma$  ограничено значениями  $0,867 \geq \gamma \geq 0,36$  и замедление групповой скорости  $\gamma_{гр}$  соответственно –  $2,77 \geq \gamma_{гр} \geq 1,15$ .

Направление излучения линейной решетки излучателей, возбуждаемого волной, бегущей вдоль решетки, определяется согласно уравнению (3.1) при  $l_d = d$  по формуле

$$\sin \theta = \gamma - n \frac{\lambda_r}{d} \quad (3.10)$$

для излучателей, синфазно связанных с полем волновода ( $\Phi = 0$ ), и

$$\sin \theta = \gamma - (n + 0,5) \frac{\lambda_r}{d} \quad (3.11)$$

для излучателей, переменнo-фазно связанных с полем волновода ( $\Phi = \pi$ ).

Качание луча при изменении частоты будет происходить за счет изменения  $\gamma$  и  $\lambda_r$ .

Для удобства анализа и решения уравнений (3.10) и (3.11) в [62, рис. 2.9, с. 38, рис. 2.10, с. 39 и рис. 2.11, с. 40] представлены графики зависимости  $\lambda_r/d$  от  $\gamma$  при различных величинах параметра  $2a/d$ , построенные по соотношению, полученному из выражения (3.7):

$$\frac{\lambda_r}{d} = \frac{2a}{d} \sqrt{1 - \gamma^2}. \quad (3.12)$$

На этих рисунках приведена также сетка линий зависимости  $\lambda_r/d$  от  $\gamma$  при различных углах наклона луча  $\theta$  для  $n = 0$ . Так как эта зависимость представляется прямой линией (3.11), то для построения сетки линий были вычислены значения  $\lambda_r/d$  при  $\gamma = 0,5$  и величинах параметра  $2a/d$ , соответствующих углам  $\theta$  от  $0$  до  $90^\circ$  через  $5$  и  $10^\circ$  (эти значения  $\lambda_r/d$  отмечены точками на графиках) и определен наклон этих линий в предположении  $\theta = \text{const}$ . На этих же рисунках приведена зависимость  $\lambda_r/2a$  от  $\gamma$ .

На графиках [62, рис. 2.9 – 2.11] прямыми линиями с различными значениями  $n$  ограничены области излучения для соответствующих номеров лучей. На рис. 2.9 лучу с номером  $n = 0$  соответствует область излучения слева от линии  $n = 0$ , расположенной вертикально. Области излучения для  $n = 0$  [62, рис. 2.9 – 2.11] и  $n = 1, 2$  лежат ниже наклонных линий, соответствующих каждому  $n$ .

Важное значение при проектировании излучателя имеет выбор расстояния между соседними излучателями  $d$ , которое должно быть таким, чтобы при качании луча в заданном секторе исключалась возможность появления побочных главных максимумов. Это условие будет выполнено, если расстояние  $d$  удовлетворяет соотношению

$$d \leq d_{\max} = \frac{1 - \frac{1}{N}}{1 + |\sin \theta|} \lambda_r, \quad (3.13)$$

где  $N$  – число излучателей решетки.

При выполнении условия  $d = d_{\max}$  нуль ближайшего бокового максимума совпадает с плоскостью решетки и, следовательно, диаграмма направленности будет иметь лишь один главный максимум.

На рис. 2.12 [62, с. 41] приведен график зависимости  $d_{\max}/\lambda_r$  от угла сканирования  $\theta$  при числе излучателей  $N = 10; 100$ , построенный по формуле (3.13). Из графика следует, что максимальное расстояние между соседними излучателями решетки с поперечным излучением без качания луча должно быть приблизительно равно  $\lambda_r$ . Если луч качается в пределах  $\pm 90^\circ$ , то  $d_{\max} \approx \lambda_r/2$ .

Таким образом, условие существования одного главного максимума в диаграмме направленности линейной решетки излучателей при сканировании требует, чтобы расстояние между излучателями было бы меньше  $\lambda_r$ . С другой стороны, чтобы направление главного максимума было близко к нормали к оси решетки, возбуждение излучателей должно быть близко к синфазному. Последнее достигается в волноводно-щелевых антеннах при  $d = \lambda_b$  ( $\lambda_b$  – длина волны в волноводе,  $\lambda_b > \lambda_r$ ). С целью уменьшения расстояния между излучателями в волноводно-щелевых антеннах применяют переменнo-фазное возбуждение соседних излучателей. В этом случае расстояние  $d$  примерно равно половине длины волны в волноводе. Однако при расположении всех излучателей на расстоянии  $d = \lambda_b/2$  друг от друга (чтобы главный максимум был направлен по нормали к оси решетки) волны, отраженные от всех излучателей, складываются в фазе на входе антенны, что резко нарушает ее согласование (наблюдается так называемый «эффект нормали»). При отклонении луча от нормали  $d$  отлично от  $\lambda_b/2$ , и отраженные от излучателей волны в большой мере взаимно компенсируются и КСВ  $\rightarrow 1$ . Для определения минимально отличного от  $\lambda_b/2$  расстояния между излучателями  $d$ , при котором во всем рабочем диапазоне длин волн согласование будет хорошим, можно воспользоваться соотношением

$$d < \left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{\lambda_{в \text{ min}}}{2}. \quad (3.14)$$

Для осуществления излучения антенны по нормали к ее плоскости необходимо согласовать каждый щелевой излучатель с волноводом. Применение согласованных щелей позволяет уменьшить «эффект нормали», т.е. избежать резкого увеличения КСВ при совпадении направления главного максимума с нормалью к плоскости антенны.

Волноводно-щелевая антенна с переменнo-фазным возбуждением излучателей может быть выполнена (см. рис. 3.1) в виде волновода с продольными щелями на широкой стенке волновода при размещении их по разные стороны от средней линии и волновода с наклоненными в противоположные стороны щелями в узкой стенке. Расстояние между щелями  $d$  зависит от требуемого направления максимума диаграммы направленности  $\theta$  и сектора сканирования. При выборе расстояния  $d$  можно ориентироваться на соотношение (3.13). В реальных конструкциях антенн  $d/\lambda_r$  обычно лежит в пределах 0,3...0,7.

Анализ уравнения (3.11) показывает, что при замедлениях  $\gamma$  в интервале от 0,36 до 0,867 и  $\lambda_r/d > 1$  уравнение (3.11) имеет смысл лишь при  $n = 0$ , т.е. при работе антенны нулевым лучом, причем при изменении частоты луч будет сканировать в основном в области отрицательных углов  $\theta$  (см. рис. 3.3, в).

### **3.4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛИНЕЙНОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ РЕШЕТКИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ЧАСТОТНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ [62]**

Расчет волноводно-щелевой решетки излучателей с частотным сканированием состоит из определения параметров волновода, возбуждающего щелевые излучатели, и расстояния между излучателями  $d$  с учетом сканирования луча в заданном угловом секторе, расчета излучателей и их связи с волноводом для обеспечения требуемого закона распределения излучаемой мощности вдоль решетки и расчета диаграммы направленности решетки.

Особенностью определения параметров волновода и расстояния  $d$  является то, что параметры волновода  $\gamma$  и  $d$  при заданных секторе сканирования  $\Delta\theta$  и рабочей длине волны  $\lambda_r$  связаны одним уравнением (3.10) или (3.11). Поэтому для нахождения одной из искомых величин приходится предварительно задаваться остальными величинами, входящими в это уравнение. Например, чтобы определить величину  $\gamma$ , надо задаться значением величин  $\theta$  и  $d$ . Меняя значения величин  $\theta$  и  $d$ , можно получить несколько вариантов возможной волноводной возбуждающей системы, а затем выбрать тот из них, который позволяет лучше удовлетворить главным требованиям технического задания (например, минимальное изменение частоты при сканировании, малый коэффициент затухания в волноводе, высокая углочастотная чувствительность решетки и т.д.).

Изложение методики расчета волноводно-щелевой решетки излучателей с частотным сканированием дано в [62, с. 42 – 48].

### **3.5. КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН**

#### **3.5.1. Назначение и особенности волноводно-щелевых антенн**

Щели в качестве излучающих элементов или самостоятельных антенн широко используются в технике ОВЧ. При этом в основном щели применяются в волноводах, хотя могут использоваться и в металлических пластинах или фольге и возбуждаться при этом с помощью полосковых линий [63].

Волноводно-щелевые антенны, получающиеся при прорезании щелей в волноводах, являются одним из видов линейных многоэлементных антенн и обеспечивают сужение диаграммы направленности (ДН) в плоскости, проходящей через ось волновода.

#### **3.5.2. Основные параметры, характеризующие щель в волноводе**

Возбуждение щели в волноводе происходит тогда, когда она своей широкой стороной пересекает поверхностные токи, текущие по внутренним стенкам волновода.

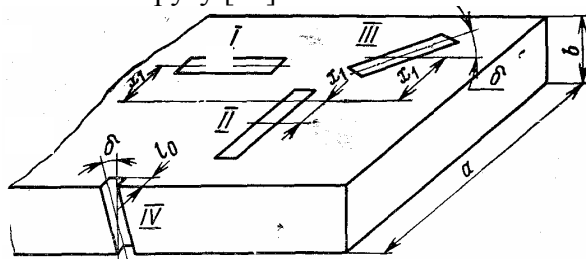
При построении волноводно-щелевой антенны, например на основе прямоугольного волновода с основным типом волны  $H_{10}$ , необходимо учитывать, что в волноводе имеют место продольный и поперечный токи на его широких стенках и поперечный ток на узких стенках

На рис. 3.6 показаны четыре основных типа излучающих щелей в таком волноводе. Щели  $I$ ,  $II$  и  $III$  расположены в широкой стенке волновода, щель  $IV$  – в узкой.

Продольная щель  $I$  пересекает поперечный ток, если она сдвинута относительно средней линии широкой стенки волновода. При  $x_1 = 0$  излучение отсутствует и при увеличении смещения  $x_1$  излучение возрастает. Поперечная щель  $II$  возбуждается продольными токами. Интенсивность ее возбуждения уменьшается при смещении от средней линии. При  $x_1 = 0$  излучение ее максимально. Наклонно-смещенная щель  $III$  пересекается как продольными, так и поперечными токами.

При  $x_2 = 0$  и  $\delta = 0^\circ$ , где  $\delta$  – угол наклона щели относительно средней линии широкой стенки волновода, излучение щели отсутствует. Щель  $IV$ , прорезанная в боковой стенке, при угле наклона  $\delta = 0^\circ$  (см. рис. 3.12) не возбуждается. Если  $\delta = 90^\circ$ , излучение максимально.

Путем совмещения центров щелей  $I$  и  $II$  можно получить крестообразную щель. При расположении центра крестообразной щели в соответствующем месте на широкой стенке прямоугольного волновода она излучает волны, поляризованные по кругу [63].



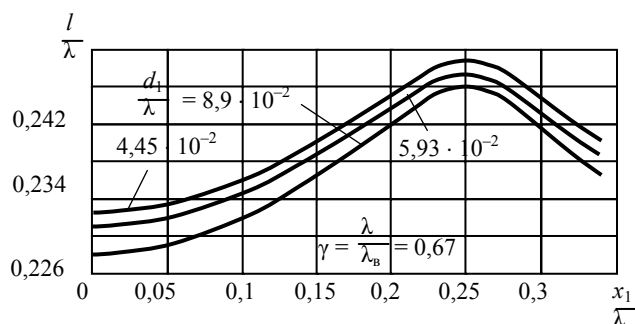
**Рис. 3.6. Основные типы щелей, используемых в волноводно-щелевых антеннах**

Как только что указывалось, продольная щель, расположенная вдоль средней линии волновода ( $x_1 = 0$ ), и наклонная щель на боковой стенке (при  $\delta = 0^\circ$ ) не излучают. Однако протекание токов в стенках вблизи от этих щелей можно изменить таким образом, чтобы излучение происходило. Для этого используются так называемые реактивные вибраторы, представляющие собой металлические стержни, ввинчиваемые в волновод рядом со щелью, и нарушающие симметрию тока в стенке волновода [64].

Наклонные щели в узкой стенке (тип  $IV$ , рис. 3.6) обычно несколько вдаются в широкие стенки волновода. При прорезаниях таких щелей в волноводе оказывается [63], что практически независимо от угла наклона щели  $\delta$  (если  $\delta \leq 15^\circ$ ) при фиксированной глубине выреза  $l_0$  реактивная проводимость щели мала и незначительно влияет на постоянную распространения волновода. Кроме того, подобные щели обладают тем ценным качеством, что их реактивная проводимость при изменении частоты меняется значительно меньше, чем у щелей, прорезанных в широкой стенке волновода. В соответствии с этим наклонные щели в узкой стенке волновода являются предпочтительными как с электрической, так и конструктивной точек зрения, особенно в больших антенных системах.

Резонансная длина щели несколько меньше  $\lambda_r/2$  и тем меньше, чем шире щель. Кроме того, резонансная длина щели зависит от смещения ее  $x_1$  относительно середины широкой стенки волновода. Для определения резонансной длины продольной щели, прорезанной в широкой стенке волновода, можно воспользоваться расчетными кривыми [64], приведенными на рис. 3.7 в виде, удобном для непосредственного определения резонансной длины щелей  $2l$ .

Данные приведены для волновода с замедлением  $\gamma = \lambda_r/\lambda_b = 0,67$  для трех значений ширины щели  $d_1$ . Видно, что чем шире щель, тем больше резонансная длина щели отличается от  $\lambda_r/2$ . При фиксированной ширине щели и небольшом увеличении смещения  $x_1$  продольной





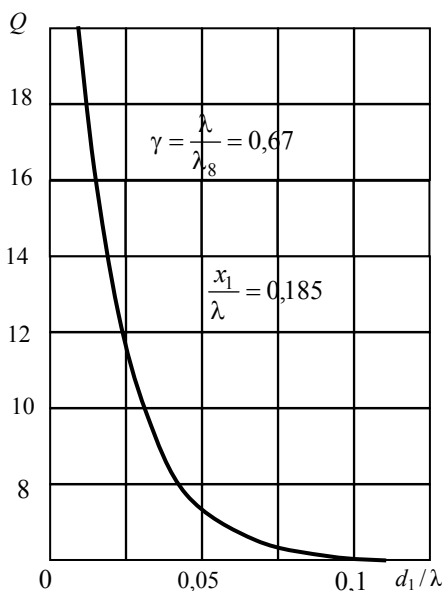
**Рис. 3.7. Зависимость резонансной длины продольной щели от смещения  $x_1$ , построенная в относительных величинах ( $l$  – размер одного плеча резонансной щели)**

щели относительно середины широкой стенки волновода резонансная длина увеличивается, приближаясь к  $\lambda_r/2$ . При дальнейшем увеличении смещения щели ее резонансная длина начинает уменьшаться.

Резонансная длина поперечной щели в широкой стенке прямоугольного (волновода 3-сантиметрового диапазона волн при смещении  $x_1 = 0$  равна  $2l = 0,488\lambda_r$  [65], т.е. незначительно отличается от половины длины волны генератора. Наклонные щели в узкой стенке имеют резонансную длину, приближенно равную половине длины волны в свободном пространстве (точное ее значение обычно подбирается экспериментальным путем) [63].

При расчетах волноводно-щелевых антенн важно знать ширину полосы пропускания щели, которая характеризуется добротностью. Зависимость добротности продольной щели  $Q$  от ее относительной ширины  $d_1/\lambda_r$  показана на рис. 3.8 для волновода с замедлением фазовой скорости  $\gamma = 0,67$  при смещении центра щели относительно средней линии широкой стенки волновода на  $x_1/\lambda_r = 0,185$ . Из рисунка следует, что при ширине щели, лежащей в пределах  $d_1/\lambda_r \in [0,05; 0,1]$ , ее добротность меняется незначительно и не превышает десяти, что соответствует при большой несущей частоте сигнала в диапазоне СВЧ значительной полосе пропускания ( $2\Delta f/f \approx 10\%$ ).

График зависимости добротности продольной щели от ее относительной ширины можно использовать и для поперечной щели при ориентировочной оценке ее полосы пропускания. Ширина щели в ВВЦА выбирается, исходя из условий обеспечения необходимой электрической прочности и требуемой полосы пропускания. При работе щелевой антенны только в режиме приема основным фактором при выборе ширины щели является полоса пропускания принимаемых сигналов.



**Рис. 3.8. Зависимость добротности щели от ее относительной ширины  $d_1/\lambda_r$**

При расчете ширины щели  $d_1$  на необходимую электрическую прочность должен обеспечиваться двух- или трехкратный запас по пробивному значению напряженности поля для середины щели, где между ее краями напряженность поля  $E_{щ}$  максимальна ( $2l = \lambda_r/2$ ). Этот запас выбирается, исходя из конструктивных требований и условий работы щелевой антенны:

$$E_{\text{ш}} = \frac{U_m}{d_1} \leq \left( \frac{1}{2} \dots \frac{1}{3} \right) E_{\text{пр}}, \quad (3.15)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения в пучности;  $E_{\text{пр}}$  – предельное значение напряженности поля, при которой наступает электрический пробой (для воздуха при нормальных атмосферных условиях  $E_{\text{пр}} = 30$  кВ/см).

В случае равномерного амплитудного распределения по антенне, когда излучаемая антенной мощность делится поровну между щелями, амплитуда напряжения в пучности равна

$$U_m = \sqrt{\frac{2P}{N} \frac{1}{G_{\Sigma}}}, \quad (3.16)$$

где  $P$  – подводимая к антенне мощность;  $G_{\Sigma}$  – проводимость излучения щели.

Если амплитудное распределение (или распределение мощности) по антенне отличается от равномерного, следует по заданному амплитудному распределению определить номер щели, которая излучает наибольшую мощность. Зная, как распределяется излучаемая мощность по щелям антенны и подводимую мощность, нетрудно подсчитать, какая доля от общей мощности приходится на данную щель. Подставляя найденную величину в формулу (3.16) вместо  $P/N$ , можно найти значение  $U_m$ . Наконец, ширина щели определяется из (3.15):

$$d_1 \geq (2 \dots 3) \frac{U_m}{E_{\text{пр}}}.$$

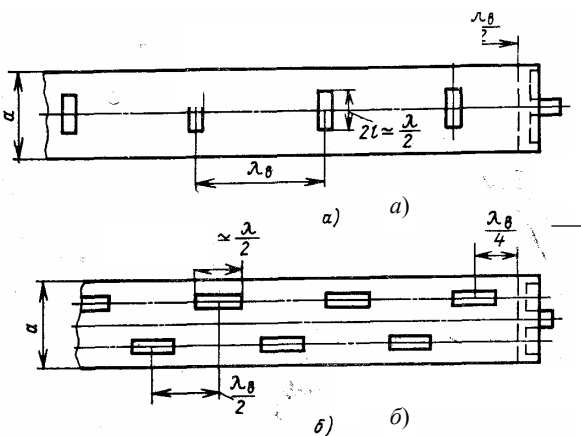
Если щель заполнена диэлектриком или закрыта диэлектрической пластиной, ее электрическая прочность увеличивается [66].

### 3.5.3. Виды волноводно-щелевых антенн

Различают антенны резонансные, нерезонансные и антенны с согласованными щелями [64].

Резонансные – это такие антенны, у которых расстояние между соседними щелями равно  $\lambda_{\text{в}}$  (рис. 3.9, а – случай синфазно связанных щелей с полем волновода) или равно  $\lambda_{\text{в}}/2$  (рис. 3.9, б – случай переменного-фазно связанных щелей с полем волновода).

Таким образом, резонансные антенны являются одновременно синфазными, и, следовательно, направление максимального излучения совпадает с нормалью к оси антенны. Синфазное возбуждение продольных щелей, расположенных по разные стороны относительно средней линии при  $d = \lambda_{\text{в}}/2$ , обеспечивается за счет дополнительного



**Рис. 3.9. Резонансная антенна:**

а – с поперечными щелями; б – с продольными щелями

сдвига по фазе на  $180^\circ$  в силу противоположных направлений поперечных токов по обеим сторонам от средней линии широкой стенки волновода. В случае наклонных щелей на боковой стенке дополнитель-

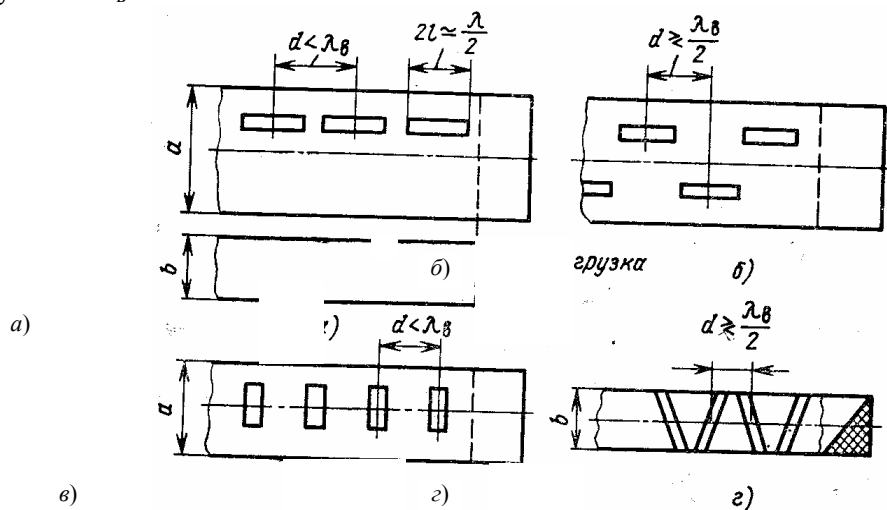
ный сдвиг на  $180^\circ$  получается за счет изменения знака угла наклона щели  $\delta$ . Следовательно, результирующий сдвиг по фазе соседних излучателей в обоих случаях оказывается равным  $360^\circ$  или  $0$  независимо от типа нагрузки на конце антенны.

Антенны рассматриваемого типа могут быть хорошо согласованы с питающей линией в весьма узкой полосе частот. Действительно, так как каждая щель отдельно не согласована с волноводом, то все отраженные от щелей волны складываются на входе антенны синфазно и коэффициент отражения системы становится большим. Очевидно, что это рассогласование можно компенсировать на входе антенны за счет какого-нибудь элемента настройки, но так как уже при малых изменениях частоты согласование нарушается, то антенна остается узкополосной. Поэтому в большинстве случаев отказываются от синфазного возбуждения отдельных щелей и выбирают расстояние между ними  $d$ , не равное  $\lambda_B/2$ . Характерной особенностью получаемой таким образом нерезонансной антенны является более широкая полоса частот, в пределах которой имеет место хорошее согласование, так как отдельные отражения при большом числе излучателей приблизительно компенсируются. Однако отличие расстояния между щелями от  $\lambda_B/2$  приводит к несинфазному возбуждению щелей падающей волной и направление главного максимума излучения отклоняется от нормали к оси антенны.

Чаще всего это отклонение мало (за исключением специальных случаев) и изменения формы главного лепестка и уровня боковых лепестков, вызванные отклонением луча, еще не заметны. Поэтому направленные свойства такой антенны можно определять как для случая синфазного возбуждения с последующим учетом угла наклона.

Для устранения отражения от конца антенны устанавливают поглощающую нагрузку. На рис. 3.10 показаны схемы нерезонансных антенн с синфазной связью щелей с полем волновода (рис. 3.10, *a*, *в*) и с переменнo-фазной связью (рис. 3.10, *б*, *г*), причем щели прорезаны как в широкой, так и в узкой стенках волновода.

Во всех случаях фазовое распределение вдоль антенны можно считать линейным, если взаимодействие излучателей как по внутреннему, так и по внешнему пространству не учитывается. Если щелевые антенны, показанные на рис. 3.10, *a* – *в*, имеют поле излучения только основной поляризации, то антенны с наклонными щелями в узкой стенке (рис. 3.10, *г*) имеют еще и поле паразитной поляризации. На рис. 3.11, *a* стрелками показано направление поперечных токов в узкой стенке волновода и векторов напряженности возбуждаемого электрического поля в двух встречно-наклонных щелях ( $\pm\delta$ ) при расстоянии между ними  $\lambda_B/2$ .

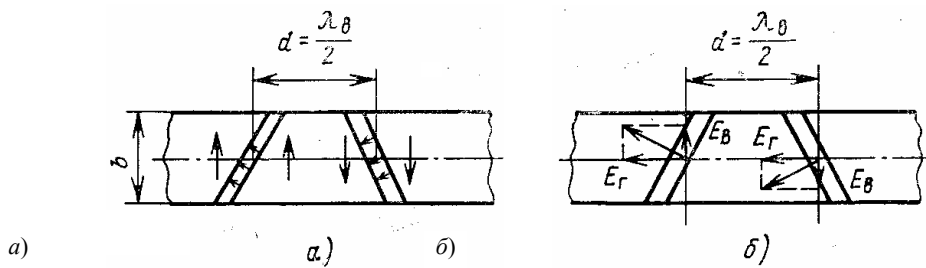


**Рис. 3.10. Схемы нерезонансных волноводно-щелевых антенн:**

*a*, *б* – с продольными щелями в широкой стенке волновода;

*в* – с поперечными щелями в широкой стенке волновода;

*г* – с наклонными щелями в узкой стенке волновода



**Рис. 3.11. Наклонные щели в узкой стенке волновода:**

$a$  – направление токов в стенке волновода и токов смещения в соседних щелях;  $b$  – составляющие вектора электрического поля в щелях

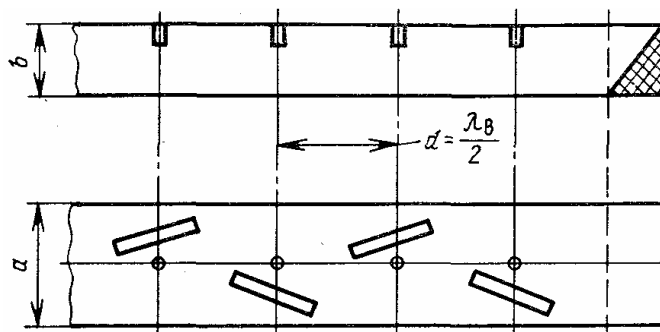
Излучение таких щелей определяется горизонтальными составляющими вектора напряженности поля щелей (рис. 3.11, б).

Вертикальные же составляющие создают поле паразитной поляризации. В целях уменьшения паразитной составляющей поля излучения необходимо применять углы наклона щелей  $\delta \leq 15^\circ$ , при которых мощность, теряемая на паразитную поляризацию, составляет меньше 1 %. Однако это ограничивает возможность получения требуемых значений нормированных проводимостей щелей  $g$ . Поэтому на практике применяются специальные меры для подавления поля паразитной поляризации [67].

В антеннах с согласованными щелями каждая щель (продольная, поперечная или наклонно смещенная) в отдельности согласована с волноводом при помощи реактивного вибратора или диафрагмы и не вызывает отражений. Следовательно, в таких антеннах с оконечной поглощающей нагрузкой устанавливается режим бегущей волны. На рис. 3.12 показана, к примеру, схема антенны с наклонно смещенными согласованными щелями.

В таких антеннах хорошее согласование с питающим волноводом получается в широкой полосе частот (5...10) %. В случае наклонно смещенных щелей на широкой стенке волновода подбором угла наклона  $\delta$  и смещения  $x_1$  добиваются того, чтобы нормированная активная проводимость волновода в сечении щели равнялась единице, а имеющуюся в этом сечении реактивную проводимость компенсируют с помощью реактивного штыря. Так как штырь устанавливается в сечении волновода, проходящем через середину щели, то при изменении частоты происходит одновременное изменение реактивных проводимостей штыря и щели и их взаимная компенсация в некотором диапазоне частот. При существенном изменении частоты антенна также остается согласованной с питающим волноводом, так как антенна превращается в нерезонансную.

Расстояние между согласованными излучателями в случае решетки с переменнo-фазно связанными щелями выбирается обычно равным  $\lambda_g/2$  на номинальной частоте. Направление максимального излучения при этом перпендикулярно оси волновода.



**Рис. 3.12. Щелевая антенна с наклонно смещенными согласованными щелями**

### 3.5.4. Направленные свойства волноводно-щелевых антенн

Для расчета диаграмм направленности многощелевых антенн используют те же методы, что и для многовибраторных антенн. При этом форма диаграммы направленности определяется амплитудно-фазовым распределением по раскрытию антенны.

На практике наиболее часто используются следующие виды амплитудных распределений: равномерное, симметричное спадающее относительно центра антенны, экспоненциальное. Фазовое распределение чаще всего линейное.

Нормированная диаграмма направленности линейной решетки идентичных излучателей может быть записана в виде

$$F(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) F_n(\theta, \varphi), \quad (3.17)$$

где  $F_1(\theta, \varphi)$  – диаграмма направленности одного излучателя;  $F_n(\theta, \varphi)$  – множитель антенны, зависящий от числа щелей в антенне.

Приведем выражения для множителя антенны  $F_n(\theta)$  при различных амплитудных распределениях по антенне. В случае равномерного амплитудного и линейного фазового распределения по длине решетки

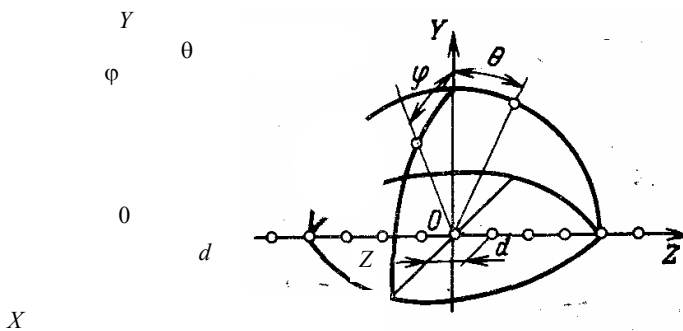
$$F_n(\theta) = \frac{\sin \frac{N}{2} \psi}{N \sin \frac{\psi}{2}}, \quad (3.18)$$

где  $\psi = kd \sin \theta - \psi_1$  – сдвиг по фазе между полями, создаваемыми в точке наблюдения соседними излучателями;  $k = 2\pi / \lambda_r$  – фазовая постоянная свободного пространства;  $\theta$  – угол, отсчитываемый от нормали к линии расположения излучателей (рис. 3.13);  $\psi_1$  – разность фаз соседних щелей по системе питания.

В синфазной антенне  $\psi_1 = 0$ ; в нерезонансной антенне с синфазной связью щелей с полем волновода  $\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_B d}$ ; в случае переменного-фазной связи  $\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_B d} - \pi$ .

Если распределение поля по раскрытию дискретной линейной решетки излучателей экспоненциальное, то (формула получена Г.А. Евстроповым и Г.К. Фридманом)

$$F_n(\theta) = \frac{\text{sh } \xi / N}{\text{sh } \xi} \sqrt{\frac{\sin^2 u + \text{sh}^2 \xi}{\sin^2 u / N + \text{sh}^2 \xi / N}}, \quad (3.19)$$



**Рис. 3.13. К выбору отсчета углов при расчете ДН волноводно-щелевых антенн**

где  $\xi = 0,5\alpha l$  – величина, характеризующая неравномерность амплитудного распределения по раскрытию;  $\alpha = \alpha_\Sigma + \alpha_{ст}$  – постоянная затухания в неперах / метр, вызванного потерями на излучение и в стенках волновода; в волноводе с малыми потерями  $\alpha_{ст} \ll \alpha_\Sigma$  и  $\alpha \approx \alpha_\Sigma$ ;  $l \approx Nd$  – длина антенны;  $u = \frac{kl}{2}(\sin \theta - \sin \theta_{гл})$  – обобщенная координата;  $\theta_{гл}$  – направление главного максимума ДН антенны.

Отклонение главного максимума ДН от нормали к линии расположения излучателей определяется по (3.10):  $n = 0$  для синфазно связанных щелей с полем волновода и по (3.11) при  $n = 0$  для переменнo-фазно связанных щелей.

Для определения постоянной затухания  $\alpha_\Sigma$  можно воспользоваться следующим очевидным соотношением:

$$\alpha_\Sigma = \frac{1}{2Nd} \ln \frac{P_0}{P_l}.$$

Для антенны с симметричным относительно центра и спадающим к краям амплитудным распределением, например косинусоидальным, расчет ДН при большом числе излучателей связан с трудоемкими вычислениями.

Для выполнения расчетов в этом случае можно воспользоваться множителем антенны с непрерывным распределением ненаправленных излучателей  $F_l(\theta)$  [68], так как ДН дискретной решетки и непрерывной при  $N \geq 6$  ( $d \approx \lambda_r / 2$ ) практически совпадают

$$F_n(\theta) \approx F_l(\theta) = \frac{1}{A_0 + \frac{2}{\pi} A_1} \left\{ A_0 \frac{\sin u}{u} + \frac{A_1}{2} \left[ \frac{\sin\left(u - \frac{\pi}{2}\right)}{u - \frac{\pi}{2}} + \frac{\sin\left(u + \frac{\pi}{2}\right)}{u + \frac{\pi}{2}} \right] \right\}, \quad (3.20)$$

где  $u = \frac{kl}{2}(\sin \theta - \sin \theta_{\text{гл}})$ ;  $l \approx Nd$  – длина антенны;  $A_0$  – амплитуда поля на краях антенны. При приведении амплитудного распределения по антенне к единице  $A_1 = 1 - A_0$ .

Диаграмму направленности одной щели  $F_1(\theta)$  в плоскости  $YOZ$ , проходящей через линию расположения излучателей (рис. 3.13), можно при инженерных расчетах определять по формулам ДН щели в бесконечном экране: продольная щель  $F_2(\theta) = \frac{\cos(\pi/2 \sin \theta)}{\cos \theta}$ , поперечная  $F_1(\theta) = 1$ , так как длина антенны обычно большая (несколько  $\lambda_r$ ) и, кроме того, направленные свойства антенны в этой плоскости определяются в основном множителем антенны  $F_n(\theta)$ .

При определении ДН в поперечной плоскости (пл.  $YOX$  рис. 3.13) антенны с продольными щелями в широкой стенке волновода следует учитывать, что конечные размеры экрана (поперечного сечения волновода) существенно влияют на форму диаграммы: ограниченность экрана придает излучению направленность – поле в направлении экрана уменьшается примерно до 40...50 % относительно значения поля в направлении максимума ДН.

Для упрощения нахождения ДН щели в плоскости, нормальной ее продольной оси (плоскость  $YOX$ ), волновод удобно заменить плоской лентой той же ширины [69]. Тогда оказывается, что при ширине волновода  $a = (0,7...0,8)\lambda_r$  ДН будет близка к любой из диаграмм, изображенных на рис. 3.14.

В случае поперечных щелей на широкой стенке волновода или наклонных в узкой стенке ДН в плоскости  $YOX$  можно ориентировочно оценить по формулам ДН щели в бесконечном экране, так как размеры экрана в направлении оси щели мало влияют на ДН как в  $E$ -плоскости щели, так и в  $H$ -плоскости [58].

В табл. 3.1 приведены формулы для определения ширины ДН синфазных щелевых антенн и указаны уровни первых боковых лепестков в децибелах при различных амплитудных распределениях по антенне.

Указанными формулами ширины луча можно воспользоваться и в случае нерезонансных антенн, так как расстояние между излучателями в таких антеннах незначительно отличается от синфазного случая и угол отклонения луча от нормали к антенне мал.

В тех специальных случаях, когда требуется значительное отклонение луча от нормали к антенне в формулы для ширины луча  $2\Delta\theta_{0,5}$  следует вместо длины антенны  $l \sim Nd$  подставить эффективную длину раскрытия  $l_{\text{эф}} \approx Nd \cos \theta_{\text{гл}}$ .

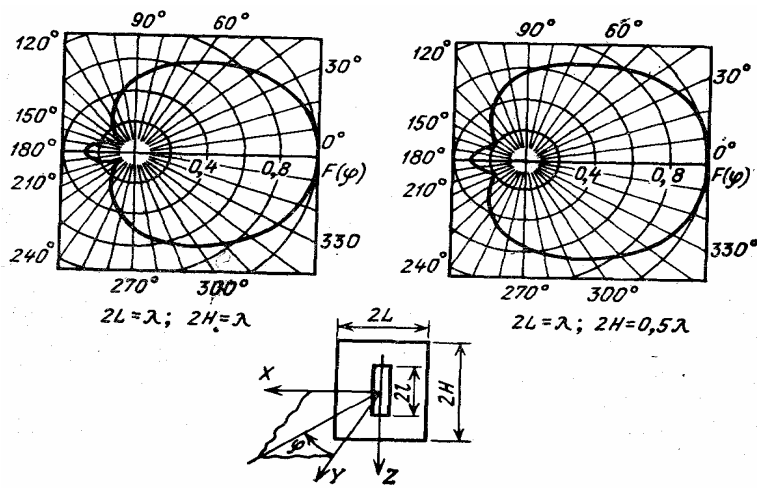


Рис. 3.14. Расчетные ДН полуволновой щели в  $E$ -плоскости при различных размерах прямоугольного экрана

Таблица 3.1

Амплитудное распределение	Ширина луча $2\Delta\theta_{0,5}$	Уровень первого бокового лепестка, дБ
1. Равномерное	$51\lambda_r / Nd$	-13,5
2. Экспоненциальное, $x = P_1 / P_0 = 0,05$	$54,4\lambda_r / Nd$	-12,1
3. Косинусоидальное; амплитуда поля на краях антенны: $A_0 = 0,5 (A_1 = 0,5);$ $A_0 = 0 (A_1 = 1)$	$56\lambda_r / Nd$ $68\lambda_r / Nd$	-17,8 -23,6

Коэффициент направленного действия (КНД) антенны с переменнo-фазными щелями в широкой или узкой стенках волновода при  $\gamma = \frac{\lambda_r}{\lambda_b} < 1$  и  $d = \lambda_b / 2 = (0,6 \dots 0,9) \lambda_r$  определяется следующей формулой

$$D_0 \approx g_0 \left( 3 + v \frac{N}{\gamma} \right), \quad (3.21)$$

где  $v = 2$  для продольных щелей в широкой стенке и  $v = 4$  для наклонных щелей в узкой стенке волновода (при  $\delta \leq 15^\circ$ ).

