

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. В. Лисовский, И. А. Титовицкий

МИКРОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК

Минск
БГАТУ
2013

УДК 631.531.011.3:53

Лисовский, В. В. Микроволновой контроль влажности в технологических процессах АПК / В. В. Лисовский, И. А. Титовицкий. – Минск : БГАТУ, 2013. – 232 с. : ил. – ISBN 978-985-519-636-6.

Обобщены и системно изложены результаты многолетних исследований авторов и других исследователей по разработке электрофизических методов стимуляции растительных объектов. Приведены обзор и анализ современных технологий семеноводства и повышения урожайности сельскохозяйственных культур, определены проблемы сохранности и факторы снижения качества семян. Изложены теоретические основы электротехнологических методов обработки органических материалов и различных сред, рассмотрены физические процессы в электрических полях с заряженными частицами, действующие на них силы. Рассмотрены технологические свойства электромагнитного поля и их использование для стимуляции биологических процессов. Предложены эффективные электротехнологические методы повышения агрономических качеств семян и растений. Представлены результаты моделирования электрических полей и электрофизических процессов, аналитических и экспериментальных исследований предлагаемых технологий стимуляции семян и растений, сформулированы направления дальнейших исследований по углублению и развитию электрофизических методов в сельскохозяйственном производстве.

Рассчитана на специалистов семеноводства, растениеводства, инженерно-технических работников аграрно-промышленного комплекса, лесного сектора; преподавателей, студентов и аспирантов высших учебных заведений биологического и сельскохозяйственного профиля.

Табл. 24. Ил. 74. Библиогр.: 57 назв.

Рецензенты:

заведующая лабораторией прикладной биофизики и биохимии
ГНУ «Институт биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси»,
доктор биологических наук, доцент *Л. Ф. Кабашиникова*;
заведующий кафедрой «Технологии и техническое обеспечение
процессов переработки сельскохозяйственной продукции» БГАТУ,
доктор технических наук, профессор *В. Я. Груданов*

ISBN 978-985-519-636-6

© БГАТУ, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ВЛАЖНЫЕ ВЕЩЕСТВА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА	7
1.1. Оптимизация конструкторско-технологических решений при разработке влагометрических систем.....	10
1.2. Влияние влаги с различной энергией связи с твердым веществом на его диэлектрические свойства.....	15
1.3. Частотные характеристики воды и влажных веществ. Обоснование выбора частотного диапазона	18
1.4. Взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности капиллярно-пористых материалов в микроволновом диапазоне.....	24
1.4.1. Взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности мелкодисперсных материалов	35
1.5. Исследование диэлектрических свойств связанной воды в зерне в радио- и микроволновом диапазонах электромагнитного излучения.....	54
1.5.1. Теоретическая модель расчета диэлектрических свойств зернового материала как двухуровневой дисперсной системы	58
1.5.2. Диэлектрические свойства связанной воды в зерне	67
2. МЕТОДЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ВЛАГОМЕТРИИ	86
2.1. Оптические методы	86
2.1.1. Амплитудные методы и параметры преобразования.....	92
2.1.2. Фазовые методы и параметры преобразования.....	102
2.1.3. Отражательные методы и параметры преобразования.....	105
2.1.4. Многочастотные методы и параметры преобразования.....	108
2.2. Методы локализованного поля.....	111
2.2.1. Резонаторные методы и параметры преобразования.....	114
2.2.2. Резонаторные датчики измерения влажности зерновых материалов коаксиального типа	125
2.2.2.1. Расчет электромагнитного поля резонаторного датчика измерения влажности зерновых материалов ..	127
2.3. Комбинированные методы	155
2.3.1. Комбинированный СВЧ-акустический метод	167
2.4. Экспериментальная проверка основных параметров преобразования	177
2.4.1. Амплитудные параметры преобразования	177
2.4.2. Фазовые, отражательные, комплексные и комбинированные параметры преобразования	188

3. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ МИКРОВОЛНОВЫХ ВЛАГОМЕРОВ	204
3.1. Требования к конструкции первичных измерительных преобразователей	206
3.1.1. Оптимизация конструкции ПИП «на прохождение»	210
3.1.2. Оптимизация конструкции ПИП «на отражение»	216
3.1.3. Влияние засыпки сыпучих материалов на параметры ПИП	227
3.1.4. Исследование влияния геометрических размеров приемо-передающих устройств на метрологические характеристики ПИП.....	230
3.2. Разработка генераторных узлов	248
3.2.1. Результаты исследований резонатора 30×17,5×6	254
3.2.2. Разработка конструкции СВЧ-генератора	261
3.3. Сравнительный анализ промежуточных измерительных преобразователей	266
3.3.1. Измерительные преобразователи на основе Видеодетектирования	267
3.3.2. Измерительные преобразователи компенсационного типа	286
3.3.3. Автодинный измерительный преобразователь	288
3.3.4. Измерительный преобразователь на основе автодинного смесителя частоты.....	296
3.3.5. Сравнительный анализ метрологических характеристик промежуточных измерительных преобразователей.....	304
4. СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК	315
4.1. Влагомеры серии Микрорадар	316
4.1.1. Лабораторный СВЧ-влагомер «Микрорадар-101»	316
4.1.2. Влагомеры зерна поточные серии «Микрорадар-113» МР-113, МР-113М и МР-113-2	318
4.1.3. Резонаторные поточные СВЧ-влагомеры для свеклосахарного производства «Микрорадар-114с»	321
4.1.4. Резонаторный поточный СВЧ- влагомер сухого молока «Микрорадар-114м»	324
4.1.5. Лабораторный резонаторный влагомер сыпучих сельскохозяйственных продуктов «Микрорадар-101.2» (МР-101.2)	325
4.2. Влагомеры Аквар-систем	328

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения конкурентоспособности сельскохозяйственного сырья и продуктов переработки становится все более острой для отечественных товаропроизводителей.

Влажность является тем ключевым параметром, от достоверности контроля которого зависит решение задачи максимального снижения себестоимости переработки продукции при сохранении ее высокого качества.

Достижения научно-технического прогресса приводят к совершенствованию старых и созданию новых технологических процессов в производстве, хранении и переработке сельскохозяйственной продукции. Эффективность процессов АПК непосредственно связана с энерго- и ресурсосбережением при получении конечной продукции высокого качества.

Из большого числа параметров, влияющих на ход технологического процесса и качество получаемой продукции, которые подлежат обязательному контролю, – ключевым является влажность. Так, сокращение потерь при уборке, первичной переработке, хранении и транспортировке сельскохозяйственной продукции во многом зависит от точности определения ее влажности. Каждый процент систематической погрешности измерения влажности может привести к искажению статистических данных о произведенной продукции АПК. Например, при систематической погрешности определения влажности зерна только на 1 %, неопределенность в установлении действительного его количества, произведенного в республике, составит 90–100 тыс. т, или свыше 60–80 млрд белорусских рублей. Аналогичные примеры можно привести в отношении льна, сахара, сухого молока, травяной муки и других продуктов сельскохозяйственного производства [1–5].

От точности измерения влажности зависят:

- качество и сохранность зерна и зернопродуктов, сахара, соевого бобов, табака, минеральных удобрений и т. д.;
- режим полива полей и тепличного грунта;
- производительность зерноуборочной техники и зерносушилок;
- качество и выход высокосортной муки при помоле и др.

Эффективность грузоперевозок также зависит от влажности, так как перевозка зерновых влажностью на 1 % выше кондиционной

4.2.1. Многопараметрический микроволновой влагомер зерна в потоке «А-315».....	328
4.2.2. Микроволновой датчик влажности листовых материалов А 313 CAN.....	332
4.2.3. Микроволновые датчики концентрации «А-343», «А-344»	334
4.2.4. Инфракрасный влагомер сыпучих и листовых материалов А1108	337
4.3. Зарубежные микроволновые влагомеры	339
4.4. Микроволновые влагомеры в системах непрерывного контроля и регулирования влажности	352
4.4.1. Автоматический контроль и регулирование влажности в мукомольном производстве влагомерами «Микрорадар»	352
4.4.2. Результаты испытаний системы автоматического контроля и регулирования влажности в мукомольном производстве на основе влагомера «Микрорадар 113-2»....	360
4.5. Автоматизированная система контроля влажности и доувлажнения зерна на основе резонаторного датчика влагосодержания зерновых материалов	366
5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ	373
5.1. Методика градуировки «Микрорадар-101»	376
5.2. Методика поверки влагомера лабораторного «Микрорадар-101».....	378
5.3. Поверочные схемы влагомеров твердых веществ и материалов.....	384
5.4. Стандартные образцы для градуировки и поверки микроволновых влагомеров	385
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	388

приводит к тому, что фактически перевозится 50–60 тыс. т воды вместо зерна. Примерно такие же цифры мы получаем при перевозке минеральных удобрений, пищевых продуктов и т. д. В денежном выражении только при перевозке железнодорожным транспортом потери составляют свыше 2 млрд белорусских руб. ежегодно [5, 6].

Проведенный системный анализ повышения эффективности энерго- и ресурсосбережения при производстве, хранении, транспортировке и переработке сельскохозяйственной продукции на основе применения влагомеров показывает, что в большинстве технологических процессов точность измерения влажности ранее разработанными устройствами контроля (на основе емкостного метода) явно недостаточна [2–5]. Это является одной из причин отказа от применявшихся ранее серийно выпускаемых емкостных влагомеров. В настоящее время все более востребованными становятся микроволновые влагомеры серии «Микрорадар» и «Аквар систем» [5, 7].

В большинстве энергоемких технологических процессов при производстве, переработке и хранении сельскохозяйственной продукции требуется экспрессный и точный контроль влажности, что могут обеспечить сверхвысокочастотные методы и приборы на их основе. Это объясняется целым рядом преимуществ микроволнового диапазона и возможностью создания необходимого в сельскохозяйственном производстве типажа экспресс-влагомеров высокого класса точности.

В повышении точности экспресс-методов и приборов СВЧ-влагометрии важное место занимают:

- разработки и исследования математической модели влажного гетерогенного диэлектрика в поле СВЧ;
- выбор оптимального частотного диапазона и метода измерения с целью уменьшения влияния так называемых «неинформативных» мешающих факторов;
- разработка методов и устройств измерения влажности гетерогенных диэлектриков, инвариантных к влиянию плотности и температуры;
- разработки алгоритмов измерения влажности для основных типов СВЧ-преобразователей;
- разработки основных функциональных узлов и элементов интеллектуализированных устройств контроля влажности в СВЧ-диапазоне.

Важен и такой аспект, как метрологическое обеспечение рабочих средств измерения влажности. Отсутствие научно обоснованных принципов конструирования влагомеров приводит к созданию десятков моделей влагомеров, работающих на разных принципах и не имеющих разработанной метрологической базы. Столь многочисленный и разнообразный парк приборов требует дополнительных материальных и трудовых затрат для их ремонта, настройки и поверки [4, 5, 7–12].

В то же время, по-прежнему актуальной является задача проведения фундаментальных исследований с целью поиска новых эффективных методов измерения влажности различных веществ и материалов, дальнейшее развитие теории взаимодействия твердых сыпучих, волокнистых гетерогенных влагосодержащих диэлектриков с электромагнитными полями в широком частотном диапазоне, изучение диэлектрических свойств воды, сорбированной этими телами.

Не менее важной проблемой влагометрии является проблема эффективного использования полученной информации. Так как сама по себе точность получения информации зачастую не дает прямого экономического эффекта, необходимо включить это устройство контроля в информационно-аналитическую систему на базе компьютера с выдачей рекомендаций по управленческому решению или, что еще лучше, электрического сигнала для автоматического управления технологическим процессом.

Данная работа вызвана потребностью всех отраслей народного хозяйства, в первую очередь АПК, в современных высокоточных устройствах контроля влажности. В ней рассмотрен комплекс вопросов, связанных с повышением точности СВЧ-влагомеров. Изложены основы теории СВЧ-влагометрии. Даны аналитические выражения амплитудных, фазовых, отражательных, многочастотных, комплексных и комбинированных параметров преобразования, полученных в приближении линейной модели, учитывающей наличие влаги с различной энергией связи с материалом. Приводятся результаты разработки основных функциональных узлов СВЧ-влагомеров, даются рекомендации по их применению, предложена методика их инженерного расчета. Приведены результаты разработки, метрологической аттестации и внедрения широкого класса СВЧ-влагомеров отечественных производителей.

1. ВЛАЖНЫЕ ВЕЩЕСТВА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Электровлагодетрия основана на различии электрофизических свойств обезвоженных материалов, которые относятся к классу неполярных диэлектриков, и воды, являющейся сильно полярным диэлектриком. Диэлектрические свойства этих веществ хорошо изучены в отдельности, а данные для воды протабулированы в широкой области частот при различных температурах [9–11, 13].

Для неорганических материалов, являющихся неплохими диэлектриками в обезвоженном состоянии, характерно наличие атомной поляризации. Время релаксации составляет $10^{-14} - 10^{-15}$ с, что соответствует инфракрасному участку спектра электромагнитных колебаний. В диапазоне сверхвысоких частот дисперсия отсутствует, а диэлектрические потери незначительны (почти на два порядка ниже, чем у воды). Исключение составляют некоторые группы кристаллических соединений, обнаруживающих аномальное поглощение в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн, а также смеси, содержащие металлические включения (рост потерь в таких материалах обусловлен механизмом рассеяния на металлических включениях, магнитная проницаемость которых больше единицы).

Исследования показывают [1, 5, 10], что диэлектрические свойства неорганических материалов в узком температурном диапазоне, представляющем интерес для влагометрии, относительно мало зависят от температуры. Плотность материалов, особенно мелкодисперсных, влияет на абсолютные значения ϵ' и ϵ'' . Следует указать на то, что структурные особенности неорганических материалов искусственного и естественного происхождения влияют на их радиофизические свойства только в той мере, в какой размеры отдельных составляющих соизмеримы с длиной волны электромагнитного излучения. Диэлектрические свойства различных структур обусловлены только объемом пор, заполненных воздухом. Как правило, при расчетах ϵ' и ϵ'' смесь считают двухкомпонентной.

Данные по диэлектрическим свойствам твердых обезвоженных материалов органического происхождения свидетельствуют о том, что значения ϵ' и ϵ'' одного порядка с неорганическими материалами. Органические диэлектрики имеют сложную структуру, для которой характерно многообразие форм и соединений. Однако при отсутствии влаги такие структуры обладают только атомной поляризацией. Данное утверждение справедливо и для жидких диэлектриков, не обнаруживающих в обезвоженном состоянии дисперсии в области сверхвысоких частот и имеющих низкие значения ϵ' и ϵ'' . Исключение составляют полярные жидкости, у которых ϵ' и ϵ'' одного порядка с водой.

В настоящее время измерены [1, 5, 7] диэлектрические свойства многих обезвоженных веществ и материалов в широком частотном диапазоне. Однако сведений, относящихся к широкому классу материалов и продуктов сельскохозяйственного производства, значительно меньше. Используя методики измерений, которые будут описаны ниже, были определены диэлектрические свойства сельскохозяйственных влагосодержащих материалов в диапазоне работ СВЧ-влагомеров. На основе литературных данных и измерений В. К. Бензаря составлена таблица значений ϵ' и $\text{tg} \delta$ [1, 5], включающая 117 различных веществ и материалов.

Анализ этих данных показывает, что в диапазоне длин волн 10–3 см все материалы обладают малыми по сравнению с водой диэлектрическими потерями. Исключение составляют некоторые материалы органического происхождения: мыло, древесина, фанера. Однако эти материалы можно считать исключением из правил, объяснить повышенное значение $\text{tg} \delta$ следует остаточной влажностью.

В отличие от рассмотренных материалов вода является сильно полярным диэлектриком с отчетливо выраженными явлениями дипольной релаксации. Структура воды обусловлена строением ее молекулы. По расположению образующих ее атомов молекула H_2O имеет форму равнобедренного треугольника. Вершину этого треугольника занимает кислород, а два атома водорода лежат в основании. Исследованиями О. Я. Самойлова и его школы [14] установлено, что электрические заряды молекул воды сосредоточены в вершинах тетраэдра, имеющего общий центр с молекулой H_2O , и находятся на расстоянии водородной связи от ядра кислорода. Из этого следует, что молекула воды имеет четыре полюса

электрических зарядов: два положительных и два отрицательных. На тетраэдрический характер распределения зарядов в молекуле воды указывали ранее Бернал и Фаулер [10]. Такое распределение зарядов приводит к существованию большого дипольного момента в молекулах воды, который согласно данным, равен $\mu = 1,84D$.

Рентгеноструктурные исследования, проведенные в работах [15–22], показали, что расположение молекул воды в жидкой фазе упорядоченное и близко к кристаллической структуре. Морган и Уоррен [10] определили среднее число молекул n , находящихся по отношению к выбранной молекуле в зоне ближней координации. Полученные ими результаты приведены в таблице 1.1. Согласно этим данным, каждая молекула воды в структуре льда окружена 4-мя соседними молекулами. При переходе через точку плавления с повышением температуры молекулы воды приобретают более интенсивные трансляционные движения. Это позволяет некоторым из них попадать в пустоты структуры жидкости.

Таблица 1.1

Среднестатистические координационные числа молекул воды
в зависимости от температуры

$t, ^\circ C$	0	1,5	1,3	30	62	83
N	4,0	4,4	4,4	4,6	4,9	4,9

С этим обстоятельством главным образом и связано увеличение плотности тающего льда. Следовательно, структура воды в смысле ближней упорядоченности несколько сходна со структурой льда, размытой тепловым движением молекул. Более подробно современные представления о структуре и строении воды рассмотрены в монографиях [13, 14, 22].

Отсутствие строгой математической модели структуры воды не дает возможности в настоящее время рассчитать взаимодействие конечного объема воды с внешним переменным электромагнитным полем.

1.1. Оптимизация конструкторско-технологических решений при разработке влагометрических систем

В конце 90-х годов прошлого столетия для нужд сельскохозяйственного производства только в странах СНГ было разработано около сотни устройств и приборов контроля влажности, однако до серийного производства дошел только десяток из них. Причин тому несколько: от сложности, дороговизны и конструкционных недоработок до чисто экономических, связанных с резким спадом производства в отраслях АПК.

В настоящее время в Республике Беларусь наблюдается постоянный и существенный рост основных видов сельскохозяйственной продукции [6]. Применяемые современные технологии все больший акцент делают на повышение качества производимой продукции, снижение потерь, энерго- и ресурсосбережения. Все это возможно на базе широкого внедрения современного комплекса технических средств контроля как качества самой продукции, так и параметров технологического процесса при ее производстве, переработке и хранении.

Как указывается в [2], «анализ производства важнейших видов сельскохозяйственной продукции (зерна, кормов) показал доминирующую роль влажности в формировании качества и оптимизации технологических процессов...». Поэтому при создании нового поколения экспресс-влагомеров для сельскохозяйственного производства, необходимо учесть ошибки разработчиков прошлых лет, ведь сейчас очевидно, что отсутствие достаточной систематизации теоретических, практических и метрологических результатов в области экспресс-влагометрии приводило к тому, что разработка конкретных моделей велась лишь для решения отдельных частных задач.

Первые попытки выработки методологии системного подхода к средствам измерения влажности для сельскохозяйственного производства были предприняты Ю. П. Секановым в конце 80-х гг. [3], когда впервые был предложен типаж влагомеров: полевой, поточный и лабораторный.

Дальнейшее развитие этого подхода привело к добавлению в эту структуру образцовых (поверочных) влагомеров [5, 12], что подразумевает разработку влагомеров в тесной связи с разработкой средств метрологического обеспечения последних.

Предложенная Ю. П. Секановым методология системного решения проблем создания и внедрения емкостных влагомеров в сельскохозяйственное производство [2] включает следующие положения:

- измерители влажности являются составной частью всех технических средств контроля технологических параметров при производстве сельскохозяйственной продукции, минимизирующих влияние на ее качество всех внешних воздействий;
- отношения между приборами в системе обусловлены не только технологическими, но и контрольными связями, определяющими порядок их метрологического обеспечения;
- разработка влагомеров ведется во взаимосвязке с созданием средств метрологического обеспечения измерения влажности.

Структура основных блоков принятия решений по разработке влагометрических систем приведена на рис. 1.1.

Она состоит из четырех основных блоков: технологической целесообразности; экономического анализа; технической перспективы и метрологического обеспечения средств измерения влажности.

Блок технологической целесообразности применения средств экспрессного контроля влажности включает изучение процессов производства сельскохозяйственной продукции и выделения узловых точек, где наиболее эффективен контроль содержания влаги в материале. При этом формулируются требования к метрологическим характеристикам, а также конструктивным и эксплуатационным параметрам разрабатываемого комплекса технических средств для измерения влажности.

В результате формулируются исходные требования на разработку средств измерения влажности.

Блок экономического анализа включает маркетинговые исследования, т. е. оценку потенциального рынка влагомеров, изучение характеристик и стоимости аналогичной продукции, выпускаемой конкурентами, а также нахождение составляющих расчетного экономического эффекта. В результате оценивается планируемая потребность во влагометрических устройствах данного типа, перспективы сбыта продукции, экономические и социальные стороны применения данных средств измерения влажности.

Блок технической перспективы включает анализ научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию новых средств контроля влажности сельскохозяйственной продукции

на основе изучения электрофизических свойств влагосодержащих материалов в широком частотном диапазоне при изменении температуры, плотности и других «мешающих» факторов. Предлагаемое техническое решение сравнивается с лучшими зарубежными аналогами.

В результате получают рекомендации по выбору метода измерения, оптимальному частотному диапазону, предлагаемым метрологическим характеристикам и конструктивным параметрам средств измерения влажности, что, в свою очередь, позволит скорректировать исходные требования на разработку устройств контроля содержания влаги.

Как уже указывалось выше, параллельно с разработкой средств измерения влажности идет разработка метрологического обеспечения. Этот блок включает: разработку научно-технической документации на методы градуировки, поверки и испытаний средств измерения влажности (если такие нормативные документы отсутствуют); разработку стандартных образцов, либо образцовых средств измерения влажности данного вида сельскохозяйственной продукции; градуировку вновь созданного влагомера, его государственные приемочные испытания (ГПИ), сертификацию и внесение в Госреестр средств измерений.

Разработка заканчивается производственными испытаниями с выработкой рекомендаций для потребителя и организацией серийного выпуска влагомеров данного типа.

В настоящее время с использованием системного подхода определены структуры комплексов средств измерения влажности зерна и некоторых других сельскохозяйственных материалов. В соответствии с ГОСТ 29027-91 для измерения влажности зерна необходимо иметь 4 типа влагомеров: полевой, поточный, лабораторный и образцовый.

Опыт практического использования серийных и опытных емкостных влагомеров зерна и кормов, таких как «Электроника ВЛК-01», АТПАЗ-01, ЭЛИВС-100 и некоторых других [2], свидетельствует о том, что проблема создания полевых и поточных измерителей влажности в значительной мере решена в случаях, когда не требуется особенно высокая точность контроля. Что же касается экспресс-влагомеров лабораторных и особенно образцовых, то здесь имеется широкое поле деятельности для разработчиков.



Рис. 1.1. Структура основных блоков принятия решения по разработке влагометрических систем

Отечественный и мировой опыт влагометрии показывают, что емкостные высокочастотные влагомеры практически достигли пределов своих возможных метрологических характеристик. Например, абсолютная погрешность измерения влажности зерна в диапазоне до 20 % составляет 0,8–1,0 % у лучших диэлькометрических влагомеров. Для лабораторных и поверочных влагомеров этот параметр должен быть $\pm 0,5\%$ и $\pm 0,3\%$ соответственно.

Применение методов ускоренной сушки (например, СВЧ- или ИК-термогравиметрических) лишь частично решают проблему и во многих случаях не соответствуют критериям экспрессности и неразрушающего контроля. Кроме того, современные технологии в различных отраслях АПК требуют контроля влажности с абсолютной погрешностью $\pm 0,3\text{--}0,5\%$ и менее. Например, в мукомольном производстве ошибка в определении влажности зерна на доувлажнении более чем на $\pm 0,5\%$ способна перевести всю партию из высшего сорта в первый или ниже при значительном снижении (на 5–7 %) выхода муки.

Таким образом, актуальность создания средств экспрессного неразрушающего контроля влажности высокого класса точности стоит для сельскохозяйственного производства Республики Беларусь и стран СНГ особенно остро. В то же время технический уровень создаваемого средства контроля влажности должен рассматриваться в связи с его стоимостными характеристиками и с учетом конъюнктуры рынка. На рис. 1.2 приведена зависимость относительной стоимости влагомера от требуемой точности измерения влажности [2].

Таким образом, для каждого типа экспресс-влагомеров сельско-хозяйственных материалов решается комплексная задача оптимизации его технико-экономических характеристик в зависимости от требований технологического процесса и результатов получения информации о влажности, а также целенаправленного ее использования.

Что касается выбора метода и оптимального частотного диапазона для создания экспресс-влагомеров высокого класса точности, то определяющими в данном случае будут диэлектрические характеристики самой воды, находящейся в различной форме связи с материалом.

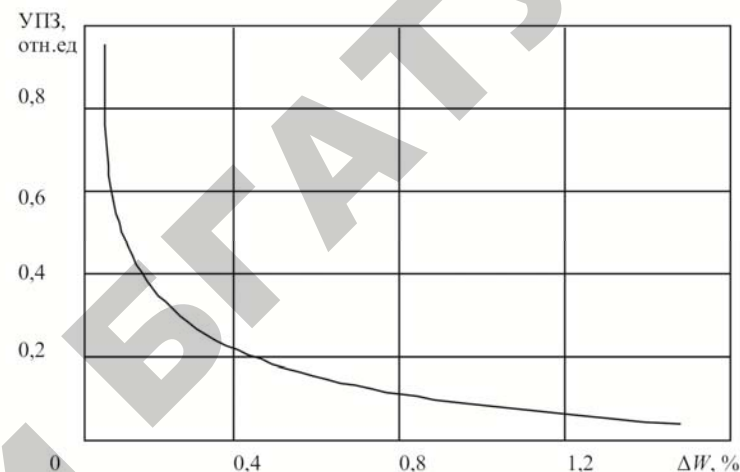


Рис. 1.2. Зависимость удельных приведенных затрат (УПЗ) от абсолютной погрешности измерения

1.2. Влияние влаги с различной энергией связи с твердым веществом на его диэлектрические свойства

Проникновение влаги в материал обусловлено его структурой и наличием воздушных пор, имеющих разнообразную форму. Как правило, твердые вещества имеют капиллярно-пористую структуру, основные модели которой рассмотрены в [1, 11]. Большой класс твердых веществ представляют порошкообразные материалы: торф, мука, абразивы, сухие краски и пигменты, цемент, мел, известь, минеральные удобрения.

Частицы некоторых порошков также обладают пористостью. Все эти вещества относятся к классу капиллярно-пористых. Для влагометрии важной характеристикой этого класса материалов является величина удельной поверхности, характеризующая отношение общей поверхности всех пор к их объему или весу:

$$S_{\text{уд}} = \frac{S}{V} = \frac{S}{P_c} \text{ (см}^2\text{/см}^3 \text{ или см}^2\text{/г)}. \quad (1.1)$$

На первый взгляд, наличие воды однозначно определяет состояние влажного материала. Опыт, однако, показывает, что это определение неточное. Из двух материалов, имеющих одинаковую влажность, одно может быть сухим, а другое – влажным. Этот факт зависит как от природы вещества, так и от силы связи воды с капиллярно-пористой структурой материала. Именно поэтому результаты измерений влажности с помощью электрических методов зависят не только от содержания воды в материале, но и от форм связи влаги. Вода, находящаяся в свободном состоянии, содержит молекулы, взаимодействующие друг с другом. При наличии твердой поверхности ближайшие к ней молекулы воды испытывают влияния энергетического потенциала активных центров, происходит ориентация этих молекул в силовом поле адсорбента и искажение структуры воды в этой зоне.

Исходя из такого механизма взаимодействия, рассматриваемый класс материалов можно условно разделить на 3 группы, отличающиеся удельной поверхностью [1, 5], – грубодисперсные, среднедисперсные и мелкодисперсные. Сделаем приближенную оценку количества моносорбционного слоя воды в капиллярно-пористых материалах с различной удельной поверхностью. Так как вес воды, адсорбированной на поверхности твердой фазы, равен:

$$P_n = \frac{S}{\sigma} a_m \frac{\mu}{N_0} = \frac{a_m \mu}{\sigma N_0} S_{уд} (1 - W), \quad (1.2)$$

где σ – посадочное место одной молекулы воды на поверхности твердой фазы;

S – общая поверхность материала, включая и поверхность твердой фазы;

a_m – количество монослоев воды;

μ – грамм-молекулярный вес воды;

N_0 – число Авогадро;

P – вес влажного материала.

Учитывая, что $W = \frac{P_n}{P}$, находим влажность материала при заполнении a_m слоев.

$$W = \left(1 + \frac{\sigma N_0}{a_m S_{уд} \mu} \right)^{-1}. \quad (1.3)$$

Для $S_{уд} = (10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7)$ см²/г и $\sigma = 3 \cdot 10^{-8}$ см получим следующие значения $W_{связ}$ для одного, двух и трех монослоев.

$W_{связ} = 0,0009 \%$; $0,009 \%$; $0,09 \%$; $0,9 \%$; 9% .

$W_{связ} = 0,0081 \%$; $0,018 \%$; $0,18 \%$; $1,8 \%$; 18% .

$W_{связ} = 0,0027 \%$; $0,027 \%$; $0,27 \%$; $2,7 \%$; 27% .

Нетрудно заметить, что крупно- и средне дисперсные материалы содержат, в основном, свободную воду. С ростом удельной поверхности содержание влаги монослоя увеличивается и для некоторых мелкодисперсных материалов может достигать 50–60 % величины максимальной влагоемкости.

Из существующих классификаций видов и форм связи воды в дисперсных системах наиболее известна классификация, предложенная академиком Ребиндером, основанная на использовании такой энергетической характеристики, как свободная энергия процессов обезвоживания [11]. По Ребиндеру различают четыре типа связанной воды: химически связанную, адсорбционно-связанную, капиллярно-связанную и свободную. Наиболее прочно удерживается химически связанная вода (гидратная или кристаллогидратная). Ее молекулы входят химически в состав вещества и освобождаются либо химическими взаимодействиями, либо прокаливанием. Этот тип связанной воды, очевидно, для влагометрии интереса не представляет. Свойства свободной воды рассмотрены выше. Таким образом, основной вклад в воду с аномальными диэлектрическими свойствами вносит адсорбционно-связанная и частично капиллярно-связанная вода.

Адсорбционно-связанная вода образуется в результате действия молекулярного силового поля. Капиллярно-связанная вода образуется в микрокапиллярах поглощением воды из влажного воздуха или непосредственным соприкосновением.

Причиной возникновения данной формы связи является капиллярное давление жидкости в капиллярах. Несмотря на различный механизм связывания воды с каждым конкретным диэлектриком можно выделить некоторые общие свойства в диэлектрических характеристиках гетерогенных диэлектриков, содержащих связанную воду.

В табл. 1.2 приведены значения ϵ'' для ряда мелкодисперсных материалов, содержащих связанную воду, для сравнения, на частотах 1 МГц и 12,5 ГГц. Значения ρ нормализованы к одной плотности 0,26 г/см³ и весовой влажности 14 %.

Таблица 1.2.

Нормализованные значения ϵ'' для двух фиксированных частот

Материал	Плотность сухого материала, г/см ³	$f = 1$ МГц	$f = 12,5$ ГГц
Ячмень	0,55	0,13	0,14
Просо	0,67	0,34	0,24
Хлебные злаки (крупа)	0,51	0,76	0,18
Рис	0,81	0,80	0,24
Целлюлоза	0,26	1,5	0,14
Чай	0,26	1,6	0,14
Мучные рожки	0,63	2,3	0,20
Рыбная мука	0,55	4,9	0,14
Табак	0,26	5,5	0,14
Хлопок	0,26	5,8	0,14
Костная мука	0,71	8,1	0,25

Как следует из приведенной таблицы, на частоте 12,5 ГГц диэлектрическая проницаемость ϵ'' приведенных материалов имеет весьма близкие значения, что, видимо, указывает на похожие механизмы релаксации на СВЧ.

1.3. Частотные характеристики воды и влажных веществ. Обоснование выбора частотного диапазона

Рассматривая влажные вещества как гетерогенные диэлектрики, их можно разделить на грубодисперсные, среднелдисперсные и мелкодисперсные, отличающиеся удельными поверхностями. Такой подход, впервые предложенный в [1] и развитый в [5], позволяет обобщить анализ их диэлектрических спектров. Отметим, что методы исследований отличаются большим разнообразием, что зачастую усложняет интерпретацию полученных результатов [24–26].

Ряд исследователей не измеряют непосредственно ϵ' и ϵ'' , а ограничиваются измерением переходного ослабления и фазового сдвига, вносимого влажным материалом, затем по соответствующим формулам эти данные пересчитываются к ϵ' и ϵ'' . Так, в [24] исследовалась диэлектрическая проницаемость красного кирпича ($\epsilon'_c = 4,6$, $P = 28$ %) в диапазоне длин волн от $\lambda = 226$ см до $\lambda = 0,8$ см при трех значениях объемного влагосодержания: 8,2 %; 17,2 %; 27 %. Полученные экспериментальные данные сравнивались с теоретическими, рассчитанными по формуле, приведенной в [1].

При расчете диэлектрической проницаемости смеси авторами учитывалось влияние проводимости воды σ на мнимую часть диэлектрической проницаемости воды. Получено удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных, за исключением точек для ϵ'' , лежащих в диапазоне измерения влажности от 0 до 2 % на метровых и дециметровых волнах. Здесь более резкий рост потерь по сравнению с расчетом обусловлен, по мнению авторов, образованием тонкой проводящей пленки воды около твердых частиц. Полученные кривые показывают, что положение максимума диэлектрических потерь для влажного кирпича приблизительно совпадает с положением максимума для свободной воды и не меняется по мере увлажнения материала.

В [27] исследовалась зависимость ослабления СВЧ-энергии от влагосодержания известки на длинах волн $\lambda = 2,85$ см и $\lambda = 7,5$ см. Экспериментальные результаты сравнивались с теоретически рассчитанными по линейной модели [5]. Расхождение между теоретическими и экспериментальными результатами составило величину порядка 15 % в диапазоне весовых влагосодержаний до 10 %. Различия температурных зависимостей составило величину 25 %, что связано, видимо, с неправильной предпосылкой авторов о том, что вся вода во влажном известняке находится в свободном состоянии.

В [25] исследовалась зависимость ослабления и фазового сдвига, вносимого влажным песком в трехсантиметровом диапазоне волн. Показано, что в среднем ослабление на 1 % весовой влажности составляет 0,8 дБ/см, а фазы – 13,5 град/см. Пересчет на ϵ' и ϵ'' не приводится.

В ряде работ [23–27] исследовались диэлектрические свойства грунтов на СВЧ. В [28] экспериментальные данные сравнивались с теоретическими, полученными по линейной модели. Указывается

на хорошее совпадение между опытными данными и теоретическим значением ϵ' в диапазонах длин волн от 30 до 3 см. Теоретические значения для ϵ'' согласуются с экспериментальными только на длине волны 3 см. На длинах волн 30 см и 10 см теоретические оценки сильно занижены. Авторы считают, что это различие связано с наличием солей в исследованных образцах.

В [15–17] исследовались диэлектрические свойства увлажненных цеолитов и силикагелей (рис. 1.3а) в области малых заполнений (до трех монослоев). Исследования проводились в полосе частот от 20 до $1,77 \cdot 10^{10}$ Гц и температур 140...360 К. Автором [16] установлено, что характерным для таких систем является наличие двух областей дисперсии, положения и амплитуды которых зависят от влажности, удельной поверхности, пористости и температуры. Показано, что обезвоженные образцы не обнаруживают дисперсии $\epsilon''(\omega)$. При увлажнении появляется область дисперсии II на частотах $\sim 10^{10}$ Гц, которая с ростом W увеличивает свое значение $\epsilon''_{\max}$ и незначительно сдвигается в сторону высоких частот. При заполнении порядка 0,8...1,2 монослоя появляется область I на частотах $10^3 \dots 10^8$ Гц, которая при дальнейшем увлажнении сдвигается в сторону более высоких частот, но слабо изменяет значение $\epsilon''_{\max}$. Автор указывает, что обе области могут быть описаны уравнениями Коула-Коула.

$$\epsilon^* = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_S - \epsilon_{\infty I}}{1 + (i\omega\tau_I)^{1-\alpha I}} + \frac{\epsilon_S - \epsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau_{II})^{1-\alpha II}} - i \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega}, \quad (1.4)$$

где τ_I и τ_{II} – наивероятнейшие времена релаксации;

α – параметр, характеризующий распределение времен релаксации.

Из анализа температурной зависимости времен релаксации τ_I и τ_{II} определены энергии активации процессов диэлектрической поляризации ΔH_I и ΔH_{II} соответственно, значения которых увеличиваются с увеличением диаметра пор и уменьшением удельной поверхности. При монослойной влажности значения энергии активации равны для $\Delta H_{II} \sim 10\text{--}20$ ккал/моль и для $\Delta H_I \sim 15\text{--}18$ ккал/моль. Указывается, что область релаксации I обусловлена молекулярными движениями тех молекул связанной воды, поведение которых может быть описано

либо моделью протонной диффузии, либо моделью молекулярных переориентаций, вызванных Бьеррумскими *L-D*-дефектами. Область дисперсии II, по мнению автора, связана с перескоками молекул воды, в результате которых они меняют свою ориентацию.