Входящий в формулу (3.21) коэффициент использования раскрыва  $g_0$  зависит от амплитудного распределения по антенне: при равномерном распределении  $g_0 = 1$ ; при экспоненциальном  $g_0 = 0,85$  и  $0,92$ , если  $x = P_1 / P_0 = 5\%$  или  $10\%$ ; при косинусоидальном распределении, когда амплитуда поля на краях антенны имеет значения  $A_0 = 0$  или  $A_0 = 0,5$ :  $g_0 = 0,81$  и  $0,965$ .

По формуле (3.21) можно оценить КНД антенны и при сканировании, если угол отклонения луча  $\theta_{гл} \leq 40^\circ$ ,  $d / \lambda_r \leq 0,6$  и длина антенны  $l = Nd \gg \lambda_r$ , так как изменение КНД антенны при сканировании в указанных пределах из-за изменения эффективной длины раскрыва компенсируется тем, что линейная антенна при  $\theta_{гл} \rightarrow 90^\circ$  становится направленной в двух плоскостях, в то время как при  $\theta_{гл} = 0^\circ$  антенна имела направленность в одной плоскости [70].

В отличие от линейной плоская решетка излучателей имеет направленность в обеих главных плоскостях и поэтому ее КНД при сканировании сразу же начинает падать за счет уменьшения эффективной апертуры решетки.

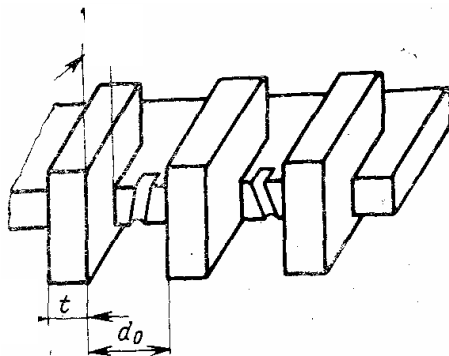
Так как в резонансной антенне вместо поглощающей нагрузки обычно устанавливают короткозамкнутый поршень, ее КПД выше, чем у нерезонансной антенны тех же размеров.

### 3.5.5. Известные схемы построения волноводно-щелевых антенн и примеры конструкций

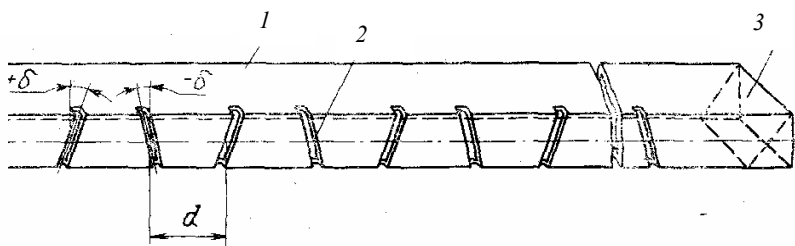
В зависимости от назначения антенна может быть выполнена в виде линейной и плоской волноводно-щелевой антенны или состоять из набора линейных щелевых антенн, расположенных по образующим поверхности летательного аппарата (рис. 3.15 – 3.19). Схематичное изображение части линейной антенны с наклонными щелями в узкой стенке волновода, используемой в судовых радиолокационных устройствах, показано на рис. 3.15.

Для ослабления паразитной составляющей поля излучения такой антенны, поляризованной поперечно волноводу, между соседними щелями установлены разделительные металлические выступы [63]. При известном расстоянии между соседними излучающими щелями с использованием основных положений о затухании волн в закритическом режиме при их распространении между параллельными металлическими пластинами [71] можно определить расстояние между выступами  $d_0$  (рис. 3.15), их длину  $l_1$  и толщину  $t$ .

На рис. 3.16 и 3.17 показаны примеры конструктивного выполнения волноводно-щелевых нерезонансных антенн с наклонными щелями на узкой стенке волновода (рис. 3.16) и с продольными щелями на широкой стенке (рис. 3.17).

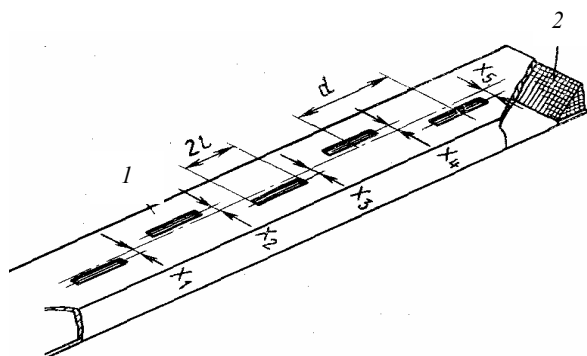


**Рис. 3.15. Наклонные щели в узкой стенке волновода с разделительными металлическими выступами между излучателями**



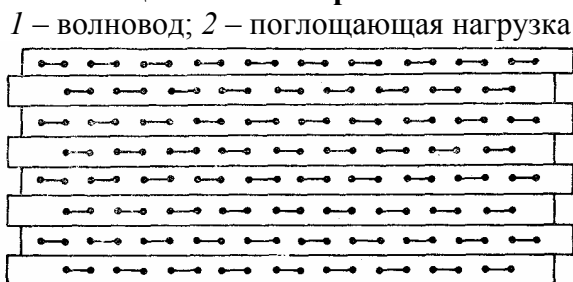
**Рис. 3.16. Нерезонансная волноводно-щелевая антенна с излучателями в боковой стенке волновода:**

1 – антенный волновод; 2 – излучающие щели; 3 – поглощающая нагрузка

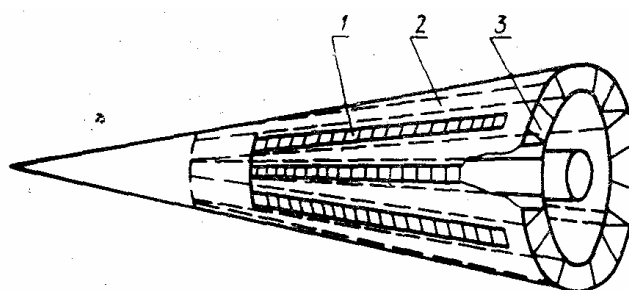




**Рис. 3.17. Нерезонансная волноводно-щелевая антенна с продольными щелями на широкой стенке волновода:**



**Рис. 3.18. Четырехлучевая антенна самолетной навигационной системы**



**Рис. 3.19. Остронаправленная антенна, применяемая на летательных аппаратах:**

*1* – поперечные щели; *2* – металлические клинья; *3* – прямоугольный волновод

На рис. 3.18 показан один из вариантов двумерной волноводно-щелевой антенны, состоящей из восьми параллельных алюминиевых волноводов, в каждом из которых прорезано десять гантельных щелей. Гантельные щели по сравнению с обычными прямоугольными обладают большей полосой пропускания. Особенностью антенны является то, что четные и нечетные волноводы питаются с разных сторон с помощью делителей мощности и весь раскрыв используется для формирования четырех лучей. Такие антенны применяются, например, в самолетных доплеровских автономных навигационных устройствах, предназначенных для определения скорости и угла сноса самолета. Набор из нескольких линейных волноводно-щелевых антенн, расположенных по образующим конической части летательного аппарата (рис. 3.19), может использоваться для формирования требуемой формы диаграммы направленности [66].

Некоторые вопросы проектирования ВВЩА более подробно рассмотрены в [72 – 76].

### 3.5.6. Расчет угла отклонения максимума ДН противофазной щелевой антенны на стандартных волноводах прямоугольного сечения

Расчетные зависимости даны для разработанных устройств на базе стандартной волноводной техники, выпускаемой промышленностью РФ. Частотный диапазон работы, таким образом, в большой мере диктуется типоразмерами прямоугольных волноводов (рис. 3.5, *a*) в соответствии со стандартами

МЭК (Международной электротехнической комиссии). Справочные материалы, указанные ниже, взяты из [77] и [78], табл. 3.2.

Для круглых волноводов с внутренним радиусом  $r$  (переход от прямоугольных фидерных линий к апертурным излучателям) данные сведены в табл. 3.3.

Для основной волны  $H_{11}$  (трансформируется из  $H_{10}$ ) при переходе от прямоугольного к круглому волноводу данные выделены курсивом в графе для волновода МЭК-100, с которым на  $\lambda_{ном} = 3,2$  см он и сопрягается. Данные по другим круглым волноводам (на другие номинальные длины волн) легко получить интерполяцией, используя принцип электродинамического подобия (круглые волноводы МЭК строго не стандартизированы). Так, например, для оптимального по частотным свойствам волновода МЭК-140 радиус круглого волновода определяется из соотношения  $2,38 / 2,3 = r / 1,6$ , откуда  $r = 1,6556 \approx 1,66$  см.

На рис. 3.20 показаны зависимости  $\Delta\theta(\lambda_r, d)$  при различных значениях реализуемого противофазного шага  $d$ , см. Показан рабочий диапазон длин волн термовлагодетри (см. рис. 4.12 – 4.14 в гл. 4).

На рис. 3.21 и 3.22 показаны расчетные зависимости углочастотной чувствительности и нормированной по величине  $\lambda_r$  углочастотной чувствительности соответственно. В рабочем диапазоне длин волн

генератора нормированная чувствительность имеет вполне приемлемую величину и практически постоянна (относительное изменение не более 4 %).

Проведем расчет углочастотной чувствительности щелевой противофазной волноводной антенны с учетом того, что волновод – ребристая замедляющая структура. Выражение для углочастотной зависимости согласно (3.2) имеет вид

$$S_{\Delta\theta}(\lambda_r, \nu) = (d(\Delta\theta) / d\lambda_r) / \lambda_r = \\ = (0,573) / \cos \Delta\theta [\sin \Delta\theta - v_{з.гр}] \text{ (град} / \% \lambda_r \text{)}.$$

### 3.3. Параметры круглых волноводов

Тип волны (моды)	$H_{11}$	$E_{01}$	$H_{01}$
Диапазон режима одной (данной) моды	$2,61r < \lambda < 3,41r$	$2,06r < \lambda < 2,61r$ ( $2,06r = \lambda_{кр H_{21}}$ )	$\lambda < 1,64r$
Критическая длина волны, $\lambda_{кр}$	$3,41r$	$2,61r$	$1,64r$

Программа расчета угла отклонения и углочастотной чувствительности для ВВЩА без замедляющей внутренней структуры (ЗС)

(Программа расчета реализована в MathCAD-2000)

Волновод МЭК-140: расчетная длина волны по данным [77, с. 45] 2,0 см:

$\lambda_r := 1,6; 1,7 \dots 2,5$  – диапазон длин волн генератора, см;

$a := 1,6$  – размер широкой стенки волновода, см;

$\lambda_{кр} := 3,2$  – критическая длина волны, см;

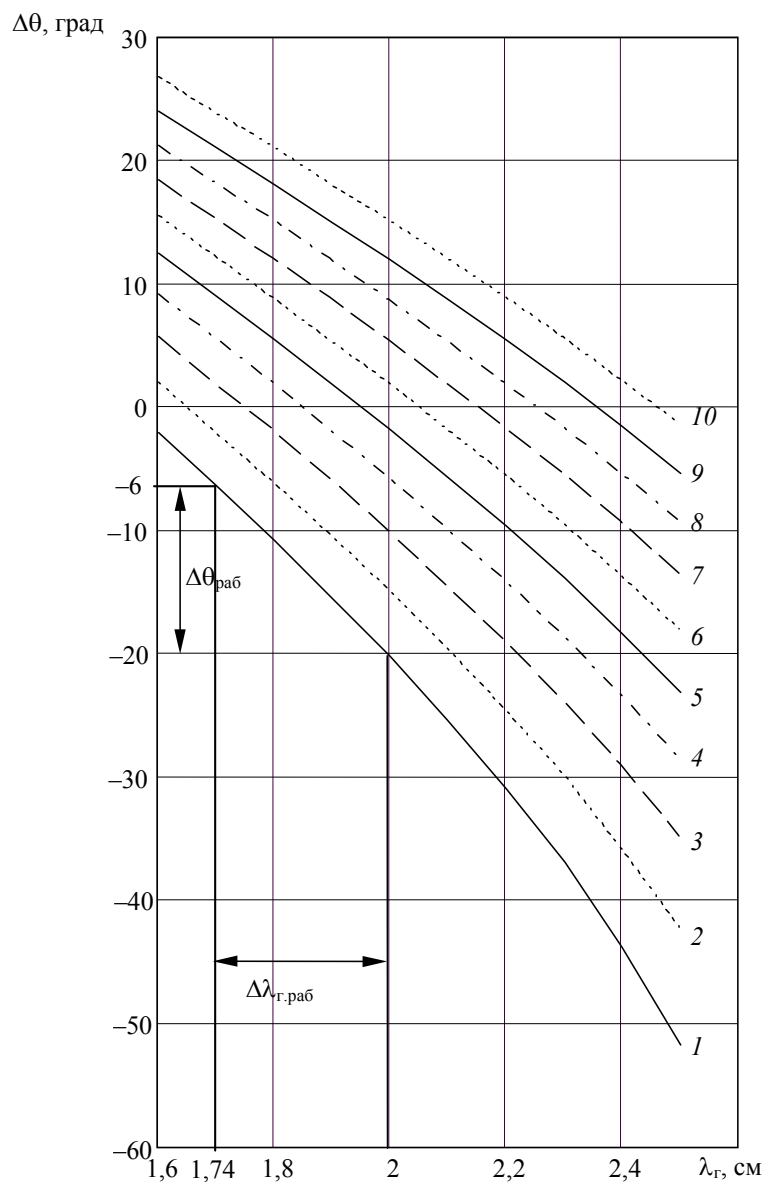
$$\Lambda_B(\lambda_r) := \frac{\lambda_r}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_{кр}}\right)^2}} \text{ – длина волны основной моды } H_{10} \text{ в волноводе, см;}$$

$d(\lambda_r) := 0,488\Lambda_B(\lambda_r)$  – оптимальная расчетная величина противофазного шага, см;

$d := 0,887; 0,963 \dots 1,922$  – реализуемая величина противофазного шага, см;

$$\Delta\theta(\lambda_r, d) := a \sin \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_r}{2a}\right)^2} - \frac{\lambda_r}{2d} \right] \text{ – угол отклонения максимума ДН, рад;}$$

$S(\lambda_r, d) := \left( \frac{d}{d\lambda_r} \Delta\theta(\lambda_r, d) - 57,3 \right)$  – угловая чувствительность при заданной величине  $d$ , град/см.



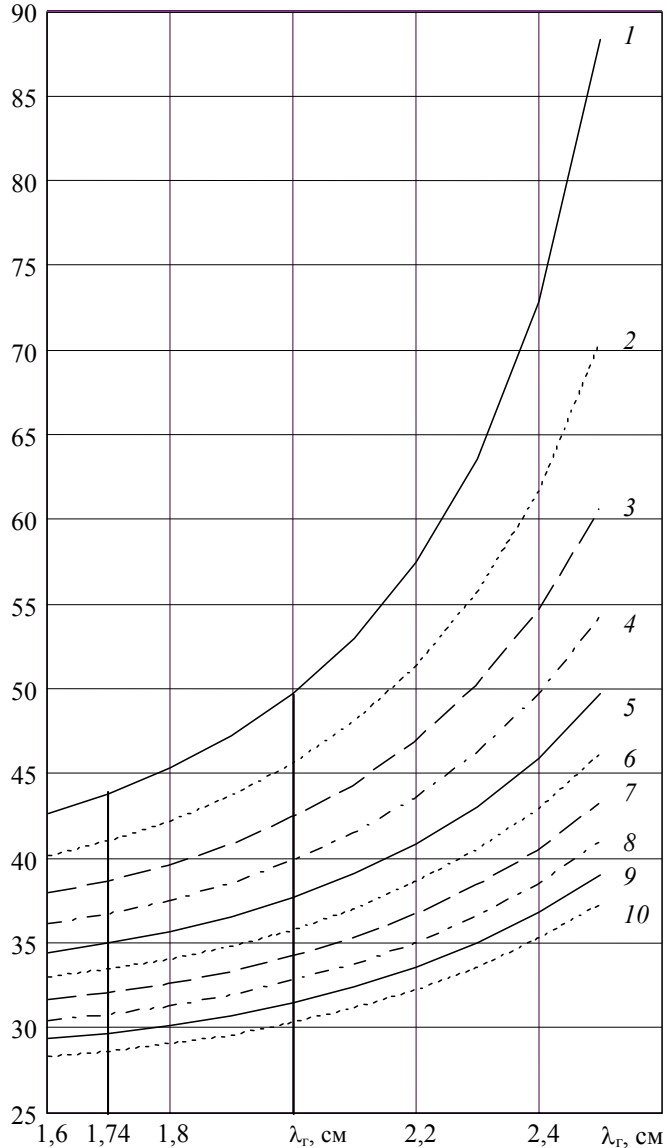
**Рис. 3.20. Зависимость угла отклонения максимума ДН**

**$\Delta\theta(\lambda_r, d) \cdot 57,3$  (град) при  $d$  (см):**

1 – 0,887; 2 – 0,963; 3 – 1,045; 4 – 1,133; 5 – 1,23;  
6 – 1,336; 7 – 1,454; 8 – 1,588; 9 – 1,742; 10 – 1,922

$S$ , град/см

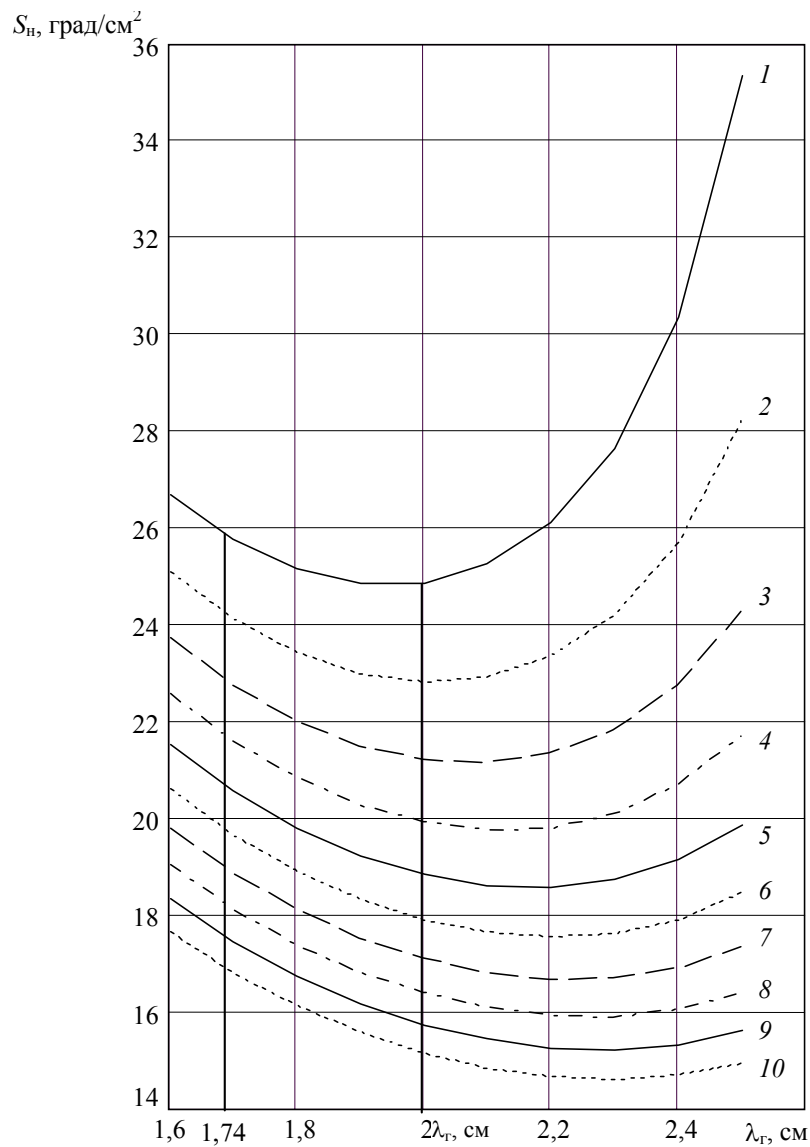
$\delta$ , град/см 90



**Рис. 3.21. Чувствительность  $S(\lambda_r, d)$  угла отклонения максимума ДН при  $d$  (см):**

1 – 0,887; 2 – 0,963; 3 – 1,045; 4 – 1,133; 5 – 1,23;  
6 – 1,336; 7 – 1,454; 8 – 1,588; 9 – 1,742; 10 – 1,922

$S_n$ , град/см<sup>2</sup>



**Рис. 3.22. Нормированная чувствительность  $S_n = S(\lambda_r, d)/\lambda_r$  угла отклонения максимума ДН при  $d$  (см):**

1 – 0,887; 2 – 0,963; 3 – 1,045; 4 – 1,133; 5 – 1,23;  
6 – 1,336; 7 – 1,454; 8 – 1,588; 9 – 1,742; 10 – 1,922

Расчет ведется для длины волны 2,0 см,  $a = 1,6$  см, варьируются величины  $d = 1,045 \dots 1,922$ ;  $v_{з.гр} = v = 1,15 \dots 2,77$ .

а)  $d = 1,045$  см;  $v := 1,15$ ;  $\lambda_r := 1,6; 1,7 \dots 2,5$  (рис. 3.23, а)

$$S(\lambda_r, v) := \frac{0,573}{\sqrt{1 - \left[ \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_r}{3,2}\right)^2} - \frac{\lambda_r}{2,09} \right]^2}} \left[ v - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_r}{3,2}\right)^2} + \frac{\lambda_r}{2,09} \right];$$

б)  $d = 1,454$  см (рис. 3.23, б);

в)  $d = 1,922$  см (рис. 3.23, в).

**АНАЛИЗ РИС. 3.23, А – В ПОЗВОЛЯЕТ СДЕЛАТЬ СЛЕДУЮЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.**

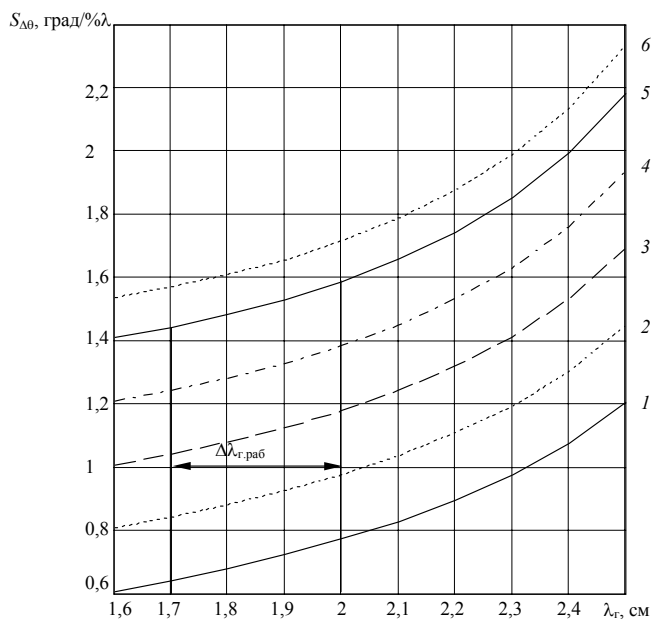
1. Величина реализуемого противофазного шага  $d$  ВВЩА должна быть максимально возможной технологически.

2. Ребристая ЗС должна обеспечивать максимальное групповое замедление, выбор геометрических ее размеров и шага  $t$  осуществляется по выражению [79]:

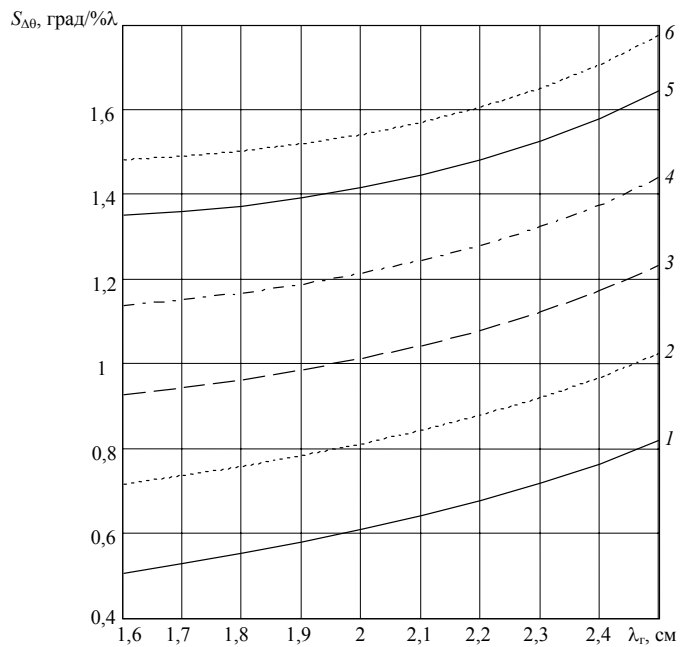
$$v_{з.гр} \cong \sqrt{1 + \left(\frac{t'}{t}\right)^2 \operatorname{tg}^2 kh}, \quad (3.22)$$

где  $k = 2\pi/\lambda_\Gamma$  – волновое число;  $t'$ ,  $t$ ,  $h$  – размеры ЗС согласно рис. 3.5, в.

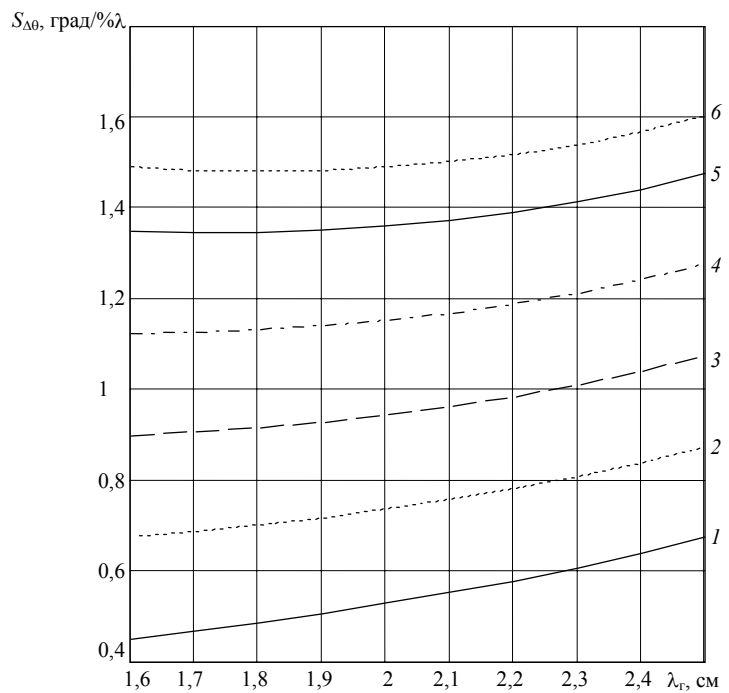
**ВЫРАЖЕНИЕ (3.22) ЯВЛЯЕТСЯ ПРИБЛИЖЕННЫМ, ПРИГОДНЫМ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ. ТОЧНЫЙ АНАЛИЗ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ЗС В ВВЩА (В ТОМ ЧИСЛЕ И  $v_{з.гр}$ ) МОЖНО НАЙТИ В [80]. В ПРИЛ. 2 ДАНЫ РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ  $\Delta\theta$  ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛИН ВОЛН  $\lambda_\Gamma = 1; 1,25$  СМ, А ТАКЖЕ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ ДОСТУПНЫХ ВОЛНОВЫХ ОТРЕЗКОВ НА  $\lambda_\Gamma = 3$  СМ. СОГЛАСНО РИС. П2.2, ПРИМЕНЕНИЕ В ВВЩА ОТРЕЗКОВ ВВ МЭК-220 (МЕНЬШИХ ГАБАРИТОВ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ УВЕЛИЧИТЬ  $L = ND$ , Т.Е. УМЕНЬШИТЬ ШИРИНУ ДН –  $2\Delta\theta_{0,5}$ ) ПЕРСПЕКТИВНО И, КРОМЕ ТОГО, ПОЗВОЛЯЕТ ПРИ ВЕЛИЧИНЕ  $\lambda_{НОМ} = 1,74$  СМ В ДИАПАЗОНЕ  $\Delta\lambda_{РАБ}$  ТАКОМ ЖЕ, КАК И У ВВ МЭК-140, ИМЕТЬ ВЕЛИЧИНУ  $\Delta\theta|_{\lambda_{НОМ}} \approx 0$ .**



a)



б)



в)

**Рис. 3.23. Нормированная по относительному (в %) изменению  $\lambda_r$  угловая чувствительность  $S_{\Delta\theta}(\lambda_r, v_{з.гр}, d)$  при  $d$ : 1,045 (а); 1,454 (б); 1,922 (в) и разных значениях замедления  $v_{з.гр}$ : 1 – 1,15; 2 – 1,5; 3 – 1,85; 4 – 2,2; 5 – 2,55; 6 – 2,77**

#### **4. ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД И РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АПЕРТУР**



## 4.1. ТЕРМОВЛАГОМЕТРИЧЕСКИЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД

### 4.1.1. Термовлагодетрический микроволновый метод на многомодовом объемном резонаторе

Измерение содержания воды в различных веществах имеет большое прикладное значение. Органические соединения (к ним относятся бензин, керосин, в том числе и авиационный, машинное, трансформаторное масло и т.д.) в процессе их эксплуатации в различных устройствах и механизмах имеют свойство накапливать воду, теряя при этом свои эксплуатационные характеристики.

При содержании воды в трансформаторном масле выше 50 г/т может возникнуть пробой, что приведет к выходу трансформатора из строя [81]. Наличие влаги в авиационном керосине, в том числе и за счет наличия жидкости «И» (моноэтиловый эфир этиленгликоля), содержащей растворенную влагу, является одним из определяющих факторов, который влияет на безопасность полетов авиации.

Освоение диапазона СВЧ открывает новые возможности для контроля влажности в связи со спецификой СВЧ.

Реализация метода по фазовому набегу через исследуемый объем электромагнитной (ЭМ) волны в волноводе позволяет получить высокую точность в узком диапазоне влажности (0,01 % в пределах 2 % изменения влажности) или контролировать влажность  $W < 0,1$  % [82]. Определение ослабления (до 50 дБ) позволяет получить широкий диапазон измерения (от 0,1 до 100 %) либо обеспечить высокую чувствительность (1 г/т) в диапазоне  $W = 0,001 \dots 0,01$  % содержания воды, например, в трансформаторном масле [81]. В резонаторном методе [1] выходными величинами первичного измерительного преобразования (ПИП) служат вызванные введением исследуемого материала изменения параметров объемного резонатора (ОР): резонансной частоты  $\Delta f = f - f_0$  и добротности  $\Delta Q = Q - Q_0$  ( $f_0$  и  $Q_0$  – значения собственных (ненагруженных) параметров резонатора). За счет локализации поля в полости резонатора метод обладает высокой чувствительностью, а также создается возможность измерения влагосодержания образцов малой массы.

Недостатками приведенных методов являются:

- необходимость образца определенной формы и размера, так как образец помещается в строго определенное место ОР или волновода, структура одномодового поля строго определена и неравномерна в пространственной полости ОР (волновода);
- сложная аппаратная реализация (наличие вентиля, циркуляторов, амплитудного или фазового детектора, смесителя, измерителя добротности, частотомера, управляемого по частоте генератора СВЧ);
- необходимость настройки при изменении геометрических размеров ОР или волновода, вызванных изменением температуры окружающей среды (что особенно важно в полевых условиях);
- возможность вырождения колебаний, вызывающая дополнительную погрешность, а применение поляризационных фильтров вырождения колебаний снижает добротность основного типа колебания и усложняет конструкцию ПИП.

Нами предлагается новый СВЧ-метод определения влажности органических соединений, основанный на контрастном поглощении энергии ЭМ поля водой и жидким диэлектриком [33]. Исследуемый образец подвергается СВЧ-нагреву в специальном объеме (зоне взаимодействия) – многомодовом объемном резонаторе. Характерные размеры этой полости выбираются много больше длины волны ( $\lambda_r$ ) питающего генератора СВЧ. Это обеспечивает возможность реализации в ненагруженном состоянии множества колебаний (вырожденных и невырожденных) разной пространственной структуры так, что распределение поля (напряженности  $E$ ) практически равномерно в замкнутой металлической полости.

Функциональная схема устройства представлена на рис. 4.1. Для улучшения равномерности поля дополнительно используется линейная частотная модуляция (ЛЧМ), а также возбуждение тремя синфазными щелями (позиции 1 – 3 на рис. 4.1). Размеры  $R$  и  $l$  выбираются из условия максимума числа мод в полосе девиации  $\Delta f_d(\Delta\omega_d)$ . Согласно формуле Релея число мод  $\Delta N$  в объеме резонансной цилиндрической камеры  $V = \pi R^2 l$ :

$$\Delta N = \frac{V \omega_{cp}^2 \Delta \omega_d}{2\pi^2 c^3}, \quad (4.1)$$

где  $\omega_{cp} = 2\pi f_{cp}$  – средняя частота ЛЧМ модулирующей несущей.

Математическое моделирование спектра мод в полосе  $\frac{\Delta f_d}{f_{cp}} < 1\%$  (при  $Q_{нагр}$  каждой моды  $\approx 100$ ) позволяет оценить число мод (для  $R = 0,05$  м и  $l = 0,15$  м) как 150...200 для  $\lambda_{cp} = 3$  см. Кроме того величина  $R$  должна быть равна:  $R = \frac{3n\lambda_{cp}}{2\pi}$  (обычно  $n = 5...10$ ).

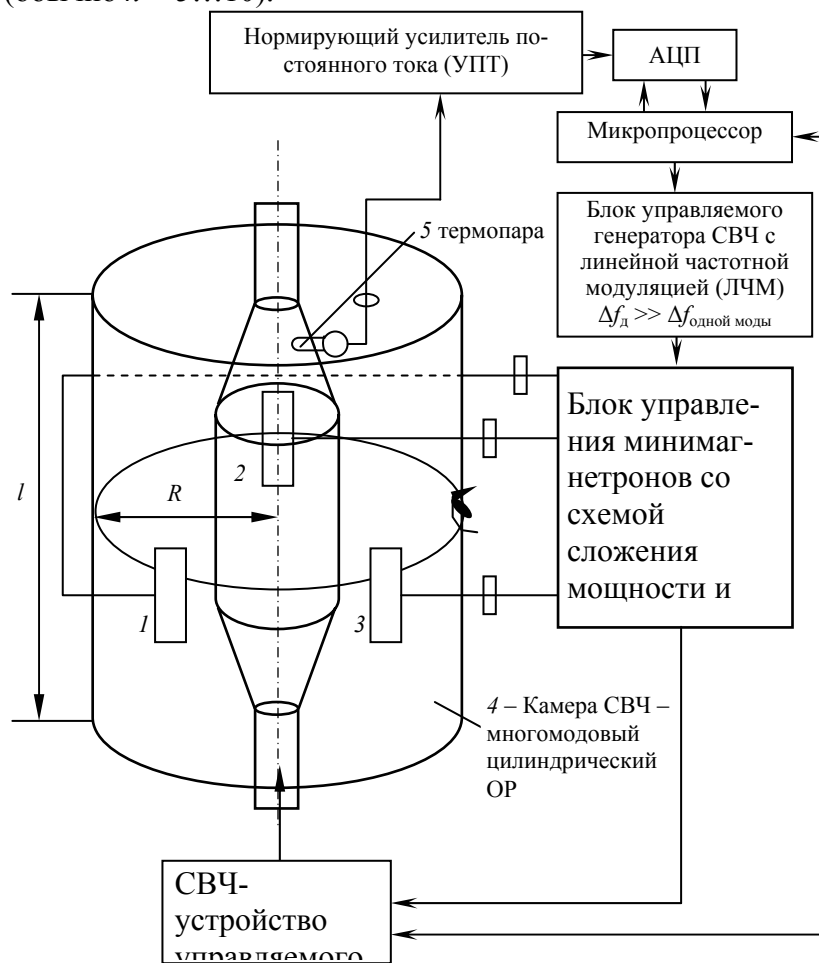


Рис. 4.1. СВЧ-влажномер стоячей волны

Сущность метода заключается в следующем. Фиксируется выходная мощность питающего генератора СВЧ:  $P_{вых} = const$ ; фиксируется время взаимодействия ( $t_{вз}$ ) влажного, жидкого или твердого образца с полем многих мод в замкнутом объеме:  $t_{вз} = const$ ; измеряется температура образца перед помещением в замкнутый объем  $T_1, ^\circ C$ , а затем температура  $T_2, ^\circ C$ , образца после  $t_{вз}$ . По величине  $\Delta T = T_2 - T_1$  определяют абсолютную влажность.

В качестве иллюстрации метода рассмотрим СВЧ-нагрев авиационного керосина марки РТ в СВЧ-объеме ( $\lambda_r \approx 12,7$  см). В данном СВЧ-объеме дополнительно используется вращающийся дефлектор для улучшения равномерности поля (дополнительные излучающие щели и сканирование частоты генератора СВЧ в конструкции не предусмотрено). На оси ординат графика (рис. 4.2) показан абсолютный прирост температуры  $\Delta T$  после СВЧ-нагрева чистого керосина (линия 1) и того же керосина, но с 0,2 % добавкой жидкости «И» (линия 2); на оси абсцисс показана начальная температура нагрева керосина.

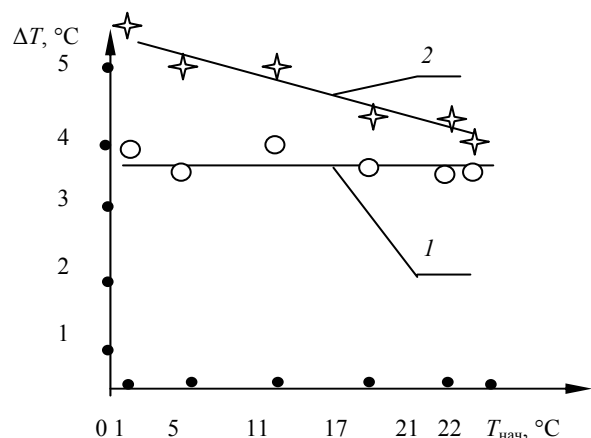
Как известно, с ростом температуры количество растворенной влаги в керосине растет, но как видно из графика (линия 1) прирост абсолютной температуры остается практически постоянным. На наш

взгляд, это объясняется тем, что резонансно поглощают СВЧ электромагнитную энергию не одиночные молекулы воды, а сдвоенные, строенные и т.д. конгломераты молекул.

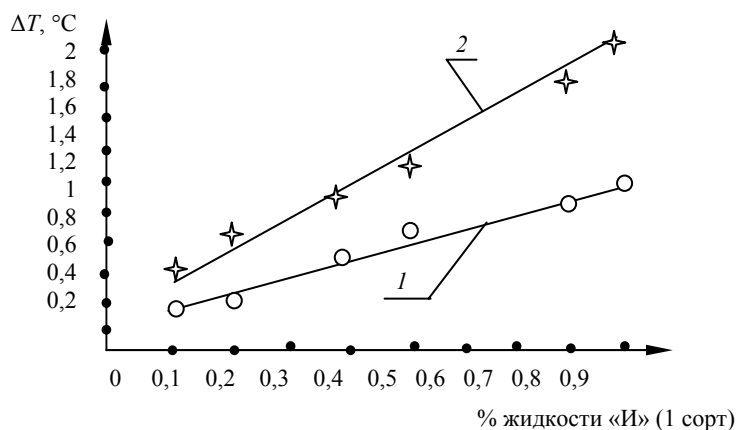
**С ростом температуры количество растворенной воды увеличивается, но увеличивается и подвижность молекул, что оставляет концентрацию конгломератов молекул воды практически постоянной. Данное объяснение требует дальнейшего обсуждения.**

Из анализа хода линии 2 можно сделать вывод: чувствительность к содержанию в керосине жидкости «И» увеличивается с уменьшением температуры – примерно в 5 раз с уменьшением начальной температуры нагрева с 21 до 2 °С. На рис. 4.3 представлены зависимости разности абсолютных температур нагрева авиационного керосина марки РТ с жидкостью «И».

В зависимости от температуры окружающей среды в авиационный керосин добавляется 0,1...0,3 % жидкости «И», которая связывает растворенную влагу, не давая ей образовывать мелкие капли (эмульсию).



**Рис. 4.2. Линии нагрева**

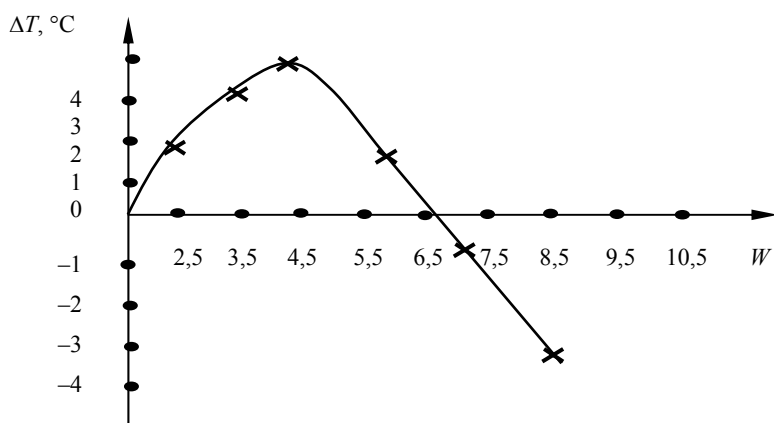


**Рис. 4.3. Линии нагрева керосина с жидкостью «И»**

Линия 1 соответствует нагреву в течение  $t = 30$  с и непрерывной мощности магнетрона  $P_m = 600$  Вт; линия 2 – нагреву в течение 1 мин и  $P_m = 600$  Вт. Начальная температура нагрева в эксперименте в зависимости от опыта лежала в пределах  $T_{нач} = 17,4...17,8$  °С. На рис. 4.3 величина  $\Delta T = T_{«И»} - T_{\text{чистый керосин}}$ . Абсолютную инструментальную погрешность (за счет погрешности двух электронных термометров и неравномерности поля) можно оценить как  $\pm 0,1$  °С. Оценка данной погрешности производилась по результатам СВЧ-нагрева множества идентичных проб, помещенных в одно и то же место замкнутой полости. В установке применялись специальные меры по устранению конвекционного тепла за счет нагрева магнетрона.

Линейный рост  $\Delta T$  объясняется наличием в жидкости «И» в зависимости от сорта 0,2...0,6 % влаги. В эксперименте использовалась жидкость «И» 1 сорта (процент содержания воды меньше 0,2).

Относительную погрешность определения жидкости «И» в авиационном керосине можно оценить примерно как 40 % для 0,1 % «И» и  $T_{\text{нач}} = 17,6$  °С и 3 % для 0,3 % «И» и  $T_{\text{нач}} = 2$  °С. График на рис. 4.4 иллюстрирует пределы однозначного прироста температуры.  $\Delta T$  – это разность абсолютных температур нагрева этиленгликоля с добавлением воды и его же концентрированного (содержание влаги по паспортным данным приблизительно 1,5 %). Однозначный прирост температуры наблюдается до 3,5...4,5 %. Неоднозначность объясняется тем, что с ростом процента растворенной влаги потери растут, но увеличивается при этом и диэлектрическая проницаемость смеси  $\epsilon_{\text{см}}$ , что влечет за собой согласно граничным условиям уменьшение напряженности поля в исследуемой среде.  $E_{\text{ср}} = E_0/\epsilon_{\text{см}}$ , а как известно, мощность потерь



**Рис. 4.4. Зависимость приращения температуры смеси от абсолютной влажности**

$P_{\text{пот}} \sim (E_{\text{ср}})^2$ , где  $E_0$  – напряженность электрического поля в объеме взаимодействия;  $E_{\text{ср}}$  – в исследуемой среде;  $W$  – абсолютная влажность, %.

Таким образом, применение термовлагометрического метода измерения имеет следующие достоинства: простота и доступность реализации; не нужен образец строгой формы; однородность электромагнитных полей (в широком диапазоне измерения влажности может нарушиться условие одномерности в волноводе, что приводит к дополнительным погрешностям); устранение влияния вырожденных колебаний на результаты измерения.

Рассмотренный выше метод является методом стоячей волны (СВ) (смешанной, с малой величиной коэффициента бегущей волны (КБВ)) и позволяет определять величину объемной влажности  $W$  твердых строительных материалов при существенном ограничении их геометрических размеров, т.е. только для их образцов. Размеры объемных образцов при этом по всем трем координатам должны быть меньше  $\lambda_{\text{г}}$ .

В этом случае в трубопровод вставляется кассета (рис. 4.5) из радиопрозрачного материала с мелкоячеистым поролоном 1 с диэлектрической сеткой 2, с заделанной в ее узлах совокупностью термопар 3, на которых располагается влажный твердый образец 4. Или же кассета с заделанными в днище термопарами заполняется неполярной жидкостью без потерь на СВЧ-нагрев, плохо смачивающей с минимальной величиной  $\epsilon'_{\text{см}}$ , например, трансформаторное масло.

Важнейшим при этом является практическая независимость характеристики  $T$  (°C) =  $\Phi(W)$  от размера и формы образца и его местоположения в камере объема  $V \gg V_{\text{образца}}$ .

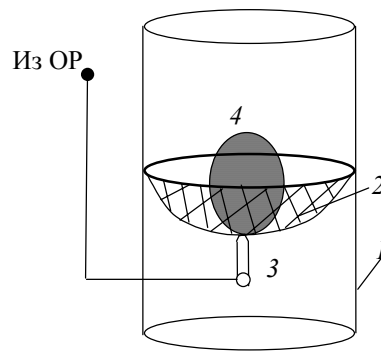


Рис. 4.5. Размещение образца в кассете

#### 4.1.2. Апертурный комбинированный термовлагодетрический микроволновый метод

При контроле строительных изделий больших размеров термо-влажнострический метод на многомодовом ОР естественно не пригоден. Известные микроволновые апертурные методы БВ хотя и обладают главным свойством адеструктивности, но крайне сложны аппаратно, с обязательным наличием двух апертур (приемной и передающей), с большим расстоянием апертуры от поверхности материала, при этом измерение  $W$  не локально. Отсюда имеется повышенная опасность СВЧ-облучения персонала, а главное практически невозможна реализация одностороннего доступа к измеряемой поверхности, что важно в реальных условиях измерения  $W$  строительных конструкций.

Нами предлагается одноапертурный термовлагодетрический микроволновый метод контроля твердых большеразмерных изделий из строительных материалов, таких как бетон разных марок (в соответствии с ТУ диапазон  $W \% \in [0,05; 0,3]$  (объемной влажности), керамика, гипсоблоки, силикатный кирпич и т.д.

Главной целью разработки односторонней апертуры являлось обеспечение максимума переноса СВЧ-энергии падающей волны именно в материал и минимума отражений и рассеивания энергии в окружающее пространство, повышение локальности измерения  $W$ . Здесь реализуется генезис высокой чувствительности от термовлагодетрии на многомодовом ОР (стоячая волна – СВ) к апертурной термовлагодетрии бегущей (падающей) волны БВ в стремлении ограничить объем взаимодействия  $V_{вз}$  преломленной волны с материалом и даже его минимизации, уменьшая величину  $\Delta$  как меры  $h \leq b$  и величину площади облучения  $S_{\phi}$  для повышения чувствительности и безопасности.

Условно все объекты измерений (образцы влажных строительных материалов и конструкций из них), при условии значения величин продольных размеров много больше  $\lambda_r$ , можно разделить по соотношению их толщины  $b$  к  $\lambda_r$  на:

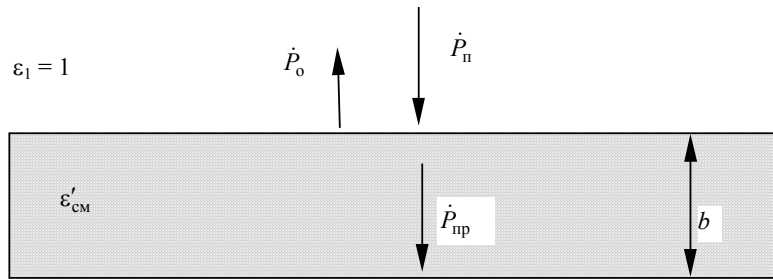
- а)  $b \ll \lambda_r$  («квазистационарное» апертурное приближение);
- б)  $b \approx \lambda_r$  («резонансное» приближение);
- в)  $b \gg \lambda_r$  («оптическое» приближение), или  $b \gg \Delta$ . При этом прочие геометрические размеры должны быть много больше размеров эффективного раскрытия апертуры.

Эти соотношения во многом определяют вид и конструкцию согласованной излучающей апертуры БВ и режим работы управляемого ГСВЧ, его мощность, аппаратное и метрологическое обеспечение измерения  $W$ . Заметим, что случай а) нами не рассматривается, так как практически вся мощность падающей волны проходит через материал, что не обеспечивает безопасности персонала.

Случай же б) метрологически неадекватен из следующих соображений. Если поток излучения падает перпендикулярно поверхности раздела между двумя материалами с различными диэлектрическими постоянными  $\epsilon_0$  и  $\epsilon'_{см}$ , то энергия его будет частично возвращаться в первую среду, а остальная часть – переходить во вторую среду (рис. 4.6).

При этом коэффициент отражения  $\dot{R}_0 = \frac{\dot{P}_o}{\dot{P}_n} \exp(j\phi)$ , где  $\phi$  – сдвиг фаз между  $\dot{P}_o$  и  $\dot{P}_n$ . Или через волновые сопротивления

$$\dot{R}_0 = \frac{\dot{Z}_{B2} - \dot{Z}_{B1}}{\dot{Z}_{B2} + \dot{Z}_{B1}} = \frac{1 - \sqrt{\dot{\epsilon}_{CM}}}{1 + \sqrt{\dot{\epsilon}_{CM}}} \quad (4.2)$$



**Рис. 4.6.** Схема измерения энергии преломленной и отраженной волн для сред без потерь ( $b \rightarrow \infty$ )

Зная волновое сопротивление среды  $l$  (например, для воздуха  $\dot{Z}_{B1} \approx Z_0$ ) и высчитывая  $\dot{R}_0$  (по  $\dot{P}_o$ ), находим модуль искомого волнового сопротивления среды 2:

$$\dot{Z}_{B2} = \frac{1 + \dot{R}}{1 - \dot{R}} \dot{Z}_{B1} \quad \text{или} \quad \dot{\epsilon}_{CM}^{-1/2} = \frac{1 + \dot{R}}{1 - \dot{R}} \quad (4.3)$$

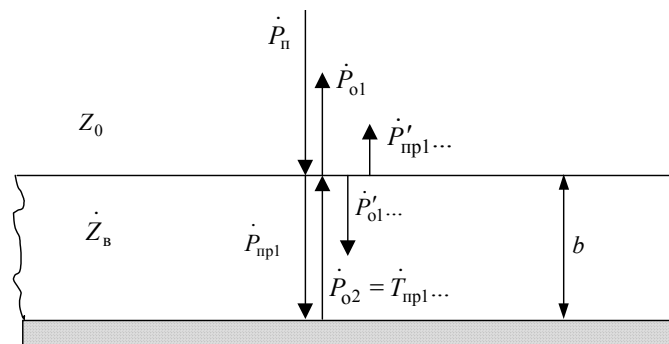
Таким образом, до настоящего времени адекватные измерения  $\dot{\epsilon}_{CM}$  или  $\epsilon'_{CM}$  поглощающих сред осуществляются лишь в так называемых полубесконечных образцах по измеренным величинам коэффициентов отражения. Метод непригоден для определения этой величины в реальных условиях при  $b \approx \lambda$ . Известные планарные емкостные и токовихревые датчики не обеспечивают локальность измерения и отстройку от зазора без большой погрешности.

Если среда с конечной  $b$ , но с такими большими  $\epsilon''$ , что отраженная от металлической подложки, устраняющей сквозное прохождение ЭМВ через материал, волна, пройдя путь  $2b$  полностью, на этом пути затухает, тогда также возможно [84] измерение  $\dot{\epsilon}_{CM}$  ( $\epsilon'_{CM}$ ) на кромке по (4.3) (рис. 4.7), т.е. величины  $W_{np}$ .

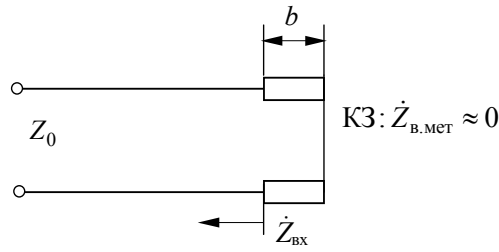
Величина волнового сопротивления металлической подложки  $\dot{Z}_{B,мет} \approx 0$  или определяется из граничных условий Лентовича–Щукина как поверхностное его сопротивление [84].

Используя схему переотражения (рис. 4.7) и эквивалентную схему (рис. 4.8), полученную на основании теории длинных линий, имеем

$$\dot{R} = \frac{\dot{Z}_{Bx} - 1}{\dot{Z}_{Bx} + 1} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{CM}} \operatorname{th} j \left[ \frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{CM}} \right]} - 1}{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{CM}} \operatorname{th} j \left[ \frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{CM}} \right]} + 1} = \frac{\dot{Z}_B \operatorname{th} j \left[ \frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{CM}} \right] - 1}{\dot{Z}_B \operatorname{th} j \left[ \frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{CM}} \right] + 1}$$



**РИС. 4.7.** СХЕМА ПЕРЕОТРАЖЕНИЯ ПАДАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ



**Рис. 4.8. Эквивалентная схема радиопоглощающего слоя диэлектрика на металлической подложке (КЗ – короткое замыкание)**

Тогда с учетом того, что  $\dot{\gamma} = jk = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{см}}} = j(\beta - j\alpha)$  – постоянная распространения, получаем окончательное выражение для

$$\dot{R} = \frac{\dot{Z}_B \operatorname{th} \dot{\gamma} b - 1}{\dot{Z}_B \operatorname{th} \dot{\gamma} b + 1} = \Phi(\dot{Z}_B, \dot{\gamma}). \quad (4.4)$$

Если по (4.2) обозначим

$$\dot{R}_0 = \frac{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{\text{см}}} - 1}}{\sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_{\text{см}}} + 1}} = \frac{\dot{Z}_B - \dot{Z}_0}{\dot{Z}_B + \dot{Z}_0} = \frac{\frac{\dot{Z}_B}{\dot{Z}_0} - 1}{\frac{\dot{Z}_B}{\dot{Z}_0} + 1},$$

то

$$\dot{R} = R_0 + \frac{(R_0^2 - 1) \exp(-2jkb)}{1 - k_0 \exp(-2jkb)},$$

$$\dot{Z}_{\text{ВХ}} = j\dot{Z}_B \operatorname{tg} jkb = \dot{Z}_B \operatorname{th} jkb = \dot{Z}_B \operatorname{th} j \left( \frac{2\pi b}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_{\text{см}}} \right),$$

где величина  $\frac{\exp(-2jkb)}{1 - k_0 \exp(-2jkb)}$  является негармонической периодической пространственной функцией, откуда

$$\dot{R} = \dot{R}_0 - \sum_{m=1}^{\infty} (1 - \dot{R}_0^2) \dot{R}_0^m \exp(-2j(m+1)kb).$$

Представление  $\dot{R}$  в виде ряда упрощает понимание отражения от рассматриваемой на рис. 4.7 структуры. Ясно, что каждый член ряда  $\dot{R}_0^m$  при  $m = 1, 2, \dots, \infty$  соответствует определенной составляющей волны, отраженной от поверхности, т.е. волны, отраженной от поверхности радиопоглощающего материала (РПМ), и падающие волны проходят путь многократного отражения.

Критическая связь возникает тогда, когда они сходятся в противофазе (инверсия вектора распространения). При этом  $\dot{R}$  принимает минимальное значение. Это означает, что слой является поглотителем с приемлемой, достаточно малой величиной  $b$ , однако электромагнитные характеристики становятся функциями  $\lambda$  – важный фактор для широкополосных поглотителей.

Вполне очевидно, что в рассмотренном случае конечной величины  $b$  отсутствует возможность определения  $\dot{\epsilon}_{\text{см}}$  ( $W_{\text{п}}$ ) или  $\epsilon'_{\text{см}}$  ( $W_{\text{п}}$ ) по  $\dot{R}$ , так как  $\dot{\epsilon}_{\text{см}} = \Phi(\dot{R}, \dot{\gamma})$ , а величина  $\dot{\gamma}$  неизвестна.

Таким образом, для рассматриваемого случая  $b \gg \lambda$  ( $b \gg \Delta$ ) принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь к поверхности изделия, обеспечивая

минимум облучения окружающей среде, контакт с поверхностью имеет лишь термопарный преобразователь (батарея термопар), причем степень прижима преобразователя должна быть максимально возможная (полупроводниковые терморезисторы в применении исключаются из-за СВЧ их нагрева). Заметим, что разработанные влагомеры рассчитаны на коррекцию измерений объемной влажности материала ( $W = 0,05 \dots 0,3$ ) с учетом изменения влажности и температуры окружающей среды.

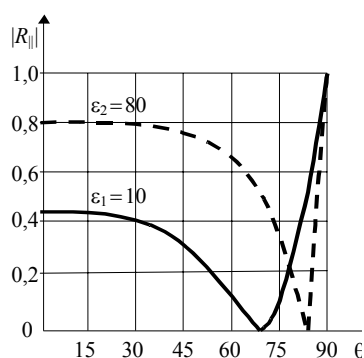
При измерениях  $W_{\text{п}}$  необходимы локальные датчики одностороннего доступа к поверхности. Известен серийно выпускаемый в малой серии портативный радиочастотный измеритель затухания (ПРИЗ-1) [21], где реализован известный одноантенный метод (с односторонним доступом) определения параметров радиопрозрачных антенных обтекателей. К сожалению, он позволяет измерять только качественно степень увлажнения радиообтекателя.

Согласно [85] угол полного преломления для  $E$ -волн (вектор  $\vec{E}$  лежит в плоскости падения) – угол Брюстера (рис. 4.9, 4.10) в первом приближении для сред без потерь ( $\gamma = 0$ ) определяется условием:

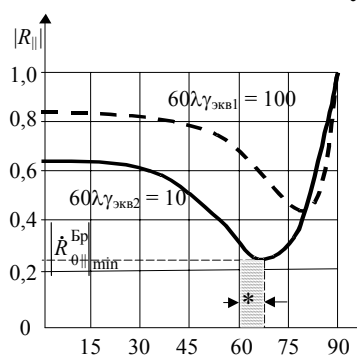
$$\sin \theta_{0\parallel}^{\text{Бр}} = \epsilon'^{1/2} / (\epsilon' + 1)^{1/2}$$

или

$$\epsilon'_{\text{см}} = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}} = \text{tg}^2(\theta_{\text{гл}} \pm \Delta\theta). \quad (4.5)$$



**Рис. 4.9. Зависимость коэффициента отражения от угла падения ( $\epsilon'' = 0$ )**



**Рис. 4.10. Зависимость коэффициента отражения от угла падения**

При росте величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_{\text{см}}$  или  $W_{\text{п}}$  угол  $\theta_{0\parallel}^{\text{Бр}}$  уменьшается. Это позволяет по углу Брюстера измерять величину диэлектрической проницаемости  $\epsilon'_{\text{см}}$  для сред с потерями при  $W_{\text{п}} > 0$ . Здесь отношение мощности, регистрируемой приемником после отражения от исследуемого образца, к мощности, регистрируемой при замене образца идеально отражающей поверхностью, позволяет найти коэффициент отражения по мощности.

Индикация угла Брюстера, изменяемого у апертуры электронным изменением положения направления максимума ДН, возможна следующим способом: индикацией отсутствия поля отраженной волны (при  $W_{\text{п}} = 0$ ) или поиском его минимума (при  $W_{\text{п}} \neq 0$ ), если падающая волна имеет  $E$ -поляризацию (вектор  $\vec{E}$  параллелен плоскости падения). Мерой величины потерь во влажном материале,

т.е. величины  $\epsilon''_{\text{см}} \equiv \gamma_{\text{эКВ}}$  (См/м), при  $\theta_0 = \theta_{0\parallel}^{\text{Бр}}$  служит величина минимального коэффициента отражения, который при  $W_{\text{п}} > 0$  уже не равен нулю, и тем больше, чем больше величина  $W_{\text{п}}$  или  $\epsilon''_{\text{см}}$  (рис. 4.10). Зная мощность падающей волны  $P_{\text{п}}$  и измеренную приемной антенной (вибратором с квадратичным детектором) мощность отраженной волны  $P_{\text{о}}$ , определяем в первом приближении величину  $\epsilon''_{\text{см}}$  или  $\gamma_{\text{эКВ}}$ :



$$\left| \dot{R}_{0||}^{\text{Бр}} \right|_{\min} = \frac{P_0}{P_{\Pi}} \cong k_1 \gamma_{\text{ЭКВ}} = k_2 \varepsilon''_{\text{СМ}} \quad \text{или} \quad \varepsilon''_{\text{СМ}} \cong k_3 R_{0||}.$$

Пусть измеренное значение  $\left| \dot{R}_{0||}^{\text{Бр}} \right|_{\min} = a$ , тогда

$$\left| \dot{R}_{0||}^{\text{Бр}} \right|_{\min} = \left| \frac{\dot{Z} \cos \theta_{\text{нр}}^{\text{Бр}} - Z_0 \cos \theta_{0||}^{\text{Бр}}}{\dot{Z} \cos \theta_{\text{нр}}^{\text{Бр}} + Z_0 \cos \theta_{0||}^{\text{Бр}}} \right| = a. \quad (4.6)$$

Зная  $\cos \theta_{0||}^{\text{Бр}}$ , свяжем угол падения (угол Брюстера) с углом преломления. Из второго закона Снеллиуса следует, что  $\sin \theta_{\text{нр}}^{\text{Бр}} = \frac{1}{\sqrt{(\varepsilon' + 1)}}$ .

$$\text{Так как } \dot{Z} = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_0}{\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}}}}, \text{ а } Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}, \text{ то } \frac{\dot{Z}}{Z_0} = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_0}{\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}; \dot{Z} = Z_0 (\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}})^{-1/2}.$$

Минимальное значение модуля коэффициента отражения

$$\left| \dot{R}_{0||}^{\text{Бр}} \right|_{\min} = a = \left| \frac{(\varepsilon'_{\text{СМ}})^{1/2} - (\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}})^{1/2}}{(\varepsilon'_{\text{СМ}})^{1/2} + (\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}})^{1/2}} \right|. \quad (4.7)$$

Так как

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}'_{\text{а см}} &= \varepsilon'_{\text{а см}} - j \varepsilon''_{\text{а см}} = \varepsilon'_{\text{а см}} - j 60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}} = \\ &= \varepsilon_0 \left( \varepsilon'_{\text{СМ}} - j \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0} \right) = \varepsilon_0 (\varepsilon'_{\text{СМ}} - j \varepsilon''_{\text{СМ}}), \end{aligned}$$

то

$$\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}} = \frac{\dot{\varepsilon}'_{\text{а см}}}{\varepsilon_0} = \varepsilon'_{\text{СМ}} - j \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0}, \quad \varepsilon''_{\text{СМ}} = \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0}. \quad (4.8)$$

С учетом этого получаем

$$\begin{aligned} \left| \dot{R}_{0||}^{\text{Бр}} \right| = a &= \left| \frac{(\varepsilon'_{\text{СМ}})^{1/2} - \left( \varepsilon'_{\text{СМ}} - j \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0} \right)^{1/2}}{(\varepsilon'_{\text{СМ}})^{1/2} + \left( \varepsilon'_{\text{СМ}} - j \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0} \right)^{1/2}} \right| = \\ &= \left| \frac{(\varepsilon'_{\text{а см}})^{1/2} - \left( \varepsilon'_{\text{а см}} - j \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0} \right)^{1/2}}{(\varepsilon'_{\text{а см}})^{1/2} + \left( \varepsilon'_{\text{а см}} - j \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon_0} \right)^{1/2}} \right| = \\ &= \left| \frac{(\varepsilon'_{\text{а см}})^{1/2} - \left[ \sqrt{(\varepsilon'_{\text{а см}})^2 + (60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}})^2} \right]^{1/2} e^{\frac{1}{2} j \arctg \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon'_{\text{а см}}}}}{(\varepsilon'_{\text{а см}})^{1/2} + \left[ \sqrt{(\varepsilon'_{\text{а см}})^2 + (60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}})^2} \right]^{1/2} e^{\frac{1}{2} j \arctg \frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon'_{\text{а см}}}}} \right|. \quad (4.9) \end{aligned}$$

Несмотря на существенные потери, параметры влажного материала удовлетворяют условию  $\varepsilon'_{\text{а см}} \gg 60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}} = \varepsilon''_{\text{а см}}$ .

Тогда, согласно [5]  $\frac{60 \lambda \gamma_{\text{ЭКВ}}}{\varepsilon'_{\text{а см}}} \approx 4a$  и

$$\gamma_{\text{ЭКВ}} \approx \frac{\varepsilon'_{\text{а см}}}{15\lambda} a \quad \text{или} \quad \varepsilon''_{\text{а см}} \approx 4a\varepsilon'_{\text{а см}}. \quad (4.10)$$

Таким образом, величины  $\varepsilon''_{\text{см}}$  рассчитываются при известной длине волны  $\lambda_{\Gamma}$  по измеренному коэффициенту отражения  $\left| \dot{R}_{0||}^{\text{Бр}} \right| = a$  и рассчитанному ранее, а по величине угла Брюстера

$$\varepsilon'_{\text{см}} = \text{tg}^2 \theta_{0||}^{\text{Бр}}. \quad (4.11)$$

#### 4.1.3. Разработка алгоритма измерения поверхностной влажности по углу Брюстера в зависимости от длины волны

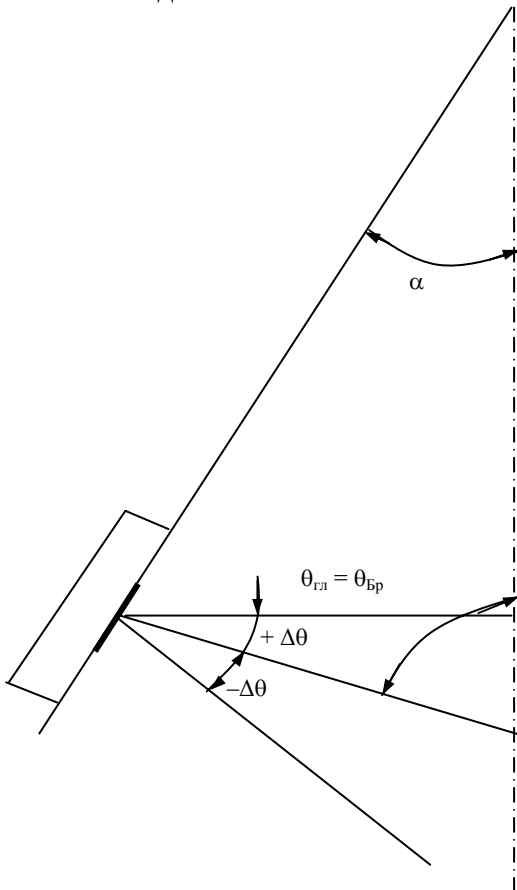
Угол образующей конусной апертуры  $\alpha$  должен обеспечивать падение волны на поверхность материала под углом Брюстера (полного преломления) (рис. 4.11):

$$\theta_{\text{пад}} = \theta_{\text{Бр}} = \theta_{\text{гл}} = (\pi/2) - \alpha, \quad (4.12)$$

при этом наблюдается минимум мощности  $P_{\text{отр}}$  отраженной волны (при условии  $\varepsilon''_{\text{см}}(W) \neq 0$ , что всегда имеет место, где  $\varepsilon''$  – мнимая часть  $\varepsilon$ ). Величина же  $\theta_{\text{Бр}}$  является мерой влажности поверхностного слоя  $W_{\text{п}}$ , т.е. максимальной влажности материала из-за отрицательного градиента влажности вглубь материала. Так как

$$\varepsilon'(W_{\text{п}}) = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}} = \text{tg}^2(\theta_{\text{гл}} \pm \Delta\theta), \quad (4.13)$$

то измеряя величину  $\theta_{\text{Бр}}$  можно определить  $W_{\text{п}}$ . Важно при этом, чтобы величина  $\theta_{\text{Бр}}$  была равна  $\theta_{\text{гл}}$  – углу максимума ДН главного лепестка круговой щелевой антенны и менялась автоматически системой непрерывного поиска минимума  $P_{\text{отр}}$ , что обеспечивает решение важной задачи охраны окружающего персонала от воздействия СВЧ-поля и



**Рис. 4.11. К аналитической модели**

повышение чувствительности основного алгоритма определения  $W$  в объеме нагрева (см. далее). Величина  $\theta_{\text{гл}}$  выбирается из условий номинальной  $\lambda_{\text{ном}} = 0,02$  м (при которой  $\Delta\theta = 0$  или из других соображений, связанных с параметрами ДН) или  $0,0174$  соответствующей  $\varepsilon'_{\text{см max}}|_{t=20^\circ\text{C}}$  и первоначальной  $W_{\text{нач}}$  из диапазона  $W_{\text{п}} \in [0,05; 0,3]$ .

Пределы изменения  $\lambda_{\text{г}}$  при условии одномодового режима основной волны  $H_{10}$  составляют  $\lambda_{\text{г}} \in [0,016; 0,025]$  м. Примем  $W_{\text{п ном}} = 0,3 = W_{\text{п max}}$ . Выбор такого значения  $W_{\text{п ном}}$  обусловлен тем, что  $W_{\text{п max}}$  соответствует величина  $\varepsilon'_{\text{см max}}$ , при которой согласно (4.13) угол Брюстера максимальный. При уменьшении  $W_{\text{п}}$  величина угла  $\theta_{\text{бр}} = \theta_{\text{гл}} - \Delta\theta$  уменьшается.

Согласно (3.1) зависимость угла отклонения представляет собой

$$\sin \Delta\theta = \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{\text{г}}}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2d_2} = \frac{\lambda_{\text{г}}}{\Lambda} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2d_2}$$

или

$$\Delta\theta = \arcsin \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{\text{г}}}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2d_2} \right\}. \quad (4.14)$$

Для волны  $H_{10}$ :  $\lambda_{\text{кр}} = 2a =$  (для МЭК-140)  $= 0,032$  при номинале,  $\lambda_{\text{г ном}} = 0,0174$  м.

Длина волны в волноводе

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\lambda_{\text{г ном}}}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_{\text{г ном}}}{2a} \right)^2}} = |a = 0,016 \text{ м}| = 0,0207 \text{ м},$$

величина  $2d_2 = \lambda_{\text{в}} = 0,0207$  м.

При  $\lambda_{\text{г ном}} = 0,0174$  м выражение (4.14) примет вид:

$$\Delta\theta = \arcsin \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{\text{г}}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\}. \quad (4.15)$$

Заметим, что при  $\lambda_{\text{г ном}} = 1,74 \cdot 10^{-2}$  м  $\Delta\theta = 0$ .

Величина  $\varepsilon'_1$  по (2.13)

$$\varepsilon'_1 = 5 + \frac{83,2 - 0,3775 t}{\left[ 1 + \left( 1,21 \cdot 10^{-5} \frac{\exp\left(\frac{2175}{t+273}\right)}{\lambda} \right)^2 \right]},$$

а согласно табл. 2.2, для красного кирпича, на примере которого рассматриваются аналитические зависимости:  $\varepsilon'_2 = 3,766$ . Аналитическая зависимость смесевой характеристики согласно (2.34) при оптимальном значении  $\alpha$

$$\varepsilon'_{см}(W_{п}, \lambda_{г}, t) = (\varepsilon'_1)^{W^{0,7}} (\varepsilon'_2)^{1-W^{0,7}} = \varepsilon'_2 \left( \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_2} \right)^{W^{0,7}} = 3,766 \left( \frac{\varepsilon'_1}{3,766} \right)^{W^{0,7}}. \quad (4.16)$$

Подставляя (4.14), (4.15) в (4.13), получаем аналитическое выражение модели измерения поверхностной влажности по измеренной величине длины волны генератора, общий вид которой

$$(\varepsilon'_{см}(W_{п}, \lambda_{г}, t \text{ } ^\circ\text{C}))^2 = \text{tg}^2 \theta_{бр} = \text{tg}^2 \left( \theta_{гл} \pm \arcsin \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{г}}{2d_2} \right) \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{г}}{2d_2} \right\} \right) = A. \quad (4.17)$$

Из выражения (4.17), прологарифмировав его по натуральному основанию, например, легко получить информативную зависимость  $W_{п}$  от комплекса параметров:

$$W_{п} = \left[ \frac{\ln \text{tg}^2 \theta_{бр} - \ln \varepsilon'_2}{\ln \varepsilon'_1 - \ln 3,766} \right]^{1,428}. \quad (4.18)$$

Для рассматриваемого примера (красный кирпич) расчетное выражение (4.18) примет вид:

$$W_{п} = \frac{\ln \left\{ \text{tg}^2 \left( \theta_{гл} \pm \arcsin \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{г}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right) \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{г}}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\} \right) \right\} - \ln 3,766}{5 + \left[ 1 + \frac{83,2 - 0,3775t}{\exp \left( \frac{2175}{t + 273} \right) \frac{1}{\lambda}} \right]} \cdot \quad (4.19)$$

В выражениях (4.18), (4.19) величина  $\theta_{гл}$  определяется следующим образом. В выражение (4.16) подставляется значение величины  $\varepsilon'_1$ , рассчитанной при номинальной длине волны генератора, равной 0,0174 м, и температуре 20 °С, при  $W_{п \text{ ном}} = W_{п \text{ max}} = 0,3$ , т.е. решается уравнение

$$3,766 \left[ \frac{\varepsilon'_1}{3,766} \right]^{0,3^{0,7}} = \text{tg}^2 \theta_{гл}, \quad 0,3^{0,7} = 0,431,$$

а угол наклона образующей конуса рупора  $\alpha = 90^\circ - \theta_{гл}$ .

Численное моделирование (4.18) и (4.19) позволило выявить эти расчетные зависимости и обратные им аналитические зависимости  $\lambda_{г} = \Phi(W_{п})$ , показанные на рис. 4.12 и 4.13.

Программа расчета информативной зависимости величины поверхностной влажности от управляемой длины волны генератора и обратной ей зависимости приведена в прил. 3. В нем же приведены результаты расчета этих зависимостей для некоторых материалов, приведенных в табл. 2.2 с крайними по диапазону значениями величины  $\varepsilon'_{2см}$ .