Эти данные противоречат результатам, полученным в работе [25]. Авторы этой работы провели детальные исследования диэлектрических свойств гидратированных и дегидратированных цеолитов в области частот до $3,2 \cdot 10^{12}$ Гц и температурах до 90 К. Ими были обнаружены три максимума ϵ'' . Воспользовавшись тем, что отношение приращения логарифма частоты релаксационного максимума к приращению обратной величины абсолютной температуры остается постоянным, экспериментальные данные приведены к стандартной температуре 20 °С. Авторы считают, что ни одна из релаксаций типа I, II, III (рис. 1.3) не является Максвелл-Вагнеровской, так как частоты для такого вида релаксаций слишком велики. Они приходят к выводу, что релаксационный процесс типа III не связан с релаксацией молекул адсорбированной воды, так как он подавляется по мере увлажнения.

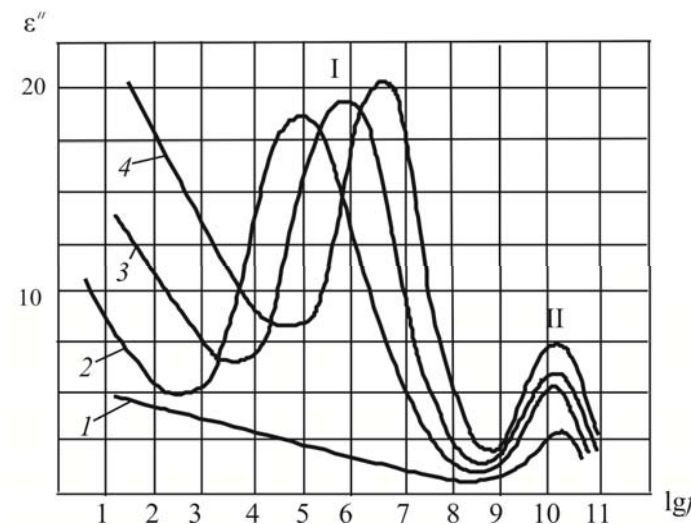


Рис. 1.3а. Зависимость ϵ' влажного силикагеля от частоты и влагосодержания по данным [20] при $T = 293$ К:
1 – $W = 12\%$; 2 – $W = 12\%$; 3 – $W = 20\%$; 4 – $W = 28\%$;
I, II – обозначения максимумов

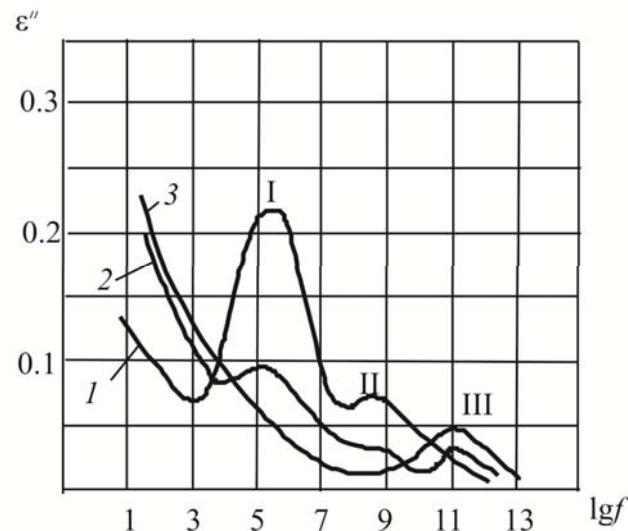


Рис. 1.36. Зависимость ε'' цеолита NaCl от влагосодержания и частоты: 1 – дегидратированный цеолит; 2 – цеолит, содержащий 4,6 % воды от предельной адсорбции; 3 – цеолит, содержащий 9,3 % воды; I–III – обозначения максимумов при $T = 293$ К

Таким образом, как следует из цитируемой работы, пик релаксации для связанной воды на цеолитах при малых заполнениях находится в диапазоне 10^8 – 10^9 Гц.

Очень интенсивному исследованию диэлектрических свойств на СВЧ в последние десятилетия подвергалось зерно, в основном, пшеница. Этому вопросу посвящен ряд работ [7, 12, 29–32]. Так как они проводились разными авторами, по различным методикам, то их трудно сопоставить. Кроме того, в ряде работ не указывается, какова была плотность зерна. Тем не менее, на основании этих исследований можно сделать вывод о том, что зерно практически во всем диапазоне СВЧ имеет положительный температурный коэффициент $\frac{\partial \varepsilon''}{\partial T}$ при влажностях вплоть до 20 % весовых.

На изотермах $N(W)$ и $\varphi(W)$ отчетливо заметна точка сингулярности в районе 10–12 %, которую авторы связывают с появлением в зерне свободной воды при влажностях больших 10–12 %.

Ряд других материалов органического происхождения обнаруживают сходные свойства. Например, крахмал и древесная мука обнаруживают также точки сингулярности на изотермах $\varphi(W)$ соответственно при 25 % и 65 % влажности [5].

В работе [39] показано, что картофельная стружка, цикорий, сахарная свекла обладают положительным температурным коэффициентом $\frac{\partial N}{\partial T}$ в диапазоне объемных влагосодержаний от 6 до 14 % на частоте 9,4 ГГц. Кроме того, для всех указанных материалов при $W = 2$ % наблюдается сингулярность на зависимостях $N(q_2)$ и $\gamma(q_2)$.

В [40] изучались диэлектрические свойства древесины на частотах 109 МГц, 1 ГГц, 4 ГГц и 10 ГГц в диапазоне влагосодержаний от 10 % до 20 %. Как и для других материалов, содержащих связанную влагу, пик релаксации для древесины оказался в районе 10^9 Гц.

Можно отметить, что $\text{tg} \delta$ для древесины при $f = 10$ ГГц имеет положительный температурный коэффициент, а для частоты $f = 100$ МГц – отрицательный.

Этот список можно было бы продолжить для бумажного полотна [41], шерсти [42], цементного камня [43] и других материалов [1, 5, 7].

Обратимся к методам исследований диэлектрических спектров влагосодержащих материалов.

В последние годы интенсивно развиваются два направления в методах исследования диэлектрических свойств диэлектриков – методы частотной диэлектрической спектроскопии (ЧДС) и методы временной диэлектрической спектроскопии (ВДС). Первое направление (ЧДС) является традиционным для диэлектрической спектроскопии и интенсивно развивается на протяжении последних четырех десятков лет. Им посвящены обстоятельные монографии [44, 45] и обзоры [46–48].

Следует, однако, отметить, что распространенный метод тонкого слоя в случае короткозамкнутой измерительной ячейки не удовлетворяет задаче снятия с высокой точностью диэлектрических спектров материалов в области больших влагосодержаний. Для частот выше 5 ГГц разработанные волноводные методы ЧДС эту задачу реализуют.

Методы ВДС являются сравнительно новыми. Началом развития этих методов послужила ставшая классической работа Х. Фемнера-Фелдига, опубликованная в 1969 г. [49]. Тем не менее, за сравнительно короткий срок исследователями, работающими в области ВДС, получены ряд важных результатов, касающихся принципиальных возможностей методов их математического и аппаратного обеспечения [5, 49–54].

Методы ВДС стали возможными благодаря появлению широкополосных стробирующих систем и генераторов с короткими фронтами импульсов (в конце 60-х годов). Суть методов ВДС заключается в измерении искажений, претерпеваемых импульсом напряжения, распространяющимся в направляющей системе с ТЕМ-волной (коаксиальные и полосковые линии), при его отражении от образца диэлектрика или прохождении через него. В [5] указывается, что в настоящее время имеется целый ряд методов ВДС, перекрывающих диапазон частот 10^4 – 10^{10} Гц и обеспечивающих достаточную точность измерения комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^*(\omega)$ широкого класса веществ. Однако анализ литературных источников указывает на то, что до последнего времени основные усилия исследователей в области ВДС пока еще направлены только на совершенствование самих методов, чтобы получились результаты (в основном на жидких диэлектриках), совпадающие с результатами, ранее полученными частотными методами. Практически отсутствуют исследования диэлектриков с неизвестными заранее диэлектрическими характеристиками.

1.4. Взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности капиллярно-пористых материалов в микроволновом диапазоне

Введем основные параметры, характеризующие влажный материал, которые понадобятся при рассмотрении математической модели диэлектрической проницаемости.

1. Насыпная плотность влажного и сухого материала:

$$\rho = \frac{P}{V}; \quad \rho_c = \frac{P - P_H}{V} = (1 - W)\rho, \quad (1.5)$$

где P – вес влажного материала;

P_H – вес воды;

V – объем, занимаемый влажным материалом;

W – весовая влажность.

2. Объемная влажность:

$$Q = \frac{P_H}{\rho_H V} = \frac{\rho}{\rho_H} W = \frac{\rho_c W}{\rho_H (1 - W)}. \quad (1.6)$$

Как указывалось ранее, традиционные формулы смесей, применяемые на НЧ и ВЧ, СВЧ, либо слишком сложны для анализа и правомерность их применения проблематична, либо приводят к результатам, не совпадающим с экспериментальными данными даже для таких систем, как крупнодисперсные гетерогенные диэлектрики.

В этой связи в [1, 5] показано, что наиболее подходящим оказывается электродинамический подход при моделировании диэлектрической проницаемости (ДП) влажного материала (ВМ). Физический смысл такого подхода, впервые предложенного В. К. Бензарем в 1967 г. [23], состоит в представлении влажного материала трехслойной системой – слой сухого материала, слой воды и слой воздуха. При этом предполагается, что распространяющаяся в бесконечном образце влажного материала электромагнитная волна СВЧ имеет плоский фронт и волновой вектор, перпендикулярный плоскости слоев (см. рис. 1.4). Толщина каждого слоя определяется объемной концентрацией соответствующего компонента. Поскольку слой вообще является фиктивным, то отражениями на границе слоев следует пренебречь. Кроме того, размеры неоднородностей в гетерогенном диэлектрике предполагаются настолько малыми, что выполняется соотношение $\lambda_m \geq \alpha$, где λ_m – длина волны во В.М., α – эффективный размер неоднородностей. В этом приближении рассеянием на неоднородностях можно также пренебречь.

Выделим в В.М. объем толщиной l . Разобьем этот объем на такие малые объемы dV толщиной dx , что каждому из них можно приписать эффективную диэлектрическую проницаемость $\epsilon^*(x)$, не изменяющуюся во всем объеме dV .

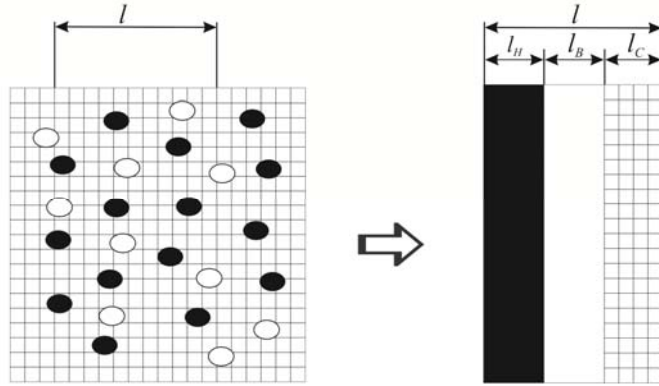


Рис. 1.4. Условное изображение влажного гетерогенного диэлектрика в приближении линейной модели:

- ⊕ – сухой материал;
- – поры заполненные водой;
- – пустые поры

Тогда в рамках описываемой модели можно записать:

$$E_0^* \exp \left\{ i\omega \left[t - \frac{1}{c} \int_0^l \sqrt{\epsilon^*(x)} dx \right] \right\} = E_0^* \exp \left\{ i\omega \left[t - \frac{1}{c} \sum_{k=0}^2 \sqrt{\epsilon_k^*} l_k \right] \right\}, \quad (1.7)$$

где E_0^* – комплексная амплитуда электромагнитной волны на входе выделенного объема;

ω – круговая частота электромагнитного поля;

t – время;

c – скорость света в вакууме;

ϵ_k^* – комплексная диэлектрическая проницаемость k -того слоя;

l_k – толщина k -того слоя.

Выделенному объему толщиной l можно приписать некоторое усредненное значение $\langle \epsilon^* \rangle$, определяемое выражением:

$$\sqrt{\langle \epsilon^* \rangle} = \frac{1}{l} \int_0^l \sqrt{\epsilon^*(x)} dx. \quad (1.8.)$$

Подставляя (2.8) в (2.7) и проводя логарифмирование, имеем:

$$\sqrt{\langle \epsilon^* \rangle} l = \sum_{k=0}^2 \sqrt{\epsilon_k^*} l_k \quad (1.9.)$$

или

$$\sqrt{\langle \epsilon^* \rangle} = \sum_{k=0}^2 \sqrt{\epsilon_k^*} q_k, \quad (1.10)$$

где $q_k = \frac{l_k}{l}$ – объемная концентрация каждого компонента.

Выражение (1.10) есть, по существу, формула диэлектрической смеси, полученная в приближении линейной модели.

В дальнейшем символ $\langle \rangle$ будем опускать, подразумевая, однако, что диэлектрическая проницаемость понимается как среднее по объему толщиной l .

Записывая (1.10) в развернутом виде, имеем:

$$\sqrt{\epsilon^*} = \sqrt{\epsilon_H^*} q_H + \sqrt{\epsilon_c^*} q_c + \sqrt{\epsilon_\theta^*} q_\theta, \quad (1.11)$$

где символы H, C, B означают соответственно воду, сухой материал и воздух.

Так как

$$Im \epsilon_c^* = 0, \quad (1.12)$$

$$Im \epsilon_\theta^* = 0, \quad Re \epsilon_\theta^* = 1, \quad (1.13)$$

и кроме того,

$$q_H = Q, \quad (1.14)$$

$$q_c = \Phi, \quad (1.15)$$

то окончательно получаем:

$$\sqrt{\epsilon^*} - 1 = Q(\sqrt{\epsilon_H^*} - 1) + \Phi(\sqrt{\epsilon_c^*} - 1). \quad (1.16)$$

Чтобы найти ε' и ε'' В.М., представим ε^* в показательной форме:

$$\varepsilon^* = |\varepsilon^*| e^{-i\delta}, \quad (1.17)$$

$$\text{где } |\varepsilon^*| = \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}, \quad (1.18)$$

$$\delta = \arctg \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.19)$$

$$|\varepsilon_H^*| = |\varepsilon_H^*| e^{-i\delta_H}, \quad (1.20)$$

$$\sqrt{\varepsilon_H^*} = \sqrt{\varepsilon_H'^2 + \varepsilon_H''^2}, \quad (1.21)$$

$$\delta_H = \arctg \frac{\varepsilon_H''}{\varepsilon_H'}, \quad (1.22)$$

тогда:

$$\sqrt{\varepsilon^*} = |\varepsilon^*|^{\frac{1}{2}} \left(\cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \right), \quad (1.23)$$

$$\sqrt{\varepsilon_H^*} = |\varepsilon_H^*|^{\frac{1}{2}} \left(\cos \frac{\delta_H}{2} + i \sin \frac{\delta_H}{2} \right). \quad (1.24)$$

После подстановки (1.23) и (1.24) в (1.16) и разделения действительной и мнимой частей имеем:

$$|\varepsilon^*|^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\delta}{2} - 1 = Q \left(|\varepsilon_H^*|^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\delta_H}{2} - 1 \right) + \Phi(\sqrt{\varepsilon_c} - 1), \quad (1.25)$$

$$|\varepsilon^*|^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\delta}{2} = Q |\varepsilon_H^*|^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\delta_H}{2}. \quad (1.26)$$

Из (1.25) и (1.26) следует, что

$$|\varepsilon^*| = Q^2 |\varepsilon_H^*|^{\frac{1}{2}}, \quad (1.27)$$

где $A = \Phi \sqrt{\varepsilon_c} + q_c$.

Из (1.27) легко получить ε' :

$$\varepsilon' = |\varepsilon^*| - Q^2 |\varepsilon^*| + Q^2 \varepsilon_H'. \quad (1.28)$$

Подставляя (1.28) в (1.27), находим ε' :

$$\varepsilon' = \left\{ Q \left(\sqrt{\frac{|\varepsilon_H^*| - \varepsilon_H'}{2}} - 1 \right) + \Phi(\varepsilon_c - 1) + 1 \right\}^2 - Q^2 \frac{|\varepsilon_H^*|^2 - \varepsilon_H'}{2}. \quad (1.29)$$

Учитывая, что

$$\varepsilon'' = \sqrt{(|\varepsilon^*| - \varepsilon')(|\varepsilon^*| + \varepsilon')}, \quad (1.30)$$

находим

$$\varepsilon'' = \sqrt{2} \left\{ Q \left(\sqrt{\frac{|\varepsilon_H^*| + \varepsilon_H'}{2}} - 1 \right) + \Phi(\sqrt{\varepsilon_c} - 1) + 1 \right\} Q \sqrt{|\varepsilon_H^*| - \varepsilon_H'}. \quad (1.31)$$

Таким образом, нами впервые получены уравнения (1.29) и (1.31), связывающие диэлектрические проницаемости ε' и ε'' с влажностью материала в приближении линейной модели.

Уравнения (1.29) и (1.31) можно упростить, если учесть, что вплоть до частот 10^{10} Гц $\frac{\varepsilon_H''}{\varepsilon_H'} \leq 0,5$.

В этом случае

$$|\varepsilon_H^*| - \varepsilon_H' = \sqrt{\varepsilon_H'^2 + \varepsilon_H''^2} - \varepsilon_H' \cong \frac{\varepsilon_H''^2}{2\varepsilon_H'}, \quad (1.32)$$

$$|\varepsilon_H^*| + \varepsilon_H' = \sqrt{\varepsilon_H'^2 + \varepsilon_H''^2} + \varepsilon_H' \cong 2\varepsilon_H'. \quad (1.33)$$

Подставляя (1.32) и (1.33) в (1.21) и (1.31), с учетом (1.5) и (1.6) имеем:

$$\varepsilon' \cong \left\{ \Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1-W} \left(\sqrt{\varepsilon_H'} - 1 \right) + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1 \right) + 1 \right\}^2; \quad (1.34)$$

$$\varepsilon'' \cong \left\{ \Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1-W} \left(\sqrt{\varepsilon_H'} - 1 \right) + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1 \right) + 1 \right\} \frac{\Phi \rho_0 W}{\rho_H (1-W)} \frac{\varepsilon_H''}{\sqrt{\varepsilon_H'}}. \quad (1.35)$$

Из (1.29) и (1.31) путем простых алгебраических преобразований можно получить еще одну полезную для практических целей систему уравнений:

$$\alpha = \alpha_H \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_0}{\rho_H}; \quad (1.36)$$

$$\beta = \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_0}{\rho_H} (\beta_H - \beta_e) + \Phi (\beta_c - \beta_e) + \beta_e, \quad (1.37)$$

где α и β – постоянные затухания и волновое число для влажного материала;

α_H и β_H – соответствующие значения для свободной воды;

β_c и β_e – волновые числа для сухого материала и воздуха.

Не останавливаясь пока детально на полученных соотношениях, отметим, что ε' и ε'' зависят от влажности W и коэффициента заполнения Φ по квадратичному закону, а α и β – по линейному. Таким образом, коэффициент заполнения является столь же существенным параметром, как влажность, по степени влияния его на диэлектрические параметры влажного материала.

Рассмотрим предельные соотношения для ε' и ε'' при $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$.

Из (1.29) и (1.31) находим:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon'' = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon'' = 0; \quad (1.38)$$

$$\varepsilon_s = \lim_{\omega \rightarrow 0} \varepsilon' = \left[Q \left(\sqrt{\varepsilon_{sH}} - 1 \right) + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c} - 1 \right) + 1 \right]^2; \quad (1.39)$$

$$\varepsilon_\infty = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon' = \left[Q \left(\sqrt{\varepsilon_{\infty H}} - 1 \right) + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c} - 1 \right) + 1 \right]^2. \quad (1.40)$$

Возникает вопрос: описываются ли полученные соотношения для ε' и ε'' влажного крупнодисперсного диэлектрика уравнениями дебаевского типа, т. е. выполняется ли соотношение

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} + \varepsilon_\infty, \quad (1.41)$$

где ε_s и ε_∞ определяются соответственно по (1.39) и (1.40);

τ – некоторое время релаксации.

Если (1.41) выполняется, то, как известно [13], должно выполняться соотношение

$$\varepsilon''_{\max} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}, \quad (1.42)$$

где $\varepsilon''_{\max}$ – максимальное значение ε'' при некоторой частоте $\omega = \frac{1}{\tau}$.

Ввиду сложности выражения (1.31) аналитически не представляется возможным показать, выполняется ли (1.42). Однако численный анализ выражения (1.31) показывает, что ни при каких частотах не выполняется равенство (1.42), а выполняется следующее неравенство:

$$\varepsilon'' < \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2}. \quad (1.43)$$

Таким образом, диэлектрическая релаксация крупнопористого, влажного гетерогенного диэлектрика не является релаксацией дебаевского типа в рамках линейной модели.

Известно, что неравенство (1.43) выполняется для релаксаций типа Коул-Коула:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^{1-\alpha}}, \quad (1.44)$$

где $0 \leq \alpha \leq 1$ – параметр, характеризующий распределение времени релаксации, а также для распределения Коул-Дэвидсона:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + i\omega\tau)^\beta}, \quad (1.45)$$

где β – некоторый эмпирический параметр, характеризующий асимметрию в распределении времени релаксации между σ и τ .

В этих случаях кривые на диаграммах Коул-Коула (в координатах ε' и ε'') характеризуются соответственно симметричным круговым сегментом и вытянутым полукругом в высокочастотной области. В первом и втором случаях угол, под которым кривая ε'' (ε') пересекает ось при $\omega \rightarrow \infty$, меньше $\pi/2$ [23].

Простым дифференцированием легко показать, что

$$\operatorname{tg} \varphi = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\frac{\partial \varepsilon''}{\partial \omega}}{\frac{\partial \varepsilon'}{\partial \omega}} = \infty, \quad (1.46)$$

т. е. угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Можно показать, что и при $\omega \rightarrow 0$ $\varphi = \frac{\pi}{2}$. Таким образом, ди-

электрическая проницаемость крупнопористого В.М. не описывается ни одним из общепринятых видов релаксаций для изотропных материалов.

На рис.1.5 представлена диаграмма Коул-Коула для гипотетического диэлектрика с $\varepsilon_c = 4,6$ коэффициента заполнения $\Phi = 0,72$ при двух значениях влажности. Из графиков на этом рисунке видно, что в области частот, меньших $3,5 \cdot 10^{10}$ Гц, т. е. практически во всем СВЧ-диапазоне, диаграмма Коул-Коула удовлетворительно описывается полуокружностью (уравнение Дебая). Длина волны, при которой ε'' достигает максимума (λ_{m1}), несколько меньше, чем для свободной воды (λ_{m0}), но по мере увлажнения материала λ_m стремится к λ_{m0} . На рис. 1.6 представлен график зависимости $\lambda_{\max}$ от влажности для того же диэлектрика.

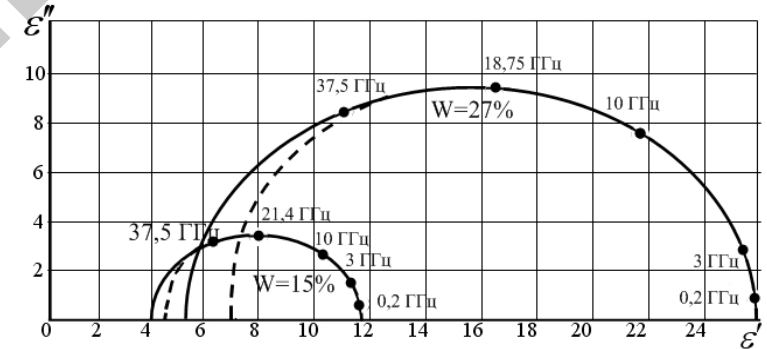


Рис. 1.5. Диаграммы Коул-Коула для крупнодисперсного диэлектрика при $\varepsilon_c = 4,6$; $\Phi = 0,72$. Штриховыми линиями показаны аналогичные диаграммы для дебаевского диэлектрика

Так как представленная ниже математическая модель влажного гетерогенного диэлектрика разработана для крупнодисперсных материалов, то и проверку ее следует проводить на крупнодисперсных материалах. Качественный критерий выбора таких материалов можно определить из условия малости количества воды, находящегося в непосредственном контакте с поверхностью твердой фазы по сравнению с общим количеством воды и материала.

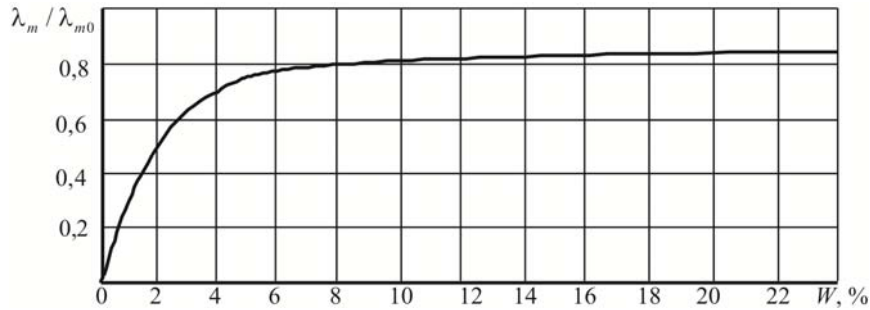


Рис. 1.6. Зависимость резонансной длины волны от влажности для крупнодисперсного диэлектрика

Согласно [16], влияние силового поля поверхности твердой фазы практически не сказывается уже на третьем монослое молекул. Таким образом, если $a_m = 3$, а минимальная влажность, на которой проверяется математическая модель, равна $W_{\min}$, то выбор материала с необходимым $S_{\text{уд}}$ определяется неравенством

$$\frac{1}{1 + \frac{6N_0}{3S_{\text{уд}}\mu}} \leq 0,1W_{\min}. \quad (1.48)$$

Из (1.48) получаем соотношение для оценки удельной поверхности, которой должен обладать модельный В.М.

$$S_{\text{уд}} \leq \frac{0,16N_0W_{\min}}{3\mu(1 - 0,1W_{\min})}. \quad (1.49)$$

Учитывая, что $0,1W_{\min} \ll 1$ и подставляя в (1.49) численные значения для входящих туда констант, находим

$$S_{\text{уд}} = 222W_{\min}. \quad (1.50)$$

Например, если $W_{\min} = 0,01$ (1 %), то для проверки полученных выше соотношений математической модели в диапазоне влажностей $W \gg 1$ %, получаем оценку

$$S_{\text{уд}} \leq 2,2 \frac{\mu^2}{2} \quad (1.51)$$

Таким требованиям удовлетворяет большинство песков на основе двуокиси кремния. Поэтому в качестве модельного материала для проверки математической модели был выбран кварцевый порошок грубого помола. Пикнометрическим способом была измерена плотность этого материала $\rho = 2,75 \text{ г/см}^3$. По методике временной диэлектрической спектроскопии (ВДС) была определена $\epsilon_s = 4,31$. В дальнейшем все теоретические оценки, касающиеся влияния коэффициента заполнения (насыпного веса), температуры, концентрации солей на диэлектрические параметры крупнодисперсного В.М. на СВЧ будем проводить с ρ_0 и ϵ_s равными соответственно $2,75 \text{ г/см}^3$ и $4,31$. В заключение приведем еще два выражения для α и β В.М., которые будут полезны для дальнейшего анализа (эти выражения легко получить из (1.34) и (1.35)):

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\Phi \rho_0 W}{\rho_H (1 - W)} \frac{\epsilon_H''}{\sqrt{\epsilon_H'}}, \quad (1.52)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{\Phi \rho_0 W}{\rho_H (1 - W)} (\sqrt{\epsilon_H'} - 1) + \Phi (\sqrt{\epsilon_c'} - 1) + 1 \right]. \quad (1.53)$$

1.4.1. Взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности мелкодисперсных материалов

Основной особенностью мелкодисперсных диэлектриков является большое количество содержащейся в них связанной влаги. Следовательно, применение к ним основного уравнения (2.16) надо скорректировать с учетом некоторых качественных физических соображений. Можно считать установленным тот факт, что вода в материалах с большой удельной поверхностью имеет, по крайней мере, 2 фазы – связанную и свободную воду. Связанная вода, однако, сама по себе неоднородна и может быть, по всей видимости,

тоже разделена на 2 фазы – менее и более подвижные. Эту точку зрения подтверждают результаты ряда работ по ЯМР-спектроскопии. В частности, в [10] в области заполнений, близких к значению статистического монослоя по БЭТ, для особо чистых образцов SiO_2 было обнаружено существование на поверхности двух фаз протонов с резко различающимися временами релаксации. Медленно релаксирующая фаза была отнесена автором к гидроксильным группам поверхности. Вторая подвижная фаза оказалась состоящей из двух сортов молекул: 1) более подвижных молекул с временем поляризации $\tau_c = 2,7 \cdot 10^{-10}$ с; 2) менее подвижных молекул – $\tau_c = 2,3 \cdot 10^{-8}$ с. Но, согласно Бломбергену, Парселлу и Пайнду (Б.П.П.) [10], время ядерной поляризации имеет тот же порядок, что и время диэлектрической релаксации. Таким образом, результаты описанной работы подтверждают точку зрения о наличии двух областей дисперсии для связанной воды. Кроме того, как уже указывалось, диэлектрические изотермы для ряда мелкодисперсных материалов обнаруживают отчетливую точку сингулярности. В частности, для пшеницы $W_{кр} \approx 10\%$ ($S_{уд} = 220 \text{ м}^2/\text{г}$). Если предположить, что эта точка соответствует переходу «связанная вода – свободная вода», тогда, как показано на рис. 1.7, уже при влажностях порядка 28 % производная $\frac{\partial \epsilon''}{\partial T}$ для

пшеницы ($\lambda = 3 \text{ см}$) становится отрицательной. Экспериментально, однако, в ряде работ [5–7, 29–32] показано, что $\frac{\partial \epsilon''}{\partial T} > 0$ для

пшеницы любой влажности и практически не меняет своего абсолютного значения с изменением влагосодержания. Таким образом, переход «связанная вода – свободная вода» осуществляется через третью промежуточную фазу.

Исходя из вышеизложенного, всю воду, находящуюся в мелкодисперсном материале, можно разделить на 3 фазы. Первая фаза – связанная вода, обладает диэлектрической проницаемостью ϵ_{Hc}^* .

Вторая фаза – вода полисорбции. Эта фаза занимает промежуточное положение между свободной и связанной водой и имеет диэлектрическую проницаемость ϵ_{Hn}^* .

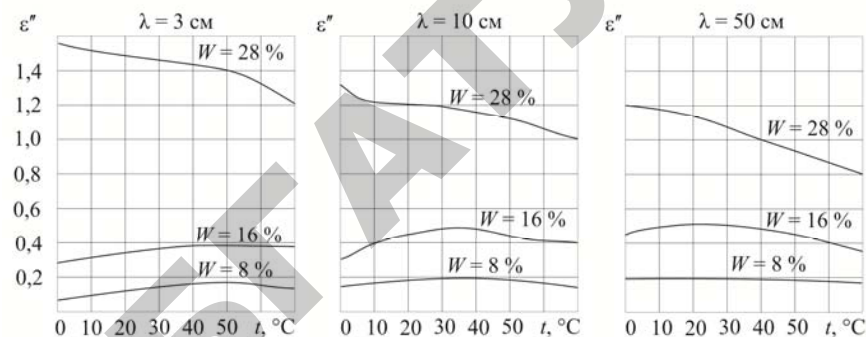


Рис. 1.7. Расчетные зависимости ϵ'' от температуры при различных влагосодержаниях и частотах для влажной пшеницы в предположении, что при $W = 10\%$ в зерне преобладает свободная вода

И третья фаза – свободная вода с диэлектрической проницаемостью ϵ_{Ho}^* . Наличие точки сингулярности на диэлектрических изотермах мелкодисперсных материалов [5] позволяет предположить, что при влажностях, меньших некоторой критической влажности $W_{кр}$, соответствующей перегибу диэлектрической изотермы, вода в мелкодисперсном диэлектрике находится только в связанном состоянии. По мере заполнения сорбционного объема при $W > W_{кр}$ появляются влага полисорбции и небольшое количество свободной воды. При дальнейшем увлажнении при некоторой предельной влажности $W_{пр}$ количество воды в образце растет только за счет свободной воды.

Такой подход позволяет преобразовать уравнение (1.16) к следующему виду:

$$\sqrt{\epsilon^*} - 1 = \Phi(\sqrt{\epsilon_c} - 1) + \sum_{i=1}^3 q_{Hi} (\sqrt{\epsilon_{Hi}^*} - 1), \quad (1.54)$$

где q_{Hi} – объемные концентрации каждой из фаз воды.

В случае, когда $W \leq W_{кр}$ (1.54), уравнение упрощается:

$$\sqrt{\epsilon^*} - 1 = \frac{\rho_0}{\rho_H} \Phi \frac{W}{1-W} (\sqrt{\epsilon_{Hc}^*} - 1) + \Phi(\sqrt{\epsilon_c} - 1). \quad (1.55)$$

Очевидно, что при любой влажности выполняется соотношение

$$q_{Hc} + q_{Hn} + q_{Ho} = Q. \quad (1.56)$$

Кроме того, при $W \leq W_{кр}$ $q_{Hc} = \frac{\rho_0}{\rho_H} \Phi \frac{W}{1-W}$, а при $W > W_{кр}$

$$q_{Hc} = \frac{\rho_0}{\rho_H} \Phi \frac{W_{кр}}{1-W_{кр}}.$$

Для того чтобы можно было пользоваться уравнением (1.54), необходимо знать ε_{Ho}^* , ε_{Hn}^* и соотношение между q_{Hn} и q_{Ho} . Ясно, однако, что для каждого конкретного мелкодисперсного материала эти параметры будут иметь свои, отличные, от других материалов значения, и без знания физико-химического строения данного материала вообще невозможно предсказать соответствующие величины для этих параметров. Тем не менее, можно сделать ряд общих замечаний, касающихся практически всех мелкодисперсных диэлектриков. Рассмотрим соотношение между влагой полисорбции и свободной воды в мелкодисперсном материале. Отсутствие дополнительных точек сингулярности на диэлектрических изотермах мелкодисперсных материалов указывает на то, что переход влаги из состояния полисорбции в состояние свободной воды происходит плавно по мере увлажнения материала. Поэтому для вычисления q_{Hn} и q_{Ho} можно воспользоваться моделью [55] Ивенса-Бускера, в которой предполагается, что скорость изменения данной формы влаги по мере увлажнения прямо пропорциональна части сорбционного объема, незанятой этой влагой.

Следовательно, можно записать:

$$\frac{dq_{Hn}}{dQ} = 1 - \frac{q_{Hn}}{q_{Hn \max}}, \quad (1.57)$$

где $q_{Hn \max}$ – максимальная объемная концентрация влаги полисорбции.

Интегрируя (1.57), находим:

$$q_{Hn} = q_{Hn \max} \left(1 - e^{-C \frac{Q}{q_{Hn \max}}} \right), \quad (1.58)$$

где C – константа интегрирования.

Для нахождения C учтем, что при $Q = Q_{Hn}$ $q_{Hn} = 0$.

$$\text{Следовательно, } C = \frac{Q_{кр}}{q_{Hn \max}}$$

$$\text{Таким образом, } q_{Hn} = q_{Hn \max} \left(1 - e^{-\frac{Q_{кр}-Q}{q_{Hn \max}}} \right). \quad (1.59)$$

Однако, в таком виде уравнением (1.59) пользоваться неудобно, поскольку все объемные концентрации, входящие в него, зависят от коэффициента заполнения. В (1.59) должны входить параметры, которые характеризуют данный материал независимо от Φ . Очевидно, что под $q_{Hn \max}$ можно понимать максимальное количество монослоев, которое образует влага полисорбции. Тогда, воспользовавшись (1.2), можно записать:

$$q_{Hn \max} = \frac{\mu \rho_0 S_{уд}}{N_A \rho_H \sigma} a_{\max} \Phi, \quad (1.60)$$

где $a_{\max}$ – максимальное возможное количество монослоев воды, занимаемых влагой полисорбции в данном материале.

С другой стороны,

$$Q_{кр} = \frac{\rho_0}{\rho_H} \Phi \frac{W_{кр}}{1-W_{кр}}. \quad (1.61)$$

Таким образом, окончательно имеем:

$$q_{Hn} = \Phi \frac{\rho_0 \mu S_{уд}}{\rho_H N_A \sigma} a_{\max} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{(W_{кр} - W) \sigma N_A}{(1 - W_{кр})(1 - W) \mu S_{уд} a_{\max}} \right] \right\}. \quad (1.62)$$

Следовательно, функция

$$f_1(W, S_{уд}, a_{\max}) = 1 - \exp \left[\frac{(W_{кр} - W) \sigma N_A}{(1 - W_{кр})(1 - W) \mu S_{уд} a_{\max}} \right], \quad (1.63)$$

характеризующая соотношение между влагой полисорбции и свободной влагой, не зависит от коэффициента заполнения Φ .

Уравнение (1.54) при $W > W_{кр}$ преобразуется к виду

$$\sqrt{\varepsilon^*} - 1 = \Phi \left\{ \left(\sqrt{\varepsilon_c} - 1 \right) + \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W_{кр}}{1 - W_{кр}} \left(\sqrt{\varepsilon_{Hc}^*} - 1 \right) + \frac{\rho_0 \mu S_{уд}}{\rho_H N_A \sigma} a_{\max} \right\} * f_1. \quad (1.64)$$

Рассмотрим величины ε_{Hc}^* , ε_{Hn}^* , ε_{Ho}^* . Очевидно, что ε_{Ho}^* имеет такие же параметры, как и для чистой воды, т. е. определяется соответствующими уравнениями Дебая. Что касается ε_{Hc}^* и ε_{Hn}^* , то можно считать установленным тот факт, что они определяются релаксацией типа Коул-Коула [13, 56–69]. Следовательно, для определения ε_{Hc}^* и ε_{Hn}^* необходимо знать соответствующие параметры этого типа релаксации.

Оценку параметров, входящих в уравнение (1.44), начнем с оптической части диэлектрической проницаемости. Очевидно, что $\varepsilon_{Hc\infty}^*$ и $\varepsilon_{Hn\infty}^*$ должны быть близкими к $\varepsilon_{Ho\infty}^*$, так как эти величины определяются атомной и электронной поляризацией. Таким образом,

$$\varepsilon_{Hc\infty} = \varepsilon_{Hn\infty} = \varepsilon_{Ho\infty}. \quad (1.65)$$

Согласно современным представлениям, развитым в работах Онзагера, Кирквуда, Фрелиха [13, 57–59], статическая диэлектрическая проницаемость полярного диэлектрика определяется выражением:

$$\frac{(\varepsilon_s - n^2) \cdot (2\varepsilon_s + n^2)}{3\varepsilon_s} = \frac{4\pi N \mu_0^2 g}{3kT} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right), \quad (1.66)$$

где n – коэффициент преломления полярного диэлектрика;

g – корреляционный параметр Кирквуда;

μ_0 – дипольный момент молекулы диэлектрика;

k – постоянная Больцмана;

N – количество молекул в единице объема.

Учитывая, что $2\varepsilon_s \gg n^2$, получаем:

$$\varepsilon_s = n^2 + \frac{2\pi N \mu_0^2}{kT} g \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2. \quad (1.67)$$

В свою очередь, корреляционный параметр g равен:

$$q = \frac{\bar{m}^* \bar{m}}{m^2} = 1 + N_i \langle \cos \gamma \rangle, \quad (1.68)$$

где $\bar{m}^*$ – векторная сумма дипольного момента произвольной центральной молекулы и дипольных моментов соседних молекул;

N_i – число ближайших соседей;

$\langle \cos \gamma \rangle$ – средний косинус угла между соседними диполями.

Физическая сущность уравнений (1.67) и (1.68) в том, что ε_s зависит не только от величины постоянного дипольного момента молекулы и числа диполей в единице объема, но и от степени, с которой молекулы наводят дополнительные моменты друг у друга, и от степени, с которой коррелируют направления их диполей. Сильная корреляция направлений диполей (т. е. большая величина g) означает, что, когда, одна молекула ориентируется по направлению внешнего поля, ее соседи также стремятся быть ориентированными. Для чистой воды g -фактор по данным [13] лежит в пределах 2,3–2,8. Кроме того, число ближайших соседей центральной молекулы, определяемое с помощью радиальной функ-

ции распределения, равно приблизительно 4. Ясно, что при малых увлажнениях ($a_m \leq 1 \div 2$) число N_i меньше 4. Далее, так как адсорбированные молекулы находятся в силовом поле адсорбента и сильно разобщены, то следует ожидать, что $\langle \cos \gamma \rangle$ также меньше, чем для свободной воды.

Все это приводит нас к выводу, что g -фактор для связанной воды меньше, чем для свободной. Следовательно, и $\epsilon_{Hcs}, \epsilon_{Hns} < \epsilon_{Hos}$ (ϵ_{Hos} , согласно [13, 1,5], при 20 °С равен 80,4), и оценка для ϵ_{Hcs} и ϵ_{Hns} по минимуму будет

$$\epsilon_{Hcs}, \epsilon_{Hns} \geq n^2 + \frac{2\pi N \mu_0^2}{kT} \left(\frac{n^2 + 2}{3} \right)^2. \quad (1.69)$$

Подстановка в (2.69) численных значений приводит к неравенству

$$\epsilon_{Hcs}, \epsilon_{Hns} > 30. \quad (1.70)$$

За верхнюю границу изменений ϵ_{Hcs} и ϵ_{Hns} следует, очевидно, принять ϵ_{Hos} . Таким образом, при $T = 20$ °С

$$30 \leq \epsilon_{Hcs}, \epsilon_{Hns} \leq 80. \quad (1.71)$$

Еще один подход для вычисления ϵ_{Hcs} и ϵ_{Hns} может быть развит на основе [59]. В этой работе автор обобщил теорию Дебая для поляризации дипольной среды на случай адсорбированных диполей, которые не могут свободно вращаться в пространстве. Ему удалось показать, что в случае, когда диполь обладает свободой вращения внутри конуса с углом 20° и выйти за пределы этого конуса не может, средний статический момент на направления поля определится выражением:

$$\langle \mu \rangle = \frac{\mu_0^2 E}{3kT} \left(1 - \cos^4 \frac{\theta_0}{2} \right). \quad (1.72)$$

Легко заметить, что (1.72) отличается от классического уравнения Ланжевена [13] наличием множителя $(1 - \cos^4 \frac{\theta_0}{2})$. Следовательно,

в первом приближении в выражениях для ϵ_s (по Дебаю, Онзагера, Кирквуду, Фрелиху) μ_0 следует заменить на $\mu_0(1 - \cos^4 \frac{\theta_0}{2})$. Такая замена приводит к следующему выражению:

$$\frac{\epsilon_{Hos} - \epsilon_\infty}{\epsilon_{Hc,nc} - \epsilon_\infty} = \frac{1}{1 - \cos^4 \frac{\theta_0}{2}}. \quad (1.73)$$

В [20] на основании экспериментальных исследований диэлектрических свойств увлажненных силикагелей в области заполнений $a_m \geq 2$ были вычислены значения θ_0 . Показано, что в широкопористых образцах силикагелей ($d \sim 70$ А) угол θ_0 достигает минимального значения, равного 55°.

Преобразуя (1.73) и подставляя указанное значение угла, получаем оценку для минимального значения:

$$\epsilon_{Hc,ns}^{\min} = (\epsilon_{Hos} - n^2) \left(1 - \cos^4 \frac{\theta_0}{2} \right) + n^2 \cong 32. \quad (1.74)$$

Оба указанных выше подхода приводят приблизительно к одинаковому значению для статической диэлектрической проницаемости связанной воды.

Ранее, в [5, 12] на основе экспериментальных исследований и данных других авторов, мы определили, что макроскопическое время релаксации составляет величину на один-два порядка большую, чем для свободной воды. Следует также учесть, что наблюдаемый максимум функций $\epsilon''(\omega)$ для мелкодисперсных материалов в области малых заполнений смещен в более высокочастотную область за счет эффектов гетерогенности (рис. 1.3). Можно предположить, что реальное время имеет еще большую величину и лежит, по-видимому, в диапазоне $3 \cdot 10^{-9} - 0 \cdot 10^{-10}$ с.

Для определения зависимости τ_{Hc} и τ_{Hn} от температуры воспользуемся теорией абсолютных скоростей реакций [61]. Согласно этой теории, диэлектрическую релаксацию можно трактовать

как процесс, протекающий с определенной скоростью, при которой дипольные молекулы из одного положения равновесия переходят в другое. Можно предположить, что колебания молекулы происходят около одного из этих положений до тех пор, пока она не приобретает энергию, достаточную для перехода через энергетический барьер, после чего она попадает во второе положение равновесия. Согласно теории абсолютных скоростей реакций, число таких поворотов, происходящих в течение одной секунды, определяется выражением

$$\nu = \frac{kT}{h} e^{-\frac{\Delta F}{RT}} = \frac{kT}{h} e^{\frac{\Delta S}{R}} e^{-\frac{\Delta H}{RT}}, \quad (1.75)$$

где R – универсальная газовая постоянная;

h – постоянная Планка;

ΔS , ΔF , ΔH – соответственно энтропия, свободная энергия и энтальпия активации.

Среднее время, необходимое для одного перескока, равно ν^{-1} , и это может быть отождествлено с микроскопическим временем релаксации τ'

$$\tau' = \tau'_0 e^{\frac{\Delta H}{RT}},$$

где $\tau'_0 = \frac{h}{kT} e^{-\frac{\Delta S}{R}}$. (1.76),

Согласно [13, 62], микроскопическое время релаксации τ' связано с микроскопическим временем релаксации соотношением

$$\tau = \frac{3\varepsilon_s \tau'}{2\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}. \quad (1.77)$$

Если учесть, что $2\varepsilon_s \gg \varepsilon_\infty$, то

$$\tau \cong \frac{3}{2} \tau'. \quad (1.78)$$

В литературе практически отсутствуют данные ΔH для мелко-дисперсных влагосодержащих гетерогенных диэлектриков. Исключением являются работы [19–21], посвященные модельным мелко-дисперсным материалам. В частности, в [19] определено, что для увлажненных силикагелей ΔH в области заполнения до двух монослоев ($a_m \leq 2$) составляет величину 10–15 ккал/моль, однако из цитируемой работы неясно, при каких заполнениях (или влажностях) вычислялось ΔH .

Для свободной воды, как известно, ΔH равно приблизительно энергии одной водородной связи и составляет величину 4,6 ккал/моль.

Таким образом, ΔH для связанной воды может в 2÷3 раза превышать энергию активации процесса поляризации для свободной воды, что качественно объясняет увеличение макро- и микроскопического времени релаксации для свободной воды.

Если для связанной воды при некоторой температуре T_0 известно значение τ_0 (либо длина волны λ_m , при которой ε'' достигает максимума: $\lambda_m = 2\pi c_0 \tau$), и, кроме того, известно ΔH , то τ или λ_m могут быть рассчитаны для любой другой температуры из выражения (последнее легко получается из (1.76) и (1.78))

$$\tau = \tau_0 \exp \left[\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]. \quad (1.79)$$

При выводе (1.79) мы пренебрегли изменением сомножителя kT/h

от температуры по сравнению с более быстрой функцией $e^{\frac{\Delta H}{RT}}$.

Известно, что свободная вода обладает очень малым параметром распределения времени релаксации α , так что диаграмма Коул-Коула для свободной воды представляет собой с высокой точностью полуокружность. Из общих физических соображений, однако, ясно, что для связанной воды этот параметр должен быть существенно больше нуля. Действительно, согласно современным представлениям [64], первые порции молекул воды в равновесных условиях занимают наиболее активные адсорбционные центры поверхности, которая предполагается гидроксильированной. Эти места обычно являются дефектами-нарушениями регулярной структуры кристалла адсорбента. Очевидно,

что в реальном гетерогенном диэлектрике такие центры адсорбции неоднородны, так как они обладают различной энергией связи с молекулами воды. Тогда, согласно (1.76) и (1.78), микро- и макроскопические времена релаксации молекул воды будут также неодинаковы, что в конечном итоге приводит к размытию спектра $\varepsilon''(\omega)$.

Если функция распределения времен релаксации удовлетворяет уравнению

$$f dy = \frac{1}{2\pi ch(1-\alpha)y + \cos 2\pi} dy, \quad (1.80)$$

где $y = \lg \frac{\tau}{\tau_{Hc}}$ и τ_{Hc} – наивероятнейшее время релаксации связанной воды, то такой спектр описывается уравнением Коул-Коула (1.44).

Приведенные выше рассуждения относятся, в основном, к связанной воде. Каковы же диэлектрические параметры воды полисорбции?

Отметим сначала некоторые характерные экспериментальные данные, которые можно выделить на примере пшеницы:

- изотерма $\alpha = f(W)$ содержит ярко выраженную точку сингулярности при $W_{кр} = 10\%$. Причем на длине волны 3 см $W > W_{кр}$ наблюдается резкое повышение чувствительности коэффициента ослабления α к влажности;

- производная $\frac{\partial \alpha}{\partial Q}$ при $W > W_{кр}$ отличается не больше чем на $\pm 10\%$ от α_{H_2O} (α_{H_2O} – постоянная ослабления для чистой воды) на длине волны 3 см;

- производная $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$ является постоянной положительной величиной, зависящей от влажности на длине волны 3 см.

Первые два факта могут навести на мысль, что диэлектрические параметры воды полисорбции на длине волны 3 см равны диэлектрическим параметрам свободной воды. Это может быть в двух случаях: либо время диэлектрической релаксации свободной воды и время релаксации воды полисорбции весьма близки, либо время релаксации воды полисорбции значительно больше времени релак-

сации свободной воды и отстоит от времени $\tau = \frac{3}{2\pi c}$ приблизительно на столько, на сколько меньше время релаксации свободной воды времени $\frac{3}{2\pi c}$.

В этом случае правая ветвь распределения $\alpha(\omega)$ на длине волны 3 см приведет к такому значению постоянной затухания, как и для свободной воды (см. рис. 1.8а). Очевидно, что в первом случае $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$ при $W > W_{кр}$ приведет к отрицательной величине, что противоречит экспериментальным данным.

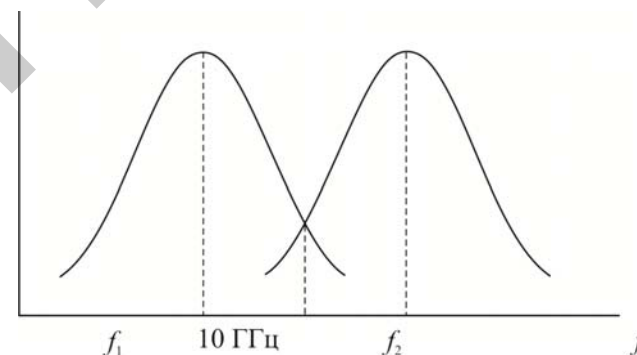


Рис. 1.8а. Две возможные ситуации расположения пика диэлектрической релаксации для воды полисорбции в зерне

С другой стороны, если принять вторую гипотезу, то $\frac{\partial \alpha}{\partial T} > 0$, по мере увеличения влажности величина $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$, как следует из линейной модели, будет возрастать, что также противоречит эксперименту.

Это противоречие, на наш взгляд, можно обойти, предположив, что время релаксации воды полисорбции соответствует второй гипотезе.

Однако энергия активации для этой формы воды весьма мала (значительно меньше, чем для свободной воды), так что при увеличении температуры зерна время диэлектрической релаксации прак-

тически не изменится (см. 1.79). В этом случае при увеличении температуры зерна частота релаксации связанной воды будет значительно смещаться в более высокочастотную область, так как энергия активации для этой формы связи весьма велика ($10 \div 15$ ккал/моль). Но так как при $W > W_{кр}$ количество связанной воды всегда одинаково, то независимо от влажности общее увеличение постоянной затухания при увеличении температуры на длине волны 3 см не будет зависеть от влажности. Сказанное выше поясняет рис. 1.8б.

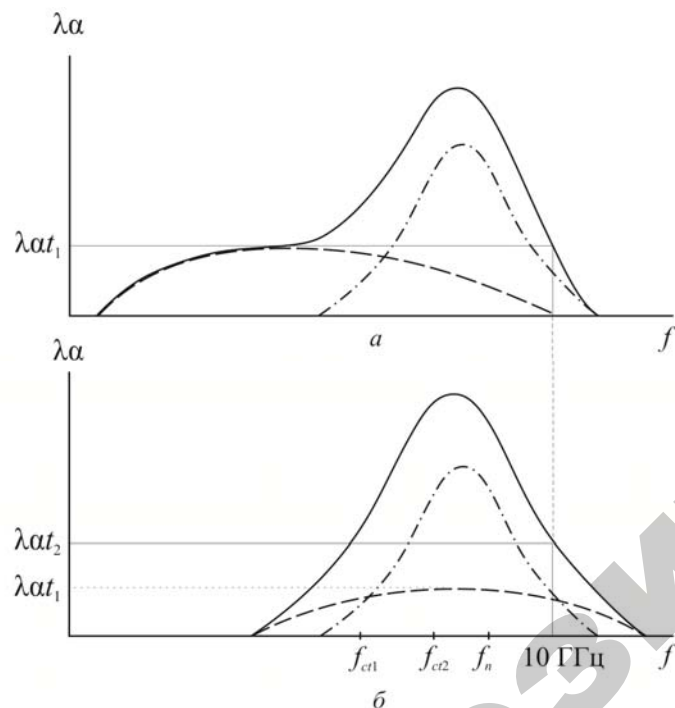


Рис. 1.8б. Расположение пиков диэлектрической релаксации для воды в зерне при температуре t_1 (а) и t_2 (б), $t_2 > t_1$.

штриховой линией показан пик диэлектрической релаксации для связанной воды; штрихпунктирной – для воды полисорбции, сплошной линией – суммарный пик; резонансные частоты для связанной воды при температурах t_1 и t_2 соответственно: f_n – резонансная частота для воды полисорбции, α_{t_1} и α_{t_2} – постоянные затухания при температурах t_1 и t_2

Сделаем еще несколько замечаний. Не все мелкодисперсные материалы должны обнаруживать ярко выраженную точку сингулярности на диэлектрических изотермах. Действительно, если сам мелкодисперсный гетерогенный диэлектрик является смесью различных сухих фракций, неоднородных в отношении их способности сорбировать влагу, то переход от связанной влаги к влаге полисорбции будет происходить плавно, по закону, близкому к предсказуемому формулой Бускера-Ивенса.

В этом случае следует ожидать, что $\frac{\partial \alpha}{\partial T}$ будет зависеть от величины влажности, что экспериментально подтверждено для торфа [68–70].

В заключение рассчитаем диэлектрические характеристики модели пшеницы, приняв следующие величины:

$$\rho_0 = 1,2 \text{ г/см}^3; S_{уд} = 220 \text{ м}^2/\text{г}; a_{max} = 100; W_{кр} = 0,1;$$

$$\varepsilon_{Ho\infty} = \varepsilon_{Hn\infty} = \varepsilon_{Hc\infty} = 5,1; \varepsilon_{Hcs}(T = 20^\circ \text{C}) = 60; \varepsilon_{Hns} = \varepsilon_{Hos} = 80,4;$$

$$\lambda_{Hcm} = 377 \text{ см}; \lambda_{Hnm} = 9,5 \text{ см}; \lambda_{Hom} = 1,79 \text{ см};$$

$$\Delta H_{Hc} = 15 \text{ ккал/моль}; \Delta H_{Hn} = 1 \text{ ккал/моль}; \Delta H_{Ho} = 4,6 \text{ ккал/моль}.$$

Для параметра распределения α выберем следующие величины $\alpha_{Hc} = 0,5; \alpha_{Hn} = 0,3; \alpha_{Ho} = 0$.

Расчеты будем проводить на основании следующих выражений. При $W < W_{кр}$

$$\alpha = \alpha_{Hc} \frac{\rho_0}{\rho_H} \Phi \frac{W}{1-W}, \quad (1.81)$$

$$\beta = \beta_0 + \Phi(\beta_c - \beta_0) + \frac{\rho_0 W}{\rho_H (1-W)} \Phi(\beta_{Hc} - \beta_0). \quad (1.82)$$

При $W > W_{кр}$

$$\alpha = \Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \left[\frac{W}{(1-W)} \alpha_{Ho} + \frac{\mu S_{уд}}{N_A \sigma} a_{max} f_1(\alpha_{Hn} - \alpha_{Ho}) + \frac{W_{кр}}{1-W_{кр}} (\alpha_{Hc} - \alpha_{Ho}) \right], \quad (1.83)$$

$$\beta = \beta_0 + \Phi \left\{ \frac{\rho_0}{\rho_H} \left[\frac{W}{1-W} (\beta_{Ho} - \beta_0) + \frac{\mu S_{уд}}{N_A \sigma} a_{max} f_1(\beta_{Hn} - \beta_{Ho}) + \frac{W_{кр}}{1-W_{кр}} (\beta_{Hc} - \beta_{Ho}) \right] + \beta_c - \beta_0 \right\} \quad (1.84)$$

Переход от α , β к ε' и ε'' осуществляется по хорошо известным выражениям [160]:

$$\varepsilon' = \beta^2 - \alpha^2 / \beta_0^2; \quad (1.85)$$

$$\varepsilon'' = 2\alpha\beta / \beta_0^2. \quad (1.86)$$

При расчетах принималось, что коэффициент заполнения изменяется с влажностью. Такое явление действительно имеет место, так как по мере увлажнения зерно набухает, а также меняется коэффициент трения между зёрнами. На основании научных данных, приведенных в работах [5, 7], мы рассчитали средние значения коэффициентов заполнения Φ в зависимости от влажности. Обобщенные результаты сведены в табл. 1.3:

Таблица 1.3

Среднее значение коэффициента заполнения Φ в функции влажности W

W	8 %	12 %	16 %	20 %	24 %	28 %	32 %	36 %
Φ	0,60	0,54	0,50	0,44	0,43	0,41	0,39	0,37

Эти значения были выбраны при расчетах диэлектрических свойств модели влажной пшеницы. На рис. 1.9а и 1.9б представлены теоретические зависимости $\varepsilon'(W)$ и $\varepsilon''(W)$ для рассмотренной модели пшеницы.

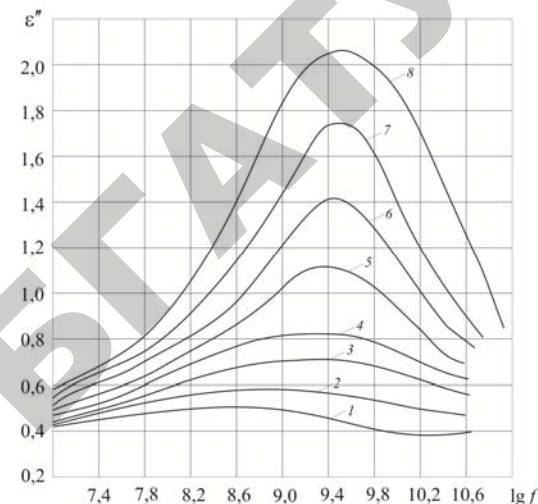


Рис. 1.9а. Расчетные зависимости ε'' от частоты при различных влагосодержаниях для модели пшеницы при $t = 20$ °C: 1 – $W = 8$ %; 2 – $W = 12$ %; 3 – $W = 16$ %; 4 – $W = 20$ %; 5 – $W = 24$ %; 6 – $W = 28$ %; 7 – $W = 32$ %; 8 – $W = 36$ %

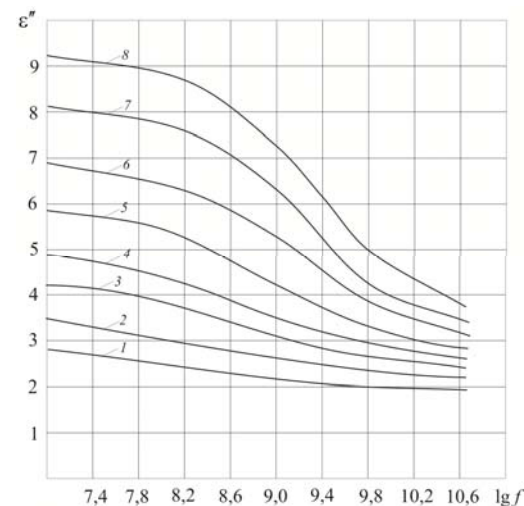


Рис. 1.9б. Расчетные зависимости ε' от частоты при различных влагосодержаниях для модели пшеницы при $t = 20$ °C (обозначения кривых – см. рис. 1.9а)

В связи с тем, что коэффициент поглощения с уменьшением длины волны возрастает ввиду наличия волнового множителя $\lambda/2\pi$, то для возможности сравнения на различных частотах строились зависимости действительной n и мнимой α от влажности, которые определяются выражениями:

$$\alpha = \lambda / 2\pi\alpha, \quad (1.87)$$

$$n = \lambda / 2\pi\beta. \quad (1.88)$$

Очевидно, что α и n зависят от частоты исключительно за счет дисперсионных свойств влажного материала.

На графиках, приведенных на рис. 1.10а и 1.10б, видны характерные изломы на зависимостях α от влажности на всех длинах волн. Интересно, что производная $\frac{\partial \alpha}{\partial W}$ возрастает при $\lambda < 20$ см, при переходе через $W_{кр}$ и убывает при $\lambda > 20$ см.

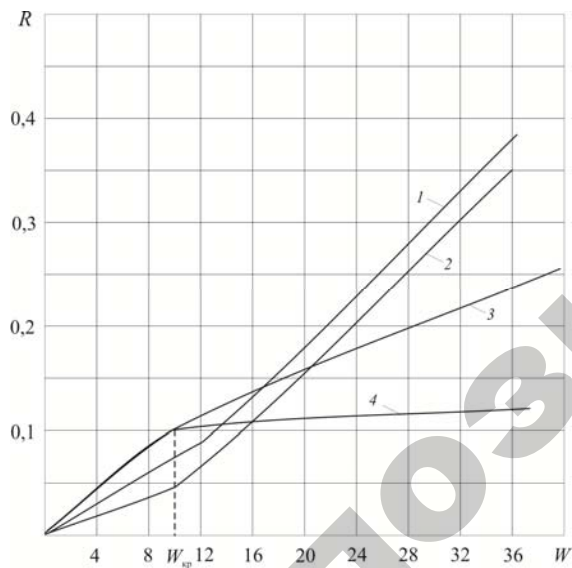


Рис. 1.10а. Расчетные зависимости мнимой части коэффициента преломления α от влагосодержания на различных длинах волн λ при $t = 20^\circ\text{C}$:
1 – $\lambda = 2$ см; 2 – $\lambda = 10$ см; 3 – $\lambda = 50$ см; 4 – $\lambda = 30$ см

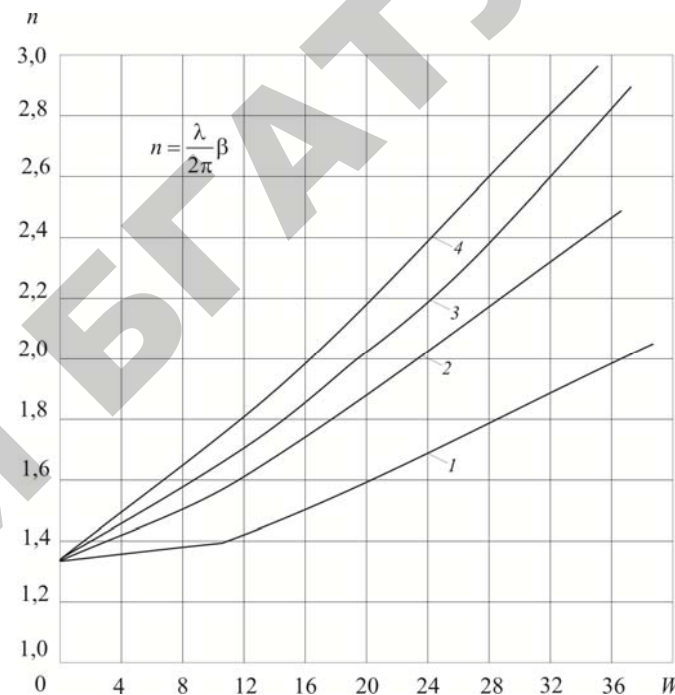


Рис. 1.10б. Расчетные зависимости действительной части коэффициента преломления n от влагосодержания на различных длинах волн λ при $t = 20^\circ\text{C}$ (обозначения кривых см. на рис. 1.9)

Этот характерный факт, который следует из наших теоретических положений. Он требует экспериментального подтверждения. Изменение n от влажности происходит более плавно, и излом отчетливо заметен только на длине волны 2 см. Отметим, что линейная зависимость между α и W является следствием убывания коэффициента заполнения Φ с ростом влагосодержания. Если бы такая зависимость отсутствовала и Φ был постоянным при любой влажности, то зависимость α от W при $V \sim W > W_{кр}$ была бы степенной функцией 2-го порядка (так как $\frac{W}{1-W} \sim W[1 + W]$).

1.5. Исследование диэлектрических свойств связанной воды в зерне в радио- и микроволновом диапазонах электромагнитного излучения

С физической точки зрения зерновая масса не является однородным веществом. Зерно – это гетерогенный (неоднородный) материал, который можно отнести к дисперсным системам [71]. Такие системы представляют собой гетерогенные смеси двух и более различных компонент, одна из которых образует непрерывную дисперсную среду, а остальные компоненты распределены по ее объему в виде мелких дисперсных частиц. Их размеры достаточно велики для того, чтобы сохранять основные физические и химические свойства данной компоненты смеси, в отличие от других неоднородных по составу веществ типа растворов, где дисперсные (рассеянные) компоненты предельно расщеплены вплоть до отдельных молекул и атомов (ионов). Дисперсные системы широко распространены в природе и в быту, к их числу относятся грунты, облака, пищевые и косметические продукты, строительные материалы, бумага и т. д.

Вода как составной компонент большинства дисперсных систем представляет особый интерес с точки зрения исследователя и инженера-практика. Во-первых, очень многие гетерогенные материалы в значительной мере обязаны своим существованием и своими специфическими свойствами воде как основному связующему веществу, например, биологические ткани и строительные материалы. Во-вторых, как стало известно в последние годы, в составе пористых дисперсных систем вода характеризуется особыми физическими свойствами, которые отличаются от свойств обычной свободной воды (так называемая связанная вода) [72–79]. Известно, например, что вблизи твердой поверхности или полимерных макромолекул она образует льдоподобную кластерную структуру [75, 78, 80], и в наибольшей степени эта ее особенность проявляется в мономолекулярном слое, непосредственно примыкающем к твердой фазе, но с удалением от нее, при переходе от одного молекулярного слоя к другому, локальные свойства воды непрерывно меняются, приближаясь к свойствам свободной воды [78, 80]. И несмотря на большое количество работ, посвященных данной теме, до сих пор не существует однозначного мнения о свойствах связанной воды. Одни исследователи считают,

что граничные значения ее локальной плотности и диэлектрической проницаемости в мономолекулярном межфазном слое идентичны свойствам льда [77, 78]. Другие выявляют отличия между данными фазами воды [74, 76], указывая, в частности, на существование дебаевской частоты релаксации связанной воды около 100 МГц [76], тогда как у льда аналогичная частота располагается примерно при 10 кГц [81, 82]. Вероятно, справедливой является точка зрения, согласно которой свойства связанной воды для разных гетерогенных систем неодинаковы и зависят от их состава.

Особое место среди влагосодержащих дисперсных систем занимают системы биологического происхождения (живые клетки, ткани и организмы), в которых вода является не просто одним из составных компонентов, но также играет важную активную роль. К зерну как биологическому материалу это относится в полной мере, причем не только на этапе активного динамического роста, но и на этапах его хранения, обработки и переработки в пищевые продукты. Поэтому большое научное и практическое значение имеет задача исследования физических свойств связанной воды в составе зерновых материалов, решению которой посвящен данный параграф. Здесь воспроизводятся основные результаты нашего исследования, опубликованные в работах [83–86]. Мы ограничимся рассмотрением диэлектрических свойств зерна пшеницы для разных частот проникающего электромагнитного излучения радио- и СВЧ-диапазонов. В качестве исходных данных для нашего рассмотрения используются результаты измерения комплексной диэлектрической проницаемости зернового материала в зависимости от его влагосодержания при разных частотах, которые приведены в работе [87] для зерна твердой озимой пшеницы. В мировой литературе достаточно много и более полных экспериментальных данных для зерна, однако авторы [87], помимо результатов измерения диэлектрической проницаемости, добросовестно приводят также данные по измерению плотности использованных образцов зерна и средней плотности отдельных зерен, без которых построение теоретической модели оказывается крайне затруднительным.

Для определения состава гетерогенных смесей и изучения свойств их отдельных компонент по измерениям диэлектрической проницаемости необходимо иметь адекватную теоретическую модель. Она должна устанавливать соответствие между физиче-

скими параметрами компонент смеси и параметрами системы в целом, которые измеряются в эксперименте. Для определения такого соответствия используются различные подходы: методы теории рассеяния, учитывающие статистические распределения при описании расположения и свойств частиц, сформированных разными компонентами смеси [88–95], и феноменологическое приближение, основанное на некоторых полуэмпирических законах [96–100]. Последнее приближение очень часто используется для моделирования диэлектрических свойств зерна как дисперсной системы, поскольку отличается предельной простотой и удобством применения. В рамках такого феноменологического подхода диэлектрическую проницаемость двухкомпонентных дисперсных систем описывают с помощью степенного закона смешения Лихтенекера [96–100]:

$$\varepsilon^{\sigma} = v_1 \varepsilon_1^{\sigma} + v_2 \varepsilon_2^{\sigma}, \quad (1.89)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость смеси;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и v_1, v_2 – диэлектрические проницаемости и объемные концентрации двух разных ее компонент;

σ – показатель степени закона смешения, удовлетворяющий неравенству Винера: $-1 \leq \sigma \leq 1$ [96–100].

Величина этого показателя степени выбирается в зависимости от пространственного расположения компонент. Например, если гетерогенная система представляет собой систему однородных чередующихся слоев из двух разных материалов, то $\sigma = \pm 1$, причем положительное значение берется в случае электрического поля, направленного вдоль параллельных границ слоев, а отрицательное – в случае ортогональности поля данным границам. Если же смесь состоит из мелкодисперсных хорошо перемешанных фаз, то $\sigma \rightarrow 0$, и в этом случае в пределе получается логарифмическая формула

$$\ln \varepsilon = v_1 \ln \varepsilon_1 + v_2 \ln \varepsilon_2. \quad (1.90)$$

Обычно для описания диэлектрических свойств зерна берут $\sigma = 1/2$, или, реже, $\sigma = 1/3$ [101], и полагают в качестве компоненты 1 связанную воду в зерне, а компоненты 2 – остальное вещество зерен. Однако такой подход нельзя признать вполне адекватным.

Дело в том, что зерно – это, как минимум, двухуровневая дисперсная система. В целом зерновой материал представляет собой двухкомпонентную дисперсную систему, в которой роль дисперсной среды играет воздух, а дисперсных частиц – отдельные зерна. Но и сами эти зерна как таковые являются очень сложными по строению дисперсными биологическими системами (рис. 1.11, [102]), в составе которых трудно выделить непрерывную дисперсную среду и отдельные дисперсные частицы, которые можно было бы соотнести с каким-либо однородным материалом.

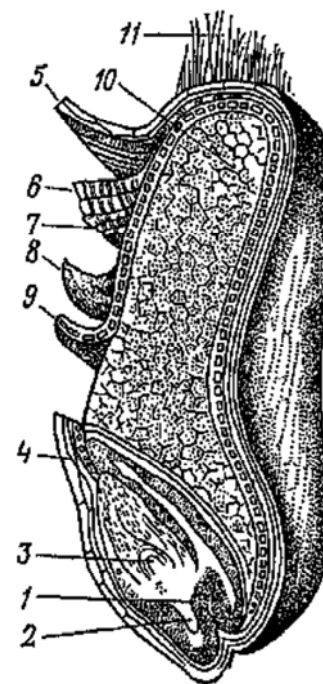


Рис. 1.11. Продольный разрез зерна пшеницы:
1 – зародыш; 2 – зачаточные корешки; 3 – почечка; 4 – щиток; 5–6 – плодовые оболочки; 7–8 – семенные оболочки; 9 – алейроновый слой эндосперма; 10 – эндосперм; 11 – хохолок

Следовательно, возникает необходимость построения новой теоретической модели диэлектрических свойств зерна, которая бы хоть в какой-то мере учитывала указанную его особенность как многоуровневой дисперсной системы. Построению такой модели посвящен первый раздел данного параграфа. Во втором разделе эта модель в полной мере используется для определения комплексной диэлектрической проницаемости связанной воды в зерне.

1.5.1. Теоретическая модель расчета диэлектрических свойств зернового материала как двухуровневой дисперсной системы

Итак, на исходном уровне детализации зерновой материал представляет собой дисперсную систему, состоящую из отдельных зерен (дисперсные частицы) и воздушных промежутков между ними (непрерывная дисперсная среда). В поле низкочастотного электромагнитного излучения с длиной волны λ , намного превышающей размеры зерен, усредненную диэлектрическую проницаемость ε_g такой системы можно описать известной формулой Рейнольдса-Хока [96–100]:

$$\varepsilon_g = 1 + (\varepsilon_k - 1)vK, \quad (1.91)$$

где $e_g = e'_g + ie''_g$ – комплексная диэлектрическая проницаемость всей системы;

$i = \sqrt{-1}$ – мнимая единица;

ε_k – средняя комплексная диэлектрическая проницаемость отдельных зерен;

v – их концентрация в объеме материала;

K – отношение средних значений напряженности электрического поля внутри зерен и во всем объеме смеси.

Диэлектрическая проницаемость непрерывной дисперсной среды (воздуха) здесь принимается равной единице.

Объемная концентрация зерен v вычисляется как отношение объемной плотности всего материала ρ_g к плотности отдельных

дисперсных частиц (зерен) ρ_k : $v = \rho_g / \rho_k$. Для зерна твердой озимой пшеницы при температуре $t = 24^\circ\text{C}$ зависимость этих плотностей от влагосодержания экспериментально изучалась в работе [87] (см. рис. 1.12). Данная зависимость хорошо аппроксимируется функцией

$$\rho_{g,k} = A_{g,k} - \frac{B_{g,k} u_{g,k}}{(1 + P_{g,k} u_{g,k}) \sqrt{1 + u_{g,k}^2}}, \quad (1.92)$$

где $u_{g,k} = (M - M_{g,k}) / \Delta_{g,k}$;

$A_g = 0,695$; $B_g = 0,145$; $P_g = 0,35$; $M_g = 0,192$; $\Delta_g = 0,115$;

$A_k = 1,363$; $B_k = 0,099$; $P_k = 0,32$; $M_k = 0,18$; $\Delta_k = 0,11$.

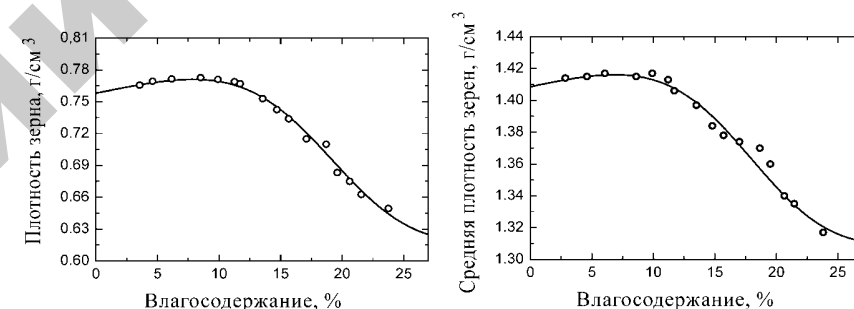


Рис. 1.12. Зависимость объемной плотности (слева) и плотности отдельных зерен (справа) от влагосодержания для твердой озимой пшеницы при 24°C : экспериментальные данные [85] (точки) и их теоретические аппроксимации согласно формуле (1.90) (непрерывные линии)

Указанные здесь числовые значения определялись методом простого подбора при условии оптимального приближения к экспериментальным данным.