На основании рис. 4.13 определим нормированную девиацию длины волны:

$$\Delta\lambda_{\text{н}} = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{ном}}} \cdot 100 \% = \frac{0,0192 - 0,0174}{0,0174} = 11,5 \%$$

ИЛИ

$$\Delta\lambda_{\text{н}} = \frac{\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}}{\lambda_{\text{ср}}} \cdot 100 \% = 11 \%$$

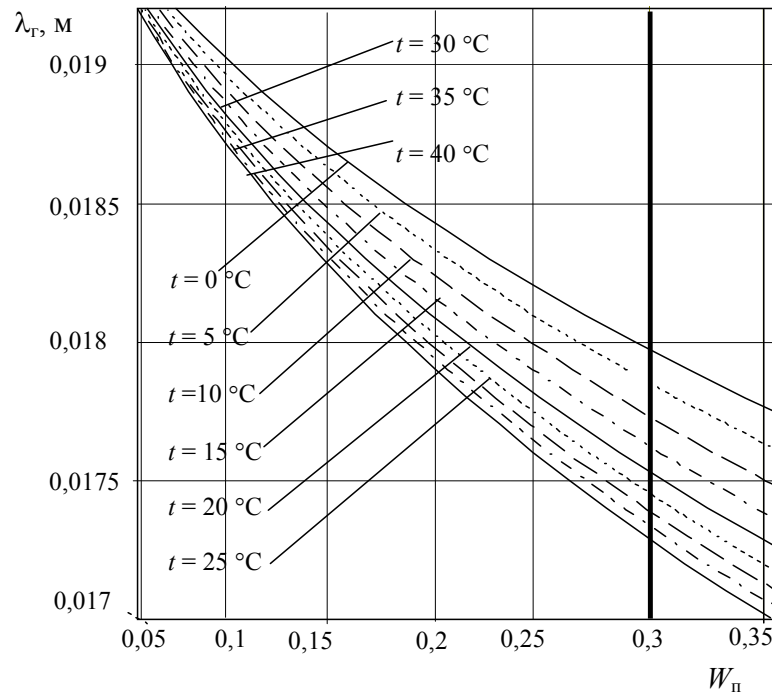


Рис. 4.12. Аналитическая зависимость длины волны от поверхностной влажности при разных температурах

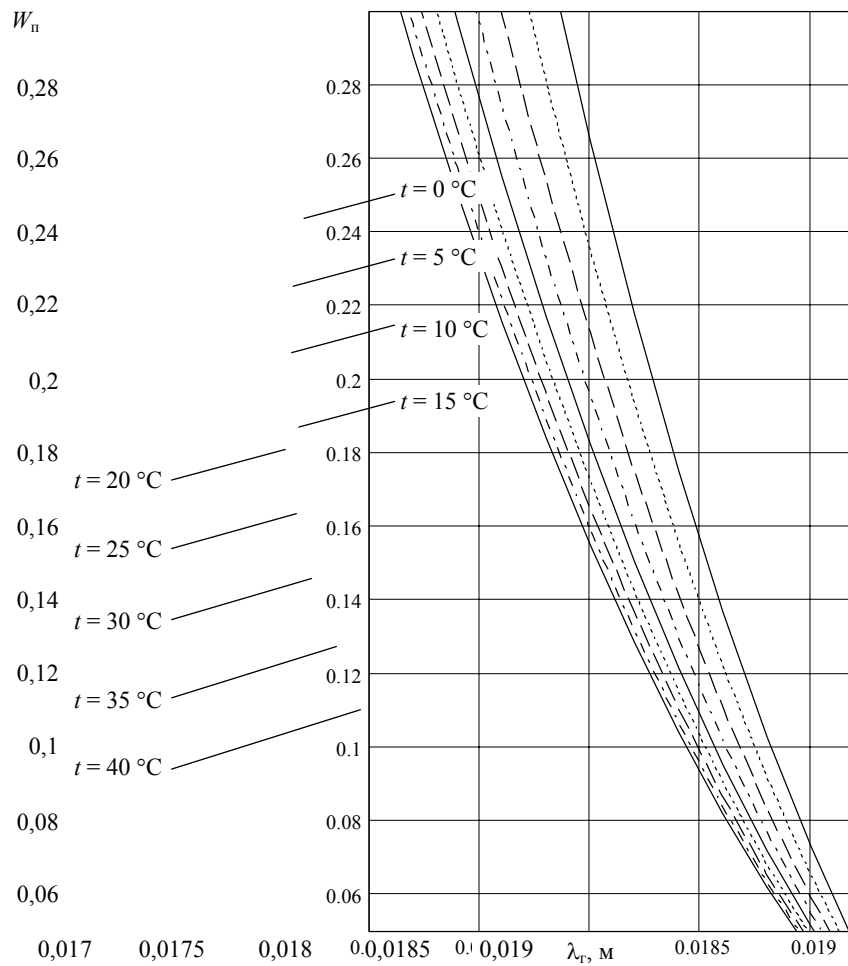
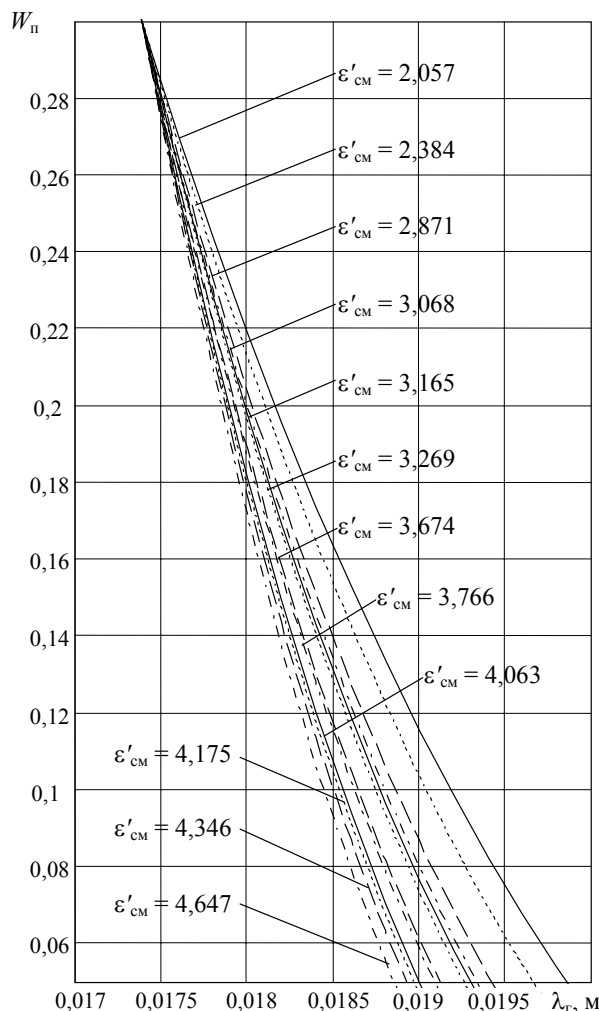


Рис. 4.13. Зависимость поверхностной влажности от длины волны при разных температурах (расчетные для реализации алгоритма)

Очевидно, что управление частотой (длиной волны) адекватно реализуется на ЛОВ «О» и даже на магнетронных ГСВЧ без механической перестройки.

На рис. 4.14 для сравнения показаны зависимости  $W_n = \Phi(\lambda_r)$  при номинальной температуре  $t = 20$  °С для разных материалов (нумерация материалов соответствует табл. 2.2. По табл. 4.1 можно определить необходимую для реализации среднеарифметическую величину  $\theta_{гл} = 72^\circ$  и среднюю по диапазону  $\theta_{гл} = 71,5^\circ$ .



**Рис. 4.14. Информативная зависимость для совокупности материалов (табл. 2.2) при  $t = 20^\circ$ ,  $\epsilon'_{CM} = 2,057...4,647$**

**4.1. Значения  $\theta_{ГЛ}$  для разных материалов при температуре  $20^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 0,0174\text{ м}$**

Номер по табл. 2.2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\theta_{ГЛ}$ , град	69,5	70,3	71,2	71,6	71,7	71,9	72,4	72,5	72,9	73	73,2	73,5

Из анализа зависимостей  $\Delta\theta(\lambda_r)$  следует, что пределы изменения угла отклонения максимума ДН  $\Delta\theta_{\pm}$  от  $v_{з.ф} \in [0,5; 1]$ , т.е. от  $\lambda_r \in [0,017; 0,02]$  м при  $2a/d = 1,95$ :  $+10^\circ \leq \Delta\theta_{\pm} \leq -20^\circ$ . Из анализа графиков (рис. 4.12 – 4.14 и прил. 3) можно сделать следующий основной вывод: чувствительность преобразования практически постоянна при  $W_{II} \in [0,05; 0,3]$  и составляет  $20\text{ МГц} / 1\% W_{II}$ .

**4.1.4. Алгоритм измерения в микроволновой термовлагометрии**

Постоянство угла падения ЭМВ на поверхность под углом полного преломления при изменении измеряемой  $W_{II}$  обеспечивает максимум  $P_{пр}$  волны, энергия которой, нагревая объем взаимодействия, позволяет измерять интегральную величину средней по объему взаимодействия влажности  $W$  по предлагаемым алгоритмам.

При реализации основного алгоритма, из-за чего собственно метод назван термовлагодетрическим, определяется изменение температуры поверхности, фиксируемое блоком ТП (батарея термопар):  $\Delta T = \Phi(W)$ . Время  $t_n = \text{const}$ ;  $P_{\text{пад}} = \text{const}$ , при этом  $\varepsilon'' = \Phi(W)$ , т.е.  $P_{\text{пад}} = \Phi(W)$ , необходимо через измерение  $\varepsilon'_{\text{см}}$  (по углу Брюстера) корректировать (стабилизировать)  $P_{\text{пад}} = P_{\text{г}}$  или  $t_n$  так, чтобы количество энергии было  $P_{\text{пр}} t_n = Q = \text{const}$  по следующему алгоритму:

- 1) измерение  $P_{\text{отр.min}}$ ;
- 2) измерение  $P_{\text{пад}}$ ;
- 3) измерение  $P_{\text{пр}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр.min}}$ ;
- 4) изменяя  $P_{\text{пад}}$ , стабилизируется  $P_{\text{пр}}$ .

Количество тепла, поглощаемое материалом:

$$Q = P_{\text{пр}} t_n = C_{V_{\text{см}}}(W) m(W) \Delta T, \quad (4.20)$$

где  $C_{V_{\text{см}}}$  – объемная теплоемкость влажного материала, определяемая по формуле Оделевского:

$$C_{V_{\text{см}}} = a + (a^2 + C_{V_1} C_{V_2} / 2)^{1/2}, \quad a = ((3W - 1) C_{V_1} + 2(2 - 3W) C_{V_2}) / 4. \quad (4.21)$$

С погрешностью менее 0,65 % температурной зависимостью удельной теплоемкости воды при  $t \in [0; +40]$  °С можно пренебречь, считая  $C = \bar{C} = 4,19$  кДж/кг · К [85] (табл. ПЗ.1, ПЗ.2).

Для расчетов удельную теплоемкость материала (кирпич красный) принимаем равной  $C_2 = 0,711$  кДж/кг · К, плотность воды  $\rho_1 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, плотность материала для красного кирпича в зависимости от пористости  $\rho_2 = (1,7 \dots 2,1) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Плотность влажного материала рассчитывается по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \rho_2 + W\rho_1. \quad (4.22)$$

Общая масса постоянного объема капиллярно-пористого материала (материал при увлажнении практически не меняет объем):

$$m = m_2 + m_1 = V\rho_{\text{см}} = V\rho_2 + V_1\rho_1 \Rightarrow \rho_{\text{см}} = \rho_2 + \frac{V_1}{V}\rho_1 = \rho_2 + W\rho_1.$$

Откуда измеренная  $\Delta T$  (при этом масса взаимодействующего вещества  $m = \rho V_{\text{вз}} = \rho_{\text{см}}(W) V_{\text{вз}}(W, W_{\text{п}})$ ) и статическая характеристика термовлагодетрического метода имеют вид:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{пр}} t_n}{C_{V_{\text{см}}}(W) \rho_{\text{см}}(W) V_{\text{вз}}(W, W_{\text{п}})} = \frac{\text{const}}{C_{V_{\text{см}}}(W) \rho_{\text{см}}(W) V_{\text{вз}}(W, W_{\text{п}})}, \quad (4.23)$$

где  $V_{\text{вз}}(W, W_{\text{п}}) = S_{\text{эф}}(W_{\text{п}}) l_{\text{эф}}(W) \leq S_{\text{ап}}(W_{\text{п}}) l_{\text{эф}}(W)$  – переменный объем взаимодействия (объем нагрева). Значение  $S_{\text{эф}}(W_{\text{п}})$  фиксируется при измерении  $W_{\text{п}}$  ( $S_{\text{ап}}$  – площадь апертуры,  $S_{\text{эф}}$  – эффективная площадь излучения).

Величину  $V_{\text{вз}}(W, W_{\text{п}})$  определим из следующих соображений. Анализ диаграммы направленности кольцевого переменного-фазного щелевого излучателя по известному решению (см. 4.3.2), а также [62] для плоской структуры с максимумом ДН, нормальным щелям, проводился с учетом сохранения структуры выражения многощелевого антенного множителя, но с учетом угла наклона ВВ  $\theta_A > 0$  (при  $R_{\text{ср}} \gg \lambda_r$ ). Векторное моделирование ДН по углу  $\theta$  в ДЗ (дальней зоне) т.е. практически в плоскости исследуемого материала, позволило сделать следующие выводы:

а) площадь апертуры, равная  $S_{\text{ап}} = \pi R_{\text{ср}}^2$ , больше эффективной площади апертуры, определяемой величиной  $R_{\text{эф}}$  (т.е. величиной  $\theta_{\text{гл}} - \Delta\theta_{0,5}$ , где  $\Delta\theta_{0,5}$  – полуширина ДН в плоскости падения) и зависит от величины  $W_{\text{п}}$ ;

б) величина угла  $\varphi = \pi/2 - (\theta_{\text{бр}} + \Delta\theta_{0,5}) \geq 0$  и должна быть минимальной;

в) ДН в плоскости материала сохраняет распределение поля  $\vec{E}$  таким же, как и у одиночной щели в плоскости, но существенно уже, т.е. чем острее ДН, тем меньше  $R_{\text{эф}}$  ( $S_{\text{эф}}$ ), тем больше чувствительность метода. Распределение поля  $\vec{E}$  от 0 до  $R_{\text{эф}}$  подобно распределению у щелевой одиночной антенны при изменении  $\theta$  от  $\theta_{\text{гл}}$  до  $\theta_{\text{гл}} + \Delta\theta_{0,5}$ ;



г) для всех предлагаемых конструкций апертур векторная суммарная картина поля преломленной волны дает картину типичной плоской  $T$ -волны с неравномерной ДН в плоскости материала.

Исходя из вышеуказанного, для плоской в ДЗ волны воспользуемся известным выражением глубины проникновения поля в материал с диссипативными (омическими) потерями, характеризующийся величиной проводимости  $\gamma$  (См/м) (см. 2.5.3):

$$\delta = [2 / \omega \mu_0 \gamma]^{1/2}, \text{ м.} \quad (4.24)$$

В задаче термовлагометрии эквивалентом величины  $\gamma$  (с учетом того, что потерями на нагрев проводимости по сравнению с потерями на поляризационный нагрев в зависимости от  $W$  пренебрегаем) служит величина  $\varepsilon''$  (т.е. своего рода  $\gamma_{\text{эф}} = f(W)$ ):

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') = \varepsilon_0 \left( \varepsilon'' - j \frac{\gamma_{\text{эф}}}{\omega \varepsilon_0} \right) \Rightarrow \gamma_{\text{эф}} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''(W),$$

причем с высокой степенью точности можно считать (при условии  $\gamma_{\text{ом}} \ll \gamma_{\text{эф}}$ ):

$$\varepsilon''_{\text{см}}(W) = W \varepsilon''_1. \quad (4.25)$$

Считая, что при  $l \geq 3\Delta$ , потерями в пространстве на расстоянии от апертуры  $l > 3\Delta$  можно пренебречь:

$$l_{\text{эф}} = 3\Delta = 3 \left[ \frac{2}{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon''_{\text{см}}} \right]^{1/2} \cong \frac{0,675 \lambda_{\Gamma}(W_{\text{п}})}{(\varepsilon''_{\text{см}})^{1/2}} = \frac{0,675 \lambda_{\Gamma}(W_{\text{п}})}{(W)^{1/2} (\varepsilon''_1)^{1/2}}, \text{ м,}$$

а величина  $R_{\text{эф}}$  определяется по разработанной нами методике в 4.3.2.

Подчеркнем, что зависимость (4.23)  $\Delta T = t_2 - t_1 = \Phi_1(W)$  – аналитическая, а  $W = \Phi_2(\Delta T_{\text{изм}})$  – расчетная для реализации алгоритма.

Величина мощности преломленной волны, расходуемой на нагрев  $V_{\text{вз}}$  с учетом функции огибающей текущей преломленной «1/2 ДН»  $P_{\text{пр}}$  (см. 4.3.2, рис. 4.15):

$$\begin{aligned} P_{\text{пр}} &= P_{\text{пад}} - P_{\text{отр min}} = \int_0^{R_{\text{эф}}} \int_0^{2\pi} \bar{\Pi}_{\text{пр} \bar{n}}(\bar{\Pi}_0, \lambda_{\Gamma}, r, \dots) r dr d\varphi = \\ &= 2\pi \int_0^{\frac{l}{2 \cos \theta_{\Gamma l}}} f_1(r, \bar{\Pi}_0, \lambda_{\Gamma}, \dots) r dr + \int_{\frac{l}{2 \cos \theta_{\Gamma l}}}^{R_{\text{эф}}} f_2(r, \bar{\Pi}_0, \lambda_{\Gamma}, \dots) r dr, \end{aligned}$$

где  $P_{\text{пр}}$  – стабилизируется управлением  $P_{\Gamma}$ ;  $P_{\text{пад}}$  – управляется мощностью генератора для стабилизации  $P_{\text{пр}}$ ;  $P_{\text{отр min}}$  – ищется экстремальной системой АПЧ и измеряется.

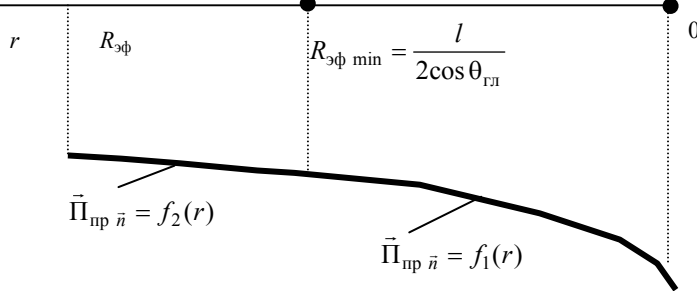


РИС. 4.15. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МОЩНОСТИ ПРЕЛОМЛЕННОЙ ВОЛНЫ ПО РАДИУСУ ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для расчета величины  $\Delta T$  по (4.23) воспользуемся выражениями (4.21) и (4.22), где  
 $C_{V1} = 4,19 \cdot 10^3$  Дж/кг · К – теплоемкость воды, не зависящая от  $T$ , К;  
 $C_{V2} = 0,711 \cdot 10^3$  Дж/кг · К – теплоемкость красного кирпича, не зависящая от  $T$ , К;  
 $\rho_1 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воды, не зависящая от  $T$ , К;  
 $\rho_2 = 1,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – плотность красного кирпича, не зависящая от  $T$ , К, при пористости равной 0,3, т.е. при максимальной влажности по диапазону  $W = 0,3$ ;  
 $a = 8,304W - 1,346$ .  
 Откуда

$$C_{cm} = 2,076 \cdot 10^3 \{W - 0,162 + [(W - 0,162)^2 + 0,346]^{1/2}\}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К};$$

$$\rho_{cm} = (W + 1,9) 10^3 \text{ кг/м}^3;$$

$$C_{cm}(W)\rho_{cm}(W) = 2,076 \cdot 10^6 (1,9 + W\{W - 0,162 + [(W - 0,162)^2 + 0,346]^{1/2}\}), \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}.$$

**Предпочтительней для расчета является вариант модели по Лихтенекеру:**

$$C_{cm}(W)\rho_{cm}(W) = C_2\rho_2(C_1\rho_1/C_2\rho_2)^W = 1,351 \cdot 10^6 \cdot (3,101)^W.$$

Величина  $P_{пр}t_n = \text{const}$  и выбирается путем варьирования  $P_{пр}$  ( $P_r$ ) или  $t_n$  из условия  $\Delta T \leq \Delta T_{\max}$  – условия пренебрежимости теплопереноса из объема  $V_{вз}$  в окружающий материал и пренебрежения процессом массопереноса влаги в окружающее пространство (процесса СВЧ-сушки): малые градиенты тепломассопереноса. Увеличение  $P_{пр}t_n$  естественно приводит к увеличению чувствительности термовлагодетрического метода.

В свою очередь величина объема взаимодействия:

$$V_{вз}(W, W_n) = S_{эф}(W_n) l_{эф}(W, \lambda_r); \quad S_{эф}(W_n) = \pi R_{эф}^2(W_n) = \pi R_{эф}^2(\lambda_r),$$

так как в (4.23) при независимых измерениях  $W$  по  $\Delta T$  величина  $\lambda_r$  является параметром аналитической зависимости  $\Delta T(W) |_{\lambda_r \in [1,7; 2]}$ . Возможен случай равенства  $W_n = W$  при отсутствии  $\text{grad } W$  (из-за тривиальности нами не рассматривается). Заметим, что при фиксированной или измеренной  $\Delta T$  выражение (4.23) дает связь  $W_n$  и  $W$ . Величина

$$l_{эф}(W_n) = \frac{0,675\lambda_r(W_n)}{W^{1/2}(\epsilon_1'')^{1/2}} = \frac{0,675\lambda_r(W_n)}{(\epsilon_{cm}'')^{1/2}} = l_{эф}(\lambda_r) = \frac{0,675\lambda_r}{W^{1/2}(\epsilon_1'')^{1/2}}. \quad (4.25')$$

Таким образом

$$V_{вз}(W) = \frac{\pi R_{эф}^2 0,675\lambda_r}{W^{1/2}(\epsilon_1'')^{1/2}},$$

где  $\epsilon_{cm}''(W, \lambda_r, t) = W\epsilon_1''$ , а величина  $\epsilon_1''$  определяется (4.21).

Расчетная зависимость объема взаимодействия от влажности  $V_{вз}(W)$  показана на рис. 4.16.

Информативная величина (4.23) с учетом аппроксимации Оделевского

$$\Delta T = \frac{P_{пр}t_n(\epsilon_1'')^{1/2}W^{1/2}}{437 \cdot 10^4 (W + 1,9) \{W - 0,167 + [(W - 0,167)^2 + 0,346]^{1/2}\} R_{эф}^2 \lambda_r}$$

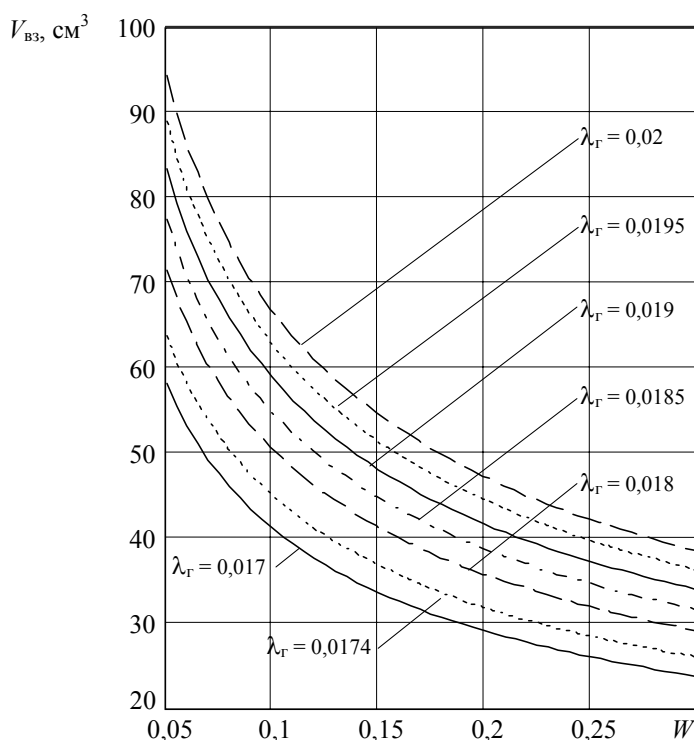
или по аппроксимации Лихтенекера

$$\Delta T = \frac{P_{\text{пр}} t_{\text{н}} (\varepsilon_1'')^{1/2} W^{1/2}}{1,351 \cdot 10^6 (3,101)^W \pi R_{\text{эф}}^2 0,675 \lambda_{\text{Г}}} =$$

$$= \frac{P_{\text{пр}} t_{\text{н}} (\varepsilon_1'')^{1/2} W^{1/2}}{0,284 \cdot 10^7 (3,101)^W R_{\text{эф}}^2 \lambda_{\text{Г}}} = \Delta T_{\text{изм}} \cdot$$
(4.27)

По (4.26) или (4.27) при разных  $\lambda_{\text{Г}} \in [1,7; 2]$  см строятся аналитические зависимости  $\Delta T(W, \lambda_{\text{Г}})$  (рис. 4.17 – 4.22). Расчет ведется для нормированной относительно поглощаемого количества энергии СВЧ преломленной волны, для случаев «карандашной» ДН ( $\Delta\theta_{0,5} = 0$ ) и ДН с расчетным  $\Delta\theta_{0,5}$  по выражению

$$\Delta T_{\text{н}} = \frac{\Delta T(W, \lambda_{\text{Г}}, t)}{P_{\text{пр}} t_{\text{н}}} = \frac{\varepsilon_1(\lambda_{\text{Г}}, t)^{1/2} W^{1/2}}{0,284 \cdot 10^7 \cdot (3,101)^W R_{\text{эф}} \lambda_{\text{Г}}}. \quad (4.28)$$



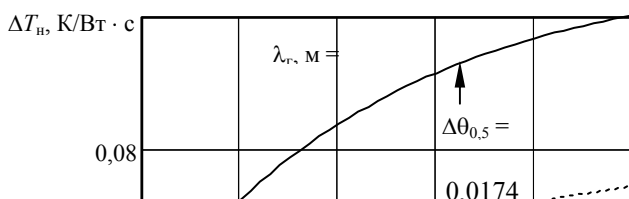
**Рис. 4.16. Зависимость объема взаимодействия  $V_{\text{вз}}(W)$  при  $t_{\text{ном}} = 20^\circ\text{C}$  при разных  $\lambda_{\text{Г}}, \Delta\theta_{0,5}$  расчетное**

Данные зависимости являются основными в теории микроволновой термовлагодетрии, анализ которых позволяет сделать следующие основополагающие выводы.

1. Чувствительность метода уменьшается с ростом величины  $W$ .
2. Чувствительность растет с уменьшением рабочей длины волны генератора.
3. Очевидна возможность варьирования информативной абсолютной величины  $\Delta T$  (К) изменением

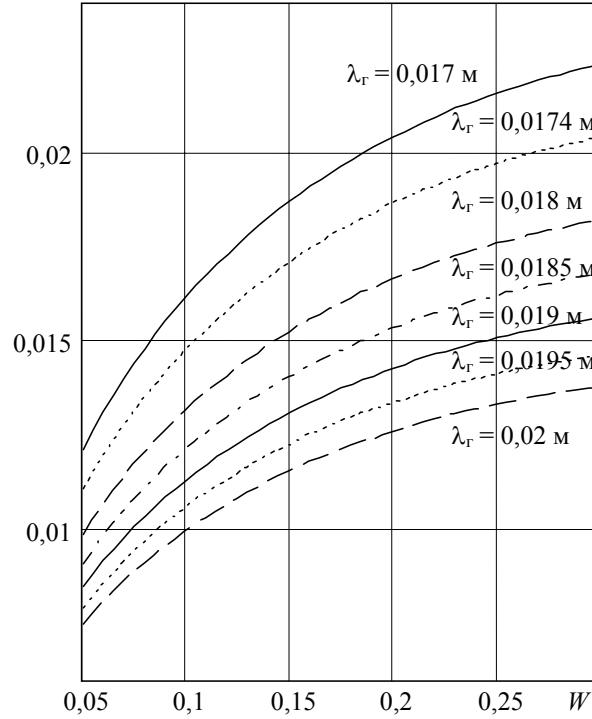
$P_{\text{пр}} t_{\text{н}}$  (на рис. 4.17, 4.18 фактически показаны зависимости  $\Delta T(W)$  при количестве поглощенной энергии в 1 Вт · с (Дж)).

Очевиден факт необходимости увеличения  $P_{\text{пр}}$ , т.е.  $P_{\text{Г}}$ , обуславливающей применение мощных генераторов СВЧ, естественно до пределов технологической безопасности персонала, что приводит к уменьшению  $t_{\text{н}}$ , а следовательно, и к уменьшению погрешности расчетного алгоритма



**Рис. 4.17. Аналитическая зависимость  $\Delta T_n(W)$ , нормированная относительно поглощаемого количества энергии СВЧ преломленной волны ( $t_{\text{ном}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )**

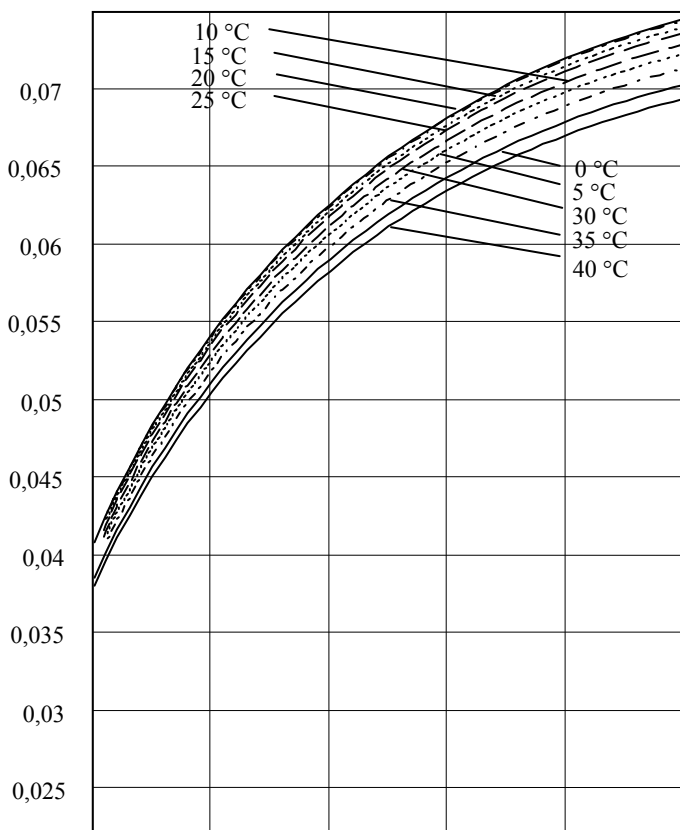
определения  $W$  по измеренной  $\Delta T$  из-за уменьшения влияния процессов тепломассопереноса на величину  $V_{\text{вз}}$  и изменения  $W$  из-за массопереноса (сушки). Сравнивая рис. 4.17 и 4.18 становится очевидным, что сужение ширины ДН (уменьшение  $\Delta\theta_{0,5}$ , т.е. увеличение  $Nd = L$ ) приводит к увеличению чувствительности термовлагодетрического метода, но увеличение  $L$  приводит к увеличению размеров апертурного преобразователя. Локализация и уменьшение объема зоны взаимодействия требует увеличения геометрических размеров апертуры.

$\Delta T_n, \text{K/Вт} \cdot \text{с}$ 

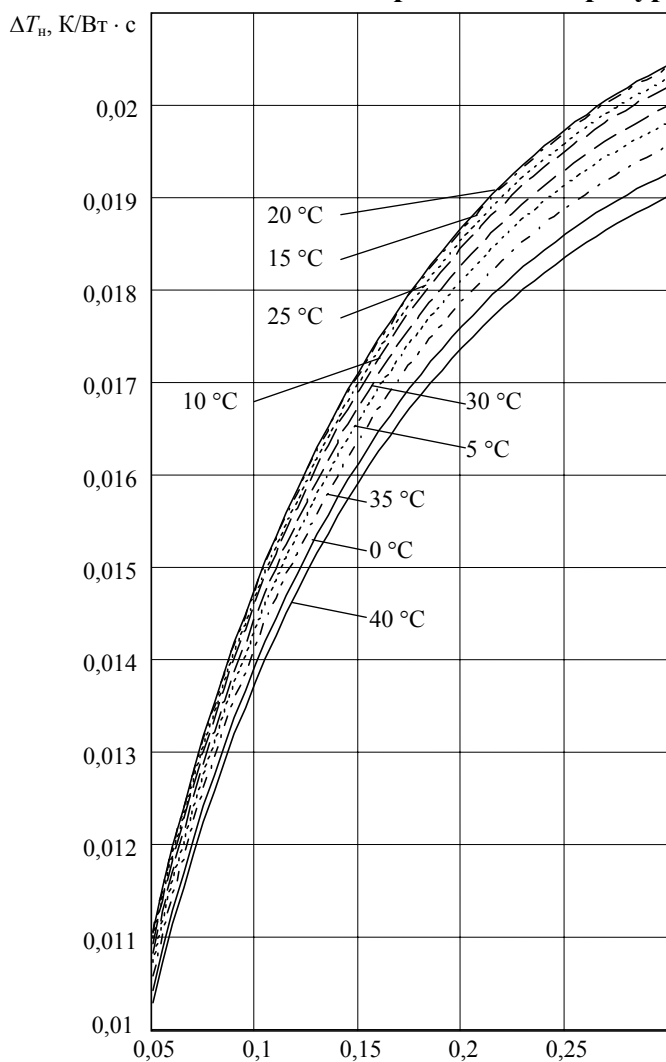
**Рис. 4.18. Аналитическая (рабочая) зависимость  $\Delta T_n(W)$ , нормированная относительно поглощаемого количества энергии СВЧ преломленной волны в увеличенном масштабе ( $\Delta\theta$  расчетное,  $t_{\text{ном}} = 20^\circ\text{C}$ )**

Единственный путь в этом случае измерения влажности малогабаритных изделий – уменьшение длины волны генератора, сопровождаемое технологическими трудностями миниатюризации ВВЦА, входящей в апертуру и, естественно, всей интегрированной апертуры в целом.

Разработку алгоритма расчета влажности  $W$  по измеренной  $\Delta T$  очевидно проще вести по (4.27) с учетом того, что  $\varepsilon''_{\text{см}}(W, \lambda_{\text{Г}}, t)$ , т.е. должно быть в алгоритме реализовано решение нелинейного уравнения относительно  $\Delta T$  или же при малом  $\Delta T$  считать  $t = t_{\text{ном}}$  (например,  $20^\circ\text{C}$ ), а  $\varepsilon''_{\text{см}}(W, \lambda_{\text{Г}}, t_{\text{ном}})$ , так как в зоне \* (см. рис. 2.20 – зависимость  $h = f(\lambda_{\text{Г}})$ ) величина  $h(\varepsilon''_{\text{см}})$  практически инвариантна изменению температуры, тогда в (4.27):  $\Delta T = K_1$  – измеряется или фиксируется;  $P_{\text{пр}} t_{\text{н}} = K_2$ ;  $\varepsilon''_1(\lambda_{\text{Г}}, t_{\text{ном}}) = K_3$  – рассчитываются;  $R_{\text{эф}}(\lambda_{\text{Г}}, t_{\text{ном}}) = K_4$  – рассчитывается;  $\lambda_{\text{Г}} = K_5$  – измеряется.

 $\Delta T_n, \text{K/Вт} \cdot \text{с}$ 

**Рис. 4.19. Зависимость  $\Delta T_{\text{н}}(W)$  при номинальной  $\lambda_{\text{г}} = 0,0174$  м, разной температуре материала  $t \in [0; 40]$  °C**



**W**

**Рис. 4.20. Зависимость  $\Delta T_n(W)$  при номинальной  $\lambda_r = 0,0174$  м, разной температуре материала  $t \in [0; 40]$  °С, для  $\Delta\theta_{0,5}$  расчетное (в увеличенном масштабе)**

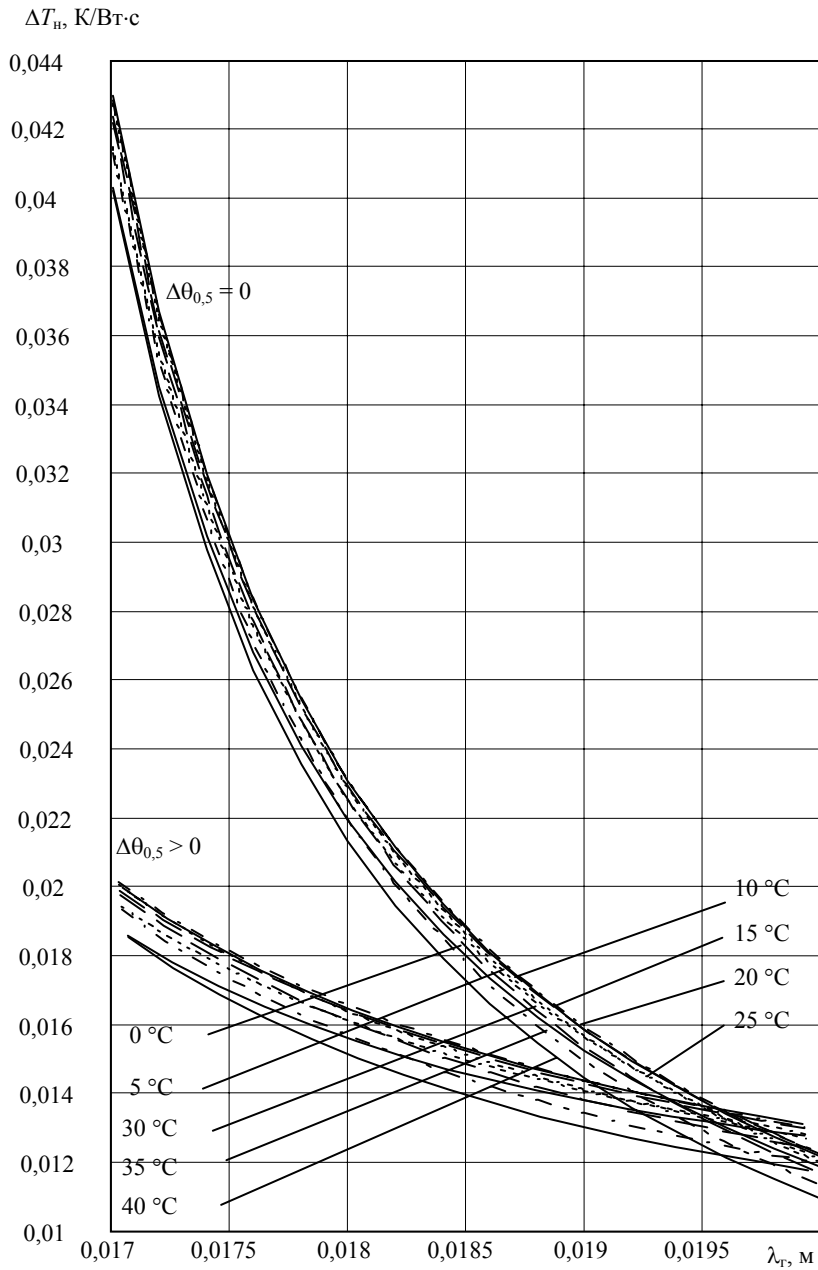


Рис. 4.21. Зависимость  $\Delta T_n(\lambda_r)$  при  $W = 0,3$ ,  $t \in [0; 40]$  °C

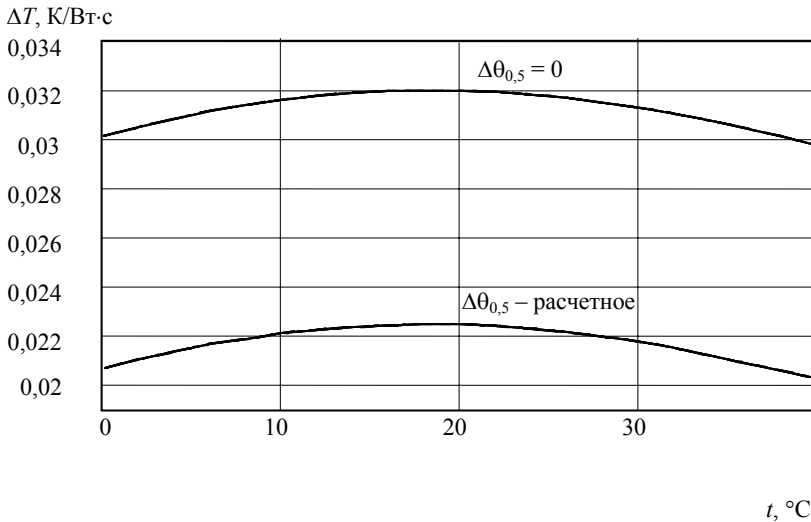


Рис. 4.22. Зависимость  $\Delta T_n(t)$  при  $W = 0,3$ ,  $\lambda_{r \text{ ном}} = 0,0174$  м

Откуда

$$K_1 = \frac{K_2 K_3 W^{1/2}}{(3,103)^W K_4^2 K_5} \rightarrow K_6 = \frac{W^{1/2}}{(3,103)^W};$$

$$\ln W = \ln K_6^2 + 2W \ln 3,103;$$

$$\ln W = K_7 + WK_8. \quad (4.29)$$

Алгоритм должен предусматривать решение этого нелинейного, относительно  $W$ , уравнения (4.29).