Далее, M – влагосодержание, которое определяется отношением массы поглощенной воды m_w ко всей массе материала $m_k = m_{dk} + m_w$:

$$M = m_w / m_k, \quad (1.93)$$

где m_{dk} – масса абсолютно сухих зерен.

Здесь и везде ниже дополнительный индекс «*d*» у каждого параметра обозначает его значение в предельном случае $M \rightarrow 0$. Отметим также, что во всех формулах влагосодержание M берется в абсолютных единицах или в процентах, если есть соответствующее обозначение.

Отношение K обычно определяется в предположении, что каждая дисперсная частица смеси погружена в непрерывную эквивалентную среду с некоторой эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} . Такая модель соответствует случаям, когда длина волны электромагнитного излучения намного превышает размеры дисперсных частиц смеси. Это простое и эффективное приближение, учитывающее поле многократной дифракции всех частиц при их плотном расположении. Оно дает возможность использовать для данного отношения формулы, полученные в электростатике для частиц заданной формы в однородном электрическом поле [103]. Например, для шара:

$$K = \{1 + [(\epsilon_k / \epsilon_{eff}) - 1] / 3\}^{-1};$$

для бесконечного цилиндра, перпендикулярного направлению поля:

$$K = \{1 + [(\epsilon_k / \epsilon_{eff}) - 1] / 2\}^{-1};$$

для цилиндра, параллельного полю, $K = 1$.

Однако в нашем случае поле не является статическим, и форма частиц отличается от шаровой и цилиндрической. Чтобы учесть подобные отклонения от идеальных случаев, предположим, что отношение K определяется следующим общим выражением:

$$K = D \{1 + S[(\epsilon_k / \epsilon_{eff}) - 1]\}^{-1},$$

где D и S – комплексные параметры, имеющие смысл коэффициентов размерности и формы дисперсных частиц.

Для смесей с высокой концентрацией компонент, как в случае зерна, диэлектрическую проницаемость ϵ_{eff} полагают равной диэлектрической проницаемости всей смеси ϵ_g [96–99]:

$$K = \frac{D}{1 + [(\epsilon_k / \epsilon_g) - 1] S}. \quad (1.94)$$

В случае очень большой длины волны следует ожидать, что D будет близко к единице, а величина S будет находиться в диапазоне от 0 до 1/2. Отдельные зерна имеют форму, близкую к форме сфероидов. Если отсутствуют внешние воздействия, создающие преимущественную ориентацию этих сфероидов в каком-либо пространственном направлении (например, давление, длительная встряска), то усредненную форму зерен можно считать близкой к сферической, и для них величина S должна быть примерно равной 1/3. Очевидно, что нестатический характер поля должен вносить свои поправки к указанным значениям коэффициентов размерности и формы, и величина этих поправок будет определяться отношением размера дисперсных частиц к длине волны электромагнитного излучения:

$$D = 1 + C_D(d / \lambda); \quad S = (1/3) + C_S(d / \lambda), \quad (1.95)$$

где C_D и C_S – некоторые коэффициенты.

Более того, переменное поле может испытывать дифракцию и рассеяние на поверхности дисперсных частиц [33]. Это будет вызывать некоторые потери электромагнитной энергии внутри материала и может быть описано как дополнительная комплексность его диэлектрической проницаемости (1.91). Поэтому коэффициенты S и D следует считать комплексными.

После подстановки выражения (1.94) в формулу (1.91) из последней получается квадратное уравнение относительно диэлектрической проницаемости зерна ϵ_g для известной диэлектрической проницаемости зерен ϵ_k [85]. И обратно, по измеренным значениям проницаемости всего материала ϵ_g это уравнение позволяет вычислять соответствующие значения средней проницаемости зерен.

Далее, как мы уже отмечали, каждое зерно в отдельности следует рассматривать как дисперсную подсистему следующего уровня. Однако в отличие от первичной дисперсной системы она характе-

ризуется значительно более сложной структурой, для которой трудно определить форму дисперсных частиц и их пространственное расположение. Диэлектрические свойства подобных систем обычно описывают с помощью степенного закона смешения Лихтенекера (1.89) [96–100]:

$$\varepsilon_k^\theta = \varepsilon_{ks}^\theta v_{ks} + \varepsilon_w^\theta v_{kw} \quad (1.96a)$$

или

$$\ln \varepsilon_k = \theta^{-1} \ln [(1 - v_{kw}) \exp (\theta \ln \varepsilon_{ks}) + v_{kw} \exp (\theta \ln \varepsilon_w)], \quad (1.976)$$

где θ – вещественный показатель степени;

ε_w – диэлектрическая проницаемость воды;

v_{kw} – ее объемное содержание в зернах;

ε_{ks} и $v_{ks} = 1 - v_{kw}$ – диэлектрическая проницаемость и объемное содержание остального вещества зерен. Под ним понимается твердое органическое вещество, заполненное развитой сетью воздушных микрокапилляров, поэтому для него также можно записать:

$$\varepsilon_{ks}^\chi = \varepsilon_{sm}^\chi v_{sm} + \varepsilon_a^\chi v_{sa} \quad (1.97a)$$

или

$$\ln \varepsilon_{ks} = \chi^{-1} \ln [v_{sm} \exp (\chi \ln \varepsilon_{sm}) + v_{sa}], \quad (1.986)$$

где χ – другой вещественный показатель степени;

$\varepsilon_a = 1$ и v_{sa} – диэлектрическая проницаемость и объемное содержание воздуха в объеме зерен, не занятом водой;

ε_{sm} и v_{sm} – диэлектрическая проницаемость и объемное содержание твердого вещества в этом объеме.

Как отмечалось выше, величина показателя θ или χ обычно определяется взаимным расположением компонент в дисперсной системе [98] и согласно неравенству Винера лежит в пределах от -1 до $+1$. Накопленные к настоящему времени данные позволяют предположить, что это утверждение допускает уточнение: величина показателя степенного закона смешения зависит от упорядочения простран-

ственного расположения компонент смеси. Действительно, для смеси с компонентами, разделенными на плоские слои, этот показатель равен $+1$ или -1 в случаях ортогональности или параллельности слоев направлению внешнего электрического поля [98]. А для дисперсной системы, состоящей из мелкодисперсных хорошо перемешанных фаз, данный показатель равен нулю. Эти предельные случаи можно считать соответствующими наибольшей пространственной упорядоченности и неупорядоченности дисперсной системы. В промежуточных случаях ($0 < \theta < 1$) наше предположение ведет к допущению, что с уменьшением хаотичности и повышением пространственного упорядочения в расположении компонент должна увеличиваться величина показателя степени θ или χ . Тем самым, наряду с термодинамическим показателем организованности структуры, каковым является энтропия, для дисперсных систем вводится понятие диэлектрического упорядочения, которое связывается с величиной показателя степенного закона смешения (8) или (9) для диэлектрической проницаемости данной системы.

Будем допускать, что показатели степени θ для частиц воды в (1.96) и χ для воздушных микрокапилляров в (1.97) не совпадают. Это может соответствовать неоднородному распределению частиц воды внутри воздушных микрокапилляров зерен, когда пространственная структура размещения частиц воды отличается от пространственной структуры системы микрокапилляров. Более того, мелкие частицы поглощаемой зернами воды могут встраиваться непосредственно в твердое органическое вещество зерен, увеличивая их объем и минуя существующие воздушные микропоры. Данное явление можно объяснить как образование новых микротрещин в твердом веществе в процессе поглощения зернами влаги [104] и немедленное их заполнение поглощаемой водой.

В уравнениях (1.96) и (1.97) присутствуют параметры, характеризующие объемную концентрацию различных фаз внутри зерен: твердой (органическое вещество зерен), жидкой (связанная вода) и газообразной (воздушные микрокапилляры). Попытаемся выразить эти параметры через макроскопические плотности зернового материала в целом и усредненной плотности отдельных зерен. Для этого предположим, что объем, плотность и диэлектрические свойства твердого органического вещества зерен неизменны при

различных значениях влагосодержания, если исключить из него воздушные микрокапилляры и микротрещины, которые могут заполняться водой. Конечно, это приближение, ведь зерно – это активная биологическая система. Однако оно необходимо, чтобы остаться в рамках феноменологического рассмотрения и исключить из него трудно определяемые и неизмеряемые физические параметры.

В предельном случае отсутствия влаги в зернах ($M \rightarrow 0$) их диэлектрическая проницаемость ε_k ($\varepsilon_k \rightarrow \varepsilon_{dk}$) согласно уравнению (1.96) совпадает с проницаемостью ε_{ks} : $\varepsilon_{ks} = \varepsilon_{dk}$ при $M = 0$. Тогда из (1.97) для диэлектрической проницаемости твердого вещества ε_{sm} применительно к данному случаю будем иметь:

$$\ln \varepsilon_{sm} = \chi^{-1} \ln [v_{dsm}^{-1} \exp(\chi \ln \varepsilon_{dk}) - (v_{dsa} / v_{dsm})].$$

С учетом последнего соотношения уравнение (1.98) при любых M примет вид:

$$\ln \varepsilon_{ks} = \frac{1}{\chi} \ln \left(\frac{v_{sm}}{v_{dsm}} \exp(\chi \ln \varepsilon_{dk}) + v_{sa} - \frac{v_{dsa}}{v_{dsm}} \right). \quad (1.98)$$

Из (1.93) найдем, что масса сухих зерен пропорциональна массе влажных зерен: $m_{dk} = m_k(1 - M)$, а учитывая связь между массой, плотностью и объемом ($m = \rho V$), будем иметь:

$$V_{dk} / V_k = (\rho_k / \rho_{dk})(1 - M). \quad (1.99)$$

Кроме того, непосредственно из определения (1.93) для объемного содержания воды в зернах $v_{kw} = V_{kw} / V_k$ получаем [29]:

$$v_{kw} = M \rho_k / \rho_w. \quad (1.100)$$

Будем полагать, что плотность связанной воды ρ_w совпадает с плотностью свободной воды: $\rho_w = 1 \text{ г/см}^3$. Хотя считается, что структура связанной воды близка структуре льда, его плотность (примерно $0,92 \text{ г/см}^3$) немного отличается от плотности свободной воды. Такое отличие оказывается малосущественным в сравнении с отличиями диэлектрических свойств этих фаз воды.

Объем зерен складывается из объемов, занимаемых твердым веществом, воздушными микрокапиллярами и водой, поэтому для объемных концентраций данных фаз в зернах v_{ks} , v_{ka} и v_{kw} справедливо соотношение

$$v_{ks} + v_{ka} + v_{kw} = 1. \quad (1.101)$$

Пусть при каком-то значении влагосодержания M_0 объем воздушных микропор внутри зерен равен нулю. Тогда объем твердого вещества V_{ks} будет равен объему зерен V_{k0} за вычетом объема имеющейся воды V_{w0} : $V_{ks} = V_{k0} - V_{w0} = V_{k0}(1 - v_{kw0})$, или $V_{ks} = V_{k0}[1 - M_0(\rho_{k0}/\rho_w)]$, где индекс 0 у параметра обозначает его значение при $M = M_0$. Но поскольку объем V_{ks} считается неизменным, то для любой влажности M

$$v_{ks} = V_{ks} / V_k = (V_{k0} / V_k)[1 - M_0(\rho_{k0} / \rho_w)].$$

Отношение объемов зерен V_{k0}/V_k можно выразить через их плотности, если использовать соотношение (11) для двух разных влажностей M и M_0 . Тогда

$$v_{ks} = \frac{\rho_k(1 - M)}{\rho_{k0}(1 - M_0)} \left(1 - M_0 \frac{\rho_{k0}}{\rho_w} \right). \quad (1.102)$$

Тем самым с помощью (1.100) и (1.102) определились две из трех объемных концентраций, входящих в соотношение (1.101). Оставшаяся третья концентрация воздушных капилляров в зернах может быть вычислена из этого соотношения: $v_{ka} = 1 - v_{ks} - v_{kw}$. Остальные объемные параметры, входящие в уравнения (1.97) и (1.98), определяются простыми выражениями: $v_{sa} = v_{ka}/v_{ks}$; $v_{sm} = 1 - v_{sa}$, и аналогично для случая, когда $M \rightarrow 0$: $v_{dsa} = v_{dka}/v_{dks}$; $v_{dsm} = 1 - v_{dsa}$.

В качестве значения влагосодержания M_0 , при котором объем воздуха внутри зерен принимается равным нулю, может быть использовано значение M , при котором его объемная концентрация v_{ka} минимальна. Оно может быть легко установлено с помощью тестовых расчетов по формулам (1.92) и (1.100)–(1.102). Для зерна твердой озимой пшеницы это будет значение $M_0 = 13,8 \%$.

Тогда формулы (1.100)–(1.102) однозначно определяют объемные концентрации всех трех фаз внутри зерен при разных значениях их влагосодержания M , если принимать во внимание изменение плотности зерен с изменением M по закону (1.92). Соответствующие зависимости графически представлены на рис. 1.12. Здесь же показан график изменения относительной величины $\Delta V_k / V_{dk} = (V_k - V_{dk}) / V_{dk}$, которая вычислялась с помощью соотношения (1.99). Он наглядно показывает, сколь сильно меняется объем зерен V_k в процессе поглощения воды по сравнению с их объемом V_{dk} в абсолютно сухом состоянии.

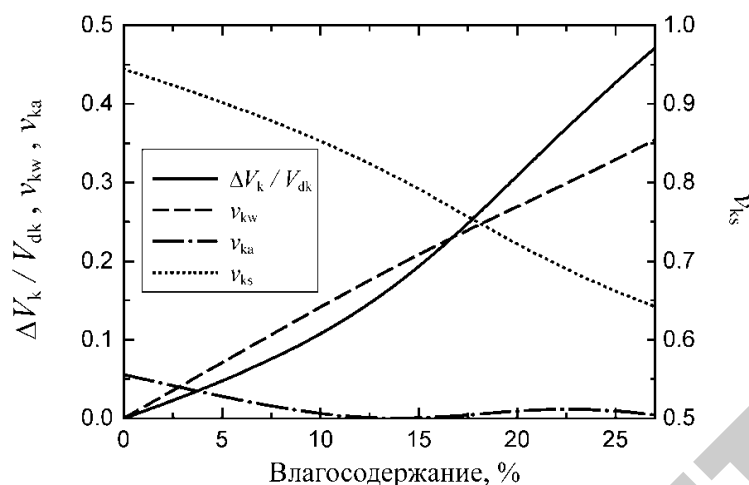


Рис. 1.13. Изменение объемного содержания воды v_{kw} , воздуха v_{ka} , твердого вещества v_{ks} в зернах и относительного увеличения их объема ΔV_k в сравнении с объемом сухих зерен V_{dk} в зависимости от влагосодержания зерна твердой озимой пшеницы при 24 °C

Тот факт, что объем воздуха внутри зерен при $M = M_0$ полагался равным нулю, совсем не означает, что при данном значении влагосодержания все воздушные микрокапилляры полностью заполнены водой. Достаточно считать, что оставшиеся при этом воздушные микрополости в зернах никогда не заполняются влагой. Тогда их влияние на диэлектрическую проницаемость зерен в (1.97) будет автоматически включаться в проницаемость твердого вещества ε_{ks} , поскольку послед-

няя выражается через диэлектрическую проницаемость абсолютно сухих зерен ε_{dk} посредством соотношения (1.96).

Итак, если известна комплексная диэлектрическая проницаемость сухих зерен ε_{dk} и диэлектрическая проницаемость воды ε_w , а также установлены значения показателей степенных законов смещения θ и χ , то по формулам (1.91), (1.93), (1.94)–(1.98), (1.100)–(1.102) можно рассчитать комплексную диэлектрическую проницаемость зерна в зависимости от его влагосодержания. Кроме того, нужно знать коэффициенты C_D и C_S , определяющие параметры размерности и формы зерен D и S (1.95) в зависимости от частоты. Однако влияние этих коэффициентов будет заметным только при сравнительно высоких частотах (более 1 ГГц).

Предложенная модель позволяет также решать обратную задачу определения диэлектрических свойств связанной воды по измеренным значениям диэлектрической проницаемости зерна при различных влажностях. Остальная часть данного параграфа посвящена решению этой задачи.

1.5.2. Диэлектрические свойства связанной воды в зерне

На рис. 1.14 воспроизведены данные по измерению комплексной диэлектрической проницаемости зерна твердой озимой пшеницы на некоторых частотах при температуре $t = 24$ °C, которые приведены в работе [87]. При их анализе сразу обращают на себя внимание две закономерности. Во-первых, с увеличением частоты проницаемость уменьшается; это правило строго соблюдается для вещественной части (диэлектрической постоянной) зерна и приближенно для мнимой его части (фактора потерь) [87]. Во-вторых, и вещественная, и мнимая части диэлектрической проницаемости зерна являются монотонно возрастающими функциями влагосодержания M . В случае высоких частот наиболее быстрый рост этих величин достигается на участке от 5 % до 15 % влагосодержания, а затем, при $M > 15$ %, он замедляется. Однако для низких частот имеет место обратная закономерность: сначала диэлектрическая постоянная и фактор потерь растут сравнительно медленно с возрастанием M , но затем, при $M > 18$ %, начинается стремительный рост данных величин. При этом абсолютная величина ε_g может достигать значений свыше

700 относительных единиц (для частоты 250 Гц), что почти на порядок больше величины диэлектрической проницаемости свободной воды и льда на такой же частоте [105]. Но согласно законам (1.91) и (1.96) проницаемость смеси по величине меньше проницаемостей составляющих ее компонент, поэтому величина проницаемости воды должна быть еще больше указанной величины. Следовательно, при низких частотах связанная вода внутри зерен проявляет свойства, существенно отличающие ее от обычной свободной воды и льда. Хорошо известно, что при низких частотах вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости водных растворов многих органических и неорганических веществ намного превышают по величине диэлектрическую постоянную и фактор потерь чистой воды [106]. Поэтому можно предположить, что внутри зерен накапливается не чистая вода, а водный раствор различных веществ, которые поступают сюда из твердой фазы. Однако при выводе формул для расчета диэлектрической проницаемости твердого вещества в зернах (1.98)–(1.102) мы предполагали, что его объем, плотность и диэлектрические свойства остаются постоянными независимо от влагосодержания. Оба эти предположения не будут противоречивыми, если считать, что количество растворяемого в воде вещества пренебрежимо мало по сравнению с общей массой твердого вещества и его убыль не оказывает заметного влияния на объем, плотность и диэлектрическую проницаемость оставшейся твердой массы зерен. В противном случае процедура определения объемных концентраций и диэлектрических проницаемостей различных фаз внутри зерен существенно усложняется.

Рассмотрим выражение, аналогичное выражению (1.92), которое описывает зависимость диэлектрической проницаемости ε_w водных растворов от частоты ω [36]:

$$\varepsilon_w(\omega) = \varepsilon(\infty) + \frac{\varepsilon(0) - \varepsilon(\infty)}{1 - i\omega\tau_w} + \sum_m \frac{P_m}{1 - i\omega\tau_m} + \frac{i}{\omega} \sum_n Q_n \sigma_n + \sum_k R_k \frac{\omega_k \Gamma_k}{\omega_k^2 - \omega^2 - i\omega\Gamma_k}, \quad (1.103)$$

где P_m , Q_n и R_k – амплитудные множители, не зависящие от частоты.

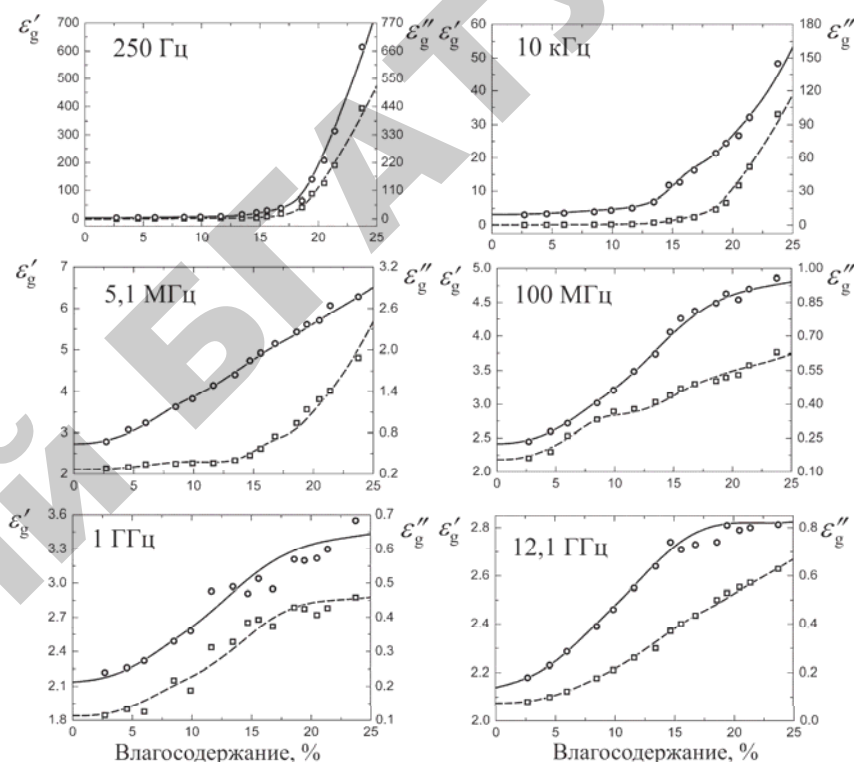


Рис. 1.14. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости зерна твердой озимой пшеницы ε_g от влагосодержания при 24 °С и различных частотах: экспериментальные данные [85] (точки) и результаты расчетов (кривые). Кружки и сплошные линии соответствуют диэлектрической постоянной ε'_g , квадратики и пунктирные кривые – фактору диэлектрических потерь ε''_g

Первые два слагаемых в правой части (1.103) описывают дипольную релаксацию чистой воды в дебаевском приближении [107, 108] ($\varepsilon(0)$ и $\varepsilon(\infty)$ – предельные значения ее диэлектрической проницаемости ε при $\omega \rightarrow 0$ и при $\omega \rightarrow \infty$, τ_w – время релаксации), следующие два слагаемых характеризуют вклад растворенных веществ в результирующую диэлектрическую проницаемость вследствие дипольной релаксации и ионной проводимости; здесь учитывается возможность присутствия разных веществ с разными временами релаксации τ_m и с разной ионной проводимостью σ_n .

Кроме того, в правую часть (1.103) дополнительно введено последнее слагаемое, которое описывает резонансные процессы [107, 108] на частотах ω_k с коэффициентами диссипации Γ_k . Обычно такие процессы связываются с электронной поляризацией и наблюдаются на оптических частотах. Однако они могут отвечать внутримолекулярным колебаниям подвижных фрагментов сложных молекул, подобно тому, как это происходит в жидких кристаллах при воздействии электромагнитного поля [109]. В этом случае резонансные частоты попадают в микроволновую область, и амплитуды резонансов в данной частотной области относительно невелики. Эти две особенности микроволновых резонансов сложных молекул могут объясняться сравнительно малой подвижностью и большой массой колеблющихся молекулярных фрагментов.

Монотонное убывание вещественной части результирующей проницаемости (диэлектрической постоянной) (1.103) с ростом частоты связано с дебаевским законом дипольной релаксации самой воды и растворенных веществ [106], тогда как для мнимой части (фактора потерь) этот закон обуславливает наличие локальных максимумов. Для нее монотонное убывание обеспечивается другим механизмом поляризации – ионной проводимостью раствора. К этому следует добавить, что каждый из резонансов внутримолекулярных колебаний определяет локальное возрастание вещественной и мнимой части проницаемости (1.103) на отдельных участках зависимости этих величин от частоты. Амплитудные множители P_m , Q_n и R_k в (1.103) зависят от концентрации соответствующих растворенных веществ. Однако нам неизвестен характер этой зависимости, и неизвестно, как концентрации различных веществ в воде меняются с изменением ее весового содержания в зернах. Поэтому в дальнейшем уравнение (1.103) будем использовать лишь в качестве иллюстрации, а более строгое изучение диэлектрических свойств связанной воды проведем, используя разложение ее диэлектрической проницаемости по функциям, явно зависящим от влагосодержания зерна. Поясним сказанное.

Наша исходная задача состоит в том, чтобы определить диэлектрическую проницаемость связанной воды на основе построенной выше теоретической модели расчета комплексной диэлектрической проницаемости зерновых материалов. Диэлектрическая проницаемость всего материала в целом нам известна (см. рис. 1.13). Тогда проница-

емость воды нам придется находить, решая систему уравнений указанной теоретической модели для нескольких значений частоты излучения и нескольких значений влагосодержания зерна (в отличие от свободной воды, проницаемость воды связанной внутри пористых систем может изменяться с изменением ее количества внутри пористой системы). То есть нам придется решать функциональное уравнение для диэлектрической проницаемости связанной воды, определяя ее как функцию частоты и влагосодержания. Существует метод решения функциональных уравнений, который состоит в том, что неизвестная функция ищется в виде разложения по заранее известным функциям, называемых базисными, с неизвестными коэффициентами. Обычно в подобных случаях рассматривают разложение неизвестной функции по системе бесконечного числа ортогональных базисных функций (синусы, косинусы или полиномы Лежандра), однако мы попытаемся применить систему неортогональных функций с тем, чтобы можно было приближенно ограничиться минимальным их числом. С этой целью необходимо так выбирать базисные функции, чтобы они были достаточно близки к искомой неизвестной функции. В нашем случае это сложная задача. С одной стороны, для их определения нужно знать точное решение для проницаемости воды при разных частотах, с другой стороны, такое решение с самого начала нужно строить в виде разложения по данным функциям. Но, как выяснилось в процессе расчетов, общий характер функциональной зависимости связанной воды от влагосодержания слабо зависит от исходных параметров теоретической модели: коэффициентов CD и CS , параметров размерности и формы зерен D и S (1.95), показателей θ и χ степенных законов смещения (1.96) и (1.97), а также диэлектрической проницаемости сухих зерен ϵ_{dk} . Поэтому процедуру выбора базисных функций и определения проницаемости воды можно проводить методом последовательных приближений, задавая изначально некоторые значения неизвестных параметров теоретической модели и меняя эти значения в ту или иную сторону в зависимости от конечного результата.

Здесь можно было бы привести графики зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости связанной воды от частоты и влагосодержания, которые получаются из экспериментальных данных рис. 1.15 на основе расчетов по приведенной выше теоретической модели при различных значениях исходных параметров C_D и C_S , D и S ,

показателей θ и χ , а также проницаемости сухих зерен ε_{dk} . Однако ради экономии мы сразу приведем конечный результат нашего исследования. На рис. 1.14 показаны значения комплексной диэлектрической проницаемости связанной воды в зерне, вычисленные с помощью формул (1.91), (1.92), (1.94)–(1.98), (1.100)–(1.102) для экспериментально измеренных значений проницаемости зерна в целом [85] (рис. 1.12) при следующих значениях параметров:

$$C_D = 0,08 + 0,25i; \quad C_S = 1, \quad (1.104)$$

$\chi = 0,25$; θ примерно равно 0,5, а диэлектрическая проницаемость абсолютно сухих зерен ε_{dk} соответствует значениям, показанным на рис. 1.15. При небольших вариациях указанных параметров общий вид функциональных зависимостей, показанных на рис. 1.14, остается примерно таким же. Сейчас же для конкретной формулировки задачи нам достаточно грубо оценить характер зависимости проницаемости связанной воды от влажности.

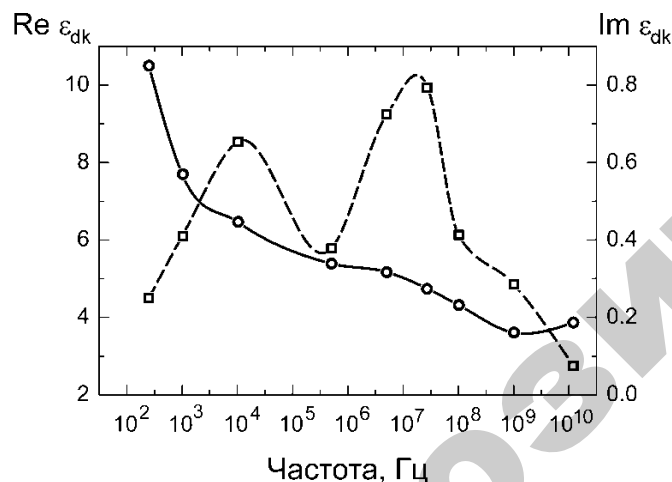


Рис. 1.15. Комплексная диэлектрическая проницаемость сухих зерен твердой озимой пшеницы ε_{dk} как функция частоты при 24 °C: расчетные результаты (точки) и их математическая интерполяция (кривые). Кружки и сплошные линии соответствуют диэлектрической постоянной $Re \varepsilon_{dk}$, квадратики и пунктирные кривые – фактору потерь $Im \varepsilon_{dk}$.

Первую базисную функцию выбираем на основе зависимости диэлектрической постоянной воды при наиболее высокой частоте (12,1 ГГц), поскольку здесь согласно (1.103) влияние растворенных веществ на ее проницаемость должно быть минимальным. Мы будем использовать функцию

$$w_1(M) = 2,65 \frac{\sqrt{(4M)^2 + 0,09} - 0,3}{(4M)^3 + 1}. \quad (1.105a)$$

С уменьшением частоты у кривых на рис. 1.14 появляются горбы с максимумами при $M = 0,09$ и $M = 0,17$. Они могут быть описаны дополнительными функциями

$$w_2(M) = 1,75 \frac{(M / 0,09)^2}{1 + (M / 0,09)^8}, \quad (1.105b)$$

$$w_3(M) = \begin{cases} 0; & M \leq 0,03 \\ 0,65 \left(\frac{u_1}{\sqrt{1+u_1^2}} - \frac{u_2}{\sqrt{1+u_2^2}} \right); & M > 0,03 \end{cases} \quad (1.105c)$$

где $u_1 = (M - 0,15) / 0,02$;
 $u_2 = (M - 0,21) / 0,03$.

Наконец, следует учесть возможность быстрого роста проницаемости с ростом влагосодержания начиная от значения $M = 0,18$ и вплоть до $M = 0,25$ при низких частотах. Такой рост можно моделировать функцией:

$$w_4(M) = 0,4 \left\{ 20M + \sqrt{[20(M - 0,185)]^2 + 0,08} - 3,7108 \right\} \quad (1.105d)$$

Численные параметры в (1.105a)–(1.105d) выбирались из условия наилучшей аппроксимации вышеуказанной зависимости и упомянутых добавок при низких частотах с точностью до постоянного слагаемого и множителя.

Таким образом, диэлектрическую проницаемость связанной воды в зерне мы будем искать в виде разложения:

$$\varepsilon_w(M) = a_{w0} + a_{w1}w_1(M) + a_{w2}w_2(M) + a_{w3}w_3(M) + a_{w4}w_4(M), \quad (1.106)$$

где a_{wm} ($m = 0, 1, 2, 3, 4$) – комплексные коэффициенты, не зависящие от влагосодержания зерна,

$w_n(M)$ ($n = 1, 2, 3, 4$) – вещественные базисные функции (1.106), графики которых приведены на рис. 1.16.

При $M \rightarrow 0$ функции w_1, w_2, w_3 и w_4 (1.105) обращаются в нуль, поэтому в данном случае $\varepsilon_w \rightarrow a_{w0}$. Рассмотрим физический смысл этого результата. Каждое отдельное зерно как пористая дисперсная система характеризуется сильными гидрофильными свойствами. Влага, поглощаемая сухим зерном, поначалу стремится сформировать мономолекулярный слой на стенках воздушных микрокапилляров, поскольку молекулы воды этого слоя наиболее энергично взаимодействуют с активными центрами сорбции [104]. И обратно, в процессе высушивания зерна влага из данного слоя выделяется в последнюю очередь. Отсюда ясно, что коэффициент a_{w0} описывает диэлектрическую проницаемость связанной воды в мономолекулярном межфазном слое.

Однако здесь речь идет скорее об общей тенденции, чем о строгой закономерности. С увеличением количества поглощенной воды воздушные микрокапилляры заполняются водой неравномерно: где-то еще только возникает мономолекулярный слой, а где-то уже появляются слои в две и три молекулы воды, для которых проницаемость возрастает и приближается к проницаемости свободной воды. Об этом говорит достаточно быстрый рост функции w_1 (1.105a) при общей влажности свыше 3 % (см. рис. 1.16). Но при достижении влажности $M = 15\%$ этот рост замедляется, а затем, при $M = 22\%$, прекращается совсем. Такой характер зависимости функции w_1 можно объяснить увеличением доли связанной воды, находящейся в межфазном слое или непосредственно вблизи него. Действительно, в процессе насыщения зерен влагой по достижении величины влагосодержания свыше 15 % твердое вещество эндосперма зерна частично разрушается с образованием густой сети микротрещин [104], поверхность которых служит для расширения межфазного слоя. Этот

факт подтверждают и расчеты объемного содержания различных фаз в зернах, основанные на измерениях плотности (см. рис. 1.12). При влагосодержании M свыше 15 % величина относительного увеличения объема зерен $\Delta V_k/V_{dk}$ с ростом M начинает расти быстрее, чем объемное содержание воды в зернах v_{kw} , а объемное содержание воздуха v_{ka} по достижении минимума при $M \approx 14\%$ снова возрастает. Такое возможно, если объем воздушных микрополостей внутри зерен с ростом влагосодержания увеличивается быстрее, чем объем сорбированной воды.

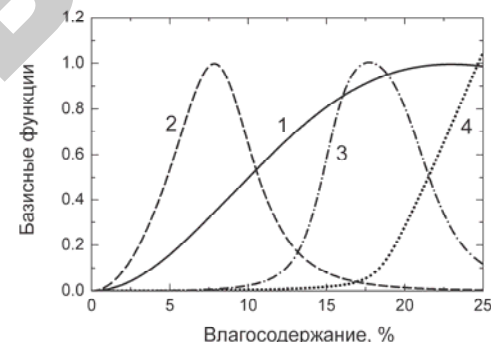


Рис. 1.16. Базисные функции влагосодержания, используемые для представления диэлектрической проницаемости связанной воды

Функция w_2 (1.105b) характеризуется более быстрым ростом, чем w_1 , но по достижении максимума при $M = 9\%$ потом стремительно убывает. По-видимому, эта функция описывает вклад в диэлектрическую проницаемость связанной воды (1.106) какого-то растворенного вещества, которое хорошо захватывается влагой на поверхность мономолекулярного межфазного слоя, но с увеличением массы поглощенной воды и приближением ее свойств к свойствам свободной воды это вещество выпадает из раствора. Подобное поведение характерно и для другого растворенного вещества, вклад которого описывается функцией w_3 (1.105c). Вероятно, повышение концентрации этого вещества в растворе связанной воды способствует осаждению из раствора предыдущего вещества. И четвертая функция w_4 (1.105d) может описывать вклад еще одного вещества, которое начинает растворяться только при наличии достаточного

количества воды, приближенной по своим свойствам к свободной воде. Следовательно, мы можем заключить, что функции (1.105) характеризуют изменение концентрации различных растворенных веществ в связанной воде внутри зерен при изменении влагосодержания.

Не следует считать, что функция w_1 описывает диэлектрическую проницаемость чистой воды, и лишь w_2 , w_3 и w_4 характеризуют наличие растворенных веществ. Эта функция также может соответствовать водному раствору одного или даже нескольких веществ, но если только их концентрация в связанной воде постоянна и не зависит от влагосодержания зерна. Точно так же каждая из функций w_2 , w_3 и w_4 может описывать вклад сразу нескольких разных веществ, при условии, что их концентрации в воде меняются одинаково с изменением влагосодержания.

Чтобы найти неизвестные коэффициенты a_{wm} ($m = 0, 1, 2, 3, 4$), составим функционал:

$$F = \sum_{j=1}^N \left| \varepsilon_{gj}^{(\text{exp})} - \varepsilon_g(M_j) \right|^2, \quad (1.107)$$

где $\varepsilon_{gj}^{(\text{exp})}$ – измеренные в эксперименте [85] значения диэлектрической проницаемости зерна для одной частоты и N значений влагосодержания M_j ($N = 15$),

$\varepsilon_g(M_j)$ – значения той же величины, вычисленные теоретически по формулам (1.91), (1.92), (1.94)–(1.98), (1.100)–(1.102) с подстановкой выражений (1.105), (1.106) в (1.96) для тех же значений влагосодержания M_j .

Будем искать минимум функционала (1.107) путем варьирования коэффициентов a_{wm} и вычисления сумм по всем измеренным значениям влагосодержания [85] для каждой частоты излучения. Помимо пяти данных коэффициентов неизвестными величинами здесь являются коэффициенты C_D и C_S параметров размерности и формы зерен D и S (1.95), показатели θ и χ степенных законов смещения (1.96) и (1.97), а также диэлектрическая проницаемость сухих зерен ε_{dk} . В общей постановке задача минимизации функционала (1.107) с таким большим количеством неизвестных становится неопределенной и допускает множество различных решений. Чтобы снять

эту неопределенность, наложим ряд очевидных условий, которые позволят выбрать единственное решение задачи.

- Для коэффициентов a_{wm} , которые определяют диэлектрическую проницаемость связанной воды (1.106), ищем решения, которые обеспечивали бы преимущественное убывание их мнимой и особенно вещественной части с ростом частоты. Мы исходим из того, что основными механизмами поляризации водного раствора являются дипольно-ориентационный и ионный. Насколько нам известно, у связанной воды в составе большинства дисперсных систем проявление резонансного механизма не обнаруживалось. Поэтому для коэффициентов a_{wm} ищем решения с минимальным числом резонансов, которым могут соответствовать участки локального возрастания вещественной части данных коэффициентов с ростом частоты. Такие же условия будем накладывать и на диэлектрическую проницаемость сухих зерен ε_{dk} .

- Для комплексного коэффициента a_{w0} ищем решение, наиболее близкое к диэлектрической проницаемости льда [81, 82, 105] (по крайней мере, в некоторой полосе частот это должно быть вещественное значение 3,16).