#### 4.2. Выбор рабочего диапазона длин волн микроволнового метода

Выбор диапазона рабочих длин волн определяется следующими метролого-технологическими факторами:

а) Диапазон  $\lambda_r$  должен принадлежать (см. рис. 2.13)  $\lambda_r \in [3,5 \text{ см } (t = 0); 1,25 \text{ см } (t = 40^\circ)]$ , что соответствует максимальному поглощению энергии преломленной волны влажным материалом (при  $t = 20$  °C:  $\lambda_{\text{max}} \varepsilon_1'' (\varepsilon_{\text{см}}'') = 2 \text{ см}$  (или 1,74 см)).

Очевидна необходимость того, чтобы АПЧ подстраивала величину  $\lambda_{r \text{ Бр}}$ , согласно выражению  $\varepsilon'_{\text{см}} = \text{tg}^2 \theta_{\text{Бр}}$ , возможно близко к  $\lambda_r = \lambda_{\text{кр}}(t)$ . Это обеспечит минимум глубины проникновения (взаимодействия)  $h = (3 - 5)\Delta$ . Конечно, величина  $\lambda_{r \text{ Бр}}$  обеспечивает падение волны под углом полного преломления  $\theta_{\text{Бр}}$ , что соответствует минимуму отраженной мощности, при том, что  $\varepsilon'_{\text{см}}(W_{\text{п}}, t, \lambda)$ . Идеально  $\lambda_r$  должна быть равна  $\lambda_{\text{кр}}(t)$  и равна  $\lambda_{r \text{ Бр}}$ . По крайней мере  $\lambda_r$  должна быть компромиссом между  $\lambda_{\text{кр}}$ , обеспечивающей максимум поглощения, и  $\lambda_{\text{Бр}}$ , обеспечивающей минимум отражения. Если заведомо во всем рабочем диапазоне  $b > 5\Delta$ , то вся энергия преломленной волны поглощается, даже если  $\lambda \neq \lambda_{\text{кр}}(t)$ .

Приближение  $\lambda_r$  к  $\lambda_{\text{кр}}(t)$ , уменьшает величину  $h$ , повышая гарантию полного поглощения энергии СВЧ материалом толщины  $b$ .

б) Диапазон  $\lambda_r$  должен принадлежать полосе одномодовости стандартных волноводов (см. табл. 3.2); МЭК-140:  $\lambda_r \in [1,6; 2,5]$  см.

в) Согласно (рис. 2.20), при  $\lambda_r \in [1,6; 1,8]$  см глубина зоны  $h$  практически инвариантна  $t$ , °C.



г) Рабочий диапазон должен быть равен полосе АПЧ ГСВЧ (девиации управляемой перестройки частоты), которая должна быть больше или равна полосе частот по п. а, б и в (см. рис. 4.13).

Таким образом, рабочий диапазон  $\lambda_r$  безусловно удовлетворяет п. б и приближенно п. а, в и г.

#### 4.3. Разработка приемно-излучающих измерительных апертур

##### 4.3.1. Цели проектирования апертур. Требования к апертурам

Целью проектирования апертуры является обеспечение выполнения ею следующих задач:

- а) обеспечение минимума мощности отраженной волны;
- б) обеспечение изменения положения максимума ДН ( $\pm\Delta\theta$ ) в пределах заданных величин с оптимальной углочастотной чувствительностью;
- в) минимизация величины площади падения при заданных границах углов «качания» ДН, т.е. и минимизация объема взаимодействия преломленной волны;
- г) полная локализация и канализация отраженной волны с КБВ, близким к 1;
- д) размещение апертуры непосредственно на измеряемом изделии (прижатой к его плоскости), но так, чтобы поверхность относительно апертуры была в дальней зоне (практически на расстоянии порядка  $1,6 \dots 2\lambda$  от «интегральной» апертуры, см. далее);
- е) отсутствие «затекания» токов на внешнюю поверхность апертуры (минимум паразитных боковых лепестков), что обеспечивает увеличение чувствительности метода и увеличивает безопасность облучения персонала;
- ж) минимальные габаритные размеры относительно плоскости материала;
- з) простота реализации «интегральной» апертуры.

Практически всем этим требованиям потенциально может отвечать только осесимметричная коническая, цилиндрическая или цилиндро-коническая апертура, внутренняя (излучающая) поверхность которой представляет собой «интегральную» систему излучающих волноводно-щелевых отрезков прямоугольных ВВ, работающих в режимах БВ и (или) СВ.

Весьма важным является то, что апертура должна эффективно работать в двух режимах передачи мощности.

Режим измерения  $W_n$  по длине волны управляемого ГСВЧ – режим без нагрева материала при мощности излучения, не превышающей долей ватта (Вт). Этот режим осуществляется либо управлением высокочастотным делителем мощности мощного ГСВЧ (ЛБВ типа «О»), либо, что предпочтительней, от автономного маломощного ГСВЧ на ЛПД (ТД) или миниклистроне.

##### 4.3.2. Простейшие апертуры

Рассмотрим простейшие общепринятые в микроволновых измерениях апертуры с точки зрения обеспечения ими выполнения следующих основных требований: а) полное преломление падающей волны;

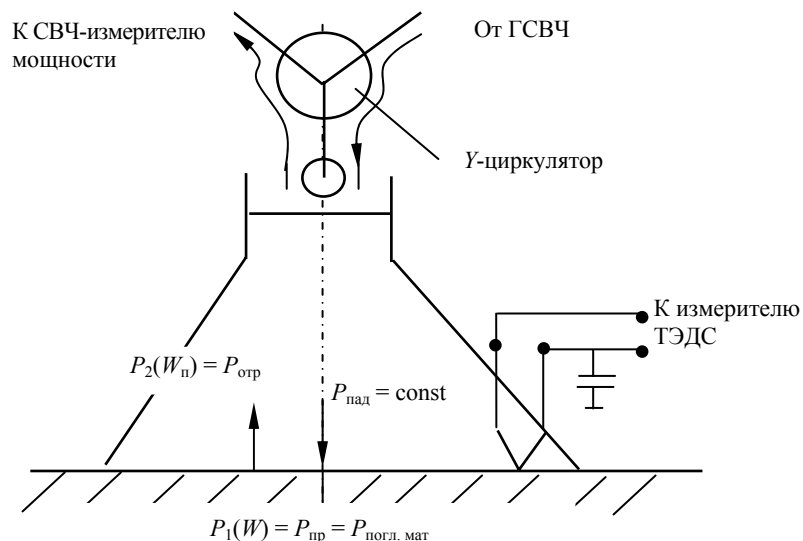
б) минимум рассеяния (боковые лепестки) падающей волны; в) полную или частичную локализацию отраженной волны.

*Локально-поверхностный* *круговой* *рупор*. Конический *рупор* (рис. 4.23) непосредственно помещается на плоскости материала, заполнен внутри радиопрозрачным материалом (пенопласт) – хорошим теплоизолятором. Измерения могут производиться по двум алгоритмам: а) измерение ТЭДС как меры нагрева материала за счет поглощенной мощности преломленной волны  $P_1(W) = P_{пр} = P_{погл.мат}$  на величину  $t = \Phi(W)$ ; б) измерение  $P_2(W_n)$ .

Практически неэффективность такой апертурной системы определяется следующими факторами:

1 Не только не обеспечивает полного преломления, но практически наоборот: величина  $P_1 \ll P_{пад}$ , так как система нагружена на волновое сопротивление  $Z_v$  исследуемого материала, резко отличное от  $Z_0$ . Режим по БВ сильно несогласован, поглощение волны в ближней зоне – зоне индукции. Так, например, при исследовании весьма влажного материала из-за вышеуказанных причин наблюдались сильный

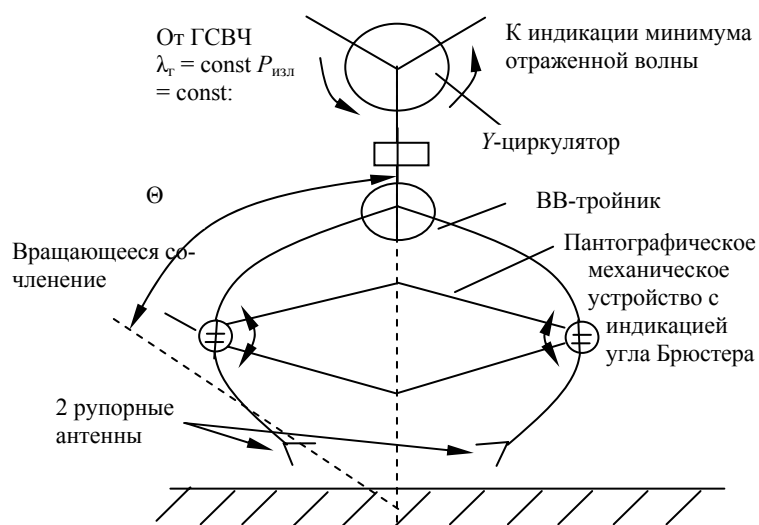
перегрев и выход из строя термисторного измерителя мощности и аварийное отключение перегруженного ГСВЧ.



**Рис. 4.23. Локально-поверхностный круговой рупор**

2. Не выполняются требования п. б и в.

Двухрупорная система с механическим поиском  $\theta_{\text{Бр}}$  (полного преломления) показана на рис. 4.24.



**Рис. 4.24. Двухрупорная система с механическим поиском  $\theta_{\text{Бр}}$  (полного преломления)**

Система обеспечивает требования п. а, но неадекватна требованиям п. б и в. Сложна конструктивно (сложность электромеханического синхронного поворота двух рупоров (подобное устройство см. в [2], с. 321, рис. 19).

4.3.3. ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ В ДЗ И ПРЕЛОМЛЕННОЙ ДН ВО ВЛАЖНОМ МАТЕРИАЛЕ ДЛЯ КОНУСОВИДНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АПЕРТУРЫ. РАДИУС ЗОНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Построение «интегральной» ДН произведено для простейшего случая двухрупорной апертуры (рис. 4.24) с механическим качанием или, что то же самое, двух наклонных линеек ВВ щелевых антенн, расположенных противофазно под углом образующей интегрирующего их конуса (т.е. ДН «интегральной» апертуры в ДЗ, которой (т.е. ДЗ) для «интегральной» апертуры будет поверхность.). Очевидно, результаты можно распространить на любое четное количество вертикальных ВВ щелевых антенн, вплоть до полного ими «выстилания» конуса (цилиндра) (рис. 4.38 – 4.42), а также для кольцевой (круговой щелевой противофазной апертуры  $N = 2$ , рис. 5.1 и 5.2). Азимутальная ДН приближенно может считаться круговой.

**Приближенный расчет «карандашной» ( $2\Delta\theta_{0,5} = 0$ ) интегральной диаграммы направленности в дальней зоне.**

1. Расчет ДН на поверхности в ДЗ и величины  $R_{эф}$ .

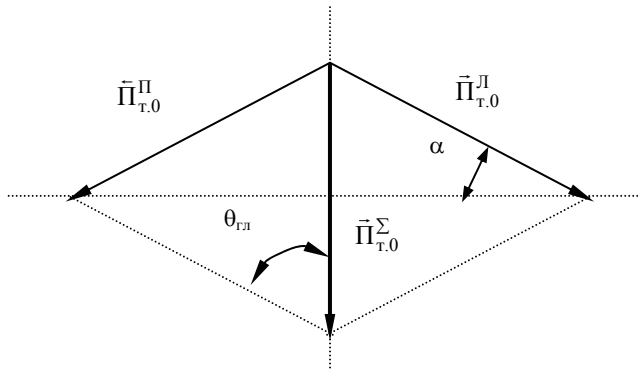
Производят расчет величин векторов Пойнтинга  $\vec{\Pi}$  в ДЗ при номинальной величине  $\lambda_r$ , когда  $\Delta\theta = 0$  (рис. 4.25). Поток мощности  $\vec{\Pi}$  в ДЗ пропорционален величине постоянного по срезу  $l$  раскрыва волноводно-щелевой круговой апертуры (ВВЩА при  $l = a = 0,016$  м) значения  $\vec{\Pi}_0$  и обратно пропорционален  $r^2$ , где  $r$  – расстояние от апертуры до поверхности:  $\vec{\Pi} \equiv \frac{\vec{\Pi}_0}{r^2}$ .

**В точке 0** (рис. 4.26) суммарная величина  $\vec{\Pi}_{\tau,0}^{\Sigma}$ :

$$\vec{\Pi}_{\tau,0}^{\Sigma} \equiv \vec{\Pi}_{\tau,0}^{\text{Л}} + \vec{\Pi}_{\tau,0}^{\text{П}} = \frac{\vec{\Pi}_0}{r^2} + \frac{\vec{\Pi}_0}{r^2} = \frac{\vec{\Pi}_0}{(R \sin \theta_{\text{гл}})^2} + \frac{\vec{\Pi}_0}{(R \sin \theta_{\text{гл}})^2},$$

где индекс Л – для левой части апертуры; П – противофазной правой части.

Откуда  $|\vec{\Pi}_{\tau,0}^{\Sigma}| \equiv \frac{2\Pi_0 \cos \theta_{\text{гл}}}{(R \sin \theta_{\text{гл}})^2}$ , аргумент (отсчет от нормали к поверхности)  $\arg \vec{\Pi}_{\tau,0}^{\Sigma} = 0$ .



**Рис. 4.26. Векторная картина в точке 0**

Векторная картина в точке 0 будет иметь вид, представленный на рис. 4.26.

**Точка 1Л:**

$$\bar{\Pi}_{т.1}^{\Sigma} \equiv \frac{\bar{\Pi}_0}{r_{\min}^2} + \frac{\bar{\Pi}_0}{r_{\max}^2} = \frac{\bar{\Pi}_0}{\left(R \sin \theta_{\text{гп}} - \frac{l}{2} \text{tg } \theta_{\text{гп}}\right)^2} + \frac{\bar{\Pi}_0}{\left(R \sin \theta_{\text{гп}} + \frac{l}{2} \text{tg } \theta_{\text{гп}}\right)^2};$$

$$\left| \bar{\Pi}_{т.1}^{\Sigma} \right| \equiv \frac{\Pi_0}{\text{tg}^2 \theta_{\text{гп}}} \left[ \left( R \cos \theta_{\text{гп}} - \frac{l}{2} \right)^{-4} + \left( R \cos \theta_{\text{гп}} + \frac{l}{2} \right)^{-4} + 2 \left( R^2 \cos^2 \theta_{\text{гп}} - \frac{l^2}{4} \right)^{-2} \cos 2\theta_{\text{гп}} \right]^{1/2};$$

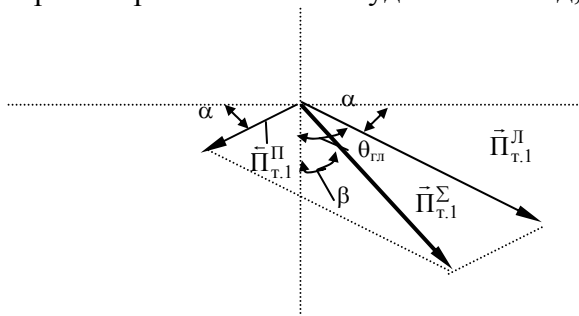
$$\arg \bar{\Pi}_{т.1}^{\Sigma} = \beta,$$

где величина  $\beta$  определяется выражением:

$$\text{tg } \beta = \frac{2lR \cos \theta_{\text{гп}}}{2R^2 \cos^2 \theta_{\text{гп}} + \frac{l^2}{2}} \text{tg } \theta_{\text{гп}} = \frac{2lR \sin \theta_{\text{гп}}}{2R^2 \cos^2 \theta_{\text{гп}} + \frac{l^2}{2}} =$$

$$= \frac{4lR \sin \theta_{\text{гп}}}{4R^2 \cos^2 \theta_{\text{гп}} + l^2} \approx |R \gg l, \cos \theta_{\text{гп}} \rightarrow 1| \cong \text{tg } \theta_{\text{гп}} \frac{l}{R \cos \theta_{\text{гп}}}.$$

Векторная картина в точке 1 будет иметь вид, представленный на рис. 4.27.



**Рис. 4.27. Векторная картина в точке 1**

В точке 1Л величина  $R_{\text{эф}}$  будет минимальной:

$$R_{\text{эф}} \Big|_{2\Delta\theta_{0,5}=0} = R_{\text{эф min}} \approx \frac{l}{2 \cos \theta_{\text{гл}}} . \quad (4.32)$$

При изменении  $R_{\text{эф}}$  от 0 до  $\frac{l}{2 \cos \theta_{\text{гл}}}$  величина  $r$  меняется слева от  $r_{\text{max}}$  до  $r_{\text{min}}$ , справа – наоборот, что позволяет, подставляя в выражения (4.30) и (4.31) вместо  $\frac{l}{2}$  ее текущее значение  $\Delta l \in \left[0; \frac{l}{2}\right]$ , построить полудиagramму направленности «1/2 ДН» (достаточную, вместо ДН в силу осевой симметрии) для рассмотренного выше случая  $\Delta\theta = 0$ , т.е. начальную «1/2 ДН» (рис. 4.28, а).

При определенной ранее полосе рабочих длин волн  $\lambda_r \in [0,17; 0,02]$  м, угол качания  $\Delta\theta$  (см. графики зависимостей  $\Delta\theta$  от  $\lambda_r$  в гл. 3) меняется от минус пяти до минус двадцати градусов, т.е. максимальная величина  $\Delta\theta_{\text{max}} \approx -20^\circ$ .

Таким образом, величина  $R$  выбирается так, чтобы при данном значении  $\Delta\theta_{\text{max}}$  при максимальном «качании» карандашной ДН радиус-вектор принял положение  $\vec{r}_{\text{max}} \rightarrow \vec{r}'''$  (точка 1П сместилась в точку 0). На самом деле точка 0 сместится чуть ближе к центру, но погрешность пренебрежимо мала, так как  $R \gg \lambda_r$ ;  $\vec{r}_0 \rightarrow \vec{r}'$  (точка 0 → точка 1Л);  $\vec{r}_{\text{min}} \rightarrow \vec{r}''$  (точка 1Л → точка 2Л). Заметим, что координате точки 2Л соответствует максимальное значение

$$R_{\text{эф max}} \Big|_{2\Delta\theta_{0,5}=0} = 2R_{\text{эф min}} \approx \frac{l}{\cos \theta_{\text{гл}}} \quad (4.33)$$

Рассчитаем «1/2 ДН» для этого случая ( $\Delta\theta = \Delta\theta_{\text{max}}$ ), т.е. конечную «1/2 ДН» (рис. 4.28, в).

**ОПРЕДЕЛИМ ЗНАЧЕНИЯ  $\bar{\Pi}^\Sigma$  В СООТВЕТСТВУЮЩИХ  $\Delta\theta_{\text{max}}$  ТОЧКАХ.**

**Точка 0:**

$$\bar{\Pi}_{\text{т.0}}^\Sigma \equiv \frac{\bar{\Pi}_0}{(r''')^2} + \frac{\bar{\Pi}_0}{(r''')^2} = \frac{\bar{\Pi}_0}{(R \sin \theta_{\text{гл}})^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{\bar{\Pi}_0}{(R \sin \theta_{\text{гл}})^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} ; \quad (4.34)$$

$$\left| \bar{\Pi}_{\text{т.1Л}}^\Sigma \right|_{\Delta\theta_{\text{max}}} \equiv \frac{2\Pi_0 \cos(\theta_{\text{гл}} - \theta_{\text{max}})}{(R \sin \theta_{\text{гл}})^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} ; \quad \arg \bar{\Pi}_{\text{т.0}}^\Sigma = 0 .$$

Векторная картина представлена на рис. 4.29.

**Точка 1Л:**

$$r' = \frac{\left( R \sin \theta_{\text{гл}} - \frac{l}{2} \text{tg } \theta_{\text{гл}} \right)}{\cos \Delta\theta_{\text{max}}} ,$$

или, так как величина  $\Delta\theta_{\text{max}}$  определяется величинами  $R$ ,  $l$  и  $\theta_{\text{гл}}$  (рис. 4.30):

$$r' = \left[ \left( R \sin \theta_{\text{гп}} - \frac{l}{2} \text{tg } \theta_{\text{гп}} \right)^2 + \left( \frac{l}{2} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

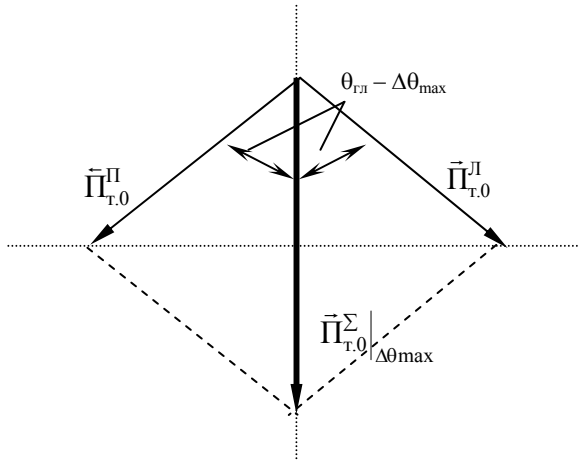


Рис. 4.29. Векторная картина в точке 0

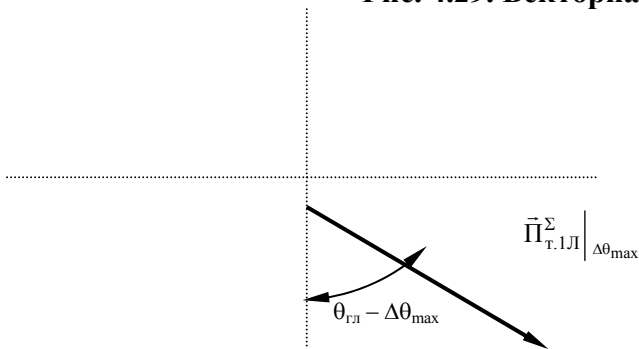


Рис. 4.30. Векторная картина в точке 1Л

Модуль мощности

$$\left| \tilde{\Pi}_{\text{г.1Л}}^{\Sigma} \right|_{\Delta\theta_{\text{max}}} \equiv \frac{\tilde{\Pi}_0}{\left( R \sin \theta_{\text{гп}} - \frac{l}{2} \text{tg } \theta_{\text{гп}} \right)^2 + \left( \frac{l}{2} \right)^2}. \quad (4.35)$$

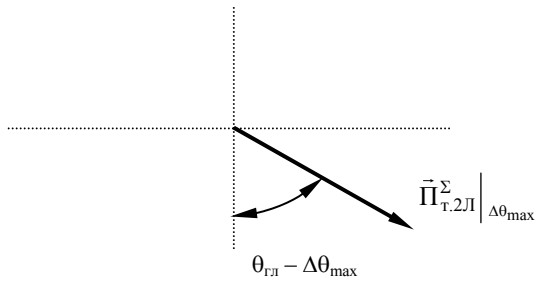
Аргумент

$$\arg \tilde{\Pi}_{\text{г.0}}^{\Sigma} = \theta_{\text{гп}} - \Delta\theta_{\text{max}}. \quad (4.36)$$

Точка 2Л:  $r'' = \left[ (R \sin \theta_{\text{гп}} - l \text{tg } \theta_{\text{гп}})^2 + \left( \frac{l}{2} \right)^2 \right]^{1/2}$  (рис. 4.31).

$$\left| \tilde{\Pi}_{\text{г.2Л}}^{\Sigma} \right|_{\Delta\theta_{\text{max}}} \equiv \frac{\tilde{\Pi}_0}{(r'')^2} = \frac{\tilde{\Pi}_0}{(R \sin \theta_{\text{гп}} - l \text{tg } \theta_{\text{гп}})^2 + \left( \frac{l}{2} \right)^2}; \quad (4.37)$$

$$\arg \tilde{\Pi}_{\text{г.2Л}}^{\Sigma} = \theta_{\text{гп}} - \Delta\theta_{\text{max}}. \quad (4.38)$$



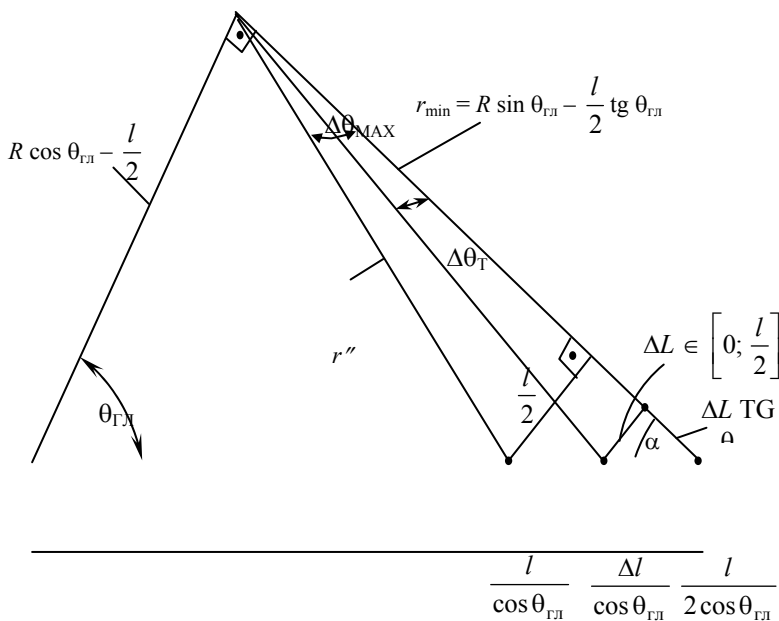
**Рис. 4.31. Векторная картина в точке 2Л**

На рис. 4.28, в показана конечная «1/2 ДН», полученная подстановкой в (4.34), (4.35), (4.37) значения  $\Delta l \in [0; l/2]$  (при соответствующей величине  $\Delta\theta_{max}$ ). Выражение для текущей между «начальной» и конечной «1/2 ДН» (рис. 4.28, б) может быть получено из этих же выражений при аналогичном варьировании  $\Delta l$  и изменении  $\Delta\theta_T \in [\Delta\theta_{min}; \Delta\theta_{max}]$  в выражениях (4.36) и (4.38). (Индекс «Т» – текущее значение). Текущая «1/2 ДН» при  $\Delta\theta_{max} > \Delta\theta_T > 0$  показана на рис. 4.28, б.

Найдем зависимость  $R_{эф} = f(\Delta\theta)$ , где  $R_{эф} \in \left[ \frac{l}{2 \cos \theta}; \frac{l}{\cos \theta} \right]$  при  $\Delta\theta_T \in [\Delta\theta_{min}; \Delta\theta_{max}]$  (или  $\Delta l \in [0, l/2]$ , или  $r_T \in [r_{min}; r'']$ ). ИЗ РИС. 4.32 ВИДНО, ЧТО

$$R_{эф} = \frac{l}{2 \cos \theta_{гЛ}} + \frac{\Delta l}{\cos \theta_{гЛ}}, \quad (4.39)$$

где 
$$\Delta l = \frac{r_{min} \operatorname{tg} \Delta\theta_T}{1 + \operatorname{tg} \theta_{гЛ} \operatorname{tg} \Delta\theta_T} = \frac{\left( R \sin \theta_{гЛ} - \frac{l}{2} \operatorname{tg} \theta_{гЛ} \right) \operatorname{tg} \Delta\theta_T}{1 + \operatorname{tg} \theta_{гЛ} \operatorname{tg} \Delta\theta_T}. \quad (4.40)$$



**Рис. 4.32. К расчету эффективного радиуса**

**ТАК КАК ВЕЛИЧИНА**

$$\Delta\theta_T = ARCTG(\varepsilon')^{1/2} - \theta_{гг}, \quad (4.41)$$

$$\operatorname{tg} \Delta\theta_T = \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg}(\varepsilon')^{1/2} - \theta_{гг} \right] = \frac{(\varepsilon')^{1/2} - \operatorname{tg} \theta_{гг}}{1 + (\varepsilon')^{1/2} \operatorname{tg} \theta_{гг}}. \quad (4.42)$$

Подставив (4.42) в выражение (4.40), а (4.40) в (4.39), получим окончательную зависимость  $R_{\text{эф}} = \Phi_1[\varepsilon'(W_{\text{п}}, \lambda_{\text{г}}, t)]$ .

$$R_{\text{эф}} = R_{\text{эф min}} \Big|_{2\Delta\theta_{0,5}=0} + \frac{r_{\text{min}}}{\cos \theta_{гг}} \frac{(\varepsilon')^{1/2} - \operatorname{tg} \theta_{гг}}{1 + 2 \operatorname{tg} \theta_{гг} (\varepsilon')^{1/2} - \operatorname{tg}^2 \theta_{гг}}. \quad (4.43)$$

Так как величина  $W_{\text{п}}$  рассчитывается по реализуемой (измеренной) величине  $\lambda_{\text{г}}$ , то величина  $R_{\text{эф}} = \Phi_1[\Delta\theta_T(\lambda_{\text{г}})] = \frac{l}{2 \cos \theta_{гг}} + \frac{r_{\text{min}}}{\cos \theta_{гг}} \frac{\operatorname{tg} \Delta\theta_T}{1 + \operatorname{tg} \theta_{гг} \operatorname{tg} \Delta\theta_T}$ , где с учетом того, что  $\Delta\theta_T < 0$ :

$$\Delta\theta_T = -\operatorname{arcsin} \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{\text{г}}}{3,2 \cdot 10^{-2}} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{\text{г}}}{2,07 \cdot 10^{-2}} \right\} = -\operatorname{arcsin} \Phi_2(\lambda_{\text{г}});$$

с учетом (4.39) и (4.40):

$$\begin{aligned} R_{\text{эф}} &= C_1 + C_2 \frac{\operatorname{tg} \Delta\theta_T}{1 + C_3 \operatorname{tg} \Delta\theta_T} = \left| \operatorname{tg} \Delta\theta_T = \operatorname{tg} [-\operatorname{arcsin} \Phi_2(\lambda_{\text{г}})] \right| = \\ &= \operatorname{tg} \left[ \operatorname{arctg} \frac{-\Phi_2(\lambda_{\text{г}})}{\sqrt{1 - \Phi_2^2(\lambda_{\text{г}})}} = \frac{-\Phi_2(\lambda_{\text{г}})}{\sqrt{1 - \Phi_2^2(\lambda_{\text{г}})}} \right] = C_1 + C_2 \frac{-\Phi_2(\lambda_{\text{г}})}{-C_3 \Phi_2(\lambda_{\text{г}}) + \sqrt{1 - \Phi_2^2(\lambda_{\text{г}})}}. \end{aligned}$$

Для полученных ранее величин  $\theta_{гг} = 71^\circ 35' \cong 3$ ;  $\cos \theta_{гг} \cong 0,316$ ;  $l = a = 0,016$ ,  $R = 0,06$  м.

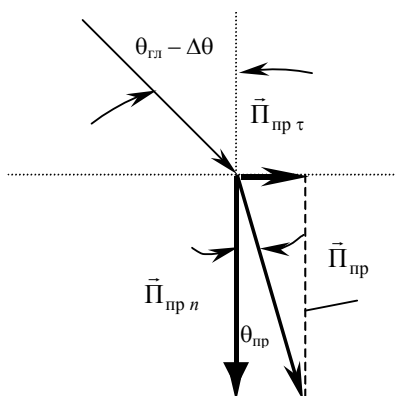
$$R_{\text{эф}} = 2,53 \cdot 10^{-2} + 11,04 \cdot 10^{-2} \frac{-\Phi_2(\lambda_{\text{г}})}{-3\Phi_2(\lambda_{\text{г}}) + \sqrt{1 - \Phi_2^2(\lambda_{\text{г}})}}, \quad (4.44)$$

где  $R_{\text{эф min}} = 2,53$  см,  $R_{\text{эф max}} = 5,06$  см.

## 2. Расчет текущей «преломленной «1/2 ДН»».

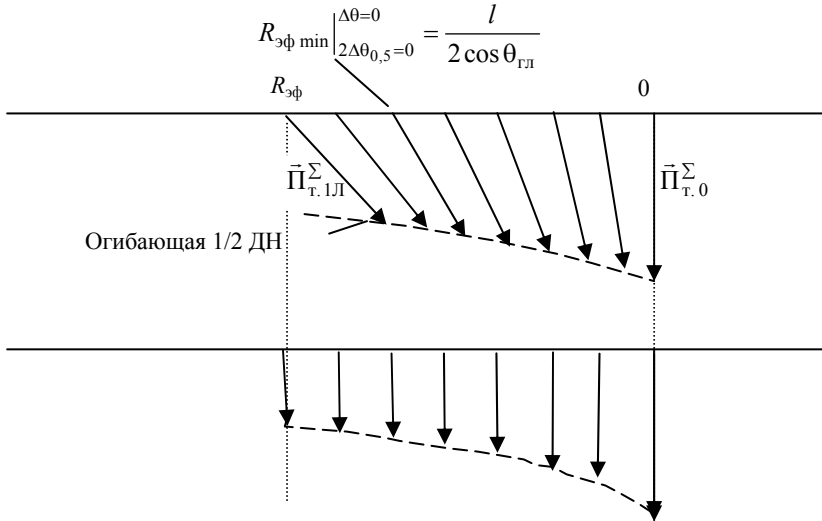
Данная основная «1/2 ДН» получается из текущей диаграммы с учетом второго закона Снеллиуса (рис. 4.33)  $\frac{\sin(\theta_{гг} - \Delta\theta)}{\sin \theta_{\text{пр}}} = (\varepsilon')^{1/2}$ ; откуда с учетом (4.41):  $\sin \theta_{\text{пр}} = (\varepsilon' + 1)^{-1/2}$ , где  $\varepsilon'(W_{\text{п}}, \lambda_{\text{г}}, t)$  определяется выражением (2.13).

На рис. 4.34 показаны в сравнении две ДН, вверху – «текущая» на поверхности, внизу – соответствующая ей «преломленная».





**Рис. 4.33. К расчету «преломленной» карандашной ДН**



**Рис. 4.34. «Преломленная» ДН при  $\Delta\theta_{0,5} = 0$**

Нижняя «1/2 ДН» (преломленная) построена с учетом того, что тангенциальные составляющие вектора  $\vec{\Pi}_{пр}$  в силу осевой симметрии апертуры одинаковы слева и справа и противофазны, следовательно, компенсируются, т.е. суммарный поток их векторов  $\vec{\Pi}_{пр \tau}$  равен нулю.

3. Расчет интегральной ДН с расчетной шириной  $2\Delta\theta_{0,5}$ .  
 Величина ширины расчетной ДН:

$$2\Delta\theta_{0,5} = \frac{54,4\lambda_{г.}}{Nd} = \frac{54,4\lambda_{г.}}{l}. \quad (4.45)$$

Так как диапазон  $\lambda_{г.}$  известен, ширину ДН можно варьировать, только меняя число  $N$  и, соответственно,  $l$ . Величина  $\Delta\theta_{0,5}$  должна быть такой, чтобы луч  $r_{max}$  на поверхности не пересекал  $r_{min}$ . В этом случае суммарный вектор  $\vec{\Pi}^{\Sigma}$  не будет содержать тангенциальной составляющей, направленной вне зоны определенной величиной  $R_{эф}$ . Все расчеты ДН ведутся аналогично «карандашной» ДН с учетом вида ДН (см. гл. 3). Например, величины  $r_{max}$  и  $r_{min}$  соответствуют уровню  $\frac{1}{2}|\vec{\Pi}_0|$ . Основная величина  $R_{эф}$  рассчитывается с учетом того, что  $\Delta\theta_{0,5} > 0$ , и определяется из вышеуказанных соображений с учетом того, что увеличивается величина

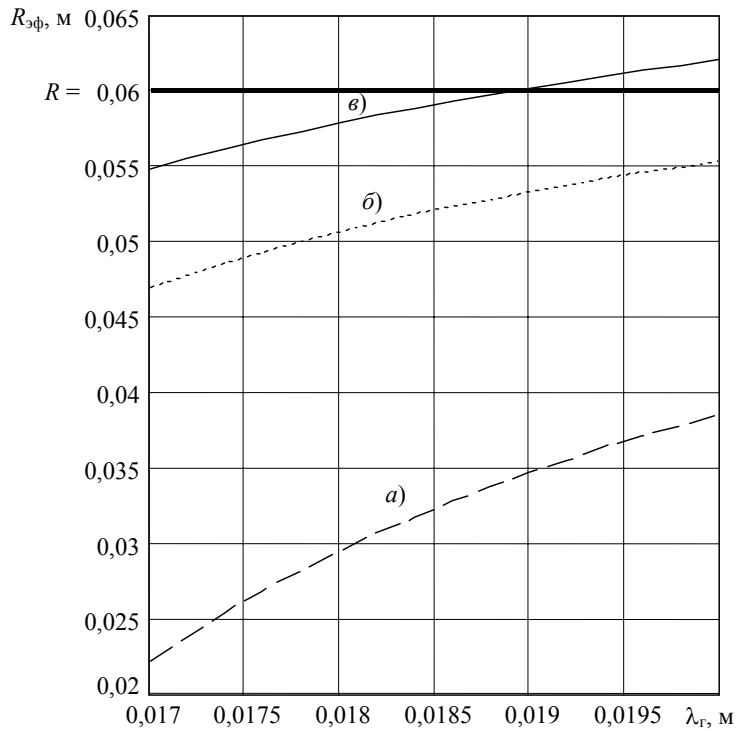
$$R_{эф \min} \Big|_{2\Delta\theta_{0,5} > 0} > R_{эф \min} \Big|_{2\Delta\theta_{0,5} = 0};$$

$$R_{эф} = \frac{l}{2 \cos \theta_{гл}} + X + \frac{r'_{\min}}{\cos \theta_{гл}} \frac{\text{tg } \Delta\theta_{т}}{1 + \text{tg } \theta_{гл} \text{tg } \Delta\theta_{т}} \leq R,$$

где  $X = r_{\min} \frac{\sin \Delta\theta_{0,5}}{\cos(\theta_{\text{гл}} - \Delta\theta_{0,5})}$ ,  $r'_{\min} = r_{\min} \frac{\cos \theta_{\text{гл}}}{\cos(\theta_{\text{гл}} - \Delta\theta_{0,5})}$ .