- Как указывалось выше, различный характер зависимости функций w_m ($m = 1, 2, 3, 4$) (1.105 (рис. 1.16)) от влажности связан с тем, что концентрации соответствующих веществ в водном растворе меняются с изменением влагосодержания. Следовательно, молекулы или ионы данных веществ в составе водного раствора находятся в состоянии, которое допускает свободный переход из твердой фазы зерна в раствор и обратно. Видимо, энергия связи ионов или молекул веществ, отвечающих функциям w_2 , w_3 и w_4 , в растворе примерно такая же или даже меньше, чем энергия их связи в составе твердой фазы. Отсюда мы выводим еще одно ограничивающее условие для задачи минимизации функционала (1.107): следует искать решение с минимальной величиной коэффициентов a_{w2} , a_{w3} и a_{w4} , которое описывает минимальную концентрацию соответствующих веществ в водном растворе.

- Приближенно диэлектрическую проницаемость сухих зерен ε_{dk} можно найти с помощью формул (1.91), (1.92), (1.94), используя предельное значение диэлектрической проницаемости всего зерна ε_g при нулевой влажности. Последнюю величину можно получить посредством полиномиальной математической экстраполяции

измеренных значений ε_g [85] у образцов с малой влажностью M в точку $M \rightarrow 0$. Найденное таким путем приближенное значение проницаемости сухих зерен $(\varepsilon_{dk})_{ref}$ можно использовать в качестве исходного приближения при вычислении точного значения параметра ε_{dk} и ввести дополнительное условие минимальности величины $|(\varepsilon_{dk})_{ref} - \varepsilon_{dk}|^2$.

- Вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости связанной воды ε_w , получаемые как промежуточный результат при вычислении функционала (1.107), должны быть положительными величинами при любых влажностях и частотах.

- Из всех возможных значений показателей θ и χ от 0 до 1 для степенных законов смешения (1.96) и (1.97), которые отвечают выполнению всех предыдущих условий, следует выбирать наименьшее значение. Оно должно в наибольшей степени соответствовать достаточно неупорядоченному расположению различных фаз внутри зерен, которые характеризуются сильно развитой пористой структурой.

Решение задачи минимизации функционала (1.107) проводилось численным методом покоординатного спуска с учетом указанных выше условий. Это решение для коэффициентов a_{wm} ($m = 0, 1, 2, 3, 4$) и диэлектрической проницаемости сухих зерен ε_{dk} при разных частотах графически представлено на рис. 1.17 и 1.15. Точки на этих рисунках показывают найденные значения параметров для каждой из частот, по которым имеются экспериментальные данные в работе [87], а линии, соединяющие эти точки, получены в результате сплайн-аппроксимации для промежуточных значений частоты. Предполагалось, что средний размер зерен $d \approx 3$ мм, а решение для коэффициентов C_D и C_S , определяющих параметры размерности и формы (1.95), соответствует величинам (1.104). Здесь для показателя степенного закона смешения χ использовалась постоянная величина 0,25. Это минимальное значение, обеспечивающее положительность диэлектрической постоянной и фактора потерь связанной воды. Но для показателя θ мы предполагали следующую зависимость от влагосодержания M :

$$\theta = \frac{1}{4} \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} + \frac{1}{2}; \quad u = 2(10M - 1). \quad (1.108)$$

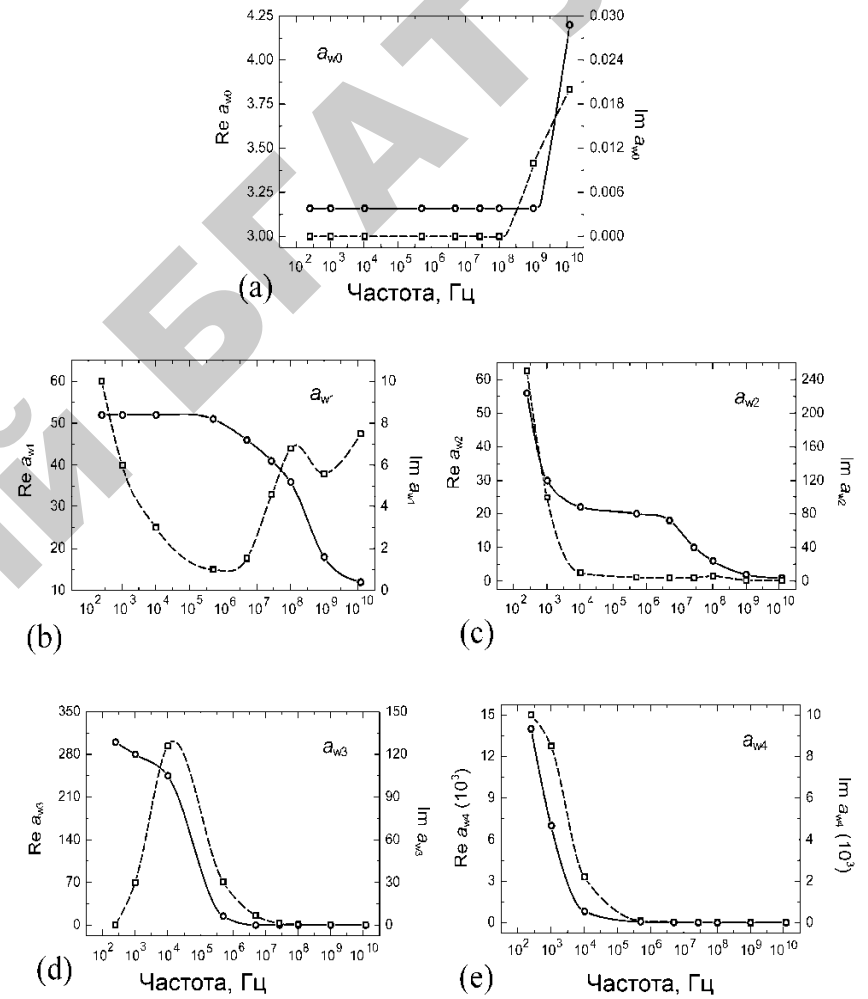


Рис. 1.17. Коэффициенты разложения диэлектрической проницаемости связанной воды внутри зерен твердой озимой пшеницы как функции частоты при 24 °С: расчетные результаты (точки) и их математическая интерполяция (кривые). Кружки и сплошные линии соответствуют вещественным частям данных коэффициентов, квадратики и пунктирные линии – их мнимым частям

Она возрастает с ростом влагосодержания от 0,25 при $M \rightarrow 0$ до 0,75 при $M = 0,25$ (рис. 1.18). Данная зависимость выбиралась на основе следующих соображений. При низких значениях влагосодержания величина θ должна быть минимально возможной, принимая во внимание условие положительности величин диэлектрической постоянной и фактора потерь. Однако расчеты показывают, что при $M > 10\%$ столь малые значения как 0,25 не могут обеспечить такой достаточно быстрый рост вещественной и мнимой частей диэлектрической проницаемости зерна с ростом влагосодержания M , какой наблюдается для экспериментальных данных [85] (см. рис. 1.13). Отсюда мы должны допустить возможность непрерывного возрастания для величины θ с ростом M , когда последнее больше 10 %.

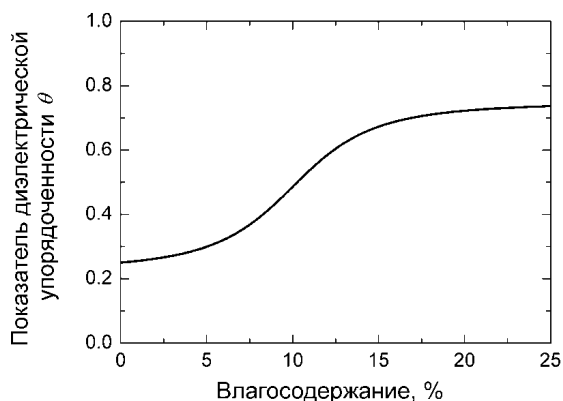


Рис. 1.18. Показатель диэлектрической упорядоченности θ как функция влагосодержания зерен пшеницы

Рассмотрим графики, показанные на рис. 1.17 для коэффициентов разложения диэлектрической проницаемости связанной воды (1.106) по базовым функциям w_n (1.105). Коэффициент a_{w0} в широкой полосе частот равен постоянной вещественной величине 3,16, и лишь при частотах свыше 100 МГц наблюдается рост как мнимой, так и вещественной части этого коэффициента (рис. 1.17а). Видимо, при частоте, немного превышающей максимальную экспериментальную частоту [87] в 12,1 ГГц, располагается резонансный пик молекулярных

колебаний, подобно тем колебаниям, которые имеют место в жидких кристаллах [109]. У свободной воды в этой области, примерно при 20 ГГц, располагается частота дебаевской дипольно-ориентационной релаксации [105, 106], которая определяется тепловым движением слабо связанных диполей-молекул. Однако для возникновения резонансного механизма поляризации необходима сильная связь [107, 108]. Такая связь, видимо, возникает между молекулами воды и поверхностью твердого вещества зерен, на которой эти молекулы располагаются в виде тонкого мономолекулярного слоя.

График зависимости вещественной и мнимой частей коэффициента a_{w1} от частоты (рис. 1.17б) является типичным для водного раствора [106]. Убывание мнимой части с ростом частоты при низких частотах выявляет наличие ионного механизма поляризации. Здесь вещественная часть данного коэффициента постоянна, и только при частотах свыше 1 МГц начинает монотонно убывать. Два максимума мнимой части один на частоте примерно 140 МГц и другой вероятный максимум при частоте свыше 10 ГГц – показывают, что здесь проявляется дипольно-ориентационный механизм поляризации. Возможно, первый максимум обусловлен присутствием в воде диполей-молекул какого-то вещества, а второй – вероятнее всего, соответствует релаксационной частоте самой воды (≈ 19 ГГц, [105, 106]).

Аналогичный вид имеют графики для коэффициента a_{w2} (рис. 1.17с), только величина проводимости ионов растворенного вещества здесь заметно больше. Релаксационный механизм поляризации для этого вещества определяет убывание вещественной части a_{w2} при частотах менее 10 кГц и свыше 1 МГц, а также наличие одного максимума у мнимой части при частоте примерно 100 МГц (вклад свободной воды в поляризацию этим коэффициентом уже не учитывается). Другой возможный максимум мнимой части в низкочастотной области, видимо, полностью маскируется наличием сильной ионной проводимости.

Для коэффициента a_{w3} график зависимости мнимой части от частоты (рис. 1.17д) имеет вид широкого максимума, локализованного на частоте $f_{rel} \approx 15$ кГц. Ионный механизм здесь никак не проявляется, поэтому можно заключить, что молекулы вещества, соответствующего данному коэффициенту, остаются электронейтральными в составе водного раствора. Возможно, что столь низкая релаксационная частота f_{rel} , обусловленная сравнительно большим временем

релаксации $\tau_{rel} = 1/2\pi f_{rel} \approx 10^{-5}$ с, соответствует крупномасштабным низкочастотным крутильным колебаниям фрагментов некоторых полимерных макромолекул или самих этих молекул.

Наконец, графики вещественной и мнимой частей коэффициента a_{w4} (рис. 1.17е) демонстрируют прямо гигантскую дисперсию с очень большим временем и малой частотой релаксации, настолько малой, что пик мнимой части здесь почти не заметен на фоне вклада от ионной проводимости. Эти графики похожи на спектральные зависимости диэлектрической проницаемости водной суспензии эритроцитов [101], которые обусловлены специфическим проявлением механизма ионной проводимости в присутствии полимерных макромолекул.

Графики частотной зависимости диэлектрической постоянной и фактора потерь сухих зерен (рис. 1.15) показывают наличие двух релаксационных частот у твердой фазы зерен вблизи 10 кГц и 20 МГц. Не совсем правильный вид этих графиков можно объяснить тем обстоятельством, что на столь редкой сетке экспериментальных частот сплайн-интерполяция не может отразить типичную форму кривых диэлектрической релаксации [106–108]. С другой стороны, здесь могут присутствовать не две отдельные линии, а целые полосы релаксации, которые могут быть обусловлены наложением ряда близких частот дипольно-ориентационного механизма поляризации у разных веществ твердой фазы.

Чтобы показать, насколько найденные решения соответствуют экспериментальным данным [87], на рис. 1.13 и 1.14 приведены расчетные кривые для диэлектрической проницаемости зерна в целом и проницаемости связанной воды, полученные с помощью формул (1.91), (1.92), (1.94)–(1.98), (1.100)–(1.103) с учетом найденного решения (1.104)–(1.106), (1.106) и данных, представленных на рис. 1.15 и 1.17. Нужно отметить, что подобные решения могут быть построены для постоянных значений θ показателя степенного закона смещения (1.96), но только для таких значений, которые заметно больше нуля, например, для $\theta = 0,5$. Расчеты показывают, что такое решение будет соответствовать экспериментальным данным не хуже прежнего решения с изменяющимся показателем θ , если увеличить коэффициенты a_{w3} , a_{w4} и немного подправить другие параметры.

Следовательно, эффект непрерывного изменения диэлектрического упорядочения в зерне с изменением его влагосодержания, который соответствует переменным значениям θ , полностью маски-

руется эффектом непостоянства диэлектрической проницаемости связанной воды. И все же мы убеждены, что такой эффект существует. Трудно поверить, что столь большое значение как 0,5, может иметь место для показателя диэлектрической упорядоченности θ при малом влагосодержании, потому что оно соответствует достаточно высокой степени упорядоченности в пространственном расположении микрочастиц воды внутри зерен. Последние имеют очень развитую пористую структуру, и их вещество находится в достаточно неупорядоченном состоянии, которое должно соответствовать малой величине индекса θ . Однако малая ее величина не в состоянии обеспечить достаточно большие значения диэлектрической постоянной зерна и его фактора диэлектрических потерь при высоком влагосодержании, как указывалось выше. Здесь при постоянных значениях $\theta < 0,3$ нельзя достичь хорошего согласия с экспериментальными данными для ϵ_g' и ϵ_g'' , принимая во внимание все необходимые условия. Следовательно, величина индекса диэлектрической упорядоченности θ не может быть постоянной. Помимо этого, в пользу последнего утверждения мы приведем еще одно соображение, основанное на независимом рассмотрении. Согласно термодинамическому подходу, в зернах «по мере развития процесса влагопереноса происходит снижение энтропии, что указывает на повышение организованности структуры (системы) зерно – вода. Этого и следует ожидать, исходя из представления о диффузионном механизме влагопереноса (высокий уровень хаотичности воды) и образования групп (по типу виноградных гроздей) ее молекул в области энергетического влияния активных центров сорбции» [104]. Следовательно, увеличение количества поглощенной воды, которое вызывает повышение интенсивности процесса влагопереноса внутри зерен, сопровождается повышением пространственной упорядоченности в расположении частиц воды после установления равновесного состояния. А изменение пространственной упорядоченности расположения разных компонент дисперсной системы обязательно должно влиять на величину показателя степенного закона смещения (1.96) для воды внутри зерен.

Итак, в результате нашего исследования выявлен ряд специфических свойств связанной воды, входящей в состав зерен озимой пшеницы. Установлено, что микрочастицы воды внутри зерен образованы не химически чистой водой, а водным раствором ряда веществ, которые переходят в этот раствор из твердого вещества

зерен. Их концентрация в растворе может меняться с изменением влагосодержания, т. е. общего количества воды внутри зерен, причем это происходит неодинаково для разных веществ. Данное обстоятельство позволило выяснить, что помимо воды, в растворе присутствует еще 4 разных вещества, и выделить их вклады в суммарную диэлектрическую проницаемость водного раствора. Анализ этих вкладов при разных частотах показал присутствие дипольно-ориентационного механизма поляризации и ионной проводимости данных веществ в растворе. При этом выяснилось, что мономолекулярный слой чистой воды на поверхности микрокапилляров зерен обладает особыми физическими свойствами. Его диэлектрическая проницаемость в широкой полосе частот равна вещественной величине 3,16 (диэлектрическая проницаемость льда), но при частоте свыше 12 ГГц, там, где у свободной воды располагается частота дипольно-ориентационной релаксации, у молекул этого слоя предположительно имеет место резонансный пик молекулярных колебаний. Подобное преобразование дебаевской ориентационной релаксации в резонанс, по всей видимости, обусловлено существованием сильной связи между молекулами воды в данном слое и поверхностью твердого вещества зерен.

Идентификация веществ, растворенных в связанной воде, представляет собой самостоятельную довольно сложную задачу. Имеющихся экспериментальных данных оказалось недостаточно для определения релаксационных и резонансных частот некоторых компонент раствора, например, для установления резонансной частоты у молекул мономолекулярного межфазного слоя. Однако более существенным является другое обстоятельство. Помимо релаксационных и резонансных частот нужно еще точно знать концентрацию компонент раствора, которую затруднительно определить диэлектрическим методом. Функции $w_n(M)$ ($n = 1, 2, 3, 4$) (1.105), которые при умножении на коэффициенты a_{wn} определяют вклады отдельных веществ в диэлектрическую проницаемость, нормированы таким образом, что в максимуме они достигают значений, примерно равных единице. Поэтому данные коэффициенты характеризуют максимальный вклад того или иного растворенного вещества в проницаемость раствора (1.106). Однако какой его концентрации такой вклад соответствует – неизвестно. Скажем, для собственно воды он определяется функцией

w_1 (1.105a) с коэффициентом a_{w1} плюс постоянная a_{w0} . Но это вклад, усредненный по всему объему воды внутри зерен, куда входит и межфазный мономолекулярный слой, примыкающий к твердым стенкам микрокапилляров, и переходные слои со свойствами, промежуточными между свойствами данного слоя и свойствами свободной воды. Известно, что размер микрокапилляров в зернах порядка 10^{-7} – 10^{-8} см, или менее 1 нм [104], откуда следует, что внутри зерен маловероятно присутствие даже отдельных мономолекулярных слоев со свойствами свободной воды [80]. Во всяком случае ясно, что даже при высоких значениях влагосодержания основная масса поглощенной воды пребывает в состоянии, промежуточном между состоянием межфазного слоя и состоянием свободной воды. И вполне вероятно, что для такого состояния вклад дипольно-ориентационного механизма поляризации у растворенных органических молекул окажется несколько иным, чем в растворе свободной воды.

2. МЕТОДЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ВЛАГОМЕТРИИ

Как отмечалось в главе 1, до настоящего времени нет единого мнения по классификации методов СВЧ-влажнометрии. Методологические аспекты этой проблемы рассмотрены в [1, 5, 9, 11] и неоднократно обсуждались на конференциях по влагометрии. Предлагая ту или иную классификацию в СВЧ-влажнометрии, необходимо исходить из того факта, что сам метод должен объективно отражать взаимосвязь физических явлений. В основе определения косвенных методов [4, 9] лежит сущность использованной зависимости свойств вещества от его влажности. В электрофизических методах влагометрии, к которым относится и СВЧ, одно из таких свойств вещества – его диэлектрическая проницаемость, величина которой зависит от содержания влаги. Специфика методов СВЧ-влажнометрии заключается в том, что эта взаимосвязь адекватно выражается и через «оптические» параметры, обусловленные взаимодействием поля СВЧ с влажным материалом. В такой трактовке более объективной будет классификация, отражающая именно эту взаимосвязь. (Отметим, что такой подход не отрицается авторами всех предлагаемых ранее классификаций). Учитывая, однако, что в СВЧ-влажнометрии методы диэлькометрии в чистом виде не применяются, целесообразно эту группу методов обозначить как методы локализованного поля, имея в виду измерения в волноводах и резонаторах. Таким образом, методы СВЧ-влажнометрии можно разделить на две группы – оптические (или методы свободного пространства) и методы локализованного поля. В таком виде классификация, по существу, совпадает с предложенной в [11].

2.1. Оптические методы (методы свободного пространства)

Эта группа методов основана на изменении характеристик электромагнитного поля, взаимодействующего с влажным материалом,

который находится в свободном пространстве. Принципиально возможна регистрация потока электромагнитного излучения от влажного материала. В этой группе методов измерительными преобразователями являются различные антенны. Измеряемыми характеристиками – назовем их параметрами преобразования – могут быть: амплитуда прошедшей через влажный материал электромагнитной волны E , изменение фазы этой волны φ , коэффициент отражения электромагнитной волны от границы раздела сред «воздух – материал» Γ , плотность потока электромагнитного излучения влажного материала P . Взаимосвязь параметров преобразования с влажностью материала (за исключением последнего) выводится из линейной модели, впервые предложенной в работах [1, 23]. Основной постулат линейной модели – избирательность и аддитивность процесса взаимодействия поля СВЧ с влажным многофазным диэлектриком. Решение задачи, описываемой уравнениями макроскопической электродинамики [57, 62], возможно при выполнении следующих граничных условий:

- 1) фронт волны плоский;
- 2) диэлектрик имеет форму плоско-параллельной пластины, бесконечной протяженности с $\mu = 1$.

Тогда в соответствии с этой моделью для коэффициентов α и β можно записать:

$$\alpha_{\text{ВМ}} = \sum_{n=0}^i \alpha_i V_i; \quad \beta_{\text{ВМ}} = \sum_{n=0}^i \beta_i V_i, \quad (2.1)$$

где $\alpha_{\text{ВМ}}$, $\beta_{\text{ВМ}}$ – постоянная затухания и фазовая постоянная влажного материала;

α_i , β_i – постоянные затухания и фазовые постоянные компоненты влажного материала;

V_i – объемы i -х компоненты влажного материала.

Так как $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} > \alpha_{\text{C}} > \alpha_{\text{В}}$, вводя обозначения, принятые в 2.1, запишем:

$$\alpha = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}};$$

$$\beta = \Phi_1 \frac{W}{1-W} \frac{\rho_0}{\rho_{H_2O}} (\beta_{H_2O} - \beta_B) + \Phi (\beta_C - \beta_B) + \beta \quad (2.2)$$

(далее вместо индекса H_2O при α и β будем ставить α_H и β_H).

В реальных условиях реализации оптических методов трудно обеспечить выполнение граничных условий, в частности, требований к конфигурации поля излучателя (плоская волна). Рассмотрим прохождение электромагнитной волны, сформированной, например, рупорной антенной через контролируемый материал, форма которого удовлетворяет второму граничному условию. Рассмотрение проведем по методике, изложенной в [110–113], предполагая, что в области малой кривизны по теореме взаимности можно считать адекватным приближение квазиоптики. В этом случае задача прохождения плоских электромагнитных волн, возбуждаемых апертурой рупорной антенны, через плоский диэлектрик решается в виде асимптотического ряда, первые члены которого дают приближение геометрической оптики, а остальные – поправки разных порядков. Введем малый параметр $\eta = \frac{1}{kl}$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, l – размер раскрыва антенны, и разложим относительно него в ряд волновое уравнение

$$\nabla^2 f + k^2 f = 0. \quad (2.3)$$

Очевидно, что в этом случае решение волнового уравнения может быть найдено для областей A , B и C (рис. 2.1). На границах раздела L_{AB} и L_{BC} необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{aligned} f_A &= f_B, \quad \frac{\partial f_A}{\partial n} = \frac{\partial f_B}{\partial n} \quad \text{на границе } L_{AB}, \\ f_B &= f_C, \quad \frac{\partial f_B}{\partial n} = \frac{\partial f_C}{\partial n} \quad \text{на границе } L_{BC} \end{aligned} \quad (2.4)$$

(перпендикулярная поляризация)

$$f_A = f_B, \quad \frac{\partial f_A}{\partial n} = \frac{\partial f_B}{\varepsilon \cdot \partial n} \quad \text{на границе } L_{AB},$$

$$f_B = f_C, \quad \frac{\partial f_B}{\partial n} = \frac{\partial f_C}{\varepsilon \cdot \partial n} \quad \text{на границе } L_{BC} \quad (2.5)$$

(параллельная поляризация)

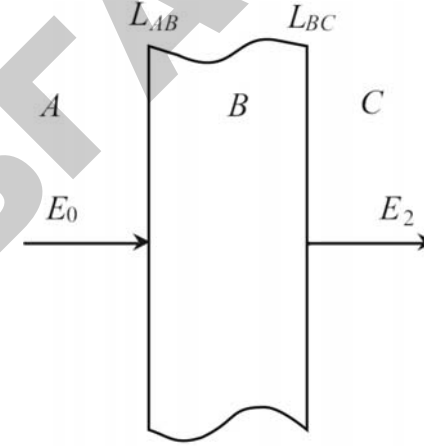


Рис. 2.1 Схема прохождения плоской электромагнитной волны через диэлектрик с потерями

Суть метода, предложенного в [111, 113], состоит в том, что решение задачи внутри диэлектрика и в воздухе ищется в виде произведения быстроосциллирующей показательной функции и медленно изменяющегося ряда по степеням малого параметра η :

$$f_{A,B,C} = F_{A,B,C} e^{ik\phi}. \quad (2.6)$$

Такой прием позволит решать задачу отдельно для диэлектрика и воздуха и последовательно вычислять ряды с требуемым приближением.

Электромагнитное поле в диэлектрике и на границе раздела находится путем решения обыкновенных дифференциальных уравнений при фиксированных граничных условиях для каждого члена ряда. Для нашей задачи амплитуды падающей, отраженной и преломленной волн выражаются через коэффициенты Френеля. Для L_{AB} имеем:

$$F_{Ai}^{OTR} = r_{01} F_{Ai}^{ПД} - \frac{\partial}{\partial n} (F_{Ai-1}^{ПД} + F_{Ai-1}^{OTR} - F_{Bi-1}), \quad (2.7)$$

$$F_{Bi} = t_{01} F_{Ai}^{ПД} - \frac{\partial}{\partial n} (F_{Ai-1}^{ПД} + F_{Ai-1}^{OTR} - F_{Bi} - 1), \quad (2.8)$$

$$\text{где } r_{01} = \frac{\cos \xi - \sqrt{\varepsilon^* - \sin^2 \xi}}{\cos \xi + \sqrt{\varepsilon^* - \sin^2 \xi}};$$

$$t_{01} = \frac{2 \cos \xi}{\cos \xi + \sqrt{\varepsilon^* - \sin^2 \xi}};$$

ξ – угол падения;

i – номер приближения.

Для нулевого приближения получаем решение плоской волны для плоской границы раздела:

$$\left. \begin{aligned} F_{AO}^{OTR} &= r_{01} F_{AO}^{ПД} \\ F_{BO} &= t_{01} F_{AO}^{ПД} \end{aligned} \right\}. \quad (2.9)$$

Подставив в (2.3) уравнение (2.6) и произведя группировку членов с одинаковыми степенями при малом параметре η , находим уравнения, определяющие различные приближенные решения:

$$\left. \begin{aligned} (\nabla \varphi_{A,C})^2 &= 1 \\ 2 \nabla F_{A,C_0} \nabla \varphi_{A,C} + \nabla^2 \varphi_{A,C} F_{A,C_0} &= 0 \\ 2 \nabla F_{A,C_1} \nabla \varphi_{A,C} + \nabla^2 \varphi_{A,C} F_{A,C_1} &= \rho \nabla^2 F_{A,C_0} \end{aligned} \right\}. \quad (2.10)$$

Первое решение – уравнение эйконала; второе – определяет амплитуду колебаний в нулевом приближении. Совокупность этих двух решений определяет полностью поле в областях A и C в приближении геометрической оптики при заданных условиях

на границах L_{AB} и L_{BC} . Остальные уравнения системы дают поправки к значениям амплитуды $F_{A,Cp}$. Оценка результатов показывает, что приближение лучевой оптики дает удовлетворительные результаты уже при $\rho > (1,5 \div 2)\lambda$. Разница фазы полей на границе раздела не превышает $10\text{--}15^\circ$. Другими словами, в этом случае можно считать, что СВЧ-энергия распространяется по «лучам», определяемым уравнением эйконала, а на границе раздела сред отражение и прохождение происходят так, как если бы падающая волна была плоской.

Рассмотренная методика вычисления результирующего поля не учитывала потери в диэлектрике. Для задач СВЧ-влажнометрии потери энергии электромагнитной волны СВЧ – один из параметров преобразования. С учетом потерь, ослабление амплитуды волны F_1 , прошедшей через влажный материал, выражается соотношением:

$$F_1 = \exp \left(-\frac{2\pi d_1}{\lambda} \frac{\varepsilon_1''}{2\sqrt{\varepsilon_1' - \sin^2 \xi}} i\varphi_1 \right), \quad (2.11)$$

где $\varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} d_1 \sqrt{\varepsilon_1' - \sin^2 \xi}$ – фазовый угол;

λ – длина волны;

ξ – угол падения;

$\varepsilon', \varepsilon'', d_1$ – диэлектрические характеристики влажного материала и толщина слоя.

Коэффициент прохождения для слоя:

$$T_{02} = \frac{F_1(1-r_{01})(1-r_{12})}{1 + F_1^2 r_{01} r_{02}}, \quad (2.12)$$

где r_{01}, r_{02} – коэффициент Френеля;

При $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} < 1, F_1 \cong e^{-i\varphi_1}$

$$\alpha_{\text{BM}} = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \frac{\varepsilon''_{\text{BM}}}{2\sqrt{\varepsilon'_{\text{BM}} - \sin^2 \xi}},$$

$$T_{02} = T_1 \exp(-\alpha_{\text{BM}}), \quad (2.13)$$

где T_{02} – коэффициент затухания;

T_1 – коэффициент прохождения для сухого материала.

С учетом линейной модели:

$$\begin{aligned} |T|^2 &= |T_1|^2 \exp[-2(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)] = \\ &= (1 - |R_1|^2) \exp[-2(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n)], \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $|R_1|^2$ – коэффициент отражения от сухого материала;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – коэффициент затухания для эквивалентных слоев компонентов влажного материала.

Перейдем к выводу параметров преобразования оптических методов.

2.1.1. Амплитудные методы и параметры преобразования

Введем постоянную распространения $\gamma = \alpha + i\beta$. Тогда коэффициент прохождения с учетом (3.14) запишется в виде:

$$T_{21} = (1 - \Gamma^2) \frac{\exp(-\gamma_1 d_1)}{1 - \Gamma^2 \exp(-\gamma_1 d_1)}. \quad (2.15)$$

Как было показано ранее, коэффициент отражения $|\Gamma|$ с высокой степенью точности можно считать величиной действительной. Тогда T_{21} найдем умножением (2.15) на комплексно-сопряженный множитель:

$$|T_{21}|^2 = (1 - \Gamma^2)^2 \frac{\exp(-2\alpha_1 d_1)}{1 - \Gamma^2 \exp(-\alpha_1 d_1) \cos 2\beta_1 d_1 + \Gamma^4 \exp(-4\alpha_1 d_1)}, \quad (2.16)$$

где α_1 и β_1 – постоянная затухания и волновое число электромагнитной волны во влажном материале.

Для линеаризации $|T_{21}|^2$ выразим эту величину в децибелах

$$N = -20 \lg |T_{21}| = 8,686 \lg |T_{21}|. \quad (2.17)$$

С учетом (2.15) и (2.16) запишем (3.17) в виде

$$\begin{aligned} N &= 8,686 \times \\ &\times \left[\alpha_1 d_1 - \ln(1 - \Gamma^2) + \frac{1}{2} \ln(1 - 2\Gamma^2 \exp(-2\alpha_1 d_1) \cos 2\beta_1 d_1 + \Gamma^4 \exp(-4\alpha_1 d_1)) \right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

Обозначив

$$N = 8,686 \alpha_1 d_1, \quad (2.19)$$

$$N_2 = -8,686 \ln(1 - \Gamma^2), \quad (2.20)$$

$$N_3 = -4,343 \ln[1 - 2\Gamma^2 \exp(-2\alpha_1 d_1) \cos 2\beta_1 d_1 + \Gamma^4 \exp(-4\alpha_1 d_1)] \quad (2.21)$$

запишем (2.18) в виде

$$N = N_1 + N_2 + N_3. \quad (2.22)$$

Первое слагаемое N_1 определяет потери энергии электромагнитного поля СВЧ при прохождении плоской волны через влажный материал толщиной d_1 в направлении просвечивания; второе N_2 – потери, вызванные отражением плоской волны от поверхности влажного материала; третье N_3 – характеризует переотражения от границ раздела передней и задней стенок влажного материала, являясь периодической функцией волнового числа β_1 и d_1 (рис. 2.2).

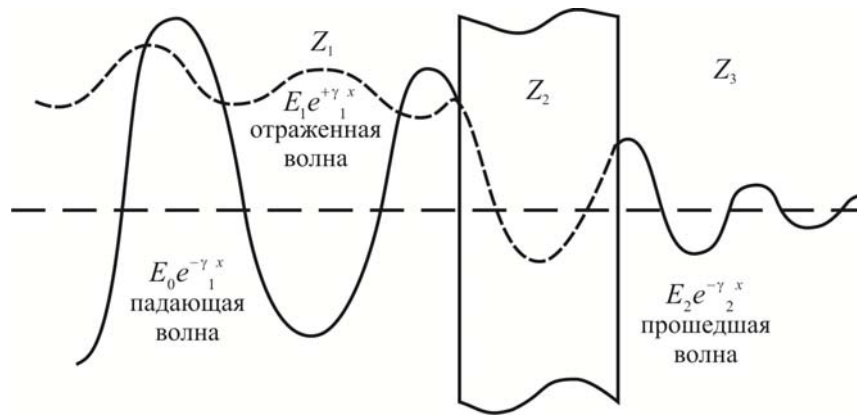


Рис. 2.2. Схема прохождения и отражения электромагнитной волны от плоского диэлектрика с потерями

Подставляя в (2.19) значение α_1 , находим:

$$N_1 = 8,686 \alpha_H \Phi \frac{W}{1-W} \frac{\rho_0}{\rho_H} d_1. \quad (2.23)$$

Так как

$$\Gamma^2 = \frac{(\alpha_0 - \alpha_1)^2 + (\beta_0 - \beta_1)^2}{(\alpha_0 + \alpha_1)^2 + (\beta_0 + \beta_1)^2}, \quad (2.24)$$

и пренебрегая ввиду малости α_0 , запишем (2.20) в виде:

$$N_2 = -8,686 \ln \left[1 - \frac{\alpha_1^2 + (\beta_0 - \beta_1)^2}{\alpha_1^2 + (\beta_0 + \beta_1)^2} \right]. \quad (2.25)$$

Упрощая выражение в квадратных скобках, и заметив, что $(\beta_0 + \beta_1)^2 \gg \alpha_1^2$, получаем:

$$N_2 = -8,686 \ln \frac{4\beta_0\beta_1}{(\beta_0 + \beta_1)^2}. \quad (2.26)$$

Учитывая, что $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon'}$, $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, запишем:

$$N_2 = -8,686 \ln \frac{(\sqrt{\epsilon'} + 1)^2}{4\sqrt{\epsilon'}}. \quad (2.27)$$

Из выражения (1.34) следует, что $\sqrt{\epsilon'} \cong \frac{W}{W-1} + b$, следовательно, (2.27) есть монотонно возрастающая функция влагосодержания. В диапазоне измерений W для грубодисперсных материалов ее можно считать линейной (рис. 2.3 и 2.4). Из графиков видно, что N_2 незначительно зависит от температуры и существенно от коэффициента заполнения Φ .

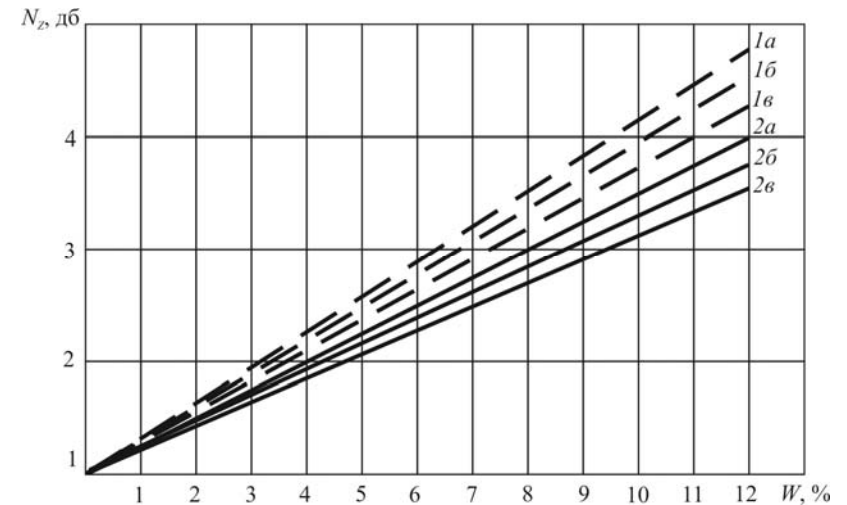


Рис. 2.3 Зависимость $N_2(W, t)$ для кварцевого порошка при $\Phi = 0,6$; $1 - \lambda = 50$ см; $2 - \lambda = 3,2$ см; $a - t = 5$ °C; $б - t = 20$ °C; $в - t = 35$ °C

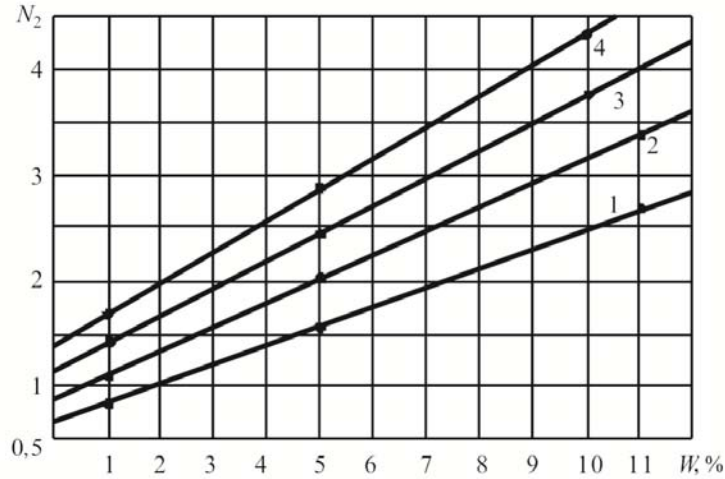


Рис. 2.4. Расчетные зависимости $N_2(W)$ для кварцевого порошка при $\lambda = 3,2$ см:
1 – $\Phi = 0,4$; 2 – $\Phi = 0,5$; 3 – $\Phi = 0,6$; 4 – $\Phi = 0,7$

Третье слагаемое в (2.18) N_3 является затухающей осциллирующей функцией толщины d , а также волнового числа β_1 . Так как β_1 связано с коэффициентом заполнения Φ и влажностью W , то возможны осцилляции и от последних. С точки зрения влагометрии это является негативным явлением, так как оно может приводить к неоднозначности связи между параметром преобразования N и влажностью W . Обычно в методе поглощения толщина d слоя влажного материала фиксируется с высокой степенью точности, поэтому осцилляции возможны только за счет изменения Φ и W . Обозначив амплитуду этих осцилляций через δN_3 , очевидно, что

$$\delta N_3 = N_{3+} - N_{3-}, \quad (2.28)$$

где N_{3+} соответствует $\cos \beta_1 d_1 = 1$, а $N_{3-} - \cos \beta_1 d_1 = -1$ в выражении (2.21).

С учетом сделанных замечаний находим:

$$\delta N_3 = 8,686 \ln \frac{1 + 2\Gamma^2 e^{-2\alpha_0 d}}{1 - 2\Gamma^2 e^{-2\alpha_0 d}}; \quad (2.29)$$

тогда условие малости осцилляций запишется в следующем виде:

$$\frac{\delta N_3}{N_1 + N_2} \ll 1. \quad (2.30)$$

Поскольку $\Gamma^2 \leq 0,3 \div 0,4$, то

$$N_2 = -8,686 \ln(1 - \Gamma^2) \cong 8,686 \Gamma^2. \quad (2.31)$$

Комбинируя (2.30), (2.31) и (2.21), получаем:

$$\frac{\delta N_3}{N_1 + N_2} = \frac{\ln \left[(1 + 2\Gamma^2 e^{-2x})(1 - 2\Gamma^2 e^{-2x})^{-1} \right]}{\Gamma^2 + x}, \quad (2.32)$$

где $x = \alpha_0 d$.

Обозначим

$$\frac{\delta N_3}{N_1 + N_2} < a. \quad (2.33)$$

Тогда, так как $N_1 \sim W$ и $N_2 \sim W$, величина « a » будет соответствовать относительной погрешности $\frac{\delta W}{W}$ в определении влажности методом поглощения, вызванной добавкой δN_3 . Задаваясь величинами Γ^2 и a и решая (2.32) численным методом, можно найти область значений x , при которых это неравенство (2.38) выполняется. На номограмме, приведенной на рис. 2.5, представлены данные, полученные из решения неравенства (2.33). Очевидно, что все наши рассуждения относительно δN_3 в основном касаются диапазона малых влагосодержаний ($W \leq (2 \div 3) \%$). Действительно, с увеличением влагосодержания постоянная затухания α_0 влажного материала также будет возрастать, а поскольку она входит в числитель и знаменатель (2.29) экспоненциально, что член $2\Gamma^2 e^{-2\alpha_0 d}$, несмотря на одновременный рост Γ^2 будет очень быстро стремиться к нулю, что неизбежно приведет к стремлению к нулю добавки δN_3 . С другой стороны, показано, что если неравенство (2.33) выполняется при некоторой влажности W_0 , то оно автоматически будет выпол-

няться и при всех $W > W_0$. Таким образом, критерием для выбора является та минимальная влажность, которую должен контролировать СВЧ-влажномер. Запишем окончательное выражение для функции преобразования для этого метода:

$$N = 8,686 \left[\alpha_n \frac{W}{1-W} \Phi \frac{\rho_0}{\rho_n} d + \ln |\Gamma^2| \right], \quad (2.34)$$

где Γ определяется выражением (1.34).

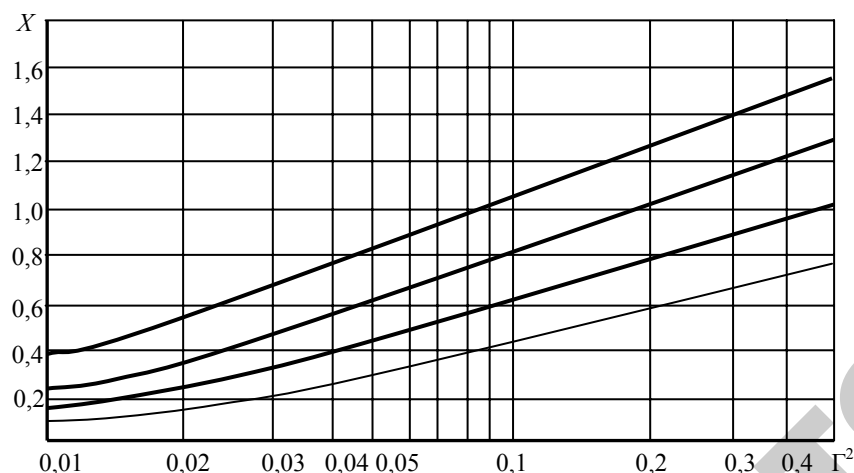


Рис. 2.5. Номограмма для определения параметра X из уравнения 2.33

В случае крупнодисперсных материалов α_n соответствует значению для свободной воды.

Произведем оценку влияния влажности W , коэффициента Φ , температуры T °С и концентрации солей C на амплитудный параметр преобразования. Учитывая, что в (2.34) эти параметры влияют на α , и пренебрегая вторым слагаемым, запишем приращения для α :

$$\Delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial W} \Delta W + \frac{\partial\alpha}{\partial\Phi} \Delta\Phi + \frac{\partial\alpha}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\alpha}{\partial C} \Delta C. \quad (2.35)$$

Дифференцируя α по W , Φ , T , C , получим:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial W} = \frac{\pi\Phi\rho_0}{\lambda\rho_n(1-W)^2} \frac{\epsilon_n''}{\sqrt{\epsilon_n'}}; \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial\Phi} = \frac{\pi\rho_0 W}{\lambda\rho_n(1-W)} \frac{\epsilon_n''}{\sqrt{\epsilon_n'}}; \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial T} = \frac{\pi\Phi\rho_0 W}{\lambda\rho_n(1-W)\sqrt{\epsilon_n'}} \left(\frac{\partial\epsilon_n''}{\partial T} - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_n''}{\epsilon_n'} \frac{\partial\epsilon_n'}{\partial T} \right); \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial C} = \frac{\pi\Phi\rho_0 W}{\lambda\rho_n(1-W)\sqrt{\epsilon_n'}} \left(\frac{\partial\epsilon_n''}{\partial C} - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_n''}{\epsilon_n'} \frac{\partial\epsilon_n'}{\partial C} \right). \quad (2.39)$$

Для сравнения степени влияния Φ , T и C на параметр преобразования зададимся усредненными значениями, приняв, что изменение каждого из них составляет 10 %, тогда при $\Phi = 0,6$; $T = 20$ °С, $C = 0,02 \frac{\text{ГЭКВ}}{\text{л}}$, $\Delta\Phi = 0,06$, $\Delta T = 20$ °С, $\Delta C = 0,002 \frac{\text{ГЭКВ}}{\text{л}}$.

Для расчета $\frac{\partial\epsilon'}{\partial T}$ и $\frac{\partial\epsilon''}{\partial T}$ воспользуемся данными по ϵ'_n и ϵ''_n из [13]. Результаты расчета приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты расчета погрешности определения ϵ' и ϵ'' в диапазоне частот – 0,1–10 ГГц

f , ГГц	10	3	0,6	0,1
$\frac{\partial\epsilon'}{\partial T}$	0,44	–0,24	–0,36	–0,37
$\frac{\partial\epsilon''}{\partial T}$	–0,6	–0,39	–0,08	–0,015

Растворенные в воде соли приводят к образованию диссоциированных ионов, уменьшающих статическую диэлектрическую проницаемость воды ϵ_{HS} и λ_{S} , увеличивающих ϵ_{H}'' за счет появления сквозной проводимости [13]:

$$\epsilon_{\text{H}}' = \frac{\epsilon_{\text{HS}} - \epsilon_{\text{H}\infty}}{1 + \left(\frac{\lambda_{\text{S}}}{\lambda}\right)^2} + \epsilon_{\infty}, \quad (2.40)$$

$$\epsilon_{\text{H}}'' = \frac{\epsilon_{\text{HS}} - \epsilon_{\text{H}\infty}}{1 + \left(\frac{\lambda_{\text{S}}}{\lambda}\right)^2} \frac{\lambda_{\text{S}}}{\lambda} + 60\lambda\sigma, \quad (2.41)$$

$$\epsilon_{\text{HS}} = \epsilon_{\text{HOS}} - \delta\epsilon_{\text{HS}}, \quad \lambda_{\text{HS}} = \lambda_{\text{HOS}} - \delta\lambda_{\text{HS}},$$

где ϵ_{HOS} – статистическая диэлектрическая проницаемость воды в отсутствие растворенных солей;

$\delta\epsilon_{\text{HS}}$ – уменьшение ϵ_{HS} при добавлении солей;

λ_{HOS} – «резонансная» длина волны в отсутствие солей;

$\delta\lambda_{\text{HS}}$ – уменьшение λ_{HS} при добавлении солей;

σ – проводимость электролита.

Согласно [117] при комнатной температуре $T = 20^\circ\text{C}$ для раствора NaCl

$$\begin{aligned} \delta\epsilon_{\text{HS}} &= 16^\circ\text{C}, \\ \delta\lambda_{\text{HS}} &= 0,15^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Для концентрации $C = 0,02 \frac{\text{гКВ}}{\text{л}}$ (что соответствует ГОСТу 2374-73 на водопроводную воду) $\delta\epsilon_{\text{HS}} = 0,32$ и $\delta\lambda_{\text{HS}} = 0,003$, и поэтому влиянием такой концентрации NaCl на ϵ_{H}' можно пренебречь. Проводимость σ определим по выражению

$$\sigma = beCN_0(U^+ + U^-) \cdot 10^{-3}, \quad (2.42)$$

где b – концентрация молекул NaCl, которые диссоциировали в растворе;

e – заряд электрона;

N_0 – число Авогадро;

$U^+ + U^-$ – проводимость ионов Na и Cl.

$$\text{Для } b = 1, U^+ = 0,53 \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}^2}{\text{Ом}}, U^- = 0,73 \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}^2}{\text{Ом}} \quad [119]; \text{ под-}$$

ставляя численные значения в (2.42), находим $\sigma = 2,54 \cdot 10^{-3} \text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$.

При частоте 10 ГГц ($\lambda = 3 \text{ см}$) отношение дипольной компоненты ϵ_{HD}'' к компоненте проводимости $\epsilon_{\text{H}\sigma}''$ будет $1,4 \cdot 10^{-2}$, а для 0,66 ГГц – 2,1. Поэтому в низкочастотной части СВЧ-диапазона влияние растворенных солей становится существенным. Таким образом,

$$\frac{\partial \alpha}{\partial C} = 7,62\lambda \frac{\Phi W \rho_0 \pi}{\rho_{\text{H}} (1 - W) \sqrt{\epsilon_{\text{H}}'}}. \quad (2.43)$$

Анализ выражений (2.34–2.36) показывает, что коэффициент заполнения Φ практически одинаково влияет на $\Delta\alpha$ во всем диапазоне СВЧ. Температура влажного материала T оказывает большое влияние на $\Delta\alpha$ в высокочастотной части диапазона. С уменьшением частоты $\Delta\alpha$ уменьшается, что обусловлено ростом сквозной проводимости. На частоте 10 ГГц $\epsilon_{\text{H}}'' \cong \epsilon_{\text{HD}}''$ и $\frac{\partial \alpha}{\partial C}$ определяется монотонно

убывающей с повышением температуры функцией $\frac{\partial \epsilon_{\text{H}}''}{\partial T}$. На частоте

0,6 ГГц вид $\frac{\partial \alpha}{\partial C}$ будет определяться взаимодействием процессов – температурной зависимостью дипольной компоненты ϵ_{HD}'' и сквозной проводимости $\epsilon_{\text{H}\sigma}''$. Так как

$$\frac{\partial \epsilon_{\text{H}}''}{\partial T} = \frac{\partial \epsilon_{\text{HD}}''}{\partial T} + \frac{\partial \epsilon_{\text{H}\sigma}''}{\partial T}, \quad \text{а} \quad \frac{\partial \epsilon_{\text{H}\sigma}''}{\partial T} = 60\lambda \frac{\partial \sigma}{\partial T}, \quad (2.44)$$

и учитывая, что $\frac{\partial \sigma}{\partial T} > 0$ [119], производная по ε''_H может обратиться в ноль и при определенной концентрации и длине волны может стать положительной.

Для мелкодисперсных материалов $\alpha_H = f(W)$. Как показано в главе 1, влияние температуры на ε'' в высокочастотной части СВЧ диапазона ниже, чем в высокочастотной. Степень влияния температуры на амплитудный ПП близка соответствующей функции $\frac{\partial \varepsilon''}{\partial T}$ и в зависимости от влажности может быть положительной (при $W < W_{кр}$), нулевой ($W = W_{кр}$) и отрицательной ($W > W_{кр}$). Влияние коэффициента заполнения Φ идентично крупнодисперсному материалу. В низкочастотной части диапазона следует ожидать более существенного влияния концентрации солей на $\Delta\alpha$. Это обусловлено, в первую очередь, структурой мелкодисперсных материалов, большинство которых относятся к классу органических диэлектриков.

2.1.2. Фазовые методы и параметры преобразования

Фазу коэффициента прохождения находим из (2.16) путем алгебраических преобразований

$$\varphi_{21} = \arctg \left[\frac{1 + \Gamma^2 \exp(-2\alpha_1 d_1) L}{1 - \Gamma^2 \exp(-2\alpha_1 d_1)} \operatorname{tg} \beta_1 d_1 \right]. \quad (2.45)$$

Ввиду малости члена $\Gamma^2 \exp(-2\alpha_1 d_1)$ им можно пренебречь и записать (2.45) в более простом виде

$$\varphi_{21} = \arctg(1 - \delta) \operatorname{tg} \beta_1 d_1, \quad (2.46)$$

где $\delta = 2\Gamma^2 \exp(-2\alpha_1 d_1)$.

В большинстве случаев $\delta < 1$ и можно считать, что

$$\varphi_{21} \cong \beta_1 d_1. \quad (2.47)$$

Величина δ характеризует степень отклонения от линейности (2.47). Так как β_1 зависит от влажности W , то и φ_{21} будет зависеть от W аналогичным образом. Параметр преобразования находится как разность фаз $\Delta\varphi$ между излучателем и приемником в отсутствие образца и с образцом (рис. 2.6) и будет отличаться от выражения для β_1 наличием множителя d_1 и отсутствием 1 в скобках

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d_1 \Phi}{\lambda} \left[\frac{\rho_0 W}{\rho_H (1 - W)} (\sqrt{\varepsilon'_H - 1}) + (\sqrt{\varepsilon'_C - 1}) \right]. \quad (2.48)$$

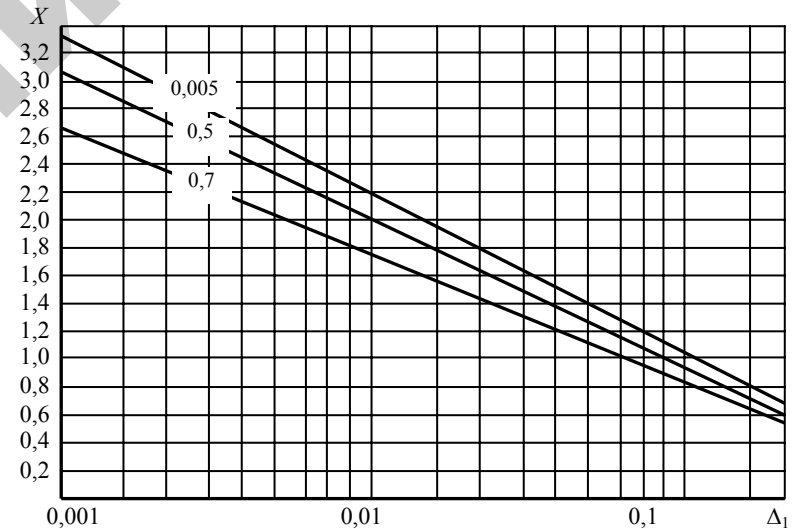


Рис. 2.6. Номограмма для определения параметра X при заданной допустимой погрешности Δ_1 . Цифрами на графиках обозначены величины коэффициентов отражения Γ

Следует отметить, что реализация (2.48) возможна при выполнении условия

$$\Delta\varphi \leq \pi, \quad (2.49)$$

что накладывает ограничения на использование этого параметра преобразования. Нетрудно показать, что

$$\beta_{\max} d_1 < \pi; \quad (2.50)$$

$$d_1 < \frac{\pi}{\beta_{\max}} = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon'}}, \quad (2.51)$$

где $\beta_{\max}$ – значения β при максимальной влажности $W_{\max}$.

Оценим влияние коэффициента заполнения Φ , температуры $T^\circ\text{C}$ и концентрации солей C на фазовый параметр преобразования:

$$\Delta\beta = \frac{\partial\beta}{\partial W} \Delta W + \frac{\partial\beta}{\partial\Phi} \Delta\Phi + \frac{\partial\beta}{\partial T} \Delta T + \frac{\partial\beta}{\partial C} \Delta C. \quad (2.52)$$

Дифференцируя β по W , Φ , T и C , получим:

$$\frac{\partial\beta}{\partial W} = \frac{2\pi\Phi\rho_0}{\lambda(1-W)^2} (\sqrt{\epsilon'_H} - 1), \quad (2.53)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial\beta}{\partial\Phi} &= \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ \left[\frac{\rho_0 W \Phi}{\rho_H (1-W)} (\sqrt{\epsilon'_H} - 1) + \Phi (\sqrt{\epsilon'_H} - 1) + 1 \right] \left[\frac{\rho_0 W}{\rho_H (1-W)} (\sqrt{\epsilon'_H} - 1) + (\sqrt{\epsilon'_C} - 1) \right] \right\} \\ \frac{\partial\beta}{\partial T} &= \frac{2\pi\Phi\rho_0 W}{\lambda\rho_H (1-W)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon'_H}} \cdot \frac{\partial\epsilon'_H}{\partial T}, \\ \frac{\partial\beta}{\partial C} &= \frac{2\pi\Phi\rho_0 W}{\lambda\rho_H (1-W)} \cdot \frac{\partial\epsilon'_H}{\partial C}, \end{aligned} \right\} \quad (2.54)$$

Анализ выражений (2.54) с учетом данных раздела 1.3 показывает, что коэффициент заполнения Φ является наиболее существенным фактором, влияющим на $\Delta\beta$. По абсолютной величине $\Delta\beta_\Phi > \Delta\alpha_\Phi$. Влияние температуры T более чем на порядок меньше, чем влияние коэффициента заполнения Φ , при малых изменениях температуры ($\pm 2^\circ\text{C}$) им можно пренебречь. Концентрация солей C практически не оказывает влияние на $\Delta\beta$.

2.1.3. Отражательные методы и параметры преобразования

Параметром преобразования является модуль коэффициента отражения $|\Gamma|$ от поверхности влажного материала (рис. 2.7) и определяется выражением

$$|\Gamma| = (\sqrt{\epsilon'} - 1)(\sqrt{\epsilon'} + 1)^{-1}. \quad (2.55)$$

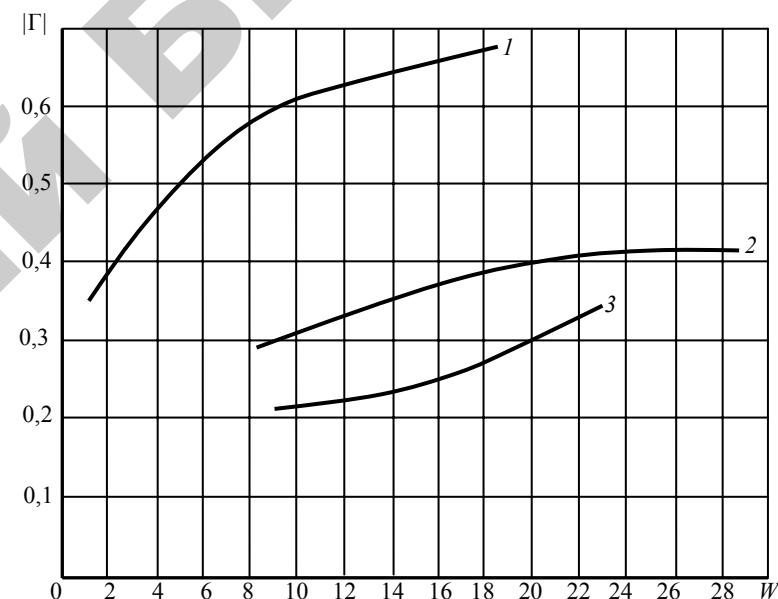


Рис. 2.7. Зависимость модуля коэффициента отражения на частоте 10 ГГц от влагосодержания:

1 – влажный кварцевый песок; 2 – молотое зерно; 3 – резанный табак (сплошными линиями показаны значения рассчитанные по линейной модели)

Дифференцируя (2.42) по $\sqrt{\epsilon'}$, находим чувствительность

$$\Delta|\Gamma| = \frac{\partial|\Gamma|}{\partial(\sqrt{\epsilon'})} = \frac{2}{\sqrt{3}+1}. \quad (2.56)$$

Из (2.56) видно, что чувствительность параметра преобразования уменьшается с ростом ε' . Согласно линейной модели, $\sqrt{\varepsilon'}$ в первом приближении пропорционален влажности W и, следовательно, чувствительность $\Delta|\Gamma|$ также уменьшается с ростом влаго-содержания.

Большую чувствительность имеет параметр преобразования, определяемый как коэффициент стоячей волны

$$r = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}. \quad (2.57)$$

Учитывая (2.55), получаем

$$r = \sqrt{\varepsilon'}, \quad (2.58)$$

и, следовательно, с учетом сделанных замечаний, чувствительность $\Delta|\Gamma|$ практически постоянна во всем диапазоне влагосодержания.

Рассмотрим основные факторы, влияющие на погрешность измерения. Они обусловлены как влиянием мешающих факторов (T , Φ) на ε' , так и неточностью определения $|\Gamma|$ или r . **Первая группа погрешностей подробно исследовалась в предыдущих разделах.**

Рассмотрим вторую группу погрешностей. Выражение (2.55), строго говоря, справедливо только тогда, когда толщина слоя влажного материала в направлении распространения СВЧ-энергии бесконечна.

В реальных условиях, однако, α имеет конечную величину, и измеряемый коэффициент отражения не есть парциальный коэффициент отражения, определяемый (2.55), а суммарный коэффициент отражения

$$T_{11} = \Gamma \frac{1 - e^{-2\gamma_1 d_1}}{1 - \Gamma^2 e^{-2\gamma_1 d_1}}. \quad (2.59)$$

Из (2.59) находим модуль $|T_{11}|$:

$$|T_{11}| = |\Gamma| B, \quad (2.60)$$

где B определяется выражением

$$B = \frac{(1 + \Gamma^2 e^{-4\alpha d})^2 + e^{-4\alpha d} (1 + \Gamma^4 + 2\Gamma^2 \cos 4\beta d) -}{-2(1 + \Gamma^2 e^{-4\alpha d})(1 + \Gamma^2) e^{-2\alpha d} \cos 2\beta} = \frac{1 + \Gamma^4 e^{-4\alpha d} - 2\Gamma^2 \cos 2\beta d}{-2(1 + \Gamma^2 e^{-4\alpha d})(1 + \Gamma^2) e^{-2\alpha d} \cos 2\beta}. \quad (2.61)$$

Таким образом $|T_{11}|$ отличается от $|\Gamma|$ наличием осциллирующего множителя B . Если толщина слоя B . М. бесконечна, то $|T_{11}| \rightarrow |\Gamma|$. Из (2.61) следует, что основными параметрами, определяющими степень равенства $|T_{11}|$ и $|\Gamma|$, являются безразмерный параметр $x = \alpha d$ и коэффициент отражения Γ . Возникает вопрос, каким требованиям должен удовлетворять параметр x , чтобы ошибкой

$$\Delta_1 = \frac{\delta \Gamma}{|\Gamma|} = 1 - \frac{|T_{11}|}{|\Gamma|} \quad (2.62)$$

при заданном значении суммарной погрешности можно было бы пренебречь. Ввиду сложности выражения (2.61) аналитически найти условия для x не представляется возможным. Поэтому для нахождения области возможных значений x при заданной допустимой погрешности Δ_1 последняя вычислялась по формулам (2.60–2.63) при различных значениях Γ и x . Полученные данные представлены на номограмме (рис. 2.8.) Как видно из приведенных зависимостей, при значениях $\Gamma^2 \leq 0,5$ погрешность Δ_1 очень слабо зависит от абсолютного значения Γ . На рис. 2.9. представлены экспериментальные зависимости $\Gamma(W)$ для трех различных влажных материалов: кварцевого песка, молотой пшеницы и табака. Можно заключить, что относительная погрешность Δ_1 изменяется в пределах от 10^{-2} (для табака при $W \sim 8\%$) до $5 \cdot 10^{-2}$ (для кварцевого песка). Следовательно, для того чтобы несущественно сказывалась на результатах измерения влажности, она должна быть, по крайней мере, в 3 раза меньше $\Delta \Gamma$. Из рис. 2.8 получаем, что x должно удовлетворять неравенству

$$x \geq 2 \div 2,7. \quad (2.63)$$

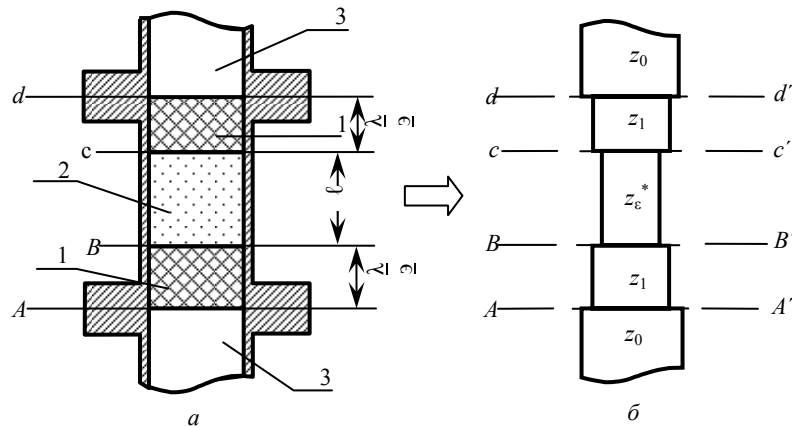


Рис. 2.8. Первичный преобразователь СВЧ-влажномера в виде отрезка волновода (а) и его эквивалентная схема (б):
1 – радиопрозрачные полуволновые заглушки; 2 – лажный материал;
3 – волновод с воздушным заполнением

Учитывая (2.63), можно заключить, что для минимизации погрешностей, связанных с переотражениями, переходное ослабление во влажном материале должно быть не менее 17÷23 дБ.

2.1.4. Многочастотные методы и параметры преобразования

Выше рассматривались влажные материалы, у которых распределение влаги по оси просвечивания было однородным. В ряде случаев необходимо решить задачу определения градиентов влаги (например, в орошаемом земледелии, изучении теплофизических параметров ограждающих конструкций и др.). Если осуществить частотную модуляцию электромагнитных колебаний СВЧ и принимать отраженные от объекта контроля сигналы, то при подаче их на смеситель на выходе получим результирующий сигнал, несущий в себе информацию о влажности каждого слоя, положении слоев относительно друг друга и их толщине [115]. Действительно, если R – расстояние до отражающего слоя и C – скорость распространения радиоволн СВЧ в исследуемом материале, то за время задержки отраженного

сигнала относительно зондирующего $t_3 = \frac{2R}{C}$ при скорости изменения частоты генератора $\nu = \frac{dt_2}{dt}$ произойдет изменение частоты на величину $\Delta f_2 = t_3 \nu = \frac{2\nu}{C} R$. При этих условиях, если $\nu = 2\Delta F \cdot F_M$, $\Delta f_2 = \frac{2\nu}{C} R = 4\Delta F \cdot F_M \frac{R}{C}$ и положить $R_x \geq 1$ см, $\Delta F = 3 \cdot 10^9$ гц, $F_M = 1000$ гц, то получим $\Delta f_2 = 400$ Гц. Это означает, что толщина слоя в 1 см дает изменение частоты на 400 Гц, что легко измеряется существующими приборами.

При зондировании исследуемого образца ЧМ СВЧ-сигналом на вход приемника поступают напряжения:

$$\left. \begin{aligned} e_{\Gamma} &= E_{\Gamma} \cos \int_0^t \omega_{\Gamma} \bar{t} dt = E_{\Gamma} \cos \theta \cdot t; \\ e'_{oc} &= E'_{oc} \cos \int_0^t \omega'_{oc} (\bar{t} - \bar{t}_3) dt = E'_{oc} \cos \theta'_{oc} t; \\ e''_{oc} &= E''_{oc} \cos \int_0^t \omega''_{oc} (t - t_3) dt = E''_{oc} \cos \theta''_{oc} t; \\ &\dots\dots\dots \\ e^n_{oc} &= E^n_{oc} \cos \int_0^t \omega^n_{oc} (t - t_3^n) dt = E^n_{oc} \cos \theta^n_{oc} t; \end{aligned} \right\}, \quad (2.64)$$

где θ – мгновенные фазы излучаемого и отраженных сигналов с соответствующими индексами;

ω – то же для частоты.

Амплитуды суммирующего напряжения равны:

$$\begin{aligned}
E_{\Sigma}' &= \sqrt{E_{\Gamma}^2 + E_{OC}^{(I)2} + 2E_{\Gamma} \cdot E_{OC}^{(I)} \cos[\theta_{OC}^{(I)}(t) - \theta_{\Gamma}(t)]}; \\
E_{\Sigma}'' &= \sqrt{E_{\Gamma}^2 + E_{OC}^{(II)2} + 2E_{\Gamma} \cdot E_{OC}^{(II)} \cos[\theta_{OC}^{(II)}(t) - \theta_{\Gamma}(t)]}; \\
\hline
E_{\Sigma}^{(n)} &= \sqrt{E_{\Gamma}^2 + E_{OC}^{(n)2} + 2E_{\Gamma} \cdot E_{OC}^{(n)} \cos[\theta_{OC}^{(n)}(t) - \theta_{\Gamma}(t)]}. \quad (2.65)
\end{aligned}$$

Подавая их на вход детектора, получаем:

$$I_{\Sigma}^{(I)} = kE_{\Sigma}^{(I)2} \cong kE_{\Gamma}^2 + 2kE_{\Gamma} \cdot E_{OC}^{(I)} \cos \int_0^t [\omega_{\Gamma}(t) - \omega_{OC}^{(I)}(\bar{t} - \bar{t}_3^{(I)})] dt = I; \quad (2.66)$$

$$I_{\Sigma}^{(n)} = I_{\Sigma}^{(n)} + I_{\Sigma}^{(n)}. \quad (2.67)$$

Осуществив спектральный анализ функции (2.66) посредством анализатора спектра, получим однозначную функцию о влажности материала каждого слоя по интенсивности линии спектральной составляющей $I_{\Sigma}^{(n)}$ и расположение слоя R по величине

$$\Delta\omega_{\Gamma}^{(n)}(\bar{t}) = \omega_{\Gamma}(\bar{t}) - \omega_{OC}^{(n)}(\bar{t} - t^{(n)}). \quad (2.68)$$

Реализация этого метода происходит следующим образом. Напряжение модулятора, поступающее на управляющий электрод генератора СВЧ, изменяет зондирующий сигнал по определенному закону, например, пилообразному. Радиоволна СВЧ, модулированная по частоте, распространяется в воздухе и исследуемом материале. При этом на границе раздела слоев с различными значениями диэлектрической проницаемости происходит ее частичное отражение и поглощение. Отраженный сигнал принимается устройством в качестве основного функционального элемента, в котором используется кристаллический смеситель. На его вход от генератора подается часть прямого сигнала. В результате смешения, на выходе приемного устройства появляется сложный результирующий сигнал $\Theta_{\Sigma}(t)$, поступающий на вход анализатора спектра.

Другой способ основан на использовании методов временной диэлектрической спектроскопии (ВДС) [49, 54].

2.2. Методы локализованного поля

В этой группе методов объект контроля помещается в отрезок регулярной линии передач (коаксиальной, волноводной, полосковой, двухпроводной и др.). При измерении влажности сыпучих или волокнистых материалов этот участок отделен с двух сторон двумя радиопрозрачными вставками (рис. 2.8), толщина которых должна быть кратной $\frac{1}{2}\lambda_{\epsilon}$ в целях минимизации величины коэффициента отражения (λ_{ϵ} – длина волны в диэлектрике, из которого сделаны вставки; в отдельных задачах СВЧ-влажнометрии вставки могут быть изготовлены из диэлектрика с нормированной величиной потерь).

Рассмотрим наиболее общий случай первичного преобразователя этого типа – первичный преобразователь в виде отрезка полого волновода. Для простоты выкладок положим, что влажный материал представляет собой крупнодисперсный гетерогенный диэлектрик.

Пусть $\alpha_{\text{ВМ}}$ – постоянная затухания во влажном материале, когда он находится в свободном пространстве. Тогда

$$\alpha_{\text{ВМ}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{\epsilon'}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.69)$$

Учитывая, что для влажных материалов $\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \leq 0,3$ и разлагая (2.69) в ряд Маклорена с точностью до величин 2-го порядка малости будем иметь

$$\alpha_{\text{ВМ}} \cong \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{\epsilon''}{\sqrt{\epsilon'}}. \quad (2.70)$$

В случае волновода постоянная затухания α' равна:

$$\alpha' = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{\varepsilon' - p}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - p} \right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.71)$$

где $p = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}} \right)^2$,

$\lambda_{кр}$ – критическая длина волны волновода.

Произведя аналогичные операции, как в (2.69), получим:

$$\alpha' = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon' - p}}. \quad (2.72)$$

Сравнивая (2.70) и (2.72), находим

$$\alpha' = \alpha_{\text{вм}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p}{\varepsilon'}}}. \quad (2.73)$$

Обычно для волноводов выполняется соотношение [115, 116] $p \leq 0,5$.

Кроме того, так как даже для сухих гетерогенных диэлектриков $\varepsilon' \geq 2$, то α' с точностью до величин второго порядка малости может быть представлено в виде

$$\alpha' \cong \left(1 + \frac{p}{2\varepsilon'} \right).$$

Таким образом, постоянная затухания α' электромагнитной волны во влажном материале, помещенном в первичный преобразователь в виде волновода, незначительно превышает (в худшем случае на (10 ÷ 15 %) постоянную затухания $\alpha_{\text{вм}}$ в случае неограниченного

диэлектрика. Если учесть, что по мере увеличения влагосодержания ε' возрастает, то этим отличием вообще можно пренебречь и считать, что $\alpha' \rightarrow \alpha_{\text{вм}}$. Таким образом, постоянная затухания α' во влажном материале практически не зависит от типа первичного преобразователя, если последняя – отрезок регулярной линии передачи.

Учитывая (1.36), находим

$$N_1 = 8,686 \alpha_{\text{н}} \Phi \frac{W}{1 - W} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{н}}} d. \quad (2.74)$$

Обратимся теперь ко второму слагаемому в (2.22). Так как β_1 связано с ε'' следующим выражением (здесь учтено, что $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \leq 0,3$), то

$$\beta_1' = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon' - p}. \quad (2.75)$$

Очевидно, что β_0' частный случай (2.61) при $\varepsilon' = 1$

$$\beta_0' = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - p}. \quad (2.76)$$

Комбинируя (2.75 – 2.76), окончательно находим

$$N_2 = 8,686 \ln \frac{(\sqrt{\varepsilon' - p} + \sqrt{1 - p})^2}{4\sqrt{(\varepsilon' - p)(1 - p)}}. \quad (2.77)$$

Согласно (1.34), $\sqrt{\varepsilon'} \sim \frac{W}{1 - W} + b$ (b – константа, зависящая от

коэффициента заполнения и ε_c) и, следовательно, N_2 есть монотонно-возрастающая функция влагосодержания, хотя и медленная, так как она пропорциональна логарифму $\sqrt{\varepsilon'}$. Тем не менее, в пределах

измерения влагосодержания крупнодисперсного диэлектрика до 12 % ее можно считать близкой к линейной. Из выражения (2.77) очевидно, что на N_2 существенное влияние оказывает p -фактор, т. е. должно иметь место различие между N_2 в свободном пространстве или в линии передачи с ТЕМ-волной и N_2 для полого волновода.

В табл. 2.2 приведены данные для $p = 0$ (случай ТЕМ) и $p = 0,484$ (типичное значение для прямоугольного волновода) [1].

Таблица 2.2

Зависимость p -фактора от влажности

$W, \%$	$p = 0$	$p = 0,484$
1	0,086	1,4
5	1,34	2,45
11	2,55	4,02

Окончательное выражение для амплитудного параметра преобразования имеет вид

$$N_2 = 8,686 \left[\frac{\alpha_n \Phi W \rho_0 d}{(1-W) \rho_n} - \ln \frac{(\sqrt{\varepsilon' - p} + \sqrt{1-p})^2}{4\sqrt{(\varepsilon' - p)(1-p)}} \right]. \quad (2.78)$$

Фазовые и отражательные параметры преобразования аналогичны полученным в разделе 2.1 для оптических методов с учетом p -фактора. Это относится и к влиянию коэффициента заполнения Φ , температуры T и концентрации солей $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ и $\Delta|\Gamma|$.