Окончательно для вышеуказанных значений  $l$ ,  $R$ ,  $\theta_{\text{гл}}$

$$R_{\text{эф}} = 2,53 \cdot 10^{-2} + 11,04 \cdot 10^{-2} \frac{\cos 71^{\circ}35'}{\cos(71^{\circ}35' - \Delta\theta_{0,5})} \times \left( \sin \Delta\theta_{0,5} - \frac{\Phi_2(\lambda_r)}{-3\Phi_2(\lambda_r) + \sqrt{1 - \Phi_2^2(\lambda_r)}} \right). \quad (4.46)$$



**Рис. 4.35. Зависимость эффективного радиуса от длины волны**

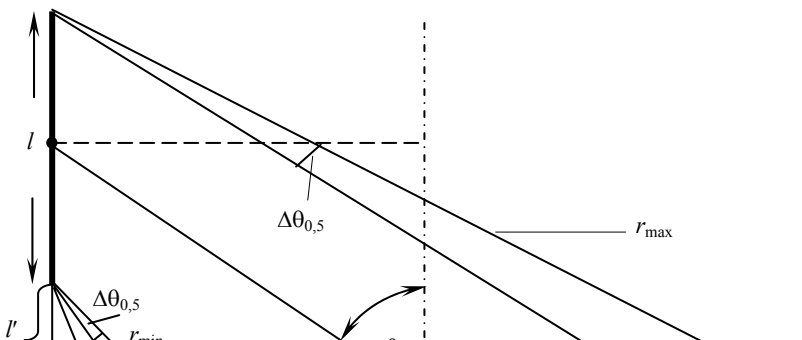
На рис. 4.35 показаны зависимости эффективного радиуса от длины волны:

- а) для «карандашной» ДН по выражению (4.44) при  $l = a$ ;
- б) для ДН с расчетным значением  $\Delta\theta_{0,5} = 27,2^{\circ} \lambda_r/l$  по (4.46) при  $l = 2a$ ;
- в) для ДН при  $\Delta\theta_{0,5} = 27,2^{\circ} \lambda_r/l$  по (4.46) при  $l = a$ .

Вполне очевидно, что чем уже ДН, тем меньше величина  $R_{\text{эф}}$ , при  $l = a$  не во всем диапазоне длин волн  $R_{\text{эф}} < R$ , следовательно, необходимо выбрать для реализации апертуры значение  $l = 2a$ .

**Особенности расчета цилиндрической апертуры (рис. 4.36).** Величина  $\theta_{\text{гл}}$  здесь не соответствует  $\Delta\theta = 0$ , а определяется значениями  $R$ ,  $l$ ,  $l'$  т.е. соответствует большей  $\lambda_r$ , чем у конусной апертуры, отсюда при необходимой величине  $\Delta\theta_{\text{max}}$  «качания» надо уменьшить  $\lambda_r$ , переходя на ВВ меньших размеров (МК-220), этого же требует уменьшение  $2\Delta\theta_{0,5}$ , т.е. увеличения  $l$  при приемлемой величине  $R$  (см. графики

$\Delta\theta = \Phi(\lambda_r)$  для МЭК-220 на  $\lambda_{\text{г ном}} = 1,25$  см в гл. 2). Для этого случая согласно (4.11) – (4.13):



**Рис. 4.36. К расчету цилиндрической апертуры**

$$\varepsilon'(20^\circ\text{C}, \lambda_{\Gamma \text{ ном}} = 1,25 \text{ см}, W_{\text{нач}}) = \text{tg}^2 \theta_{\text{гл}} = \left( \frac{R}{l' + l} \right)^2. \quad (4.47)$$

Из этого выражения определяется начальное значение влажности материала  $W_{\text{нач}}$ . Заметим, что величина  $r_{\text{мин}} > 1,6\lambda_{\Gamma}$  (обеспечение ДЗ):

$$r_{\text{мин}} = \frac{l'}{\sin(\theta_{\text{гл}} - \Delta\theta_{0,5})}, \quad (4.48)$$

отсюда выбирается величина  $l'$ . При такой величине  $W_{\text{нач}}$  требуется положительное начальное отклонение ДН, т.е.  $\Delta\theta \in [+ \Delta\theta; 90 - \Delta\theta_{0,5\text{max}}]$ .

Так как угол Брюстера реализуется только для направления максимума ДН и отсутствия симметричного луча от противофазной стороны, то, с нашей точки зрения, следует ввести понятие «интегрального» угла по  $S_{\text{эф}}$ , соответствующей минимуму отражения, т.е. величина  $\theta_{\text{Бр инт}}$  должна лежать в области \* (рис. 4.10), где величина  $R_{\text{отр}}$  (коэффициент отражения) консервативна к  $\Delta\theta$ .

Важно заметить, что преломленную в материале осесимметричную интегральную волну можно считать условно плоской Т-волной, интересно, что распределение ее мощности в пределах от  $R_{\text{эф мин}}$  до  $R_{\text{эф max}}$  подобно ДН щелевой антенны в угле от 0 до  $\Delta\theta_{\text{max}}$ .

Вышеуказанный анализ параметров конусной и цилиндрической ВВЩА позволяет сделать следующий вывод: чем острее ДН, тем меньше  $R_{\text{эф max}}$  и меньше  $V_{\text{вз}} = \pi R_{\text{эф}}^2 l'_{\text{эф}}(h)$ , т.е. тем больше чувствительность термовлагодетрического метода.

Таким образом, при максимизации  $P_{\text{пр}}$  необходимо минимизировать объем взаимодействия  $V_{\text{вз}}$ , т.е. увеличивать  $\Delta T$  (К), но при этом  $\Delta T \leq \Delta T_{\text{max}}$  из-за погрешностей, обусловленных тепломассопереносом (см. 5.3). Конструктивно увеличение чувствительности в пределах  $\Delta T \leq \Delta T_{\text{max}}$  возможно лишь увеличением числа щелевых антенн  $N$ , т.е. «излучающей» длины  $l$  (в рассмотренном термовлагодетрическом 5.2.:  $l = l_{\text{мин}} = a, 2a$ ), ограниченной сверху габаритными размерами апертуры. Далее в 4.3.4 показаны конструктивные разработки, направленные на решение данной оптимизационной задачи.

#### 4.3.4. Особенности конструкций апертурных преобразователей термовлагодетрии

*Конические апертуры* имеют следующие конструктивные особенности:

1) Коническая приемопередающая апертура со «спирально-винтовой» ВВЩА (рис. 4.37).

Базу ВВЩА  $l$  можно увеличивать в пределах до  $l_{\text{max}}$ , определяемого величинами  $R, \Delta\theta_{\text{гл}}$  и  $2\Delta\theta_{0,5}$ .

2) Безволноводная двухконическая апертура – двухконический волновод (рис. 4.38).

Апертура состоит из двух коаксиальных конусов с постоянным между ними зазором, на внутреннем конусе по образующей прорезаны щелевые излучатели  $\text{Щ}_б$  (базовые), прочие «образующие»  $\text{Щ}_а$  находятся от  $\text{Щ}_б$  на постоянном расстоянии  $a$  (по «винтовой» образующей), как в обычном прямоугольном волноводе. В коническом нерегулярном

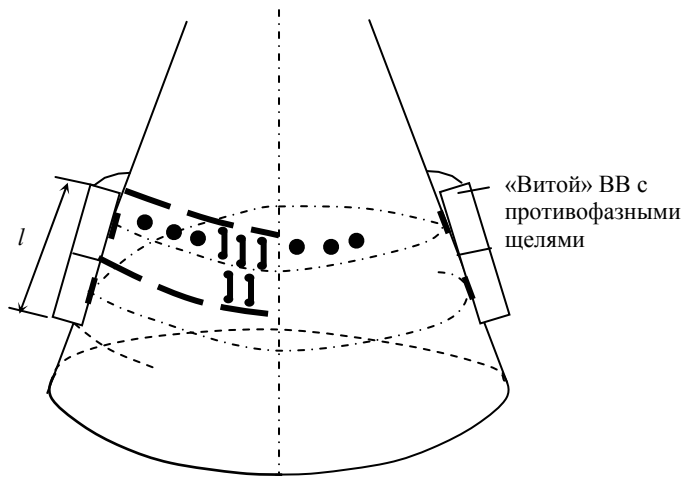


РИС. 4.37. КОНИЧЕСКАЯ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩАЯ АПЕРТУРА  
СО «СПИРАЛЬНО-ВИНТОВОЙ» ВВЩА

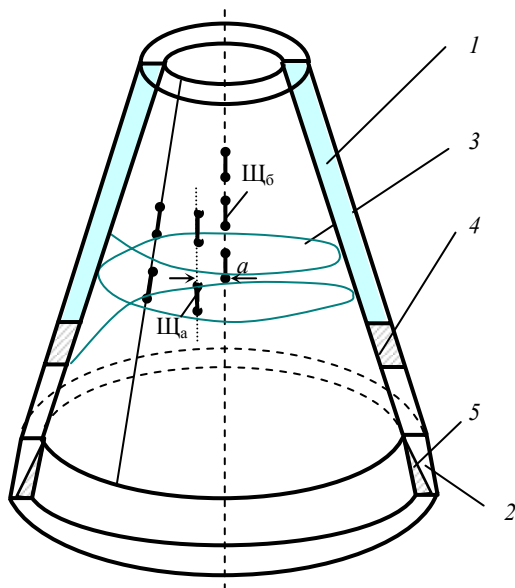


РИС. 4.38. БЕЗВОЛНОВОДНАЯ ДВУХКОНИЧЕСКАЯ  
АПЕРТУРА – ДВУХКОНИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД:

- 1 – верхняя часть конической ВВ апертуры; 2 – нижняя часть апертуры (по  $\theta_{бр}$ ), возбуждаемая отдельно; 3 – спираль, нормальная щелевым разрезам; 4 – кольцевой вентиль, отключающий верхнюю часть апертуры (ферритовое кольцо с реверсом подмагничивающего поля  $\vec{H}_0$ ); 5 – поглощающее кольцо-конус

волноводе распространяется бегущая волна Т-типа с КБВ  $\rightarrow$  1, обеспечиваемом 2. Посредством 5 реализуются следующие режимы: вентиль 5 закрыт – режим измерения  $W_{п}$  при минимуме отраженной мощности

по  $\lambda_r$  маломощного (отсутствует нагрев, т.е.  $\Delta T = 0$ ) локального управляемого ГСВЧ на ЛПД, питающего 2; вентиль 5 открыт – ГСВЧ (локальный) переключается через микроволновый усилитель (на основе ЛБВ) на питание всей апертуры (1 + 2). В этом случае производится измерение  $W$  по величине  $\Delta T$ .

3) Комбинированная апертура: разделение излучающей ВВЩА и конической приемной (рис. 4.39).

Особенности: а) «интегральная» апертура из отрезков прямоугольных волноводов; б) сложность возбуждения, фазировки и согласования; в) раздельное управление длиной волны генератора для маломощной системы 1 и системы отрезков волновода «линза» 2 с возможностью их интегрирования.

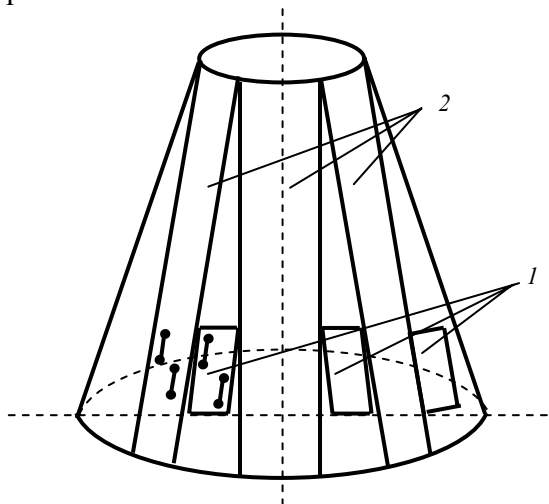


РИС. 4.39. КОНИЧЕСКАЯ АПЕРТУРА С РАЗДЕЛЕНИЕМ ФУНКЦИЙ:

- 1 – для определения  $W_{\Pi}$  по длине волны генератора (по  $P_{отр. \min}$ , соответствующей  $\theta_{Бр}$ );
- 2 – апертура «линзовой» концентрации мощности падающей волны для нагрева материала

*Цилиндрические апертуры с конической приемной частью.*

1) Цилиндрикоконическая апертура (рис. 4.40) с общим «качанием»  $\Delta\theta$  конической и цилиндрической ВВЩА (за счет разных геометрических параметров  $d_1$  и  $d_2$ ). При  $\lambda_r$ , соответствующей  $\theta_{гл} = \pi/2 (\pm\Delta\theta = 0)$  – режим опасен, так как может быть стоячая волна внутри кольца по максимуму диаграммы ДН, т.е.  $\lambda_r$  нач, а должна быть такая, чтобы  $\Delta\theta_{0,5}$  (половина ширины ДН) была ниже горизонта – условие отсутствия СВ и паразитного излучения вверх.

2) Цилиндрикоконическая апертура с двухконусным ВВ и «интегральной» цилиндрической апертурой с вертикальными отрезками прямоугольного ВВ показана на рис. 4.41, где цифрами обозначены:

- 1 – излучающие щели «линзы-конуса»; 2 – поглощающее кольцо БВ «линзы-конуса» или управляемый ферритовый ключ-аттенюатор;
- 3 – кольцевой ВВ, возбуждающий БВ в вертикальных отрезках ВВ, образующих интегральную цилиндрическую апертуру; 4 – возбуждающие щели; 5 – межцилиндрические ребра, образующие ВВ; 6 – ребро теплоотвода; 7 – поглощающая нагрузка – согласующее устройство;
- 8 – нижняя часть апертуры поиска угла Брюстера  $\theta_{Бр}$ ; 9 – управляемый делитель мощности.

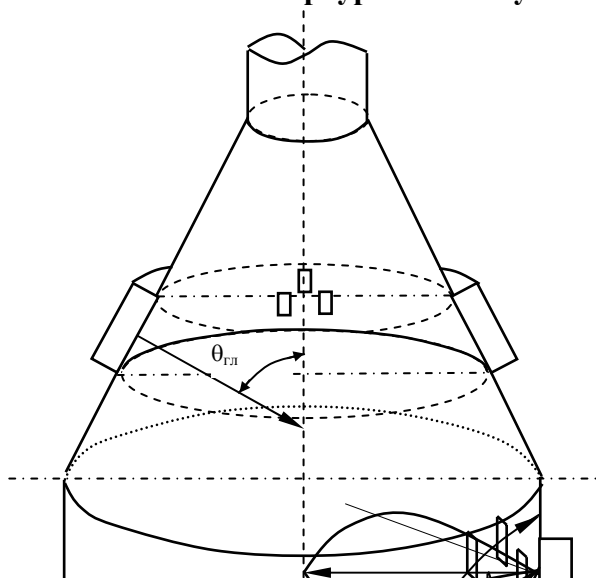
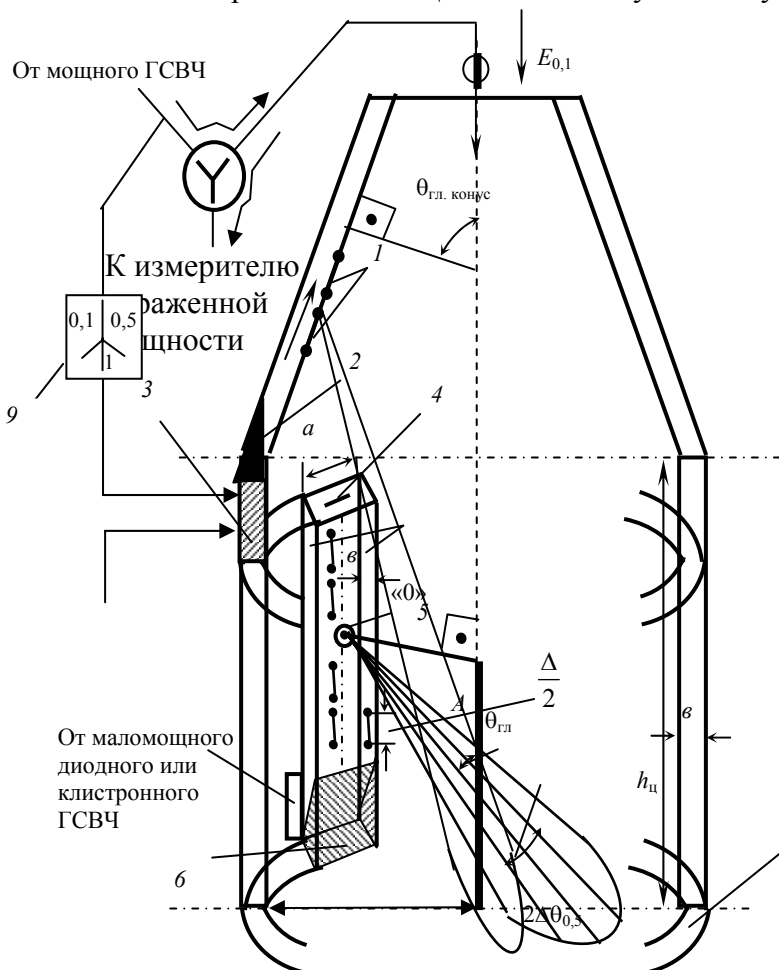


Рис. 4.40. Цилиндрикоконическая апертура

Особенности апертуры, представленной на рис. 4.41: количество щелей  $N$  у «конуса-линзы» больше (и может быть намного больше) количества щелей цилиндрической части с учетом того, что  $2\Delta\theta_{0,5} = \frac{54,5(58)\lambda_r}{Nd}$ , т.е. ДН «конуса-линзы» более узкая (высокая «локальность»).

Нами рассматривается вариант алгоритма работы данной антенны, при котором:

- в конусной части отсутствует ВВЩА, он используется только для приема  $P_{отр}$ ;
- после измерения  $W_{\Pi}$  по  $\lambda_r$  (по  $\theta_{бр}$ ) меняется у цилиндрической ВВЩА положение  $\theta_{гп}$ , так чтобы ее ДН по всей ширине  $2\Delta\theta_{0,5}$  попадала в участок  $AB$ . В этом случае не нужен ВВ 3, а отраженная волна от щелей цилиндрической ВВЩА пойдет по пути между конусами ( $\rightarrow$ ).



$$R_{\text{ц}} \gg h_{\text{ц}} \quad \mathbf{R}$$

**Рис. 4.41. Вариант цилиндрической апертуры: двухконусный ВВ и «интегральная» цилиндрическая апертура с вертикальными отрезками прямоугольного ВВ**

## 5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ТЕРМОВЛАГОМЕТРИИ

В гл. 5 кратко даны основные результаты экспериментальных разработок устройств термовлагодиметрии, базирующихся на наших работах [33, 88 – 96].

### 5.1. ОПИСАНИЕ БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ

На рис. 5.1, *а* и *б* показана конструкция комплексного приемно-передающего антенного преобразователя, состоящего из излучающей кольцевой щелевой антенны и приемной – рупорного типа.

Рассмотрим некоторые конструктивные особенности кольцевой переменного-фазной многощелевой излучающей апертуры. Электрический вектор  $E$  волны, излучаемой поперечными щелями, должен лежать в плоскости падения, щели при этом должны быть согласованно излучающими при том условии, что в кольцевом волноводе (ВВ) осуществляется одноименный смешанный режим волны  $H_{10}$  (близкий к ВВ), причем величина КВВ в нем близка к единице.

Число щелевых антенн равно  $N + 1$ , где  $N$  – число излучающих щелей плюс одна, возбуждаемая вибратором от ГСВЧ (ЛОВ «О») и выбираемая из соотношения, обеспечивающего максимум напряженности электрического поля по центру поперечной щелевой антенны:

$$N + 1 = \frac{2\pi R_{\text{ср}}}{n \frac{\lambda_{\text{в}}}{2}} = \frac{4\pi R_{\text{ср}}}{n \lambda_{\text{в}}}, \quad (5.1)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  – длина основной волны  $H_{10}$  в прямоугольном ВВ;  $R_{\text{ср}}$  – средний радиус кольцевого ВВ ( $R_{\text{ср}} \gg \lambda_{\text{в}}$ );  $n = 1, 2, \dots$ .

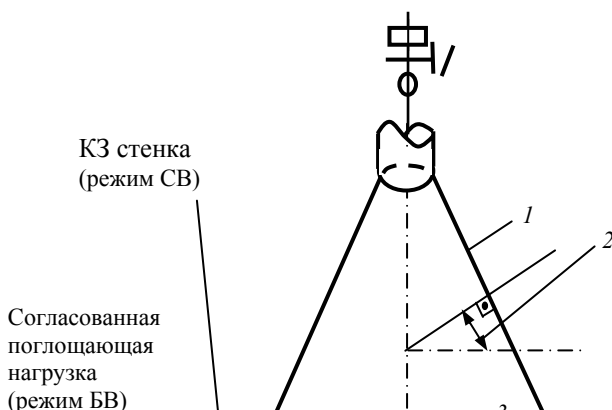
На рис. 5.1, *б* подробно показана конструкция и геометрические параметры кольцевой переменного-фазной многощелевой излучающей антенны.

Выбор параметров кольцевой переменного-фазной многощелевой излучающей антенны сделан нами с учетом материалов главы 3:

а) длина щели  $l_{\text{щ}} \approx \lambda_{\text{в}} / 2$  – щель резонансная;

б) величина противофазного шага  $d_2 = 0,488\lambda_{\text{в}}$ , из условия существования только главного лепестка ДН (нулевого порядка):

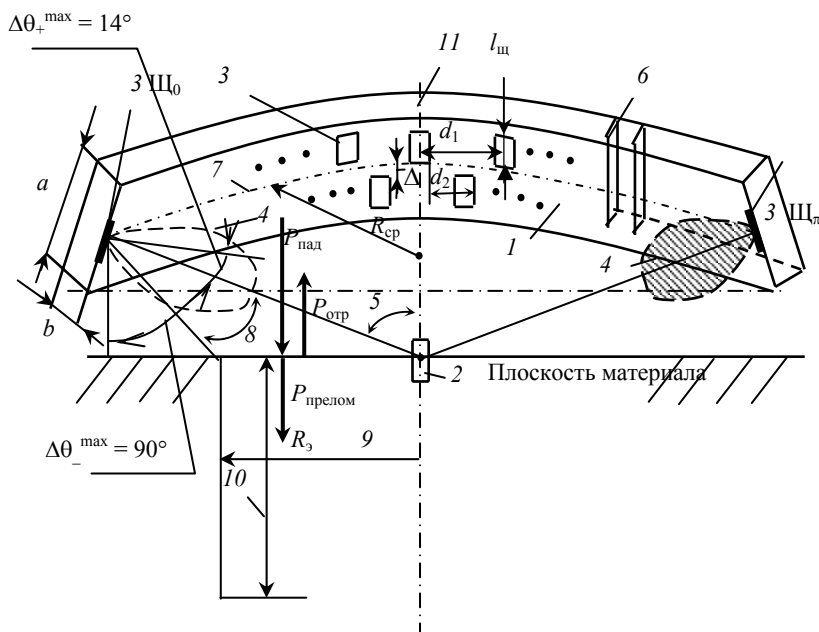
$$d_2 \leq d_{2\text{max}} = \frac{(1 - N^{-1})\lambda_{\text{г}}}{1 + |\cos \theta_{\text{гт}}|} \leq \lambda_{\text{г}},$$



к У-циркулятору  
(К 7, РИС. 5.2)

a)

**Рис. 5.1 Конструкция комплексного приемно-передающего**  
*a* – комплексная апертурная система (позиции 9 и 10 на рис. 5.2):  
 ЭМВ –  $P_{отр}$ ; 2 – угол между плоскостью материала и максимумом  
 $\lambda_B/2$  – полуволновая поперечная щель; 3 – одна из щелевых антенн  
 щелевыми антеннами; 5 – внешняя щель возбуждения кругового ВВ;  
 8 – пространство, заполняемое теплоизолирующим радиопрозрачным  
 с наклеенным комплектом точечных  
*b* – конструкция кольцевой переменнo-фазной многощелевой  
 1 – кольцевой ВВ с переменнo-фазным расположением щелей;  
 где  $\text{Щ}_0$  и  $\text{Щ}_\pi$  – диаметрально противоположные щели; 4 – ДН одной щели;  
 6 – ребристая периодическая замедляющая структура;  
 8 – ширина ДН в плоскости падения  $2\Delta\theta_{0,5}$ ; 9 – эффективная поверхность  
 10 – эффективная (условно-эквивалентная) глубина пространства СВЧ-нагрева  
 или согласованная поглощающая нагрузка





б)

### устройства антенного преобразователя:

1 – ЭМЭ (электромагнитный экран и приемный рупор мощности, отраженной диаграммы направленности апертуры  $\theta_A$  (щелевой антенны): щель длины (внутренняя щель); 4 – кольцевой прямоугольный ВВ с излучающими 6 – возбуждающий вибратор; 7 – плоскость материала; материалом с  $\epsilon'$  близким к 1 (пенопласт) термопар (термобатарея); излучающей антенны:

2 – возбуждающая щель с вибратором; 3 – излучающая щель, 5 – направление максимума основного лепестка ДН одной щели  $\theta_{гд}$ ; 7 – средняя линия широкой стенки ВВ; переноса СВЧ-энергии падающей волны в материал ( $\pi R_{эф}^2$ ); ( $l_{эф} = h$ ); 11 – условная короткозамкнутая плоскость (режим СВ) (режим БВ)

а с другой стороны условием нормальности направления максимума ДН к плоскости щели является величина синфазного шага:  $d_1 = \lambda_{в}$ . Реально  $d_2 / \lambda_{г} = 0,3 \dots 0,7$ , откуда:

в) величина синфазного шага  $d_1 = 2d_2$ ;

г) ширина щели примерно  $0,25l_{щ}$ ;

д) величина смещения излучающей щели  $\Delta$  относительно оси симметрии растёт от условной плоскости КЗ до вибратора 2, для уменьшения боковых лепестков приближенно на величину  $2\Delta/N$  при шаге, равном  $d_2$ .

Известно (гл. 3), что изменение положения максимума ДН, т.е. ее отклонение от величины  $\theta_{гд}$  на величину  $\Delta\theta_{\pm}$ , можно добиться электронным сканированием луча, изменяя величину  $\lambda_{г}$  ГСВЧ (ЛОВ «О», например) через  $E_{A2}$  (рис. 5.2).

Предложенная нами система поиска величины  $\theta_{гд} \pm \Delta\theta_{\pm}$  и, соответственно, связанной с ней величины  $\theta_{Бр}$  позволяет (см. рис. 5.2), меняя  $\lambda_{г}$  в щелевом кольцевом ВВ, снабженном ребристой периодической замедляющей структурой 6 (для увеличения изменения  $\theta_{гд}$  нужно увеличивать  $v_{зф}$ ), используя систему поиска минимума  $P_{отр}$  по сигналу  $W$  (ваттметра СВЧ, термисторного или поглощения) через ОС на ГУН, найти величину  $\lambda_{г}$ , как меру величины  $\epsilon'$  и, соответственно, определить величину  $W_{п}$ , а затем по предлагаемому (см. ниже) алгоритмам термовлагодетрического метода, например по изменению  $\Delta T$  поверхности, определить и величину влажности  $W$  объема взаимодействия.

Величина управляемого отклонения максимума ДН от  $\theta_{гд}$  (т.е.  $\Delta\theta_{\pm}$ ) определяется для предлагаемой переменного-фазной системы выражением (4.14) и принимает вид:

$$\sin \Delta\theta_{\pm} = \frac{\lambda_{г}}{\lambda_{в}} - \frac{\lambda_{г}}{2d_2} = \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{г}}{2a} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{\lambda_{г}}{2d_2} = v_{зф} - \frac{\lambda_{г}}{2d_2}, \quad (5.2)$$

где  $v_{зф} = c / V_{ф}$  – коэффициент замедления фазовой скорости волны  $H_{10}$  в прямоугольном ВВ, причем  $v_{з.гp} = v_{з.ф}^{-1}$  – коэффициент замедления групповой скорости. (После измерения  $W_{п}$  величина  $\theta_{гд} \pm \Delta\theta_{\pm} +$

$\Delta\theta_{0,5}$  должна запоминаться, так как она определяет величины  $R_{эф}$  и  $V_{вз}$ , см. гл. 4).

Углочастотная чувствительность

$$\frac{\partial(\Delta\theta)}{\partial\lambda_r / \lambda_r} = S_{\Delta\theta}^{\lambda_r} = \frac{0,573}{\cos\Delta\theta} (\sin\Delta\theta - v_{з.гр}) \cong \frac{1,61}{\% \lambda_r}, \text{ град} \quad (5.3)$$

без применения ребристой замедляющей структуры (ЗС). Реально для применяемого одномодового режима  $H_{10}$  с учетом разработанной ЗС величина  $1,15 \leq v_{з.гр} \leq 2,77$ . Ширина ДН при соотношении мощностей  $P_{\pi R_{ср}} / P_0 = 0,05$ , где  $P_0$  – мощность волны  $H_{10}$  у возбуждающей щели;  $P_{\pi R_{ср}}$  – мощность  $H_{10}$  у условной плоскости КЗ, определяется выражением (3.5).

## 5.2. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА МИКРОВОЛНОВОГО ТЕРМОВЛАГОМЕРА

Устройство, реализующее микроволновый термовлагодетрический способ определения влажности (рис. 5.2), содержащее генератор СВЧ и детектор СВЧ, включает плоскостной волноводный Y-циркулятор, во входное плечо которого включены блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны типа «О» (ЛОВ «О») с выходной мощностью 100 Вт в непрерывном режиме и работающей в частотном диапазоне (15...17 ГГц), с диапазоном управляемой девиации частоты  $\Delta f_d \leq 0,5$  ГГц. Кроме того, включает аттенюатор на подмагниченном феррите, управляемый микропроцессором, СВЧ-термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на микропроцессорное устройство для управления и стабилизации выходной мощностью, диодный импульсный модулятор и генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором, пиковый детектор. В первое выходное плечо Y-циркулятора включена поглощающая согласованная нагрузка, а во второе выходное плечо включена комплексная рупорная апертура, состоящая из излучающей части в виде кольцевой переменного-фазной многоцелевой антенны и рупорной приемной части, к которой подключены вентиль, СВЧ-термисторный ваттметр, сопряженный с экстремальным цифровым регулятором поиска и индикации минимума мощности отраженной волны по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ «О», резонаторный датчик волномера, питание генератора на ЛОВ «О» осуществляется управляемым микропроцессорным блоком питания; счетчик видеоимпульсов (ВИ), сопряженный с цифровым волномером, блок термопар, сопряженный через ФНЧ, УПТ и АЦП с микропроцессорным устройством.

Структурная схема устройства микроволнового термовлагомера показана на рис. 5.2, где цифрами обозначены следующие блоки:  
 1 – блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны (ЛОВ «О») «Шеелит» и УВ-40:  $P_{вых} \cong 100$  Вт в непрерывном режиме,  $(f_{min}..f_{max}) \in [15; 17]$  ГГц с делителем частоты (спецблок),  $\Delta f_d \leq 0,5$  ГГц – диапазон управляемой девиации частоты (предусмотрена работа с клистронным ГСВЧ на К-27 со стационарным блоком управляемого питания при измерении  $W_n$  (см. фото измерительного комплекса – рис. 5.8, 5.9);  
 2 – управляемый микропроцессором (МП) аттенюатор на подмагниченном феррите;  
 3 – СВЧ-термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на МП (через МП управление и

### Рис. 5.2. Структурная схема микроволнового термовлагомера

стабилизация  $P_{\text{вых}}$ ); 4 – диодный импульсный модулятор; 5 – генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором; 6 – пиковый детектор; 7 – волноводный Y-циркулятор; 8 – поглощающая согласованная нагрузка; 9 – кольцевая переменнo-фазная многощелевая антенна – излучающая часть комплексной апертуры; 10 – рупорная приемная часть комплексной апертуры; 11 – вентиль; 12 – СВЧ-термисторный ваттметр; 13 – экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума мощности отраженной волны  $P_{\text{отр}}$  по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ «О»1 ( $E_{A2}$  – Кл 5); 14 – управляемый микропроцессорный блок питания для 1 (УБП); 15 – счетчик ВИ, сопряженный с цифровым волномером 16; 17 – резонаторный датчик волномера; 18 – микропроцессор; 19 – блок термопар (ТП); 20 – персональный компьютер.

Устройство работает следующим образом. С помощью кольцевой переменнo-фазовой многощелевой антенны 9, являющейся частью приемоизлучающей комплексной апертуры 10 (рис. 5.1), возбуждают электромагнитную волну мощностью  $P_{\text{пад}}$ , падающую на диэлектрический материал. Излучающая антенна питается от генератора СВЧ 1 на ЛОВ типа «О» через управляемый аттенюатор 2, диодный импульсный модулятор 4 и развязывающее устройство на базе  $H$ -плоскостного волноводного Y-циркулятора 7.

Комплексная приемоизлучающая апертура представлена на рис. 5.1, а и б.

Принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь к поверхности изделия, обеспечивая минимум облучения окружающей среды. Контакт с поверхностью имеет лишь термопарный преобразователь (батарея термопар), причем степень прижима преобразователя должна быть максимально возможная.

Отраженная от материала волна, принимаемая приемной частью 10 (рис. 5.2), через вентиль 11 поступает на резонансный датчик волномера 17, где измеряется ее длина волны, и на СВЧ-термисторный ваттметр 12, где измеряется мощность отраженной волны  $P_{\text{отр}}$ . Сигнал с выхода 12 поступает на экстре-

мальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума отраженной волны  $P_{отр}$  13 и через управляемый микропроцессорный блок питания ЛОВ 14 поступает на клемму (Кл. 5) ГСВЧ 1, где изменяет величину  $E_{A2}$ , меняя тем самым длину волны генератора  $\lambda_r$ , что приводит к отклонению максимума ДН главного лепестка  $\theta_{гл}$  на величину  $\Delta\theta_{\pm}$ .

Для увеличения изменения угла ДН  $\theta_{гл}$  необходимо увеличивать коэффициент замедления фазовой скорости  $v_{з.ф}$  замедляющей структуры 6 (рис. 5.1, б).

Предложенная система поиска величины угла ДН  $\theta_{гл} \pm \Delta\theta_{\pm}$  и, соответственно, связанной с ней величины угла Брюстера  $\theta_{Бр}$  позволяет, меняя  $\lambda_r$  в щелевом кольцевом волноводе, снабженном ребристой периодической замедляющей структурой, с помощью системы поиска минимума  $P_{отр}$  13 (рис. 5.2), по сигналу СВЧ термисторного ваттметра 12 через ОС на ГУН, найти  $\lambda_r$  как меру действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и, соответственно, определить величину поверхностной влажности  $W_n$  материала, решая систему уравнений (см. гл. 4) в МП 18.

Далее, при найденном угле Брюстера, МП 18 задается время нагрева материала  $t_n = \text{const}$  и мощность падающей волны  $P_{пад} = \text{const}$ . Так как мнимая часть величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon''_{см} = \Phi(W)$ , т.е.  $P_{пр} = \Phi(W)$ , то необходимо через измерение  $\epsilon'_{см}$  по углу Брюстера, корректировать (стабилизировать) мощность падающей волны  $P_{пад}$  или время нагрева так, чтобы количество энергии было постоянным  $P_{пр} t_n = Q = \text{const}$ . Это достигается следующим образом: измеряют с помощью 12 и 13 величины минимальной отраженной мощности  $P_{отр. \min}$  и падающей волны  $P_{пад}$ ; в МП 18 вычисляют мощность преломленной волны  $P_{пр} = P_{пад} - P_{отр. \min}$  и, изменяя величину  $P_{пад}$  с помощью 2, стабилизируют  $P_{пр}$ . Количество тепла, поглощаемое материалом, определяется (4.20).

Измеренная блоком термодатчик 19 величина  $\Delta T$  согласно (4.23) позволяет по реализующему это выражение алгоритму вычислить искомое значение  $W$ . На рис. 5.3 более подробно показана блок-схема общего алгоритма расчета  $W_n$  и  $W$  в рамках функционирования схемы термовлагомера (рис. 5.2, блок 18).

На рис. 5.4 более подробно показана блок-схема алгоритма расчета  $W_n$  по углу Брюстера в блоке алгоритма Брюстера (рис. 5.3).