2.2.1. Резонаторные методы и параметры преобразования

Резонаторные параметры преобразования (ПП) основаны на измерении добротности Q или ухода частоты ΔF резонатора, заполненного влажным материалом. Как отмечалось в главе 1, эти ПП наиболее перспективны для диапазона малых и сверхмалых влагосодержаний, поэтому рассмотрим их детально. При измерениях резонатор заполняют полностью влажным материалом, либо

его малую часть. В последнем случае используют метод малых возмущений [111]. Заполнять резонатор полностью твердым гетерогенным диэлектриком не представляется возможным, так как это требует разборки стенок резонатора, что приводит к дополнительной погрешности в измерении влагосодержания и увеличивает время анализа. Метод малых возмущений требует малых объемов образца по сравнению с объемом самого резонатора. Размеры резонатора по порядку величины равны длине волны. Если принять, что линейные размеры образца В.М. составляют 0,1 размеров резонатора (обычное требование для метода малых возмущений), то очевидно, что выполнение этого условия применительно к рассматриваемому классу В.М. можно осуществить только на частотах, меньших 1÷2 ГГц.

Получим общие соотношения для резонаторных параметров преобразования. Примем, что резонаторная частота невозмущенного резонатора (в отсутствии образца) ω_0 , а при наличии образца в резонаторе ω изменение резонансной частоты объемного резонатора определяется выражением:

$$\omega - \omega_0 = \frac{i_{\Delta V} \int (J_e \bar{E}_0 - J_m \bar{H}_0) dV}{\int_V (\varepsilon_0 \bar{E}_0^* \bar{E} + \mu \bar{H}_0^* \bar{H}) dV}, \quad (2.79)$$

где $\bar{J}_e$, $\bar{J}_m$ – векторы плотности тока электрической и магнитной составляющей поля;

$\bar{E}_0^*$ и $\bar{H}_0^*$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей соответственно в невозмущенном резонаторе;

$\bar{E}$ и $\bar{H}$ – векторы напряженности электрического и магнитного полей соответственно в возмущенном резонаторе;

ΔV и V – объемы образца и резонатора соответственно.

Обычно в приложениях используются два приближения: СВЧ-поле при введении образца меняется слабо в пустом объеме резонатора; СВЧ-поле постоянно по объему образца вдоль линий симметрии электрического поля. Оба этих условия выполняются, если

размеры образца значительно меньше длины волны. В этом предположении можно показать [66], что (2.79) преобразуется к виду

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx - \frac{\int_{\Delta V} (\epsilon^* - 1) |E_0|^2 dV}{2 \int_{\Delta V} (E_0)^2 dV}. \quad (2.80)$$

Так как диэлектрическая проницаемость величины комплексная, то круговая частота ω также комплексная величина:

$$\omega = \omega' + i\omega''. \quad (2.81)$$

Согласно [149] выполняется соотношение

$$\omega'' = \frac{\omega'}{2Q_{od}}, \quad (2.82)$$

где Q_{od} – ненагруженная добротность возмущенного резонатора.

Для резонаторов с высокой добротностью $\omega_0'' \ll \omega_0'$. Кроме того, в методе малых возмущений $\frac{\omega' - \omega_0}{\omega_0'} \ll 1$. С учетом сделанных замечаний комбинируя (2.81, 2.82), получаем выражения для ϵ и ϵ' :

$$\epsilon'' = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{Q_{cd}} - \frac{1}{Q_0} \right] \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\bar{E}_0|^2 dV}, \quad (2.83)$$

$$\epsilon' = 1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\bar{E}_0|^2 dV}, \quad (2.84)$$

где $\Delta\omega = \omega - \omega_0$;

Q_0 – ненагруженная добротность невозмущенного резонатора.

В реальных условиях объемный резонатор всегда связан с фидерной системой СВЧ-тракта влагомера, поэтому контролируется обычно ненагруженная добротность Q_H объемного резонатора.

Учитывая, что

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_{вн}}, \quad (2.85)$$

где $Q_{вн}$ – внешняя добротность резонатора, которая не меняется при помещении образца В.М. в резонатор.

Для ϵ'' получаем:

$$\epsilon'' = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{Q_{Hd}} - \frac{1}{Q_H} \right] \frac{\int_V |\bar{E}_0|^2 dV}{\int_{\Delta V} |\bar{E}_0|^2 dV}. \quad (2.86)$$

Очевидно, для того чтобы можно было воспользоваться выражениями (2.83) и (2.86), необходимо знать тип резонатора и тип колебаний, на котором он возбужден. В низкочастотной части СВЧ-диапазона в большинстве случаев используются цилиндрические резонаторы. Наиболее приемлемым для целей СВЧ-влагометрии является резонатор с возбуждением на волне E_{010} , так как такой резонатор имеет сравнительно небольшие габариты, ввиду независимости резонансной частоты резонатора от его высоты. Вычислим интегралы, входящие в правые части равенств (2.83) и (2.86).

Согласно [125], напряженность электрического поля в резонаторе имеет только одну составляющую E_z , удлиняющуюся по закону

$$E_z = E_A J_0 \left(\frac{\nu_{01}}{a} r \right), \quad (2.87)$$

где E_A – напряженность электрического поля в центре резонатора;

r – расстояние от центра резонатора;

a – радиус резонатора;

J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

С учетом геометрии расположения образца в резонаторе будем иметь:

$$\int_{\Delta V} |E_0|^2 dV = E_A^2 \int_0^h \int_0^{2\pi} \int_0^a r J_0^2 \left(\frac{v_{01}}{a} r \right) dr d\phi dh. \quad (2.88)$$

Учитывая, что для любой цилиндрической функции $Z_n(x)$ [153, 154],

$$\int x Z_n^2(x) dx = \frac{x^2}{2} [Z_n^2(x) - Z_{n-1}(x) Z_{n+1}(x)]; \quad (2.89)$$

$$Z_{-n}(x) = (-1)^n Z_n(x), \quad (2.90)$$

для (2.88) получаем:

$$\int_{\Delta V} |E_0|^2 dV = \pi d^2 h \left[J_0^2 \left(\frac{v_{01} d}{a} \right) + J_1^2 \left(\frac{v_{01} d}{a} \right) \right] E_A^2. \quad (2.91)$$

Так как в методе малых возмущений всегда выполняется условие $\frac{d}{a} \ll 1$, то функции Бесселя «0» и «1» порядка могут быть представлены в виде первых членов ряда их разложения. Учитывая также, что $v_{01} = 2,40$, окончательно получаем:

$$\int_{\Delta V} |E_0|^2 dV = \pi d^2 h \left[1 + \frac{1,2d^2}{a^2} \right] E_A^2. \quad (2.92)$$

Аналогично получаем, что

$$\int_V |E_0|^2 dV = 0,27 \pi a^2 h E_A^2. \quad (2.93)$$

Учитывая (2.92) и (2.93), находим

$$\varepsilon' = 1 + 0,27 \frac{\Delta \omega}{\omega_0} \frac{a^2}{d^2 \left[1 + \frac{1,2d^2}{a^2} \right]}, \quad (2.94)$$

$$\varepsilon'' = 0,135 \left[\frac{1}{Q_{Hd}} - \frac{1}{Q_H} \right] \frac{a^2}{d^2 \left[1 + \frac{1,2d^2}{a^2} \right]}. \quad (2.95)$$

Принципиально возможны два варианта включения резонаторов. В первом случае резонатор включается по проходной схеме и контролируется изменение переходного ослабления ΔN резонатора при внесении в его полость образца или смещение Δf от его резонансной частоты $\left(\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi} \right)$. Изменение ΔN можно контролировать

двойко: либо при выполнении условия резонанса, т. е. на частотах f_0 и f_1 , либо на одной частоте f_0 . В последнем случае условие резонанса не выполняется, однако повышается чувствительность метода к влагосодержанию. При включении резонатора на прохождение можно контролировать также фазовый сдвиг $\Delta \phi$ волны в резонаторе до и после внесения в полость резонатора образца. Аналогичные измерения можно проводить при включении резонатора в режиме отражения. В этом случае переходное ослабление ΔN заменяется коэффициентом отражения $|\Gamma|$.

Рассмотрим параметр преобразования при включении резонатора по проходной схеме. При таком включении резонатор имеет два элемента связи (на входе и на выходе). В этом случае переходное ослабление резонатора будет задаваться выражением [125]:

$$N = 10 \lg \frac{Q_{BH} - Q_{BH2}}{4Q_H^2} (1 + a^2), \quad (2.96)$$

где Q_{BH1} и Q_{BH2} – внешние добротности резонатора для входного и выходного элементов связи резонатора;

$$a = 2Q_H \frac{\delta f}{f_0}, \quad (2.97)$$

где δf – расстройка резонатора относительно резонансной частоты f_0 .

Примем сначала, что функция преобразования ΔN измеряется на резонансной частоте резонатора, т. е. в отсутствии образца переходное ослабление N_0 измеряется на резонансной частоте f_0 , а в переходное ослабление N_1 при наличии образца в полости резонатора – на резонансной частоте f_1 . Так как в этом случае $a = 0$, из (2.96) находим:

$$\Delta N = N_1 - N_0 = 20 \lg \frac{Q_{HO}}{Q_{Hd}}. \quad (2.98)$$

Комбинируя (2.95) и (2.98), имеем:

$$\Delta N = 8,686 \ln \left(1 + \frac{2Q_{HO}}{B} \varepsilon'' \right), \quad (2.99)$$

$$\text{где } B = 0,27 \frac{a^2}{d^2 \left(1 + 1,2 \frac{d^2}{a^2} \right)}. \quad (2.100)$$

Найдем связь между ΔN и W . При этом учтем, что пользоваться выражениями (1.35) в данном случае нельзя, так как при его выводе полагалось $\varepsilon_c = 0$ (сухой материал не обладает потерями). В диапазоне малых и сверхмалых влагосодержаний ε'' собственного сухого материала может оказаться сравнимым с ε'' , вызванным водой в материале. Полагая, что мнимая часть диэлектрической проницаемости сухого материала равна ε_c'' , в рамках линейной модели можно записать:

$$\frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_H''}{\sqrt{\varepsilon_H'}} \Phi \frac{\rho_c}{\rho_H} W + \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}} \Phi = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon'}}. \quad (2.101)$$

Откуда находим

$$\varepsilon'' = \Phi \left(\frac{\rho_c}{\rho_H} \frac{\varepsilon_H''}{\sqrt{\varepsilon_H'}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}} \right) \left[\Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1 \right) + 1 \right]. \quad (2.102)$$

При выводе (2.102) было принято во внимание, что при $W \ll 1$

$$1 + \Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1 \right) \gg \Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1 - W} \left(\sqrt{\varepsilon'} - 1 \right).$$

Комбинируя (2.100) и (2.102), получаем для параметра преобразования ΔN :

$$\Delta N = 8,686 \ln \left[1 + \frac{2Q_{HO}}{B} \Phi \left(\frac{\rho_c \varepsilon_H''}{\rho_H \sqrt{\varepsilon_H'}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}} \right) \right] \left[\Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} + 1 \right) \right]. \quad (2.103)$$

Из (2.103) простым дифференцированием можно определить чувствительность функции преобразования к влагосодержанию:

$$\Delta(\Delta N) = 8,686 \frac{\frac{2Q_{HO}}{B} \Phi \frac{\rho_c \varepsilon_H''}{\rho_H \sqrt{\varepsilon_H'}} \left[\Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1 \right) + 1 \right]}{1 + \frac{2Q_{HO}}{B} \Phi \left(\frac{\rho_c \varepsilon_H''}{\rho_H \sqrt{\varepsilon_H'}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}} \right) \left[\Phi \left(\sqrt{\varepsilon_c'} - 1 \right) + 1 \right]} \quad (2.104)$$

Из (2.104) следует, что чувствительность рассматриваемого метода уменьшается с ростом влагосодержания. Что касается влияния нагруженной добротности невозмущенного резонатора Q_{HO} , то с увеличением Q_{HO} чувствительность $\Delta(\Delta N)$ возрастает и при неограниченном возрастании Q_{HO} стремится к величине, не зависящей от Q_{HO} :

$$\Delta(\Delta N)_{Q_{HO} \rightarrow \infty} = 8,686 \frac{\frac{\rho_c \varepsilon_H''}{\rho_H \sqrt{\varepsilon_H'}}}{\frac{\rho_c \varepsilon_H''}{\rho_H \sqrt{\varepsilon_H'}} W + \frac{\varepsilon_c''}{\sqrt{\varepsilon_c'}}}. \quad (2.105)$$

В этой связи необходимо отметить следующее. Подстановка численных значений в (2.104) для реальных В.М. в области малых влагосодержаний показывает, для того чтобы единицей в знаменателе (2.104) можно было пренебречь (случай $Q_{HO} \rightarrow \infty$), необходимы очень большие добротности $Q_{HO} > 10^5$. В низкочастотной части

СВЧ-диапазона такие добротности практически недостижимы. Следовательно, для повышения чувствительности $\Delta(\Delta N)$ следует выполнять резонатор с максимально возможной добротностью $Q_{\text{но}}$. С другой стороны, как следует из выражения (2.85), $Q_{\text{но}}$ можно повысить двумя путями: либо увеличивая собственную добротность Q_0 , либо увеличивая внешнюю добротность $Q_{\text{вн}}$. Возможности в увеличении Q_0 обычно ограничены качеством внутреннего покрытия резонатора. Поэтому единственный путь в повышении $Q_{\text{но}}$ состоит в увеличении $Q_{\text{вн}}$, т. е. в уменьшении степени связи резонатора с остальным СВЧ-трактом влагомера. Обратимся теперь к выражению (2.96) и перепишем с учетом (2.85):

$$N_0 = 8,686 \left(1 + \frac{Q_{\text{вн}}}{2Q_0} \right). \quad (2.106)$$

Из (2.106) следует, что с увеличением $Q_{\text{вн}}$ переходное ослабление N_0 незаполненного резонатора возрастает. Так как реальные контролируемые ослабления ограничены обычно величиной 60 дБ, то из сделанных замечаний следует, что с одной стороны, с увеличением $Q_{\text{вн}}$ (а вместе с ним и $Q_{\text{но}}$) увеличивается чувствительность метода, а с другой – сужается диапазон контролируемых влагосодержаний. Следовательно, при практическом использовании описанного метода необходимо искать компромисс между этими двумя противоречивыми требованиями.

На графиках рис. 2.9 представлены экспериментальные зависимости $\Delta N(W)$ для кварцевого песка в диапазоне малых влагосодержаний. На этом же рисунке нанесена теоретическая зависимость. Экспериментальные значения для $\Delta N(W)$ были получены в резонаторе с размерами $a = 84$ мм; $d = 8,2$ мм на частоте 1,4 ГГц. Нагруженная добротность $Q_{\text{но}}$, измеренная по известной методике [125], оказалась равной 2 400, а начальное ослабление – 23 дБ. Из приведенных зависимостей следует хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическими, рассчитанными по выражению (2.103).

Параметр преобразования Δf равен:

$$\Delta f = \frac{f_0}{B} \left\{ \left[\Phi \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1-W} (\sqrt{\varepsilon'_H} - 1) + \Phi (\sqrt{\varepsilon'_c} - 1) + 1 \right]^2 - 1 \right\}. \quad (2.107)$$

Из (2.107) следует, что чувствительность метода, основанного на измерении Δf , практически соответствует тем оценкам, которые были сделаны относительно чувствительности $\Delta \varepsilon'$, f_0 , т. к. Δf отличается от ε' только наличием множителя f_0/B и дополнительной единицы в скобках. Очевидно, что и степень влияния мешающих факторов на функцию преобразования Δf_1 приблизительно такая же, как и на ε' .

Рассмотрим еще один параметр преобразования. Суть его заключается в измерении ослабления δN проходного резонатора при помещении в него образца В.М. Отличительной особенностью является то, что измерения производятся без перестройки частоты резонатора. Частота, на которой возбуждается резонатор, соответствует резонансной частоте при возмущении резонатора абсолютно сухим материалом. Таким способом можно существенно повысить чувствительность резонаторного метода. Получим выражение для параметра преобразования рассматриваемого метода. Примем, что резонансная частота невозмущенного резонатора f_0 , возмущенного абсолютно сухим материалом f_1 , а возмущенная образцом В.М. – f_2 . Тогда, согласно (2.96), переходное ослабление резонатора на частоте f_1 при помещении в него пробы абсолютно сухого материала будет определяться выражением

$$N_1 = 8,686 \ln \frac{Q_{\text{вн}}}{2Q_{\text{нс}}}, \quad (2.108)$$

где $Q_{\text{нс}}$ – нагруженная добротность объемного резонатора возмущенного образцом сухого материала.

Переходное ослабление N_2 резонатора, в полость которого помещен образец В.М., будет равно:

$$N_2 = 8,686 \ln \frac{Q_{\text{вн}}}{2Q_{\text{нв}}} \sqrt{1+a^2}, \quad (2.109)$$

где $Q_{\text{нв}}$ – нагруженная добротность объемного резонатора при помещении в его полость образца В.М.;

$$a = 2Q_{HB} \frac{f_2 - f_1}{f_1} \approx Q_{HB} \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (2.110)$$

Из (3.108) и (3.109) находим fN ;

$$\delta N = N_2 - N_1 = 8,686 \ln \frac{Q_{HC}}{Q_{HB}} \sqrt{1 + a^2} \quad (2.111)$$

С учетом (2.95) выражение (2.111) преобразуется к виду:

$$\delta N = 8,686 \ln \left(\frac{\frac{2\varepsilon'' Q_{HO}}{B} + 1}{\frac{2\varepsilon''_l Q_{HO}}{B} + 1} \sqrt{1 + a^2} \right) \quad (2.112)$$

Сравнивая (2.99) и (2.111), находим

$$\delta N = \Delta N + 8,686 \ln \frac{\sqrt{1 + a^2}}{\frac{2\varepsilon''_c Q_{HO}}{B} + 1} \quad (2.113)$$

Учитывая (2.110), можно показать, что в диапазоне очень малых влагосодержаний ($\varepsilon' \approx 10^{-3}$)

$$1 + a^2 \approx 1 + Q_{HO}^2 \Delta \varepsilon^{12}(W) \quad (2.114)$$

Подставляя (2.114) в (2.113) и полагая, что $(2\varepsilon''_c / B) Q_{HO} \ll 1$, имеем:

$$\delta N = \Delta N + 8,686 \ln \sqrt{1 + Q_{HO}^2 \Delta \varepsilon^{12}(W)}, \quad (2.115)$$

$$\Delta \varepsilon^{12} = 4 \left[\left(\sqrt{\varepsilon'_c} - 1 \right) \Phi + 1 \right]^2 \frac{W^2 \Phi^2 \rho_0^2}{\rho_H^2} \quad (2.116)$$

Таким образом, параметр преобразования δN возрастает с увеличением влагосодержания быстрее, чем функция ΔN . Следует, однако, отметить, что рассмотренный выше способ может быть пригоден только в диапазоне очень малых влагосодержаний, так как при увеличении W добавка к ΔN становится настолько большой, что ослабление $\delta N + N_0$ намного превышает 60 дБ. Кроме того, необходимо очень точно фиксировать Φ . В связи с изложенным, данный ПП может быть использован только при очень точных измерениях в диапазоне сверхмалых влагосодержаний ($W < 0,1\%$), там где: другие резонаторные методы недостаточно чувствительны.

2.2.2. Резонаторные датчики измерения влажности зерновых материалов коаксиального типа

Микроволновые приборы измерения влажности зерновых материалов часто конструируются на основе полосковых или обычных простых линий передачи СВЧ с помещением образца исследуемого материала между приемником и передатчиком излучения [129–136]. Такие электромагнитные системы являются открытыми системами и сильно подвержены разнообразным внешним влияниям, например, присутствию вблизи тракта проводящих объектов, влажности окружающего воздуха и т. д. Еще один недостаток подобных измерительных систем состоит в том, что они плохо приспособлены к работе в режиме реального времени, когда надо постоянно контролировать влажность зернового материала, непрерывно подаваемого по трубопроводу. Для повышения точности измерений нужно свести к минимуму подобные внешние воздействия, и с этой точки зрения наиболее перспективными могут оказаться резонаторные схемы реализации влагометрического процесса [139, 144]. Их основное достоинство заключается в том, что здесь электромагнитное поле существует в замкнутой области, ограниченной со всех сторон проводящими поверхностями, а контакт с исследуемым материалом осуществляется посредством узких щелей. Кроме того, резонаторные системы легко встраиваются в трубопроводные устройства подачи зерна и обеспечивают непрерывный режим

контроля его влагосодержания. Исходя из этих требований, можно вполне определенно сформулировать оптимальную конструктивную схему исполнения датчика влажности зерна резонаторного типа. Это коаксиальная структура, внутренний цилиндр которой есть не что иное, как трубопровод подачи зерна, с которой сама коаксиальная область резонансного возбуждения связана посредством внутренней поперечной кольцевой щели (рис. 2.9). Через нее часть возбуждаемого поля проникает в диэлектрик (зерно), что вызывает изменение резонансной частоты и уменьшение добротности резонатора. Прибор фиксирует эти изменения относительно исходных значений параметров резонансного поля для пустого резонатора без диэлектрика. Поскольку комплексная диэлектрическая проницаемость зерна является однозначной функцией его влагосодержания, то по измерению резонансной частоты и добротности резонатора можно однозначно определить диэлектрическую проницаемость помещенного во внутренний цилиндр диэлектрика, т. е. зерна, а, стало быть, и его влажность. Соответствующая функция, связывающая измерение резонансных параметров датчика с влажностью зернового диэлектрического материала, устанавливается в процессе калибровки прибора.

В данном разделе рассматривается теоретический расчет электромагнитного поля внутри резонаторного датчика коаксиального типа и некоторые вопросы применения таких датчиков в реальных условиях. Расчет поля возбуждения резонатора необходим для того, чтобы получить общую картину его пространственного распределения и оценить интегральные характеристики (резонансную частоту и добротность) в зависимости от параметров внесенного диэлектрика. Анализ пространственной картины поля позволяет четко уяснить в деталях суть физических процессов, происходящих при возбуждении резонатора с диэлектриком, и выявить особенности резонансного метода измерения, связанные с неоднородностью его поля возбуждения. Здесь мы излагаем основные результаты нашего исследования по теоретическому моделированию коаксиальных резонаторных датчиков влажности зерна и их применению, которые опубликованы в работах [129–134].

2.2.2.1. Расчет электромагнитного поля резонаторного датчика измерения влажности зерновых материалов

Рассмотрим коаксиальный резонатор с идеально проводящими стенками конечной толщины $d = rc - ra$, ось которого совпадает с осью z цилиндрической системы координат $\rho\varphi z$, а внутренняя поверхность боковых стенок – с поверхностями $\rho = rc$ и $\rho = R$ (рис. 2.9). Область возбуждения резонансного излучения между ними ограничена плоскими стенками $z = \pm L$, а бесконечная по высоте цилиндрическая область внутри проводящей стенки $\rho = ra$ целиком заполнена диэлектриком с комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ . Предполагаем, что обе указанные области контактируют через кольцевую щель с краями $z = s \pm l$, где l – полуширина щели, s – вертикальное ее смещение относительно середины оси резонатора.

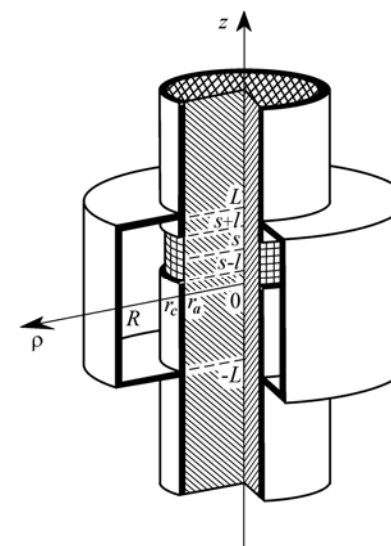


Рис. 2.9. Коаксиальный резонатор с бесконечным по высоте цилиндрическим диэлектриком:

L – внутренняя полувысота резонатора; R и rc – внутренние радиусы области резонансного возбуждения поля; ra – радиус цилиндрического диэлектрика; l – полуширина кольцевой щели; s – ее смещение от середины резонатора

Применительно к рассматриваемой резонансной системе задача состоит в определении электромагнитного поля, возникающего при возбуждении свободных колебаний данной системы на некоторой частоте, близкой к частоте колебаний аналогичного резонатора без щели и диэлектрика. В дальнейшем будем рассматривать случай возбуждения резонатора через H -поляризацию, когда частота начального возбуждающего поля и его поляризация близки к частоте и поляризации моды H_{0m1} (m – целое неотрицательное число, причем $m \neq 0$ – несимметричная мода). Предполагаем, что поле – монохроматическое и его зависимость от времени определяется экспоненциальным множителем $\exp(-i\omega t)$, а также, что оно азимутально симметричное, т.е. что в цилиндрической системе координат ρ, φ, z оно периодическое по азимутальному углу φ . Тогда, в указанной цилиндрической системе координат пространственные компоненты электромагнитного поля выражаются через 2 различные комплексные скалярные функции $u(\rho, z)$ и $\bar{u}(\rho, z)$ по формулам [135–137]:

$$E_\rho = \left(-\frac{ikm}{\rho} u + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \rho \partial z} \right) \sin m\varphi;$$

$$H_\rho = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \rho \partial z} - \frac{ikm}{\rho} \varepsilon(\rho) \bar{u} \right) \cos m\varphi; \quad (2.117a)$$

$$E_\varphi = \left(-ik \frac{\partial u}{\partial \rho} + \frac{m}{\rho} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \cos m\varphi;$$

$$H_\varphi = \left(-\frac{m}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} + ik \varepsilon(\rho) \frac{\partial \bar{u}}{\partial \rho} \right) \sin m\varphi; \quad (2.117b)$$

$$E_z = \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon(\rho) \bar{u} \right) \sin m\varphi;$$

$$H_z = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon(\rho) u \right) \cos m\varphi, \quad (2.117b)$$

где m – число периодов поля, которые целиком укладываются в полный азимутальный угол 2π ,

$k = \omega/c$ – волновое число,

$\Sigma(\rho)$ – кусочно-постоянная функция, равная величине диэлектрической проницаемости диэлектрика $\square$ внутри него ($\rho < rc$) и единице в остальном пространстве ($\rho > rc$). Чтобы эти компоненты полей удовлетворяли векторным уравнениям Максвелла, для функций u и $\bar{u}$ достаточно потребовать выполнимости цилиндрического уравнения Гельмгольца:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{m^2}{\rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon(\rho) \right) \begin{Bmatrix} u \\ \bar{u} \end{Bmatrix} = 0 \quad (2.118)$$

Эти функции определяют H - и E -поляризации электромагнитного поля.

Отметим, что волновое число $k = \omega/c$ и частота ω свободных колебаний поля в резонаторе – комплексные, с отрицательной мнимой частью, что должно обеспечивать затухание колебаний во времени вследствие потерь энергии на излучение через щель и на поглощение в диэлектрике [137, 138].

Наша задача по определению структуры поля внутри резонатора по существу является задачей дифракции излучения, которое возбуждается в коаксиальной области, на поперечной кольцевой щели и бесконечном цилиндрическом диэлектрике. Для такого рода задач очень эффективен метод частичных областей, или метод сшивания [139, 140]. Он состоит в том, что все пространство распространения поля разбивается на области простой формы, границы которых совпадают с координатными поверхностями и внутри которых поле может быть представлено в виде синусоидальных или экспоненциальных функций координат с неизвестными амплитудами, а затем на границах разных смежных областей поля, и их нормальные производные приравниваются друг другу, откуда возникают уравнения для определения всех неизвестных амплитуд и других

вычисляемых параметров поля (например, резонансной частоты свободных колебаний). В нашем случае разбиение пространства на области очевидно. В качестве первой области можно взять коаксиальную область резонансного возбуждения поля $rc \leq \rho \leq R$; $-L \leq z \leq L$, лежащую между цилиндрическими поверхностями $\rho = rc$ и $\rho = R$, в качестве второй – цилиндрическую область бесконечной высоты $0 \leq \rho \leq ra$, занимаемую диэлектриком, и в качестве третьей – область внутри щели $ra \leq \rho \leq rc$; $s - l \leq z \leq s + l$, расположенную между проводящими стенками, которые разделяют первые две подобласти.

Граничные условия для полей (2.117а)–(2.117в) в рассматриваемой резонансной системе сводятся к условиям равенства нулю тангенциальных компонент электрического поля на проводящих поверхностях и к условию непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на поверхности диэлектрика:

$$(\partial u / \partial \rho)_{\rho=R} = 0; \quad (\bar{u})_{\rho=R} = 0 \quad \text{при } -L \leq z \leq L; \quad (2.119)$$

$$(u)_{z=s \pm l} = 0; \quad (\partial \bar{u} / \partial z)_{z=s \pm l} = 0 \quad \text{при } ra \leq \rho \leq rc; \quad (2.120)$$

$$(u)_{z=\pm L} = 0; \quad (\partial \bar{u} / \partial z)_{z=\pm L} = 0 \quad \text{при } rc \leq \rho \leq R, \quad (2.121)$$

а также

$$E_{\varphi,z}(r_{a,c}, z) = 0 \quad \text{при } |z - s| > l \text{ (на металле);} \quad (2.122)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{\varphi,z}(r_{a,c} - 0, z) &= E_{\varphi,z}(r_{a,c} + 0, z) \\ H_{\varphi,z}(r_{a,c} - 0, z) &= H_{\varphi,z}(r_{a,c} + 0, z) \end{aligned} \right\} \text{при } |z - s| < l \text{ (на щели),} \quad (2.123)$$

где символ «0» в первом аргументе величин (2.123) обозначает бесконечно малую положительную величину. В соответствии с идеологией метода частичных областей [139, 140], на поверхностях, ограничивающих всю область или подобласть распространения поля, граничные условия накладываются на функции u и $\bar{u}$ H - и E -поляризации по отдельности (условия (2.126)–(2.128)), а на поверхностях, разделяющих выбранные

подобласти, обе поляризации должны рассматриваться совместно (условия (2.129), (2.130)).

Конкретизируем вид этих полевых функций в каждой из трех выделенных подобластей. Будем рассматривать u и $\bar{u}$ в качестве суперпозиции простых стоячих решений (мод) уравнений (2.121), получаемых методом разделения переменных ρ и z в этих уравнениях. Как известно из [135–140], такие решения уравнений Гельмгольца (2.121) представляют собой произведения функций Бесселя различного рода порядка m , зависящих от ρ , и синусоидальных (экспоненциальных) функций – от z . В соответствии с этим для области резонансного возбуждения $rc \leq \rho \leq R$; $L \leq z \leq L$ полагаем:

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{D_n(\rho)}{D'_n(r_c)} \sin \beta_n(L - z);$$

$$\bar{u} = im \sum_{n=0}^{\infty} \bar{A}_n \frac{\bar{D}_n(\rho)}{\bar{D}_n(r_c)} \cos \beta_n(L - z), \quad (2.124)$$

где во второй формуле (2.124) общий множитель im введен для удобства дальнейших вычислений, A_n и $\bar{A}_n$ – скалярные амплитуды мод, которые определяются в дальнейшем,

$$D_n(\rho) = \frac{H_m^{(1)}(\alpha_n \rho)}{H_m^{(1)'}(\alpha_n R)} - \frac{H_m^{(2)}(\alpha_n \rho)}{H_m^{(2)'}(\alpha_n R)};$$

$$D'_n(\rho) = \frac{H_m^{(1)'}(\alpha_n \rho)}{H_m^{(1)'}(\alpha_n R)} - \frac{H_m^{(2)'}(\alpha_n \rho)}{H_m^{(2)'}(\alpha_n R)}; \quad (2.125a)$$

$$\bar{D}_n(\rho) = \frac{H_m^{(1)}(\alpha_n \rho)}{H_m^{(1)}(\alpha_n R)} - \frac{H_m^{(2)}(\alpha_n \rho)}{H_m^{(2)}(\alpha_n R)}; \quad (2.125b)$$

$$\beta_n = \pi n / 2L; \quad n = 0, 1, 2, \dots; \quad \alpha_n = \sqrt{k^2 - \beta_n^2}, \quad (2.126)$$

H_m (2.117, 2.118) – функции Ханкеля 1-го и 2-го рода [141], а штрихом обозначена производная от этих функций по своим аргументам $\alpha n \rho$ и $\alpha n R$.

Для области внутри щели ($ra \leq \rho \leq rc$; $s - l \leq z \leq s + l$) положим:

$$u = \sum_{j=1}^{\infty} v_j(\rho) \sin \tau_j(s+l-z); \quad \bar{u} = im \sum_{j=0}^{\infty} \bar{v}_j(\rho) \cos \tau_j(s+l-z), \quad (2.126a)$$

где

$$v_j = a_j H_m^{(2)}(\sigma_j \rho) + b_j H_m^{(1)}(\sigma_j \rho); \quad \bar{v}_j = \bar{a}_j H_m^{(2)}(\sigma_j \rho) + \bar{b}_j H_m^{(1)}(\sigma_j \rho); \quad (2.126б)$$

$$\tau_j = \pi j / 2l; \quad j = 0, 1, 2, \dots; \quad \sigma_j = \sqrt{k^2 - \tau_j^2}, \quad (2.127)$$

a_j , b_j и $\bar{a}_j$, $\bar{b}_j$ – неизвестные модовые амплитуды. Для единообразия записи сумм по модам обеих поляризаций в дальнейшем мы полагаем $a_j = b_j = 0$ при $j = 0$.

Внутри цилиндрической области $0 \leq \rho \leq ra$, занимаемой диэлектриком, необходимо использовать разложение по непрерывному, а не дискретному спектру мод, поскольку эта область не ограничена по высоте:

$$u = \int_0^{+\infty} \frac{J_m(\gamma \rho)}{J'_m(\gamma r_a)} [A(\beta) \cos \beta(z-s) + B(\beta) \sin \beta(z-s)] d\beta; \quad (2.128a)$$

$$\bar{u} = im \int_0^{+\infty} \frac{J_m(\gamma \rho)}{J'_m(\gamma r_a)} [\bar{A}(\beta) \cos \beta(z-s) - \bar{B}(\beta) \sin \beta(z-s)] d\beta, \quad (2.128б)$$

где $A(\beta)$, $B(\beta)$ и $\bar{A}(\beta)$, $\bar{B}(\beta)$ – амплитуды мод H - и E -поляризаций непрерывного спектра,

$$\gamma = \sqrt{k^2 \varepsilon - \beta^2} - \quad (2.129)$$

параметры распространения этих мод по оси ρ .

Выбор ветви каждого из корней (2.125), (2.127), (2.129) для радиальных параметров распространения мод αn , τ_j и γ не имеет

принципиального значения, потому что область резонансного возбуждения не имеет выхода в свободное пространство. Но для удобства численных расчетов желательно определиться с выбором этих ветвей. Будем полагать, что в качестве таковых берутся ветви, соответствующие неотрицательной мнимой части каждой из величин αn , τ_j и γ (2.125), (2.127), (2.129), т. е. что

$$\text{Im } \alpha_n \geq 0; \quad \text{Im } \tau_j \geq 0; \quad \text{Im } \gamma \geq 0. \quad (2.130)$$

Выражения для различных пространственных компонент электрического и магнитного полей в трех рассмотренных областях получаются после подстановки соответствующих представлений (2.124), (2.126) или (2.128) в соотношения (2.117) и дифференцирования по координатам. Мы не будем выписывать эти достаточно громоздкие выражения, только отметим, что синусоидальные функции, определяющие зависимость полей (2.124) и (2.126) от осевой координаты z в двух ограниченных областях резонатора, образуют две ортогональные системы функций:

$$\int_{-L}^L \sin \beta_n(L-z) \sin \beta_m(L-z) dz = L(\delta_{nm} - \delta_{n0}); \quad (2.131a)$$

$$\int_{-L}^L \cos \beta_n(L-z) \cos \beta_m(L-z) dz = L\delta_{nm}(1 + \delta_{n0}); \quad (2.131б)$$

$$\int_{s-l}^{s+l} \sin \tau_j(s+l-z) \sin \tau_i(s+l-z) dz = l(\delta_{ij} - \delta_{i0}); \quad (2.131в)$$

$$\int_{s-l}^{s+l} \cos \tau_j(s+l-z) \cos \tau_i(s+l-z) dz = l\delta_{ij}(1 + \delta_{i0}), \quad (2.131г)$$

где δ_{nm} – символ Кронекера ($\delta_{nm} = 0$ при $n \neq m$ и $\delta_{nm} = 1$ при $n = m$). В дальнейшем будут использоваться и интегралы перекрытия между этими двумя системами функций по области щели:

$$\begin{aligned}
Q_{nj}^{\pm} &= \frac{1}{l} \int_{s-l}^{s+l} \left\{ \begin{array}{l} \cos \beta_n(L-z) \cos \tau_j(s+l-z) \\ \sin \beta_n(L-z) \sin \tau_j(s+l-z) \end{array} \right\} dz = \\
&= \text{sinc} \left((\beta_n - \tau_j)l \right) \cos \left(\beta_n s - \frac{\pi}{2}(n-j) \right) \pm \\
&\pm \text{sinc} \left((\beta_n + \tau_j)l \right) \cos \left(\beta_n s - \frac{\pi}{2}(n+j) \right), \quad (2.132)
\end{aligned}$$

где sinc – стандартное обозначение для функции

$$\text{sinc } x = \sin x / x.$$

Простые моды бесконечной цилиндрической области также ортогональны между собой на всем интервале изменения координаты z :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \cos \beta(z-s) \cos \bar{\beta}(z-s) dz = \pi \delta(\beta - \bar{\beta}); \quad (2.133a)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sin \beta(z-s) \sin \bar{\beta}(z-s) dz = \pi \delta(\beta - \bar{\beta}); \quad (2.133б)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \cos \beta(z-s) \sin \bar{\beta}(z-s) dz = 0, \quad (2.133в)$$

где δ – дельта-функция Дирака [142].