#### НА РИС. 5.5 ПРЕДСТАВЛЕНА УПРОЩЕННАЯ СХЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ

#### $P_{пр} = \text{CONST}$ , Т.Е. БЛОК ЭКСТРЕМАЛЬНО-МИНИМАЛЬНОЙ АПЧ СХЕМЫ (РИС. 5.4).

Кроме основного алгоритма измерений в устройстве реализован и дополнительный импульсный алгоритм измерений. Сущность его состоит в импульсно-непрерывной работе излучателя и преобразователей:

- 1) модуляция СВЧ-излучения ВИ (видеоимпульсами) с  $\tau_n = \text{const}$  при постоянной и большой мощности излучения  $P_{изл} = \text{const}$ ;
- 2) величина  $\Delta T$  задается и фиксируется;
- 3) число  $n$  радиоимпульсов (РИ) нагрева по достижении заданной  $\Delta T$  есть мера  $W$ .

**Рис. 5.3. Тестерный алгоритм измерений и расчета величины  $W_{II}$**   
 (непосредственно к алгоритму термовлагометрии по п. 3 – 5 МП 18 рис. 5.2)

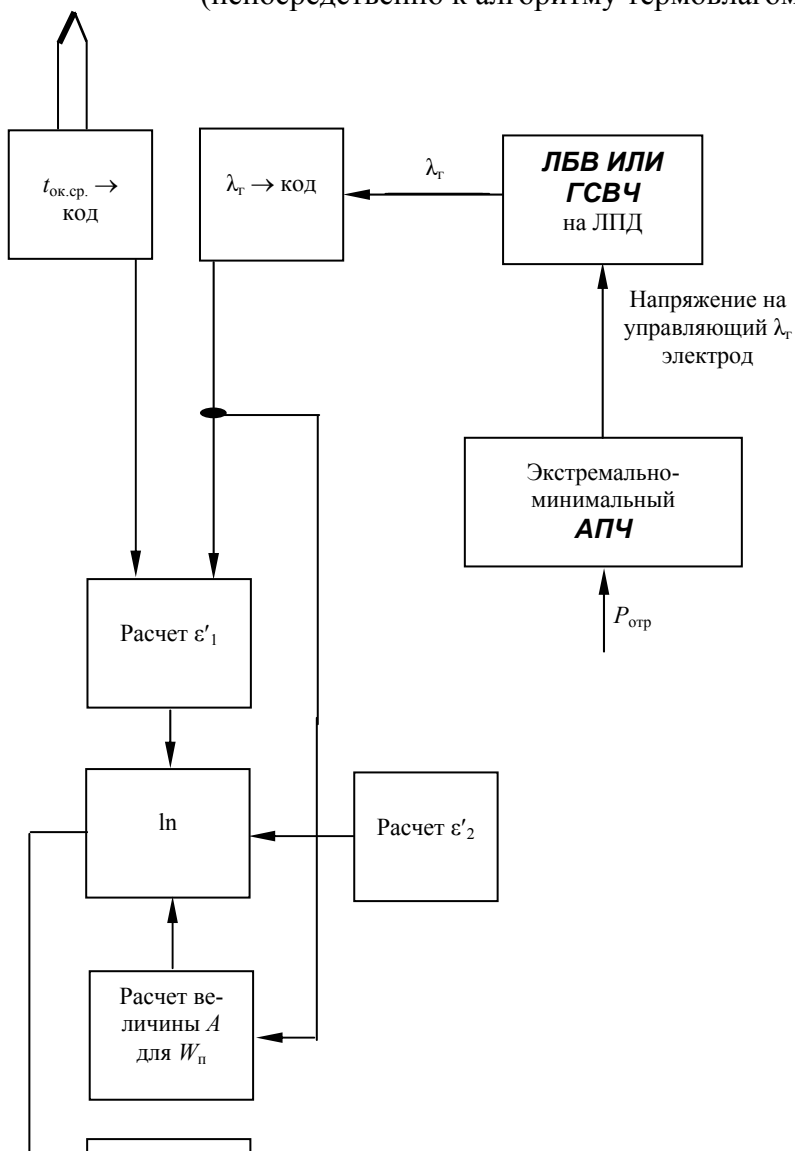


Рис. 5.4. Блок-схема алгоритма Брюстера

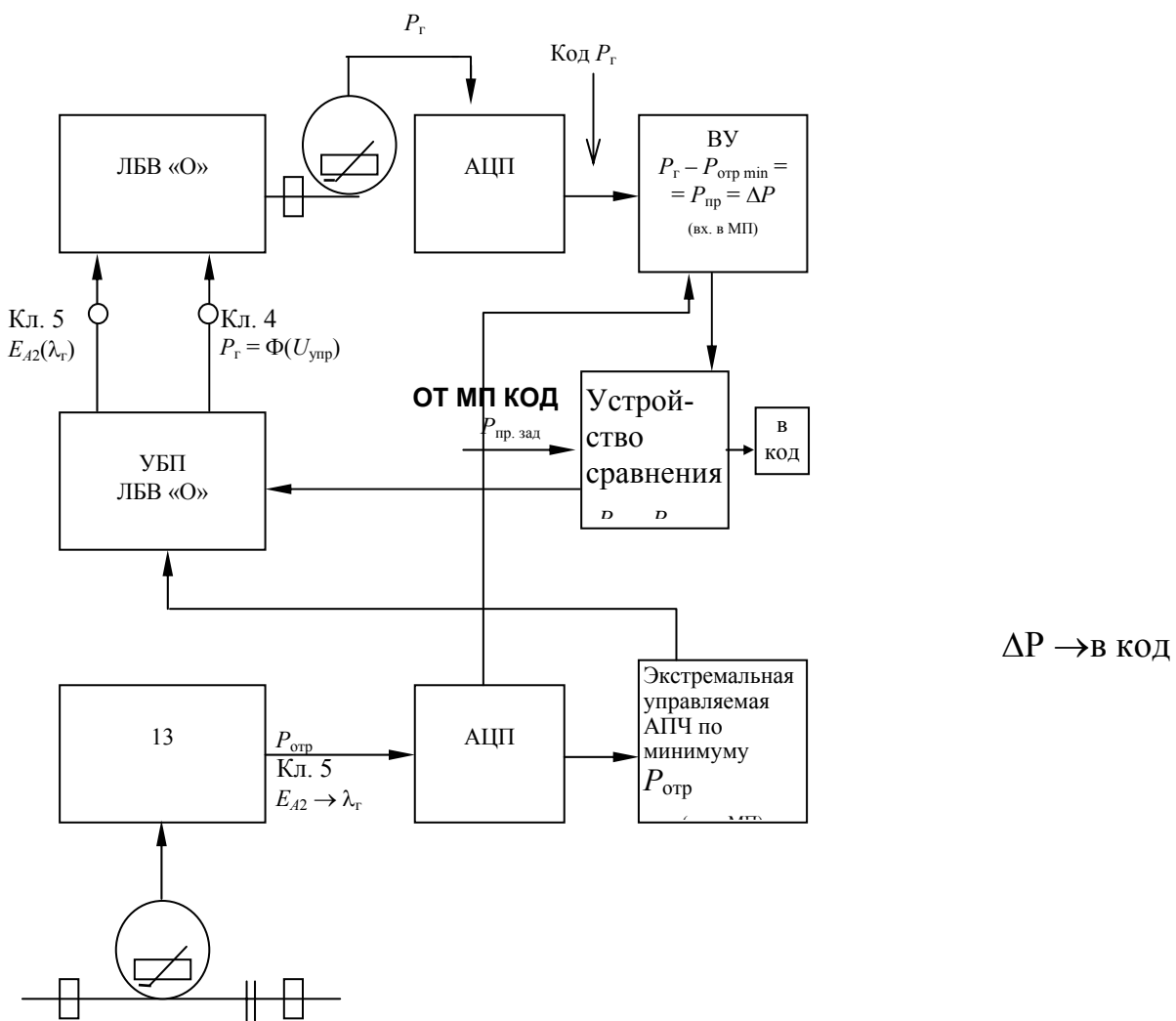


Рис. 5.5. Упрощенная схема стабилизации  $P_{пр} = \text{const}$

Конструктивной особенностью приемного устройства (батареи термопар) является радиально симметричное расположение ТП с шагом их расположения, уменьшающимся по лучу  $0 \rightarrow R_{\text{эф}}$ , т.е. обратно пропорциональное распределению напряженности поля полудиаграммы направленности. Это позволяет решать следующие задачи исследования строительных материалов:

а) распределение поля температур в функции  $W_{\text{п}}$  и  $W$  в плоскости материала ( $T = \Phi(r, \varphi)$  или  $\Phi(x, y)$ );

б) исследование термограмм при числе импульсов  $n = \text{const}$ , т.е.  $T = f(\tau)$  и т.д.

Предлагаемая СВЧ-система позволяет, не разрушая капиллярно-пористый материал, отдельно определять влажность поверхностного слоя  $W_{\text{п}}$  и влажность по переменному объему взаимодействия  $W$  в пределах их изменения от 5 до 30 % с точностью не хуже 5 %.

Модифицированный измерительный комплекс с импульсным режимом измерений позволяет определить (рассчитать) средний градиент изменения влажности по нормали к поверхности материала по формуле:

$$\text{grad}_{\text{ср}} W = \frac{W - W_{\text{п}}}{l_{\text{эф}}}, \quad (5.4)$$

где  $l_{\text{эф}} = h$  – расчетная высота зоны нагрева (см. 2.5.3), показана на рис. 5.6.

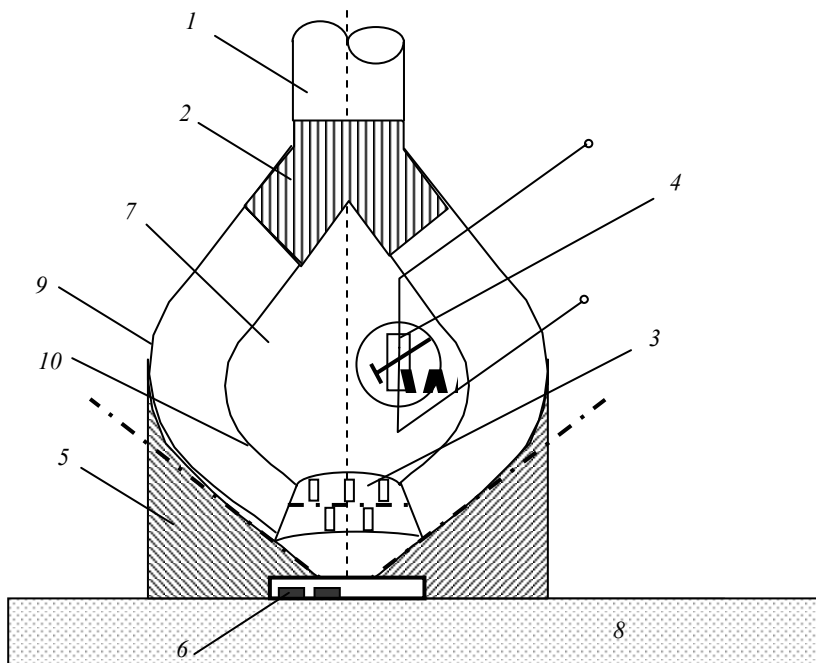
На рис. 5.6 цифрами обозначены следующие блоки: 1 – блок генератора управляемого напряжением (ГУН) на лампе обратной волны (ЛОВ) «О»; 2 – управляемый микропроцессором (МП) аттенюатор на подмагниченном феррите; 3 – СВЧ-термисторный ваттметр с выходом через УПТ и АЦП на МП (через МП осуществляется управление и стабилизация выходной мощности генератора СВЧ  $P_{\text{вых}}$ ); 4 – диодный

импульсный модулятор; 5 – генератор видеоимпульсов, управляемый микропроцессором; 6 – пиковый детектор; 7 – волноводный Y-циркулятор; 8 – поглощающая согласованная нагрузка; 9 – сферическая двухповерхностная антенна с внутренним объемом с кольцевой переменнo-фазной многощелевой апертурой; 10 – СВЧ-термисторный ваттметр; 11 – экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума мощности отраженной волны  $P_{\text{отр}}$  по управляемой величине напряжения на втором аноде ЛОВ «О»1 ( $E_{A2}$  – Кл 5); 12 – управляемый микропроцессорный блок питания для 1 (УБП); 13 – счетчик ВИ, сопряженный с цифровым волномером 14; 15 – резонаторный датчик волномера; 16 – микропроцессор; 17 – блок термопар (ТП); 18 – персональный компьютер.

С помощью кольцевой переменнo-фазной многощелевой апертуры сферической двухповерхностной антенны 9 возбуждают электромагнитную волну мощностью  $P_{\text{пад}}$ , падающую на диэлектрический материал. Излучающая антенна питается от генератора СВЧ 1 на ЛОВ типа «О» через управляемый аттенюатор 2, диодный импульсный модулятор 4 и развязывающее устройство на базе H-плоскостного волноводного

Y-циркулятора 7.

**Рис. 5.6. Структурная схема микроволнового термовлагомера в импульсном режиме со сферической двухповерхностной антенной**



**Рис. 5.7. Сферическая двухповерхностная антенна с внутренним объемом с кольцевой переменнo-фазной многощелевой апертурой**



Излучающая антенна представляет из себя сферическую двухповерхностную антенну, изображенную на рис. 5.7, где цифрами обозначены: 1 – круглый волновод; 2 – радиопрозрачный материал; 3 – апертурный преобразователь с излучающими переменnofазными щелевыми антеннами; 4 – СВЧ-термисторный ваттметр; 5 – держатель сферической антенны, выполненный из поглощающего материала, полностью изолирующий излучающую апертуру от внешнего пространства; 6 – термопарный преобразователь (блок термопар); 7 – замкнутый внутренний объем; 8 – плоскость материала; 9 – верхняя поверхность «объемного» волновода; 10 – нижняя поверхность «объемного» волновода.

Излучающая сферическая двухповерхностная антенна имеет замкнутый внутренний объем 7, где расположен СВЧ-термисторный ваттметр 5. Постоянство расстояния между верхней 9 и нижней 10 поверхностями «объемного» волновода обеспечивается держателями из радиопрозрачного материала 2.

Принцип неразрушающего контроля позволяет максимально приблизить апертурный преобразователь 3 к плоскости материала 8, обеспечивая минимум облучения окружающей среды. Полностью исключить паразитное СВЧ-излучение позволяет держатель 5 сферической антенны, выполненный из поглощающего материала и полностью изолирующий излучающую апертуру от внешнего пространства. Контакт с поверхностью исследуемого материала имеют держатель 5 сферической антенны и термопарный преобразователь 6 (батарея термопар) (рис. 5.7).

Отраженная от материала волна попадает во внутренний замкнутый объем 7 излучающей антенны, где создается поле стоячей волны. С помощью СВЧ-термисторного ваттметра 4 измеряется мощность отраженной волны  $P_{отр}$ . Сигнал с выхода 4 поступает на экстремальный цифровой регулятор поиска и индикации минимума отраженной волны  $P_{отр}$  11 (рис. 5.6) и через управляемый микропроцессорный блок питания ЛОВ 12 поступает на клемму (Кл. 5) ГСВЧ 1, где изменяет величину  $E_{A2}$ , меняя тем самым длину волны генератора  $\lambda_r$ , что приводит к отклонению максимума ДН главного лепестка  $\theta_{гл}$  на величину  $\Delta\theta_{\pm}$ .

Предложенная система поиска величины угла ДН  $\theta_{гл} \pm \Delta\theta_{\pm}$  и, соответственно, связанной с ней величины угла Брюстера  $\theta_{бр}$  позволяет, меняя  $\lambda_r$  в кольцевой переменnofазной многощелевой излучающей апертуре, с помощью системы поиска минимума  $P_{отр}$  11 (рис. 5.6), по сигналу СВЧ-термисторного ваттметра 10 через ОС на ГУН, найти  $\lambda_r$  как меру действительной части диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и, соответственно, определить величину поверхностной влажности  $W_n$  материала.

Далее при найденном угле Брюстера, обеспечив максимум попадания энергии падающей волны в материал, т.е. максимум мощности  $P_{пр}$ , МП 16 стабилизирует мощность преломленной волны, приводя этот уровень к номиналу по цепи обратной связи путем изменения мощности падающей волны. С помощью блока термопар 17 измеряют температуру  $T_1$  внутри объема антенны на поверхности материала и переводят генератор СВЧ в режим генерирования радиоимпульсов постоянной длительности  $\tau_{и}$ , амплитуды  $A_m$  и частоты повторения  $F_T$  посредством генератора видеоимпульсов (ВИ) 5 и диодного импульсного модулятора 4, управляемых микропроцессором. Одновременно включают счетчик ВИ 13, сопряженный с цифровым волномером 14 и производят отсчет числа видеоимпульсов. По достижении заданной температуры  $T_2$  фиксируют число  $N$  генерируемых видеоимпульсов и определяют в 16 величину влажности  $W$  в объеме материала из соотношения

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = K_N W, \quad (5.5)$$

где  $K_N$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа видеоимпульсов.





**Рис. 5.9. Приемно-передающая апертура с клистронным СВЧ ГУН и устройством снятия ДН и измерения поля рассеяния**

По измеренным величинам влажности поверхностного слоя  $W_p$  и влажности  $W$  в объеме материала рассчитывают эквивалентную глубину проникновения  $l_0$  и определяют средний градиент изменения влажности по нормали к поверхности внутри материала по (5.4).

Модифицированный измерительный комплекс (рис. 5.6) и апертурная система (рис. 5.7) имеют особенности, отличающие их от базового комплекса (рис. 5.2) с апертурой (рис. 5.1).

1. Апертура (рис. 5.7) позволяет генерировать в импульсном режиме с большими КБВ и КПД в излучатель от ГСВЧ через круглый волновод.

2. Наличие внутренней полости обеспечивает режим интерференции  $P_{\text{пад}}$  и  $P_{\text{отр}}$ , т.е. режим смешанных волн (СмВ), близкий к СВ, своего рода эквивалент ОР с потерями  $P_{\text{пр}}$ . Таким образом, увеличивается точность измерения  $P_{\text{отр.min}}$  и уменьшается погрешность отработки АПЧ.

3. Паразитное излучение практически отсутствует при существенном упрощении измерительной схемы.

4. Апертурная система сложнее в изготовлении по сравнению с комплексной приемопередающей апертурной системой (рис. 5.1).

### **5.3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ВЛАЖНОСТИ**

#### **Методика гравиметрического определения $W$ материала с неизвестной влажностью.**

1. Образец материала с определенной на измерительном комплексе (рис. 5.8) влажностью взвешивается и определяется его масса  $m_1$ .

2. Помещают образец материала для сушки в СВЧ-многомодовый ОР на время  $t_1$ .

3. Образец взвешивается и определяется его масса  $m_2$ .
4. Определяют  $\Delta m_1 = m_1 - m_2$ .
5. Повторно образец материала помещают в СВЧ-многомодовый ОР на время  $t_2$  и определяется  $m_3$ .
6. Определяют  $\Delta m_2 = m_2 - m_3$ .
7. Повторяют циклы 2 – 6 до тех пор, пока не достигнут  $m_i - m_{i+1} \approx 0$ , т.е.  $\Delta m \approx 0$  с необходимой точностью, материал высушен до  $W \approx 0$ .
8. Помещают образец в воду и определяют  $V_M$  по объему вытесненной воды.
9. Рассчитывают  $W = \frac{m_1 - m_{i+1}}{\rho_B V_M}$ .

Весь процесс по п. 2 – 6 занимает около трех часов до достижения величины  $\Delta m_B \approx 0$ . В каждом цикле ( $\Delta t_{\text{ц}} \approx 15$  мин) мощность  $P_{\text{СВЧ}}$  уменьшалась на 50 % при  $P_{\text{нач}} \approx 600$  Вт.

#### Методика реализации заданной величины объемной влажности образца $W$ .

1. Подготавливают образец с линейными размерами больше поверхности раскрытия апертуры, толщиной 0,04 м, определяют его объем  $V_C$ .

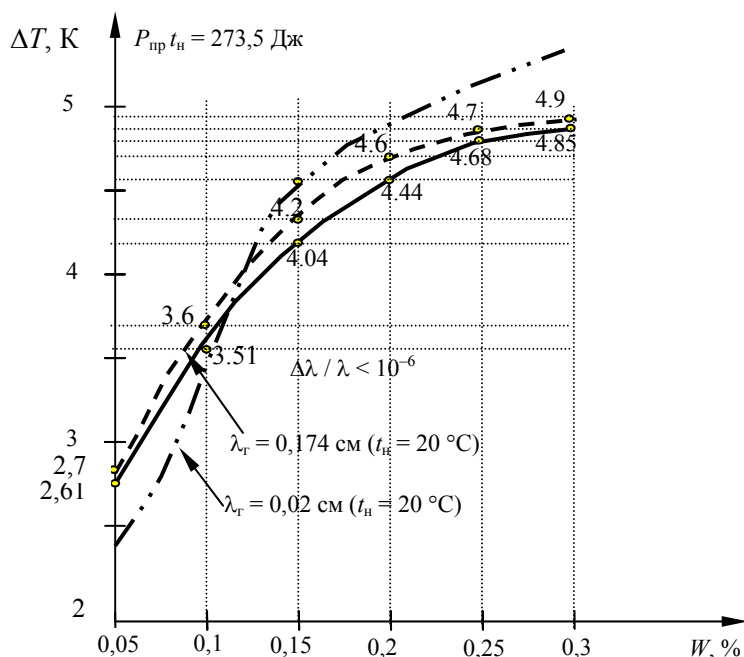
2. Увлажняют материал с определением объема влаги  $V_{B,i}$  так, чтобы были реализованы значения  $W_i = 0,05; 0,1; \dots; 0,3$ , где  $W_i = V_{B,i} / V_C$ .

3. Для достижения равномерности распределения влаги по объему  $V_C$  (для интенсификации внутреннего теплопереноса, без испарения влаги) образец с  $W_i$  подвергается СВЧ-нагреву в течение 5 мин до увеличения его температуры на 2...3 °С, последовательно не менее трех раз, с контролем постоянства его массы.

Точность реализации  $W$  не хуже 0,1 %  $V_C$  (абсолютная погрешность реализации  $W$ ).

В качестве примера на рис. 5.10 показаны расчетные и экспериментальные термовлагодатграммы.

Экспериментальная термовлагодатграмма для гипсолитовой плиты снята комплектом параллельно соединенных термопар (см. рис. 5.11). Измерение термоЭДС проводилось с помощью вольтметра с высоким входным сопротивлением, градуировочная таблица зависимости термоЭДС от температуры горячего спая (при  $t_{\text{х.сп}} \cong 20^\circ$ ) взята для ТП типа ХК из [98].



**Рис. 5.10. Зависимости  $\Delta T$  от  $W$  (термовлагодатграмма):**

- — — — — расчетная термовлагодатграмма (кирпич красный, см. рис. 4.20);
- - - - - экспериментальная термовлагодатграмма (одиночная термопара по центру зоны нагрева);
- · · - экспериментальная термовлагодатграмма (гипсолитовая плита)

Стабилизированная мощность  $P_{\text{пад}} = 47,5$  Вт (точность измерения поглощаемой мощности  $P_{\text{пр}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}$  термисторными измерителями марки Я2М-64  $\Delta P = 0,5$  мВт).

Таймером (электроконтактный программируемый) устанавливается  $t_{\text{н}} = 5$  с ( $\Delta t = 0,01$  с), т.е. величина  $P_{\text{пр}} t_{\text{н}} = 273,5 \approx 240$  Вт · с (Дж).

Уменьшение чувствительности в зоне больших влажностей  $W$  (рис. 5.10) объясняется увеличением величины  $\varepsilon''$  и соответственно  $|\dot{\varepsilon}|$ , при этом уменьшается величина  $l_{\text{эф}} (V_{\text{эф}})$ , что приводит к уменьшению количества тепла  $Q$ , так как затухание волны в материале прямо пропорционально  $l_{\text{эф}} [1]$ :

$$A, \text{ дБ} = 19,36 \frac{l_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{г}}} \sqrt{\varepsilon'(W) (\sqrt{\text{tg}^2 \delta + 1} - 1)},$$

или по [97]

$$A = kWR(W) = kW\rho(W)l_{\text{эф}}(W),$$

где  $R(W)$  – массовая толщина слоя материала.

К этому же выводу приводит [4] анализ выражения мощности поглощаемой  $1 \text{ м}^3$  за  $1$  с энергии активных поляризационных потерь:

$$P_{\text{пр}} = \frac{\omega}{2} \varepsilon \varepsilon''(W) \left( \frac{E}{\varepsilon'(W_{\text{п}})} \right)^2,$$

т.е. величина  $P_{\text{пр}}$  уменьшается с ростом  $\varepsilon'(W)$  быстрее, чем с ростом  $\varepsilon''(W)$ .

## 5.4. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

### 1. Погрешность определения $W_{\text{п}}$ по $\lambda_{\text{г}}$ по модели угла Брюстера, ее составляющие.

а) Погрешность из-за неоднородности материала (электрофизическая неоднородность), шероховатости (малая геометрическая неоднородность с характерным размером значительно меньше  $\lambda_{\text{г}}$ ), неплоскостности (геометрическая неоднородность с характерным размером примерно  $\lambda_{\text{г}}$ ) – источник дифракционной погрешности метода из-за незеркального рассеянного отражения.

Экспериментальное исследование неоднородностей поверхности, проведено по методике, описанной нами в [5] на экспериментальной установке (см. рис. 5.9) на образцах красного отделочного кирпича. В пределах погрешности метода при заданном минимальном пороговом значении неоднородности примерно  $10^{-3}$  м, поверхность можно считать при  $\lambda_{\text{г}} \geq 1,7 \cdot 10^{-2}$  м «зеркальной».

б) Погрешность из-за ширины углового спектра («1/2 ДН» на поверхности) не совпадающего с «зеркальным» значением угла Брюстера для плоской волны (см. текущую «карандашную» ДН), из-за конечной величины  $\Delta\theta_{0,5}$  и двухлучевого векторного суммирования.

Эта погрешность из-за работы АПЧ не на поиск точного минимума  $P_{\text{отр}}$  (см. рис. 4.9 и 4.10, работа в зоне \*), а на поиск «интегрального» минимума  $P_{\text{отр}}$ , уменьшает точность поискового значения  $P_{\text{отр min}}$ . Экспериментальная проверка позволяет оценить эту погрешность не более 0,5 % от верхней границы измерения влажности  $W_{\text{п}}$ .

В модель можно ввести значение интегрально-среднего угла «полного» преломления, рассчитываемого по «1/2 ДН» апертуры на поверхности, т.е. модель следует уточнить именно в этом аспекте.

в) Погрешности расчетной модели  $W_{\text{п}} = \Phi(\lambda_{\text{г}}, \text{точность АПЧ-поиска } P_{\text{отр min}}; \varepsilon'_{\text{см}}(\lambda_{\text{г}}, t, W_{\text{п}}, \varepsilon'_1, \varepsilon'_2))$  – модель определения влажности материала по углу Брюстера.

Источником погрешности расчетной модели, кроме указанных выше, является неточность модели смещения. Ее экспериментальная оценка дает величину (для модели Лихтенекера) не более 6 % от  $W_{п\max}$ . Заметим, что погрешностью реализации  $\Delta\theta(\lambda_r)$  по сравнению с основной погрешностью можно пренебречь (в пределах доступной точности определения угла Брюстера она пренебрежимо мала).

Общую погрешность определения  $W_{п}$  по  $\lambda_r$  (с учетом погрешности измерения  $\Delta t \leq 0,1$  °С) с учетом погрешности эталонной реализации образцов с известной  $W_{п}$  (гравиметрический метод) с доверительной вероятностью 95 % оцениваем менее 8 % (среднеквадратическая приведенная погрешность) от  $W_{п\text{ср}}$  по измеряемому диапазону.

## 2. Погрешность метода непосредственно термовлагометрии (погрешность расчета $W$ по объему взаимодействия).

Инструментальные погрешности:

- а) погрешность АПЧ по  $P_{\text{отр min}}$ , в нее входит погрешность от нестабильности реализации  $\lambda_r$  (установки дискретного по коду  $U_y$ );
- б) погрешность  $\Delta t$  (°С) при измерении  $\Delta T$ ;
- в) погрешность реализации и стабилизации  $P_{\text{пр}}$  по  $P_r$ , т.е. погрешность установки дискретной по коду величины  $E_{A2}$ ;
- г) погрешность установки  $t_n$ .

Модельные погрешности:

- а) погрешности моделей  $C_{\text{см}}$  и  $P_{\text{см}}$ ;
- б) погрешности определения  $V_{\text{вз}}$  из-за тепломассопереноса.

Общая инструментальная методическая погрешность менее 5 % от  $W_{\text{ср}}$ .

Абсолютная погрешность (максимальная):

$\Delta W \leq 1,5$  % (абсолютных) объемной влажности по зоне взаимодействия;

$\Delta W_{п} \leq 2,5$  % (абсолютных) объемной влажности по поверхности.

Погрешность определения величины нормального grad  $W$ : знак градиента – точно. Величина градиента не нормируется, так как нет эталонного способа. Наша оценка точности – порядка 20 % от максимального, полученного экспериментально, по методике реализации положительного grad  $W$  – увлажнение, отрицательного – СВЧ-высушивание.

## 5.5. ТЕРМОПРИЕМНИКИ [98]

Распределение термопар (ТП) по оси  $OZ$ : расстояние между ними растет прямо пропорционально виду диаграммы направленности ДН эффективной апертуры, т.е. чем больше напряженность поля, тем больше расстояние между ТП. Так как ДН в азимутальном направлении по углу  $\varphi$  неоднородна, число максимумов ДН и угол между ними  $\varphi$  зависят от числа и расположения отрезков щелевых волноводов по азимуту. Заметим, что равномерность ДН по азимуту практически не существенна (рис. 5.11).

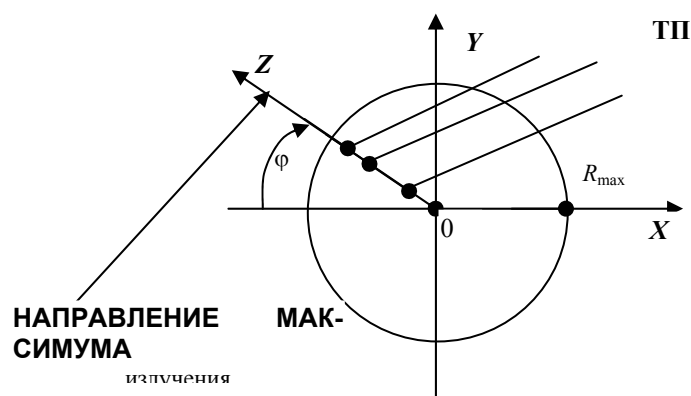


Рис. 5.11. Конструкция батареи термопар (ТП)

## 5.6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ МИКРОВОЛНОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Работа с микроволновым измерительным комплексом должна соответствовать санитарным нормам при работе с источниками электромагнитных излучений СВЧ-диапазона [99], согласно которым допустимое время облучения  $T_p = 6800 / x^2$ , где  $T_p$  – допустимый период облучения (мин) в течение любого часа;  $x$  – плотность потока мощности на рабочем месте, но не более  $100 \text{ мВт/см}^2$ .

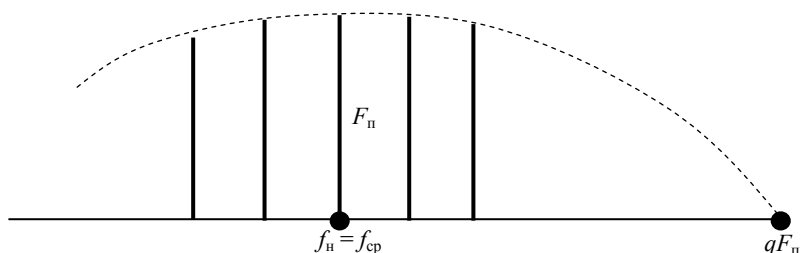
Так, например, Американский национальный институт стандартов предлагает основываться при нормировании облучений на величине  $1 \text{ мВт/см}^2 \cdot \text{ч}$ . В процессе исследований практическая доза за время экспериментальной работы, не превышающей трех часов, была на два порядка меньше.

### ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработаны основы микроволновой термовлагометрии, позволяющие с помощью частотно управляемой специально организованной апертуры определять поверхностную влажность  $W_n$  по длине волны генератора  $\lambda_r$  при условии реализации интегральной диаграммы направленности (диаграммы Брюстера) по минимуму отраженной мощности  $P_{отр}$ . Вторая часть разработанного метода предполагает измерение интегральной влажности  $W$  по объему взаимодействия и градиента ее распределения  $\text{grad } W$  по изменению температуры  $t$  локализованного объема взаимодействия.

Разработанные нами термовлагометрический микроволновый метод и реализующие его устройства позволяют решить новый комплекс следующих задач.

- 1) Определение концентрации льда во влажных материалах, так как  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  свободной воды и льда весьма отличны. Возможный алгоритм:
  - а) определение концентрации воды в виде льда без микроволнового СВЧ-нагрева с фиксацией температуры;
  - б) фиксация количества энергии импульсного СВЧ-нагрева до температуры таяния;
  - в) определение количества тепла на фазовый переход как мера влажности. Исследованию индирования момента окончания фазового перехода посвящена наша работа [100].
- 2) Исследование режимов нагрева СВЧ-радиоимпульсами с большой скважностью  $q$ : активная ширина спектра  $\Delta f_{сп} = 2qF_n = 2 / \tau_n$ .



### Амплитудный спектр радиоимпульса

Разрешение вопросов оптимального соотношения  $\Delta f_{сп}$  и полосы пропускания волновода  $\Delta f_{вв}$ , если  $\Delta f_{вв} < \Delta f_{сп}$  может выделить  $n$  гармоник с практически постоянной амплитудой. Их числом можно управлять, меняя скважность импульсов  $q(\tau_n)$ . Это реализация многочастотного метода с анализом формы и спектрального состава отраженного импульса и их изменения относительно падающего импульса, т.е.

решение многопараметрической задачи определения комплекса электротеплофизических характеристик.

3) Исследование термограмм в импульсном режиме ( $\tau_{и} = \text{const}$ ,  $P_{\text{изл}} = \text{const}$ ):  $t = f(\tau)$ , т.е. решение теплофизических задач с мгновенным импульсным внутренним источником тепла (безынерционный нагрев при большом  $\tau_{и}$ ). Исследование полей распределения температур  $t = \Phi(r, \varphi)$ .

4) Использование разработанных методов и устройств для исследования тепломассопереноса – кинетики сушки, влагопоглощения и т.д.

5) При больших влажностях  $W > 30\%$ , когда микроволновые термовлагометрические методы мало чувствительны и есть возможность поместить материал на металлическую поверхность, измерения можно производить методом поверхностных волн (при невыполнении условия  $h > 5\Delta$ , т.е.  $b \approx \lambda_{\tau}$ ), адаптируя результаты нашей работы [5] для измерения влажности.

С целью упрощения измерительного комплекса, включающего в себя мощный генератор на ЛОВ «О», и для реализации возможности нестационарных измерений влажности строительных материалов предлагается модификация алгоритма определения интегральной влажности  $W$  по объему взаимодействия и ее градиента  $\text{grad } W$  при элиминировании нагрева материала полем СВЧ-бегущей волны. Предлагаемый алгоритм и аппаратура для его реализации являются развитием разработанного нами метод [5] определения комплексной диэлектрической проницаемости и толщины диэлектрических пластин. Особенностью предлагаемого метода [101] является то, что после измерения величины  $W_{п}$  и стабилизации мощности падающей волны  $P_{\text{пад}} = \text{const}$  определяют мощность преломленной волны как  $P_{\text{пр}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр min}} = P_{\text{пад}} - a$ , где  $a$  – измеренное значение.

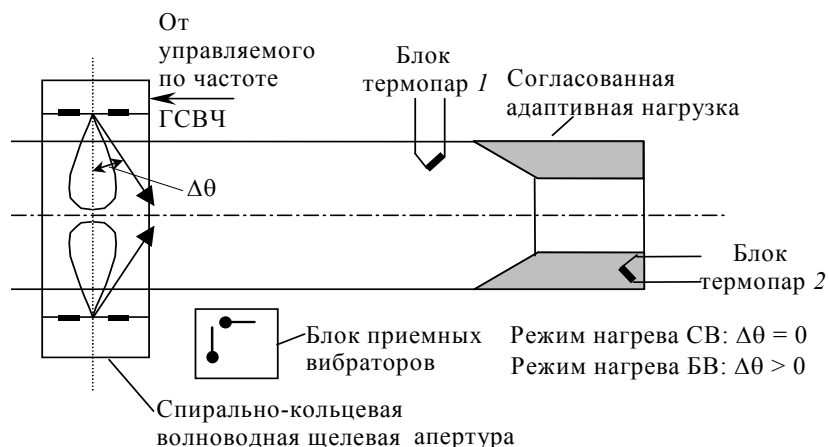
Так как в первом приближении мощность преломленной волны пропорциональна мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости магнитодиэлектрического слоя, являющейся функцией интегральной влажности  $P_{\text{пр}} \equiv \varepsilon''_{\text{см}}(W) = W\varepsilon''$ , находят величину интегральной влажности  $W$  по объему взаимодействия с учетом известного выражения

$$P_{\text{пр}} = \frac{\omega}{2} \varepsilon_0 \varepsilon''_{\text{см}}(W) \left[ \frac{E}{\varepsilon'(W_{п})} \right]^2.$$

Основными технологическими недостатками измерителей  $W$  [103] на диэлектрических волноводах являются: трудность сопряжения возбуждения поверхностной волны (с приемлемым согласованием и минимумом быстрых волн) и вводом материальных потоков в диэлектрический волновод (нельзя сопрягать возбудитель и ввод жидкости), невозможность байпасного ввода. Применение специальных волноводных щелевых антенн не только разрешает вышеуказанные трудности, но и позволяет осуществлять измерения влажности в потоке жидкой среды в диэлектрическом волноводе [102]. Ниже показано простейшее устройство с разнесенным вводом материальных потоков и микроволновой энергии СВЧ, поглощаемой жидкой средой, реализующее принципы микроволновой термовлагометрии в волноводных измерителях.

В отличие от многомодового резонатора, где равномерность нагрева СВЧ-полем обеспечивается сменным многомодовым режимом многочастотных мод в полосе управляемой девиации частоты за заданный отрезок времени, в рассматриваемом устройстве эффект равномерности нагрева обеспечивается управляемым пространственным частотным сканированием положения ДН по заданному пространственно-временному алгоритму вплоть до пространственного сопровождения зоны нагрева со скоростью ламинарного течения нагреваемой жидкости, протекающей в диэлектрическом трубопроводе.





**Рис. 2. Измеритель электрофизических и теплофизических параметров жидкостей**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берлинер М.А.** Измерение влажности в диапазоне СВЧ. М.: Энергия, 1973.
- Неразрушающий контроль и диагностика:** Справочник / В.В. Клюев, Ф.В. Соснин, В.Н. Филинов и др. / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 408 с.
- Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий:** Справочник. Т. 1, 2 / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1976.
- Кричевский Е.С.** Контроль влажных твердых и сыпучих материалов / Е.С. Кричевский, А.Г. Волченко, С.С. Галушкин; Под ред. Е.С. Кричевского. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
- Дмитриев Д.А., Федоров Н.П., Федюнин П.А., Русин В.А.** Поверхностные волны и микроволновые устройства контроля электрофизических параметров магнетодиэлектрических покрытий на металле / Под ред. Н.П. Федорова. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. 196 с.
- Бензарь В.К.** Техника СВЧ-влажнометрии. Минск: Высшая школа, 1974.
- Исматуллаев П.Р., Юсупбеков Н.Р., Гринвальд А.Б.** Метод повышения чувствительности измерения влажности на сверхвысокой частоте // Измерительная техника. 1983. № 5. С. 69 – 71.
- Исматуллаев П.Р., Гринвальд А.Б.** Теоретические и экспериментальные исследования сверхвысокочастотного метода измерения влажности материалов. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1982. 84 с.
- Берлинер М.А., Полищук С.А.** Характеристики фазовых влагомеров СВЧ // Приборы и системы управления. 1971. № 12. С. 26 – 28.
- Берлинер М.А., Полищук С.А.** Фазовый сверхвысокочастотный влагомер // Заводская лаборатория. 1971. № 10. С. 1265 – 1267.
- Kroszevski A., Kulinski S.** An improved microwave method of moisture measurement and control // IEEE Trans. Electron. and Control. Instrum. 1976. Vol. 23, № 4 / P/364-370 / Пер. в кн. Экспресс-информация. Сер. Контрольно-измерительная техника. М.: ВНИИТИ, 1977. № 10.
- Крошевски А., Кулински С., Хенцински К.** Измерение влажности фосфата аммония методом СВЧ // Приборы и системы управления. 1974. № 10. С. 25 – 26.
- Берлинер М.А.** Влагомеры СВЧ // Приборы и системы управления. 1970. № 11. С. 19 – 22.
- Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов /** Под ред. Е.С. Кричевского. М.: Недра, 1972.
- Исследование зависимости ослабления СВЧ-излучения от влажности аммофоса и нитроаммофоски /** Б.И. Смотрицкая, Ю.Г. Фадеев, Ф.И. Гисина и др. // Метрология. 1976. № 7. С. 56 – 59.

Де Лоор Г.П. Диэлектрические свойства гетерогенных влагосодержащих смесей // Приборы и системы управления. 1974. № 9. С. 19 – 22.

Калашников В.С., Михайлов В.Ф. Метод и аппаратура для измерения комплексного коэффициента передачи стенки антенного обтекателя. Проблемы транспорта / Под ред. Г.В. Анцева; Международная академия транспорта. СПб.: Агентство «РДК-принт», 2000. Вып. 3. 376 с.

Desraisses R. Controle de serie des radomes // Revue Technique Thomson – CSF. 1971. Vol. 3. № 4.

Воробьев Е.А., Калашников В.С., Негурей А.В. Измеритель радиотехнического качества диэлектрических изделий и материалов на СВЧ // Дефектоскопия. Российская академия наук. 1993. № 9.

Калашников В.С., Негурей А.В. Возможности метода модулированного отражения при технологическом контроле диэлектрических изделий и материалов // Вопросы радиоэлектроники. 1993. Вып. 1.

Портативный радиочастотный измеритель затухания ПРИЗ-1. Паспорт ОП-03-38/89 / Н.В. Любецкий. Минск: Институт прикладной физика АН БССР, 1989.

Смоляк В.А. Опыт нейтронной влагометрии и черной металлургии. М.: Атомиздат, 1974.

Спиридонов В.И., Демьянов А.А. Повышение чувствительности СВЧ-датчиков влажности с помощью резонатора бегущей волны // Заводская лаборатория. 1978. № 8. С. 983 – 984.

Спиридонов В.И. Разработка и исследование резонаторных влагомеров СВЧ для диапазона малых влагосодержаний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 1979.

Берлинер М.А., Демьянов А.А. Новые разработки в области СВЧ-измерений влажности материалов // Приборы и системы управления. 1974. № 9. С. 22 – 25.

Берлинер М.А., Демьянов А.А. К использованию сверхвысокочувствительных влагомеров с зондами-излучателями и зондами-приемниками // Заводская лаборатория. 1975. № 3. С. 310 – 313.

Хромов Ю.П., Рулев В.Ф. Применение СВЧ-техники для измерения влажности (обзор) // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. 1969. № 4. С. 131 – 144.

Костырко К., Лапински М., Влодарски В.С. Средства измерения влажности, разработанные и выпускаемые в ПНР // Приборы и системы управления. 1970. № 1. С. 16 – 19.

Помошников В.С., Архипова К.С. Автоматический СВЧ-влагомер ВХС-2 // Приборы и системы управления. 1982. № 8. С. 25 – 26.

Берлинер М.А., Спиридонов В.И. Унифицированный влагомер СВЧ // Измерительная техника. 1980. № 3. С. 60 – 63.

Браго Е.Н., Демьянов А.А. Использование сверхвысоких частот для измерения содержания компонентов в водонефтяных и газожидкостных потоках. М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1989.

Беляков В.Л. Автоматический контроль параметров нефтяных эмульсий. М.: Недра, 1992.

Суслин М.А., Тегушкин М.А., Чернышев В.Н., Дмитриев Д.А. Микроволновой термовлагометрический метод контроля органических соединений // Вестник ТГТУ. 2004. Т. 10, № 2. С. 428 – 434.

Пюшнер Г. Нагрев энергией СВЧ. М.: Энергия, 1968. 310 с.

Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963.

Stuchly S. Dielectric properties of some granular solids containing water // J-I Microwave Power. 1970. № 2.

Берлинер М.А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.: Энергия, 1965. 354 с.

Матис И.Г. Емкостные преобразователи для неразрушающего контроля. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1982.

Парсел Э. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1975.

Берлинер М.А. и др. Применение диаграммы Коул–Коул во влагометрии СВЧ // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 1973. Т. 16, № 4. С. 101 – 106.

Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах: В 2 кн. Пер с англ. М.: Мир, 1984. 824 с.

Grant E.H. et al. Dielectric behavior of water at microwave frequencies // J-I. Chem. Phys. 1957. № 1.

Хиппель А.Р. Диэлектрики и их применение. М.: Госэнергоиздат, 1953.

- Казанский М.Ф.** Анализ форм связи и состояние влаги, поглощенной дисперсным телом, с помощью кинетических кривых сушки // ДАН СССР. 1960. № 5.
- Parkhomenko E.I.** Electrical Properties of Rocks. New York: Plenum Press, 1967.
- Богородицкий М.П.** Теория диэлектриков. М.: Госэнергоиздат, 1965. 268 с.
- Хиппель А.Р.** Диэлектрики и волны. М.: Наука, 1960. 360 с.
- Тареев Б.М.** Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1982. 320 с.
- Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я. и др.** Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. М.: Госэнергоиздат, 1959. 468 с.
- Бугров А.В.** Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. М.: Машиностроение, 1982. 94 с.
- Клугман Ю.И., Ковылов Н.Б.** Диэлькометрические нефтяные влагомеры (обзор). М.: ВНИИОЭНГ, 1969.
- Palmer L.S.** On the dielectric constant of the water in wet clay. Proc. Phys. Soc, 1952.
- Эме Ф.** Диэлектрические измерения. М.: Химия, 1967.
- Берлинер М.А., Иванов В.А.** Характеристики влагомеров СВЧ // Приборы и системы управления. 1967. № 3.
- Дерягин Б.В. и др.** Вода в дисперсных системах. М.: Химия, 1989. 288 с.
- Франчук А.У.** Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: НИИ строительной физики Госстроя СССР, 1969. 137 с.
- Тетушкин В.А.** Определение границ применимости термовлагодетрического микроволнового метода по минимуму необходимой толщины строительных материалов // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой Междунар. теплофизической школы. Тамбов, 20 – 24 сентября 2004 г. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.
- Жук М.С., Молочков Ю.Б.** Проектирование антенно-фидерных устройств. М.: Энергия, 1966.
- Сканирующие антенны СВЧ:** Труды МАИ / Под ред. Л.Н. Дерюгина. Вып. 159. М.: Машиностроение, 1964.
- Сканирующие антенные системы СВЧ.** Т. I, II / Пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. М.: Сов. радио, 1966 и 1969.
- Shnitkin H.** Electronically scanned antennas. The Microwave Journ., 1960, Dec., № 12, p. 67 – 72; 1967, Jan. № 1, p. 57 – 64.
- Воскресенский Д.И., Грановская Р.А., Гостюхин В.Л. и др.** Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов: Учеб пособие / Под ред. проф. Д.Н. Воскресенского. М.: Советское радио, 1972. 320 с.
- Кюн Р.** Микроволновые антенны / Пер. с нем. под ред. М.П. Долуханова. М.: Судостроение, 1967.
- Айзенберг Г.З.** Антенны УКВ. М.: Связьиздат, 1957.
- Яцук Л.П., Смирнова Н.В.** Внутренние проводимости нерезонансных щелей в прямоугольном волноводе // Известия вузов. Радиотехника. 1967. Т. X, № 4.
- Резников Г.Б.** Антенны летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1967.
- Резников Г.Б.** Самолетные антенны. М.: Советское радио, 1962.
- Шубарин Ю.В.** Антенны сверхвысоких частот. Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1960.
- Драбкин А.А., Зузенко В.Л.** Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1961.
- Сканирующие антенные системы СВЧ.** Т. I / Пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. М.: Советское радио, 1966.
- Ширман Я.Д.** Радиоволноводы и объемные резонаторы. М.: Связьиздат, 1959.
- Пистолькорс А.А.** Общая теория дифракционных антенн // ЖТФ. 1944. Т. XIV, № 12; ЖТФ. 1946. Т. XVI, № 1.
- Пособие** по курсовому проектированию антенн. М.: Изд-во ВЗЭИС, 1967.
- Вешнякова И.Е., Евстропов Г.А.** Теория согласованных щелевых излучателей // Радиотехника и электроника. 1965. Т. X, № 7.

**Евстропов Г.А., Царапкин С.А.** Исследование волноводно-щелевых антенн с идентичными резонансными излучателями // Радиотехника и электроника. 1965. Т. X, № 9.

**Евстропов Г.А., Царапкин С.А.** Расчет волноводно-щелевых антенн с учетом взаимодействия излучателей по основной волне // Радиотехника и электроника. 1966. Т. XI, № 5.

**Драбкин А.Л. и др.** Антенно-фидерные устройства. М.: Радио и связь, 1974. 452 с.

**Чернушенко А.М., Майбородин А.В.** Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн. М.: Радио и связь, 1986. 336 с.

**Молочков Ю.Б.** Авиационные антенно-фидерные устройства. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1983. 287 с.

**Григорьев А.Д., Янкевич В.Б.** Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.

**Бабко В.Б., Константинов В.Е., Королев А.Ф., Крылов Д.А.** Влагометрия жидких углеводородов // Состояние и проблемы измерений: Материалы 7-й Всерос. науч.-техн. конф. М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000.

**Михеев К.Г., Мусяков Л.А., Яцевич Г.Б.** Прибор для измерения концентрации органических соединений на СВЧ // Средства контроля и регулирования: Сб. материалов Государственного института прикладной химии. М.: Химия, 1974.

**Мировицкий С.** Современное состояние и практика применения радиопоглощающих материалов (РПМ) // Зарубежная электроника. 1987. № 5. С. 5 – 12.

**Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П.** Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1979. 450 с.

Справочник по теплопроводности жидкости и газов / **Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий.** М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.

**Ривкин С.Л., Александров А.А.** Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.

**Франчук А.У.** Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: НИИ строительной физики Госстроя СССР, 1969. 137 с.

**Тетушкин В.А.** Апертурный термовлагометрический метод контроля строительных материалов // Труды ТГТУ: Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Вып. 16. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 200 с.

**Тетушкин В.А.** СВЧ-метод контроля влажности органических соединений // IX науч. конф. ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. С. 172 – 173.

**Дмитриев Д.А., Тетушкин В.А.** Измерение геометрических размеров и диэлектрической проницаемости покрытия по смещению максимума диаграммы направленности // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: Материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. Ч. II (27 – 28 апреля 2004 г.) / Тамбовский ВАИИ. Тамбов: ТВАИИ, 2004. С. 489 – 491.

**Федюнин П.А., Тетушкин В.А.** Термовлагометрический метод сканирования и обработки информативного СВЧ поля падающей и отраженной волн // Повышение эффективности средств обработки информации на базе математического моделирования: Материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. (27 – 28 апреля 2004 г.) / Тамбовский ВАИИ. Тамбов: ТВАИИ, 2004.

**Дмитриев Д.А., Федюнин П.А., Тетушкин В.А.** Основы микроволновой термовлагометрии // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой Междунар. теплофизической школы (20 – 24 сентября 2004 г.) / ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.

**Федюнин П.А., Федоров Н.П., Каберов С.Р., Дмитриев Д.А.** Контроль и сканирование волнового сопротивления магнитодиэлектрических защитных покрытий на металле // Контроль и диагностика. 2004. № 11. С. 18 – 27.

**Тетушкин В.А., Федюнин П.А., Дмитриев Д.А.** Приемно-излучающие измерительные апертуры микроволнового термовлагометрического метода // Наука на рубеже тысячелетий: Материалы конф. (29 – 30 октября 2004 г.) / ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.

**Положительное** решение по заявке № 2004108282 РФ, МКИ G 01 N 15/06. Неразрушающий СВЧ-способ контроля влажности твердых материалов и устройство для его контроля / В.А. Тетушкин, П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, В.Н. Чернышов. Заявл. 22.03.2004.

**Положительное** решение по заявке № 2004115898 РФ, МКИ G 01 N 15/06. СВЧ-способ измерения поверхностной влажности твердых материалов, влажности по объему взаимодействия, нормального к поверхности градиента влажности его реализации / В.А. Тетушкин,

П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев, В.Н. Чернышов. Заявл. 25.05.2004.

**Берлинер М.А., Иванов В.А.** Характеристики влагомеров сверхвысоких частот // Приборы и системы управления. 1967. № 3.

**Анатычук Л.** Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник. Киев: Наукова думка, 1979. 768 с.

**Золотухин А.Н.** Воздействие ЭМИ на биологические объекты и физические основы защиты от него // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 1. С. 91 – 112.

**Федоров Н.П., Дмитриев Д.А.** Микроволновой контроль фазовых переходов в радиопоглощающих материалах // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы Пятой Междунар. теплофизической школы (20 – 24 сентября 2004 г.) / ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.

**Федюнин П.А., Дмитриев Д.А., Дмитриев С.А.** Микроволновые способы определения поверхностной  $W_p$  влажности, интегральной влажности  $W$  по объему нагрева и ее градиента // Состояние и проблемы измерений: Тез. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. (23 – 25 ноября 2004 г.) / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

**Воробьев А.А., Федюнин П.А., Дмитриев Д.А.** Первичные измерительные преобразователи электро-теплофизических параметров жидких сред на регулярных линиях передачи поверхностных волн // Состояние и проблемы измерений: Тез. 9-й Всерос. науч.-техн. конф. (23 – 25 ноября 2004 г.) / МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

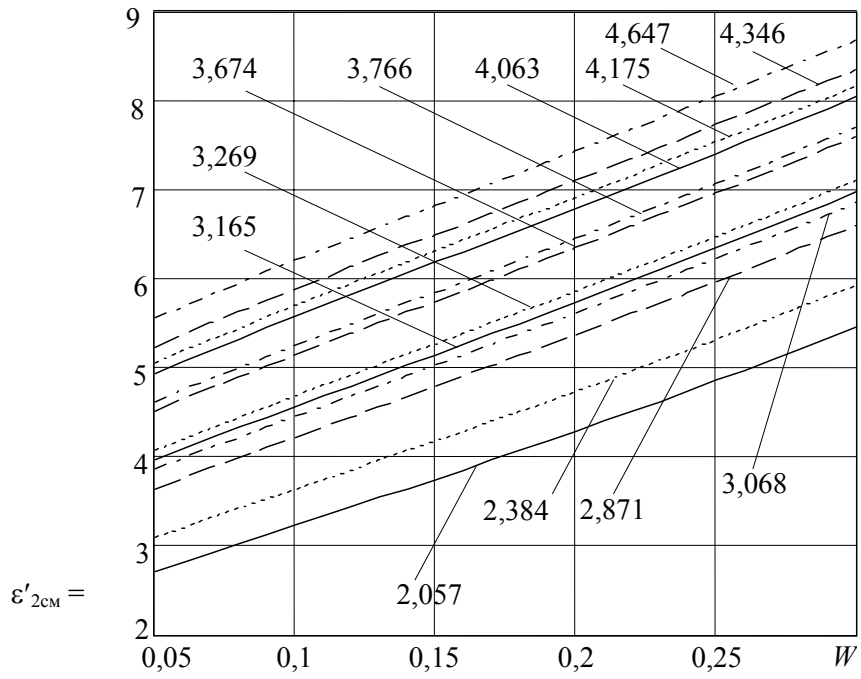
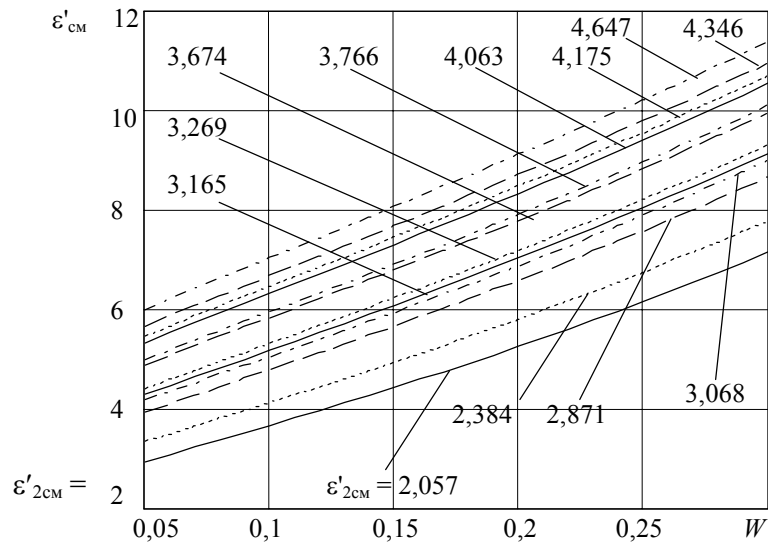
**Федюнин П.А., Воробьев А.А., Дмитриев Д.А.** Волноводы поверхностных волн как измерительные преобразователи электро- и теплофизических свойств. Классификация и определения понятия регулярности // Теплофизические измерения при контроле управления качеством: Материалы Пятой Междунар. теплофизической школы (20 – 24 сентября 2004 г.) / ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Ч. 1. 298 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

---

### Приложение 1

Значения  $\varepsilon'_{2cm}$  определяют номер материала (согласно табл. 2.2), влажностные характеристики которых показаны на рис. П1.1 – П1.5 при номинальной температуре  $t = 20$  °С и разных длинах волн.

$\varepsilon'_{\text{CM}}$ РИС. П1.1.  $\varepsilon'_{\text{CM}}(W)$  ПРИ  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  И  $\lambda_{\Gamma} = 1 \text{ CM}$  $\varepsilon'_{\text{CM}}$ РИС. П1.2.  $\lambda_{\Gamma} = 1,74 \text{ CM}$

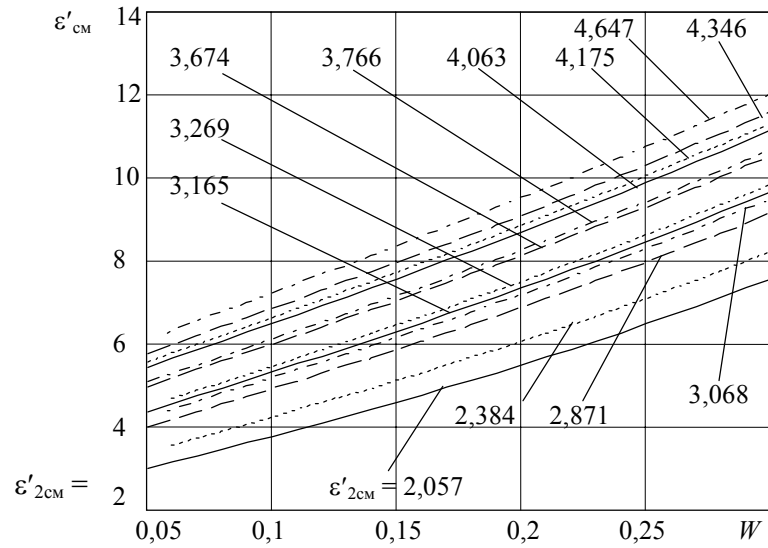
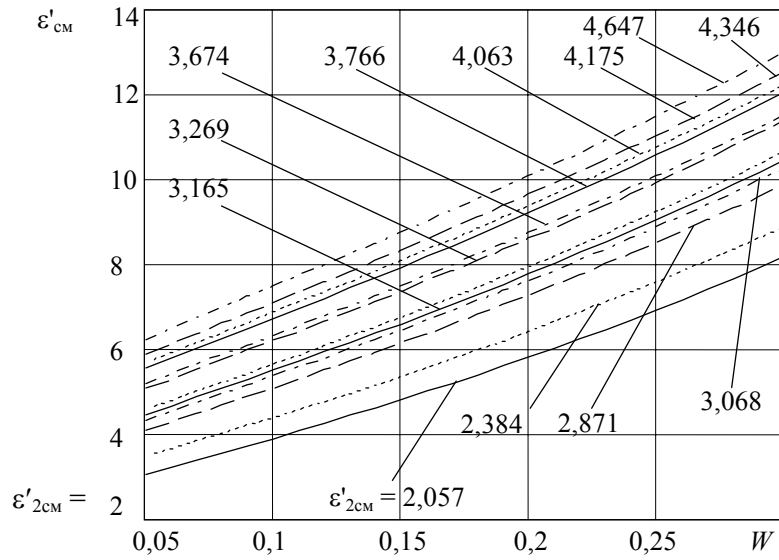
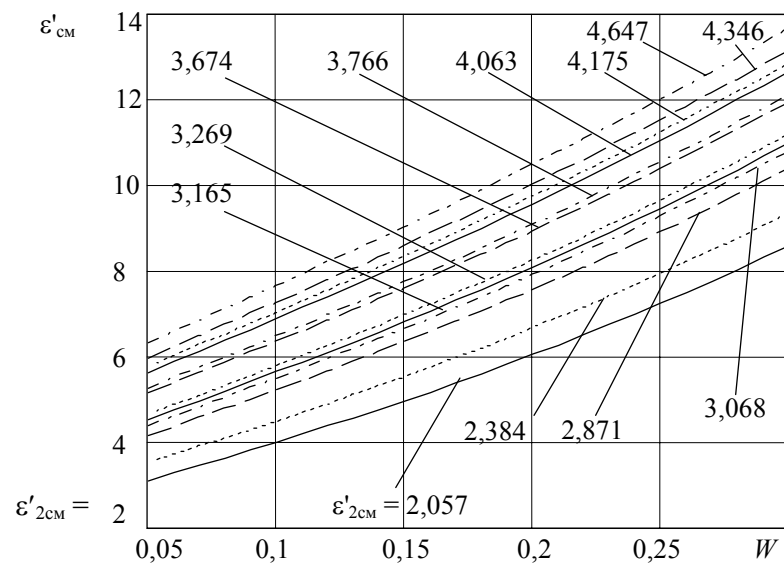
$\varepsilon'_{\text{CM}}$ РИС. П1.3.  $\lambda_{\Gamma} = 2$  CM $\varepsilon'_{\text{CM}}$ РИС. П1.4.  $\lambda_{\Gamma} = 2,5$  CM $\varepsilon'_{\text{CM}}$ 

РИС. П1.5.  $\lambda_{\Gamma} = 3 \text{ CM}$

НА РИС. П1.6 – П1.9 ПОКАЗАНЫ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  $\varepsilon'_{\text{CM}}(\lambda_{\Gamma})$  ПРИ  $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЛИЧИН  $W$ .

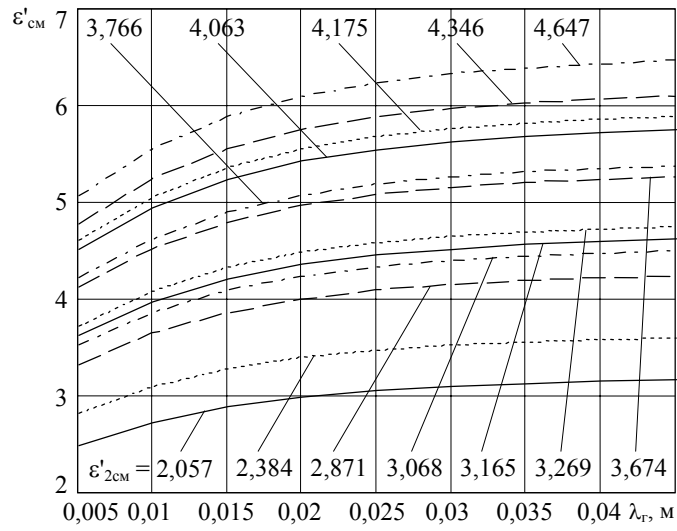


РИС. П1.6.  $W = 0,05$

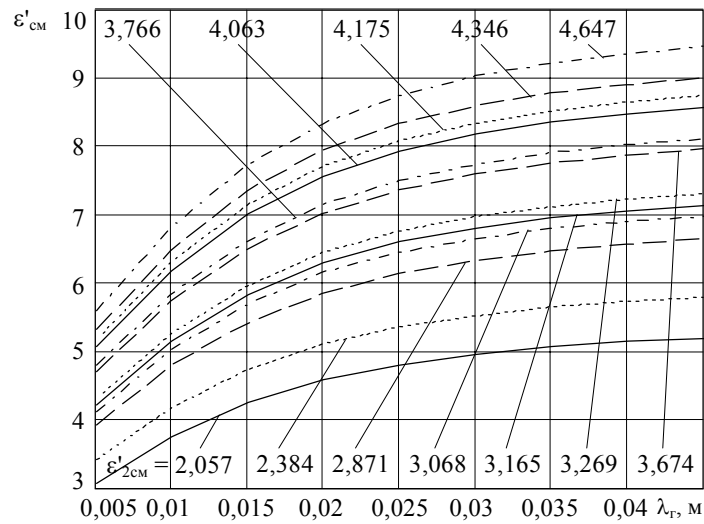
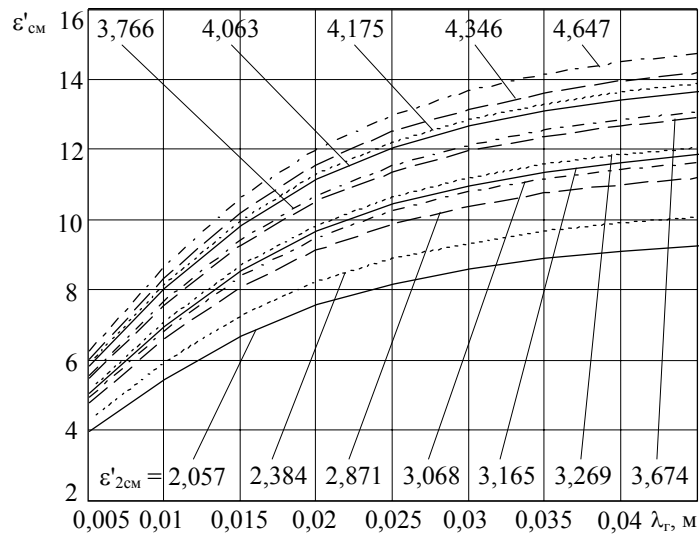
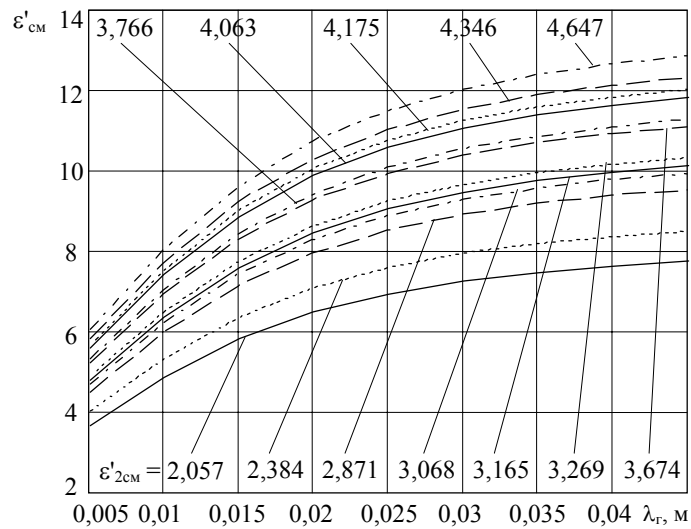


РИС. П1.7.  $W = 0,15$





**Рис. П1.8.  $W = 0,25$**



**Рис. П1.9.  $W = 0,3$**

Приложение 3

**Программа расчета информативной зависимости величины  $W_n$  от управляемой длины волны генератора (на примере материала: кирпич красный  $\varepsilon'_2 = 3,766$ )**

$$\lambda := 0,017; 0,0172 \dots 0,0192$$

$$t := 20$$

$$\varepsilon_1(\lambda, t) := 5 + \frac{(83,2 \cdot 1 - 0,3775t)}{\left[ 1 + \left( 1,21 \cdot 10^{-5} \frac{\exp\left(\frac{2175}{t+273}\right)}{\lambda} \right)^2 \right]}$$

$$A(\lambda, t) := 3,766 \left( \frac{\varepsilon_1(\lambda, t)}{3,766} \right)^{0,431}$$

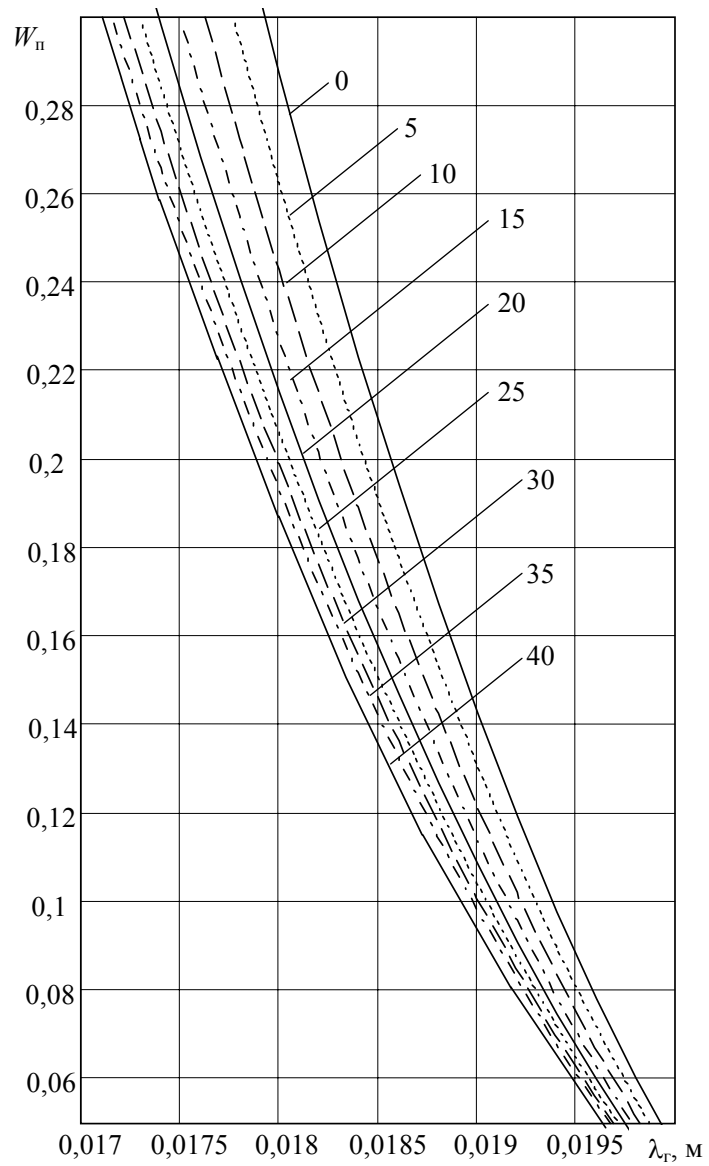
$$\theta_{\text{гп}}(\lambda, t) := a \operatorname{tg} \left( \sqrt{A(\lambda, t)} \right)$$

$$\theta(\lambda, t) := 1,266 + a \sin \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{0,032} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{\lambda}{0,0207} \right) \right\}$$

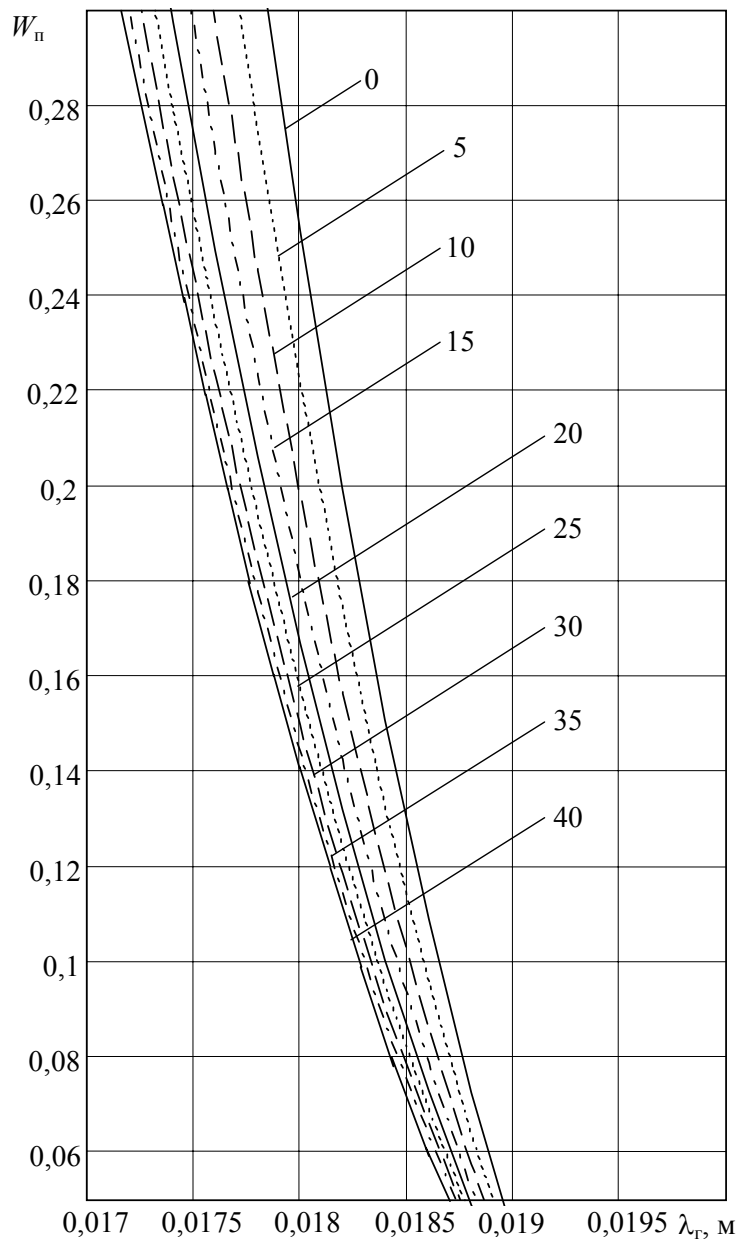
$$W_{\text{п}}(\lambda, t) := \left\{ \frac{\left[ \ln \left( \operatorname{tg} \left( \theta(\lambda, t) \right)^2 \right) - \ln(3,766) \right]}{\left[ \ln \left( \varepsilon_1(\lambda, t) \right) - \ln(3,766) \right]} \right\}^{1,428}$$

**Информативные зависимости  $W_{\text{п}}$  от длины волны генератора  $\lambda_{\text{г}}$  для асбеста и минераловатной плиты (табл. 2.2)**

АСБЕСТ



МИНЕРАЛОВАТНАЯ ПЛИТА



**ПЗ.1. Значения теплопроводности воды и водяного пара в состоянии насыщенности  $\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К) [85, с. 60]**

$t$ , °C	$\lambda'$	$\Delta\lambda'$	$\lambda''$	$\Delta\lambda''$	$C_p$ , кДж/кг·К* ( $P = 0,1$ мПа)
0	561	11	17,1	0,5	4,217
10	580	12	17,6	0,5	4,192
20	598	12	18,2	0,6	4,182
30	616	12	18,9	0,6	4,178
40	631	12	19,6	0,6	4,179

\* – по [86].

### ПЗ.2. По материалам [87]

Материал	Плотность $\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	Пористость $P$ , %
Бетон с гравием	2200	11
	2100	16
	2000	20
Гипс (гипсо- лит)	1300	51
	1200	55
	1100	59
	1000	63
	900	66
Кирпич крас- ный	2100	20
	2000	26
	1900	30
	1800	33
	1700	37

### ПЗ.3. Удельная теплоемкость сухих строительных материалов при $t = (+20 \dots -20) \text{ }^\circ\text{C}$ (1кКал = 4186 кДж) [87, с. 64]

<i>МАТЕРИАЛ</i>	$C_{уд}$ , кКал/град
Бетон	0,17
Гипс	0,18
Гипсовая плита	0,22
Дуб	0,26
Кирпич	0,17 – 0,18
Лед	0,505