Соответствующие интегралы перекрытия между осевыми функциями данных мод и мод щели будут равны:

$$\int_{s-l}^{s+l} \cos \beta(z-s) \left\{ \begin{array}{l} \sin \tau_j(s+l-z) \\ \cos \tau_j(s+l-z) \end{array} \right\} dz = l \left\{ \begin{array}{l} \eta_j \\ \bar{\eta}_j \end{array} \right\} Q_j^{\pm}(\beta); \quad (2.134a)$$

$$\int_{s-l}^{s+l} \sin \beta(z-s) \left\{ \begin{array}{l} \sin \tau_j(s+l-z) \\ \cos \tau_j(s+l-z) \end{array} \right\} dz = l \left\{ \begin{array}{l} -\bar{\eta}_j \\ \eta_j \end{array} \right\} Q_j^{\mp}(\beta), \quad (2.134б)$$

$$\text{где } Q_j^{\pm}(\beta) = \text{sinc} \left((\beta - \tau_j)l \right) \pm \text{sinc} \left((\beta + \tau_j)l \right); \quad (2.134в)$$

$$\eta_j = \cos \tau_j l = 1; 0; -1; 0; 1; 0; \dots; \quad (2.134г)$$

$$\bar{\eta}_j = \sin \tau_j l = 0; 1; 0; -1; 0; 1; \dots,$$

$$j = 0; 1; 2; 3; \dots$$

Легко заметить, что полевые функции u и $\bar{u}$ в выбранных представлениях (2.124)–(2.125), (2.126), (2.127) удовлетворяют граничным условиям (2.119)–(2.121) в области коаксиального возбуждения (т. е. внутри собственно резонатора) и внутри щели, благодаря чему множества допустимых значений параметров распространения β и τ в этих двух областях ограничиваются только дискретными вещественными наборами (2.125) и (2.127). Остается удовлетворить граничным условиям (2.122) и (2.123) на цилиндрических границах областей $\rho = rc, a$, что и составляет, собственно, предмет решения дифракционной задачи для рассматриваемого резонатора.

Условия (2.122) и (2.123) для тангенциальных компонент электрического поля можно рассматривать совместно. С учетом представлений (2.124), (2.126) и (2.128) эти условия записываются следующим образом:

$$\begin{aligned}
&\sum_{n=1}^{\infty} \left(\alpha_n A_n - \frac{m^2}{kr_c} \beta_n \bar{A}_n \right) \sin \beta_n(L-z) = \\
&= \sum_{j=1}^{\infty} \left[\sigma_j v'_j(r_c) - \frac{m^2}{kr_c} \tau_j \bar{v}_j(r_c) \right] \sin \tau_j(s+l-z) \cdot \theta(l - |z-s|); \quad (2.135a)
\end{aligned}$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n^2 \bar{A}_n \cos \beta_n(L-z) = \sum_{j=0}^{\infty} \sigma_j^2 \bar{v}_j(r_c) \cos \tau_j(s+l-z) \cdot \theta(l - |z-s|); \quad (2.135б)$$

$$\int_0^{+\infty} \left\{ \gamma \left[A(\beta) \cos \beta(z-s) + B(\beta) \sin \beta(z-s) \right] + \right. \\ \left. + m^2 (kr_a)^{-1} \beta \left[\bar{A}(\beta) \sin \beta(z-s) + \bar{B}(\beta) \cos \beta(z-s) \right] \right\} d\beta = \\ = \sum_{j=1}^{\infty} \left[\sigma_j v'_j(r_a) - m^2 (kr_a)^{-1} \tau_j \bar{v}_j(r_a) \right] \sin \tau_j(s+l-z) \cdot \theta(l-|z-s|); \quad (2.135в)$$

$$\int_0^{+\infty} \gamma^2 \left[\bar{A}(\beta) \cos \beta(z-s) - \bar{B}(\beta) \sin \beta(z-s) \right] d\beta = \\ = \sum_{j=1}^{\infty} \sigma_j^2 \bar{v}_j(r_a) \cos \tau_j(s+l-z) \cdot \theta(l-|z-s|), \quad (2.135г)$$

где для (2.135а), (2.135б) z изменяется по всей высоте резонатора от $-L$ до L , а для (2.135в), (2.135г) – по всей бесконечной вещественной оси;

θ – стандартное обозначение для кусочно-постоянной функции:

$$\theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0 \\ 0 & \text{при } x \leq 0 \end{cases}.$$

Правые части всех соотношений (2.135) тождественно равны нулю при $-L \leq z < s-l$ и $s+l < z \leq L$, т.е. на поверхности проводящих цилиндрических стенок $\rho = rc, a$. Соответственно и левые части этих соотношений должны обращаться в нуль на проводящих стенках. Эти соотношения дают возможность выразить модовые амплитуды полей вне щели через модовые амплитуды поля внутри щели. Для этого спроектируем соотношения (2.135а), (2.135б) на базисные векторы $\sin \beta n(L-z)$ и $\cos \beta n(L-z)$ в функциональном пространстве, т.е. поочередно умножим обе части этих соотношений на все $\sin \beta n(L-z)$, $\cos \beta n(L-z)$ и проинтегрируем по z от $-L$ до L . С учетом соотношений ортогональности (2.131) получим выражения для амплитуд мод резонансной области:

$$\bar{A}_n = \frac{l}{L} \cdot \frac{1}{\alpha_n^2 (1 + \delta_{0n})} \cdot \frac{kr_c}{m^2} \sum_{j=0}^{\infty} \bar{w}_j^{(c)} Q_{nj}^+; \quad (2.136а)$$

$$A_n = \frac{l}{\alpha_n L} \sum_{j=0}^{\infty} \left(w_j^{(c)} Q_{nj}^- + \frac{\beta_n}{\alpha_n^2} \bar{w}_j^{(c)} Q_{nj}^+ \right), \quad (2.136б)$$

$$\text{где } w_j^{(c,a)} = \sigma_j v'_j(r_{c,a}) - \frac{\tau_j}{\sigma_j^2} \bar{w}_j^{(c,a)}; \quad \bar{w}_j^{(c,a)} = \frac{m^2}{kr_{c,a}} \sigma_j^2 \bar{v}_j(r_{c,a}) - \quad (2.137)$$

функции, которые неявно зависят от модовых амплитуд поля внутри щели через соотношения (2.126б); здесь использовано обозначение

$$v'_j = a_j H_m^{(2)'}(\sigma_j \rho) + b_j H_m^{(1)'}(\sigma_j \rho); \quad \bar{v}_j = \bar{a}_j H_m^{(2)'}(\sigma_j \rho) + \bar{b}_j H_m^{(1)'}(\sigma_j \rho), \quad (2.126в)$$

штрихом у функций Ханкеля, как и прежде, обозначается производная этих функций по их аргументам.

Поскольку $v'_j(r_{c,a}) = 0$ при $j = 0$, то и $w_0^{(c,a)} = 0$.

Аналогичным образом после поочередного умножения уравнений (2.135б), (2.135в) на все $\cos \beta(z-s)$, $\sin \beta(z-s)$ и интегрирования их обеих частей по z от $-\infty$ до $+\infty$ с учетом условий ортогональности (2.133) получим выражения для амплитуд мод непрерывного спектра внутри диэлектрика:

$$\bar{A}(\beta) = \frac{kr_a l}{\pi m^2 \gamma^2} \sum_{j=0}^{\infty} \bar{w}_j^{(a)} \bar{\eta}_j Q_j^+(\beta); \\ \bar{B}(\beta) = -\frac{kr_a l}{\pi m^2 \gamma^2} \sum_{j=0}^{\infty} \bar{w}_j^{(a)} \eta_j Q_j^-(\beta); \quad (2.136в)$$

$$A(\beta) = \frac{l}{\pi \gamma} \sum_{j=0}^{\infty} \left[w_j^{(a)} Q_j^+(\beta) + \beta \gamma^{-2} \bar{w}_j^{(a)} Q_j^-(\beta) \right] \eta_j; \quad (2.136г)$$

$$B(\beta) = -\frac{l}{\pi \gamma} \sum_{j=0}^{\infty} \left[w_j^{(a)} Q_j^-(\beta) + \beta \gamma^{-2} \bar{w}_j^{(a)} Q_j^+(\beta) \right] \bar{\eta}_j, \quad (2.136д)$$

где $w_j^{(a)}$ и $\bar{w}_j^{(a)}$ – функции (2.137), которые неявно зависят от модовых амплитуд поля внутри щели через соотношения (2.135б), (2.135в).

В результате неизвестными остались амплитуды мод, распространяющихся внутри щели. Эти амплитуды найдутся из условий непрерывности тангенциальных компонент магнитного поля по обе стороны щели (2.123). После ввода сюда выражений для магнитных полей, которые определяются представлениями (2.117) и (2.124), (2.126), (2.128), эти условия примут вид:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n^2 A_n \frac{D_n(r_c)}{D'_n(r_c)} \sin \beta_n (L - z) = \sum_{j=1}^{\infty} \sigma_j^2 v_j(r_c) \sin \tau_j (s + l - z);$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left[\beta_n A_n \frac{D_n(r_c)}{D'_n(r_c)} - k r_c \alpha_n \bar{A}_n \frac{\bar{D}'_n(r_c)}{\bar{D}_n(r_c)} \right] \cos \beta_n (L - z) =$$

$$= \sum_{j=0}^{\infty} [\tau_j v_j(r_c) - k r_c \sigma_j \bar{v}'_j(r_c)] \cos \tau_j (s + l - z);$$

$$\int_0^{+\infty} \gamma^2 \frac{J_m(\gamma r_a)}{J'_m(\gamma r_a)} [A(\beta) \cos \beta(z - s) + B(\beta) \sin \beta(z - s)] d\beta =$$

$$= \sum_{j=1}^{\infty} \sigma_j^2 v_j(r_a) \sin \tau_j (s + l - z);$$

$$\int_0^{+\infty} \left\{ \beta \frac{J_m(\gamma r_a)}{J'_m(\gamma r_a)} [A(\beta) \sin \beta(z - s) - B(\beta) \cos \beta(z - s)] - \right.$$

$$\left. - k r_a \varepsilon \gamma \frac{J'_m(\gamma r_a)}{J_m(\gamma r_a)} [\bar{A}(\beta) \cos \beta(z - s) - \bar{B}(\beta) \sin \beta(z - s)] \right\} d\beta =$$

$$= \sum_{j=1}^{\infty} [\tau_j v_j(r_a) - k r_a \sigma_j \bar{v}'_j(r_a)] \cos \tau_j (s + l - z),$$

где z меняется только в пределах щели от $s - l$ до $s + l$. На этом интервале, малом по сравнению со всей высотой резонатора, функции $\sin \beta n (L - z)$ и $\cos \beta n (L - z)$ уже не образуют ортогональную систему функций, поэтому, чтобы хоть как-то упростить полученную систему уравнений, будем поочередно умножать их на $\sin \tau_i (s + l - z)$,

$\cos \tau_i (s + l - z)$ и интегрировать по z в пределах данного интервала. С учетом выражений (2.137) для линейных комбинаций амплитуд мод вне щели получим:

$$\sum_{j=0}^{\infty} (w_j^{(c)} P_{ij}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} S_{ij}^{(c)}) = \frac{L}{l} \sigma_i^2 v_i(r_c); \quad (2.138a)$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} (w_j^{(c)} S_{ji}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} W_{ij}^{(c)}) = \frac{L}{l} [\tau_i v_i(r_c) - k r_c \sigma_i (1 + \delta_{0i}) \bar{v}'_i(r_c)]; \quad (2.138б)$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} (w_j^{(a)} P_{ij}^{(a)} + \bar{w}_j^{(a)} S_{ij}^{(a)}) = \frac{L}{l} \sigma_i^2 v_i(r_a); \quad (2.138в)$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} (w_j^{(a)} S_{ji}^{(a)} + \bar{w}_j^{(a)} W_{ij}^{(a)}) = \frac{L}{l} [\tau_i v_i(r_a) - k r_a \sigma_i (1 + \delta_{0i}) \bar{v}'_i(r_a)], \quad (2.138г)$$

$$\text{где } P_{ij}^{(c)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n D_n(r_c)}{D'_n(r_c)} Q_{ni}^- Q_{nj}^-; \quad S_{ij}^{(c)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta_n D_n(r_c)}{\alpha_n D'_n(r_c)} Q_{ni}^- Q_{nj}^+; \quad (2.139a)$$

$$W_{ij}^{(c)} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\beta_n^2 D_n(r_c)}{\alpha_n^2 D'_n(r_c)} - \left(\frac{k r_c}{m} \right)^2 \frac{1}{1 + \delta_{0n}} \cdot \frac{\bar{D}'_n(r_c)}{\bar{D}_n(r_c)} \right] \frac{Q_{ni}^+ Q_{nj}^+}{\alpha_n}; \quad (2.139б)$$

$$P_{ij}^{(a)} = \frac{L}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\gamma J_m(\gamma r_a)}{J'_m(\gamma r_a)} [\eta_i \eta_j Q_i^+(\beta) Q_j^+(\beta) + \bar{\eta}_i \bar{\eta}_j Q_i^-(\beta) Q_j^-(\beta)] d\beta; \quad (2.139в)$$

$$S_{ij}^{(a)} = \frac{L}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\beta J_m(\gamma r_a)}{\gamma J'_m(\gamma r_a)} [\eta_i \eta_j Q_i^+(\beta) Q_j^-(\beta) + \bar{\eta}_i \bar{\eta}_j Q_i^-(\beta) Q_j^+(\beta)] d\beta; \quad (2.139г)$$

$$W_{ij}^{(a)} = \frac{L}{\pi} \int_0^{+\infty} \left[\frac{\beta^2 J_m(\gamma r_a)}{\gamma^2 J'_m(\gamma r_a)} - \left(\frac{k r_a}{m} \right)^2 \varepsilon \frac{J'_m(\gamma r_a)}{J_m(\gamma r_a)} \right] \times$$

$$\times [\eta_i \eta_j Q_i^-(\beta) Q_j^-(\beta) + \bar{\eta}_i \bar{\eta}_j Q_i^+(\beta) Q_j^+(\beta)] \frac{d\beta}{\gamma}. \quad (2.139д)$$

матрицы, не зависящие от модовых амплитуд.

Система (2.138) – это бесконечномерная система линейных алгебраических уравнений, и ее бесконечная размерность обусловлена тем, что мы изначально использовали бесконечно большое число мод H - и E -поляризаций в разложении поля внутри щели (2.126а). Разумеется, найти точное решение такой системы, отвечающее строгой постановке задачи дифракции, не представляется возможным. Однако можно взять конечное число мод N и строить ее приближенное решение, которое оказывается достаточно близким к точному, если взять число N достаточно большим (так называемое приближение редукции для бесконечномерной системы [143]). При численном решении дифракционной задачи количество мод вне щели также должно быть ограничено, скажем, не более некоторого целого числа M , поэтому далее будет подразумеваться, что везде в формулах (2.126), (2.135), (2.136) и (2.138) верхний бесконечный предел суммирования заменяется на конечное число M . Самым надежным критерием правильности выбора максимального числа мод будет служить проверка точности выполнения всех граничных условий дифракционной задачи после выполнения необходимых расчетов. Запишем конечномерное приближение для системы (23), попутно преобразовав ее вторую (2.138б) и четвертую (2.138г) группу уравнений:

$$\sum_{j=0}^N (w_j^{(c)} P_{ij}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} S_{ij}^{(c)}) = \frac{L}{l} \sigma_i^2 v_i(r_c); \quad (2.140a)$$

$$\sum_{j=0}^N \left[w_j^{(c)} \left(S_{ji}^{(c)} - \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} P_{ij}^{(c)} \right) + \bar{w}_j^{(c)} \left(W_{ij}^{(c)} - \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} S_{ij}^{(c)} \right) \right] = -\frac{L}{l} k r_c \sigma_i (1 + \delta_{0i}) \bar{v}_i'(r_c); \quad (2.140б)$$

$$\sum_{j=0}^N (w_j^{(a)} P_{ij}^{(a)} + \bar{w}_j^{(a)} S_{ij}^{(a)}) = \frac{L}{l} \sigma_i^2 v_i(r_a); \quad (2.140в)$$

$$\sum_{j=0}^N \left[w_j^{(a)} \left(S_{ji}^{(a)} - \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} P_{ij}^{(a)} \right) + \bar{w}_j^{(a)} \left(W_{ij}^{(a)} - \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} S_{ij}^{(a)} \right) \right] =$$

$$-\frac{L}{l} k r_a \sigma_i (1 + \delta_{0i}) \bar{v}_i'(r_a). \quad (2.140г)$$

Очевидно, что уравнения (2.140) удобнее решать относительно величин $w_i^{(c,a)}$ и $\bar{w}_i^{(c,a)}$, и лишь затем вычислять амплитуды мод внутри щели a_j , b_j и $\bar{a}_j$, $\bar{b}_j$, используя соотношения (2.126б, в), (2.137), тем более что амплитуды мод вне щели явно выражаются через эти величины с помощью простых формул (2.136). Тогда следует найти явные выражения для амплитудных параметров $v_i(r_{c,a})$ и $\bar{v}_i'(r_{c,a})$, входящих в правые части уравнений (2.140а), через данные величины.

Сначала выразим $v_i(r_{c,a})$ и $\bar{v}_i'(r_{c,a})$ через $v_i'(r_{c,a})$ и $\bar{v}_i(r_{c,a})$ соответственно. Возьмем первое соотношение (2.126в) при $\rho = rc$ и при $\rho = ra$, что даст нам 2 уравнения для определения a_j и b_j . Из этих уравнений найдем:

$$a_i = V_{mi}^{-1} [v_i'(rc) H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a) - v_i'(ra) H_m^{(1)'}(\sigma_i r_c)];$$

$$b_i = V_{mi}^{-1} [v_i'(ra) H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c) - v_i'(rc) H_m^{(2)'}(\sigma_i r_a)],$$

$$\text{где } V_{mi} = H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a) H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c) - H_m^{(1)'}(\sigma_i r_c) H_m^{(2)'}(\sigma_i r_a). \quad (2.141a)$$

Теперь подставим эти соотношения в первое выражение (2.135б) при $\rho = rc$ и при $\rho = ra$:

$$v_i(r_c) = v_i'(rc) \frac{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_c V_{mi}} \left(v_i'(rc) \frac{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c)} - v_i'(ra) \right);$$

$$v_i(r_a) = v_i'(ra) \frac{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_a V_{mi}} \left(v_i'(rc) - v_i'(ra) \frac{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a)} \right).$$

Аналогично возьмем второе соотношение (2.135б) при $\rho = rc$ и при $\rho = ra$, выразим $\bar{a}_j$ и $\bar{b}_j$ через $\bar{v}_i(r_{a,c})$:

$$\bar{a}_i = \bar{V}_{mi}^{-1} [\bar{v}_i(r_c) H_m^{(1)}(\sigma_i r_a) - \bar{v}_i(r_a) H_m^{(1)}(\sigma_i r_c)];$$

$$\bar{b}_i = \bar{V}_{mi}^{-1} [\bar{v}_i(r_a) H_m^{(2)}(\sigma_i r_c) - \bar{v}_i(r_c) H_m^{(2)}(\sigma_i r_a)],$$

$$\text{где } \bar{V}_{mi} = H_m^{(1)}(\sigma_i r_a) H_m^{(2)}(\sigma_i r_c) - H_m^{(1)}(\sigma_i r_c) H_m^{(2)}(\sigma_i r_a), \quad (2.141б)$$

и подставим эти соотношения во второе выражение (2.135в) при $\rho = rc$ и при $\rho = ra$:

$$\bar{v}_i'(r_c) = \bar{v}_i(r_c) \frac{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(2)}(\sigma_i r_c)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_c \bar{V}_{mi}} \left(\bar{v}_i(r_a) - \bar{v}_i(r_c) \frac{H_m^{(2)}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(2)}(\sigma_i r_c)} \right);$$

$$\bar{v}_i'(r_a) = \bar{v}_i(r_a) \frac{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(1)}(\sigma_i r_a)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_a \bar{V}_{mi}} \left(\bar{v}_i(r_c) \frac{H_m^{(1)}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(1)}(\sigma_i r_a)} - \bar{v}_i(r_c) \right).$$

Далее, из (2.137) легко установить выражения для $v_i'(r_{c,a})$ и $\bar{v}_i(r_{c,a})$ через $w_i^{(c,a)}$ и $\bar{w}_i^{(c,a)}$:

$$v_i'(r_{c,a}) = \frac{1}{\sigma_i} \left(w_i^{(c,a)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \bar{w}_i^{(c,a)} \right); \quad \bar{v}_i(r_{c,a}) = \frac{kr_{c,a}}{m^2 \sigma_i^2} \bar{w}_i^{(c,a)}.$$

Подставляя последние в полученные выше соотношения, найдем искомые выражения для a_j , b_j , $\bar{a}_j$, $\bar{b}_j$, $v_i(r_{c,a})$ и $\bar{v}_i(r_{c,a})$ через $w_i^{(c,a)}$ и $\bar{w}_i^{(c,a)}$:

$$a_i = \frac{1}{\sigma_i V_{mi}} \left[\left(w_i^{(c)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \bar{w}_i^{(c)} \right) H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a) - \left(w_i^{(a)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \bar{w}_i^{(a)} \right) H_m^{(1)'}(\sigma_i r_c) \right]; \quad (2.142a)$$

$$b_i = \frac{1}{\sigma_i V_{mi}} \left[\left(w_i^{(a)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \bar{w}_i^{(a)} \right) H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c) - \left(w_i^{(c)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \bar{w}_i^{(c)} \right) H_m^{(2)'}(\sigma_i r_a) \right]; \quad (2.142б)$$

$$\bar{a}_i = \frac{k}{m^2 \sigma_i^2 \bar{V}_{mi}} \left[r_c \bar{w}_i^{(c)} H_m^{(1)}(\sigma_i r_a) - r_a \bar{w}_i^{(a)} H_m^{(1)}(\sigma_i r_c) \right]; \quad (2.142в)$$

$$\bar{b}_i = \frac{k}{m^2 \sigma_i^2 \bar{V}_{mi}} \left[r_a \bar{w}_i^{(a)} H_m^{(2)}(\sigma_i r_c) - r_c \bar{w}_i^{(c)} H_m^{(2)}(\sigma_i r_a) \right]; \quad (2.142г)$$

$$v_i(r_c) = \frac{1}{\sigma_i} \left\{ \left(\Gamma_{2i} + \frac{4iC_{2i}}{\pi \sigma_i r_c V_{mi}} \right) w_i^{(c)} - \frac{4i}{\pi \sigma_i r_c V_{mi}} w_i^{(a)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \left[\left(\Gamma_{2i} + \frac{4iC_{2i}}{\pi \sigma_i r_c V_{mi}} \right) \bar{w}_i^{(c)} - \frac{4i}{\pi \sigma_i r_c V_{mi}} \bar{w}_i^{(a)} \right] \right\}; \quad (2.143a)$$

$$v_i(r_a) = \frac{1}{\sigma_i} \left\{ \left(\Gamma_{1i} - \frac{4iC_{1i}}{\pi \sigma_i r_a V_{mi}} \right) w_i^{(a)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_a V_{mi}} w_i^{(c)} + \frac{\tau_i}{\sigma_i^2} \left[\left(\Gamma_{1i} - \frac{4iC_{1i}}{\pi \sigma_i r_a V_{mi}} \right) \bar{w}_i^{(a)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_a V_{mi}} \bar{w}_i^{(c)} \right] \right\}; \quad (2.143б)$$

$$\bar{v}_i(r_c) = \left(\bar{\Gamma}_{2i} - \frac{4i\bar{C}_{2i}}{\pi \sigma_i r_c \bar{V}_{mi}} \right) \frac{kr_c}{m^2 \sigma_i^2} \bar{w}_i^{(c)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_c \bar{V}_{mi}} \cdot \frac{kr_a}{m^2 \sigma_i^2} \bar{w}_i^{(a)}; \quad (2.143в)$$

$$\bar{v}_i(r_a) = \left(\bar{\Gamma}_{1i} + \frac{4i\bar{C}_{1i}}{\pi \sigma_i r_a \bar{V}_{mi}} \right) \frac{kr_a}{m^2 \sigma_i^2} \bar{w}_i^{(a)} + \frac{4i}{\pi \sigma_i r_a \bar{V}_{mi}} \cdot \frac{kr_c}{m^2 \sigma_i^2} \bar{w}_i^{(c)}, \quad (2.143г)$$

$$\text{где } \Gamma_{1i} = \frac{H_m^{(1)}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a)}; \quad \Gamma_{2i} = \frac{H_m^{(2)}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c)}; \quad (2.144a)$$

$$\bar{\Gamma}_{1i} = \frac{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(1)}(\sigma_i r_a)} = \Gamma_{1i}^{-1}; \quad \bar{\Gamma}_{2i} = \frac{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(2)}(\sigma_i r_c)} = \Gamma_{2i}^{-1}; \quad (2.144\text{б})$$

$$C_{1i} = \frac{H_m^{(1)'}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(1)}(\sigma_i r_a)}, \quad C_{2i} = \frac{H_m^{(2)'}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(2)}(\sigma_i r_c)}, \quad (2.144\text{в})$$

$$\bar{C}_{1i} = \frac{H_m^{(1)}(\sigma_i r_c)}{H_m^{(1)}(\sigma_i r_a)}, \quad \bar{C}_{2i} = \frac{H_m^{(2)}(\sigma_i r_a)}{H_m^{(2)}(\sigma_i r_c)}. \quad (2.144\text{г})$$

Окончательный вид уравнения для амплитудных функций поля внутри щели приобретают после подстановки выражений (2.143) в правые части (2.140):

$$\sum_{j=0}^N \left(w_j^{(c)} P_{ij}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} S_{ij}^{(c)} \right) - \Lambda_i^{(c)} w_i^{(c)} + q_i^{(c)} w_i^{(a)} - \mathcal{G}_i \Lambda_i^{(c)} \bar{w}_i^{(c)} + \mathcal{G}_i q_i^{(c)} \bar{w}_i^{(a)} = 0; \quad (2.145\text{а})$$

$$\sum_{j=0}^N \left[w_j^{(c)} \left(S_{ji}^{(c)} - \mathcal{G}_i P_{ij}^{(c)} \right) + \bar{w}_j^{(c)} \left(W_{ij}^{(c)} - \mathcal{G}_i S_{ij}^{(c)} \right) \right] + \bar{\Lambda}_i^{(c)} \bar{w}_i^{(c)} + \frac{r_a}{r_c} \bar{q}_i^{(c)} \bar{w}_i^{(a)} = 0; \quad (2.145\text{б})$$

$$\sum_{j=0}^N \left(w_j^{(a)} P_{ij}^{(a)} + \bar{w}_j^{(a)} S_{ij}^{(a)} \right) - \Lambda_i^{(a)} w_i^{(a)} - q_i^{(a)} w_i^{(c)} - \mathcal{G}_i \Lambda_i^{(a)} \bar{w}_i^{(a)} - \mathcal{G}_i q_i^{(a)} \bar{w}_i^{(c)} = 0; \quad (2.145\text{в})$$

$$\sum_{j=0}^N \left[w_j^{(a)} \left(S_{ji}^{(a)} - \mathcal{G}_i P_{ij}^{(a)} \right) + \bar{w}_j^{(a)} \left(W_{ij}^{(a)} - \mathcal{G}_i S_{ij}^{(a)} \right) \right] + \bar{\Lambda}_i^{(a)} \bar{w}_i^{(a)} - \frac{r_c}{r_a} \bar{q}_i^{(a)} \bar{w}_i^{(c)} = 0, \quad (2.145\text{д})$$

где $\mathcal{G}_i = \tau_i \sigma_i^{-2}$; $\Lambda_i^{(c)} = p_i \Gamma_{2i} + q_i^{(c)} C_{2i}$; $\Lambda_i^{(a)} = p_i \Gamma_{1i} - q_i^{(a)} C_{1i}$;

$$p_i = \frac{L}{l} \sigma_i; \quad q_i^{(c,a)} = \frac{L}{l} \cdot \frac{4i}{\pi r_{c,a} V_{mi}};$$

$$\bar{\Lambda}_i^{(c)} = \bar{p}_i^{(c)} \bar{\Gamma}_{2i} - \bar{q}_i^{(c)} \bar{C}_{2i}; \quad \bar{\Lambda}_i^{(a)} = \bar{p}_i^{(a)} \bar{\Gamma}_{1i} + \bar{q}_i^{(a)} \bar{C}_{1i};$$

$$\bar{p}_i^{(c,a)} = \frac{L}{l} \left(\frac{kr_{c,a}}{m} \right)^2 \cdot \frac{1 + \delta_{0i}}{\sigma_i}; \quad \bar{q}_i^{(c,a)} = \bar{p}_i^{(c,a)} \cdot \frac{4i}{\pi \sigma_i r_{c,a} V_{mi}}.$$

Систему (40) можно записать в сокращенном матричном виде:

$$\sum_{j=1}^{4N+2} A_{ij} w_j = 0, \quad (2.146\text{а})$$

где w_j – элемент матрицы-столбца w , которая в транспонированном виде представляется матрицей-строкой с элементами:

$$\tilde{w} = \left(w_i^{(c)} \quad \bar{w}_i^{(c)} \quad w_i^{(a)} \quad \bar{w}_i^{(a)} \right), \quad (2.146\text{б})$$

A_{ij} – элемент квадратной матрицы

$$A = \begin{pmatrix} P_{ij}^{(c)} - \Lambda_i^{(c)} \delta_{ij} & S_{ij}^{(c)} - \mathcal{G}_i \Lambda_i^{(c)} \delta_{ij} & q_i^{(c)} \delta_{ij} & \mathcal{G}_i q_i^{(c)} \delta_{ij} \\ S_{ji}^{(c)} - \mathcal{G}_i P_{ij}^{(c)} & \tilde{W}_{ij}^{(c)} & 0 & \frac{r_a}{r_c} \bar{q}_i^{(c)} \delta_{ij} \\ -q_i^{(a)} \delta_{ij} & -\mathcal{G}_i q_i^{(a)} \delta_{ij} & P_{ij}^{(a)} - \Lambda_i^{(a)} \delta_{ij} & S_{ij}^{(a)} - \mathcal{G}_i \Lambda_i^{(a)} \delta_{ij} \\ 0 & -\frac{r_c}{r_a} \bar{q}_i^{(a)} \delta_{ij} & S_{ji}^{(a)} - \mathcal{G}_i P_{ij}^{(a)} & \tilde{W}_{ij}^{(a)} \end{pmatrix} \quad (2.146\text{в})$$

$$\tilde{W}_{ij}^{(c,a)} = W_{ij}^{(c,a)} - \mathcal{G}_i S_{ij}^{(c,a)} + \bar{\Lambda}_i^{(c,a)} \delta_{ij}$$

Нулем здесь обозначены матрицы, все элементы которых равны нулю.

Если считать N максимальным порядком внутрищелевых мод H - и E -поляризации, то число учитываемых H -мод согласно (2.126а) будет равно N , от 1 до N , а число учитываемых E -мод равно $N + 1$, от 0 до N . Всего таким образом нужно будет учитывать $2N + 1$ мод, а число неизвестных системы (2.146) в 2 раза больше, поскольку

рассматриваются неизвестные (2.137) с внутренней и внешней стороны щели по числу всех мод; это число и есть порядок системы (2.146). Соответственно размерность матриц, записанных в первом и третьем столбцах (2.146б, в), составит N по горизонтали и столько же по вертикали для первой и третьей строчки, а размерность матриц во втором и четвертом столбцах по горизонтали и во второй и четвертой строчке по вертикали – $N + 1$.

Полученная система (2.145) или (2.146) – это однородная система линейных алгебраических уравнений. Ее однородность обусловлена тем, что здесь не учитываются источники возбуждения поля в резонаторе. В таком случае поля будут определяться с точностью до скалярного множителя, или с точностью до одного неизвестного, которому можно приписывать любое значение. Чтобы однородная система (2.146) имела ненулевые решения, ее определитель должен быть равен нулю, или быть достаточно близким к нулю по величине. Очевидно, что данное условие не должно зависеть от числа выбранных мод N (порядка системы (2.146)), поскольку при любом достаточно большом N мы должны получать ненулевое решение данной системы, приближенное к точному. Отсюда следует, что система (2.146) является плохо обусловленной [139–141], причем в такой степени, что исключение нескольких уравнений или нескольких неизвестных из системы не приводит к заметному улучшению ее обусловленности (увеличению величины определителя). Для решения таких систем приходится применять специальные методы, наиболее эффективным и универсальным из которых, по-видимому, является метод регуляризации А. Н. Тихонова [144].

Согласно данному методу вместо непосредственного решения исходной системы уравнений ищется минимум некоторого функционала, который представляет собой норму разности левых и правых частей системы плюс положительно определенную квадратичную форму от искомого решения (так называемый тихоновский стабилизатор). В соответствии с этим методом сопоставим системе (2.146) функционал

$$\sum_{i=1}^{4N+2} \left| \sum_{j=1}^{4N+2} A_{ij} w_j \right|^2 + \mu \sum_{i=1}^{4N+2} |w_i|^2 \zeta_i^2 = \min, \quad (2.147a)$$

где μ – параметр регуляризации (малая положительная величина), который специально подбирается из условия согласования минимальности данного параметра с удовлетворительной обусловленностью получаемой системы,

$$\zeta_i = \zeta_{i+N+1} = \zeta_{i+2N+1} = \zeta_{i+3N+2} = \tau_i; \quad i = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (2.147б)$$

Принятый вид тихоновского стабилизатора отвечает регуляризации искомого решения по второй производной, т. е. выбору решения по критерию наименее быстрого изменения по ширине щели.

В развернутом виде условие (2.147a)

$$\sum_{k=1}^{4N+2} \left(\sum_{j=1}^{4N+2} A_{kj} w_j \right) \left(\sum_{i=1}^{4N+2} A_{ki}^* w_i^* \right) + \mu \sum_{i=1}^{4N+2} w_i w_i^* \zeta_i^2 = \min,$$

где звездочка обозначает комплексное сопряжение. Продифференцируем последнее соотношение по всем w_i^* , кроме одного из неизвестных, скажем, w_1^* , которое считаем известным (в дальнейшем полагаем $w_1^* = 1$):

$$\sum_{k=1}^{4N+2} A_{ki}^* \sum_{j=1}^{4N+2} A_{kj} w_j + \mu w_i \zeta_i^2 = 0; \quad i = 2, 3, 4, \dots, 4N + 2.$$

В результате вместо системы (2.146) получим новую, регуляризованную систему уравнений:

$$\sum_{j=2}^{4N+2} \left(\sum_{k=1}^{4N+2} A_{ki}^* A_{kj} + \mu \zeta_i^2 \delta_{ij} \right) w_j = - \sum_{k=1}^{4N+2} A_{ki}^* A_{k1}; \quad i = 2, 3, 4, \dots, 4N + 2. \quad (2.148a)$$

Матрица коэффициентов этой системы эрмитова с положительными вещественными диагональными компонентами, а сама система оказывается хорошо обусловленной благодаря присутствию в ее матрице коэффициентов диагональных компонент с множителем μ .

Систему (33а) можно записать в стандартном виде:

$$\sum_{q=1}^{4N+1} B_{pq} u_q = f_p ; \quad p, q = 1, 2, 3, \dots, 4N+1, \quad (2.148б)$$

где $u_q = w_j$;

$$B_{pq} = \sum_{k=1}^{4N+2} A_{k,p+1}^* A_{k,q+1} + \mu \zeta_{p+1}^2 \delta_{pq} ;$$

$$f_p = - \sum_{k=1}^{4N+2} A_{k,p+1}^* A_{k1} ;$$

$$p = i-1; \quad q = j-1.$$

Поскольку матрица коэффициентов полученной системы эрмитова, ее удобно решать с помощью метода квадратного корня [145, 146]. Однако для получения решения дифракционной задачи недостаточно просто найти решения w_j или u_q системы (2.148) для некоторого комплексного волнового числа k . При произвольном значении последнего найденные решения не будут удовлетворять всем поставленным граничным условиям (2.123) (уравнениям (2.140)), поскольку при этом задействованы не все необходимые условия задачи, а именно, не учитывается дополнительное условие существования ненулевых решений системы (2.136). Обычно в качестве такового рекомендуется использовать условие равенства нулю определителя этой однородной системы [140], или условие минимальности невязки одного из уравнений подобной системы, если ее решения получены с помощью метода вычеркивания этого уравнения из всей системы [140]. Но, как мы выяснили выше, система (2.146) является очень плохо обусловленной, и для нее прямая численная реализация приведенных рекомендаций не дает устойчивых алгоритмов расчета величины k . Для их получения необходимо использовать соотношения, полученные после процедуры регуляризации системы (2.147). Поэтому комплексную величину k будем определять, исходя из условия минимума неувязок сразу всех уравнений нашей системы, или минимума функционала (2.147) с решениями $w_j, j = 2, 3, \dots, 4N+2$, полученными из регуляризированной системы (2.148), и с изначально задаваемым значением $w_1 = 1$.

Однако при проведении конкретных численных расчетов по указанному алгоритму выяснилось, что не всякое решение сформулированной математической задачи имеет физический смысл. Решение, удовлетворяющее граничным условиям (2.123) для тангенциальных компонент электрического и магнитного полей, может противоречить энергетическому условию резонанса, к рассмотрению которого мы сейчас перейдем.

Запишем общее выражение закона сохранения энергии для электромагнитного поля в области резонансного возбуждения [135]:

$$\frac{dW}{dt} + U + P = 0, \quad (2.149)$$

где W – энергия электромагнитного поля во всем объеме данной области,

U – мощность потерь в этой области на поглощение,

$$P = \frac{c}{8\pi} \operatorname{Re} \oint_s [EH^*] dS - \quad (2.150)$$

мощность излучения из него. Рассмотрим соотношение (2.149) для величин, усредненных за период колебаний поля. Тогда производная по времени будет отвечать скорости уменьшения энергии поля в выделенной области (для рассматриваемой резонансной системы – через щель в сторону диэлектрика). По определению [125, 127, 128], резонанс отвечает максимальному значению энергии поля в данной области за большой промежуток времени, или минимальной по величине скорости уменьшения энергии за период:

$$\left| \frac{dW}{dt} \right| = \min .$$

В нашем случае идеально проводящих стенок резонатора и отсутствия поглощающих диэлектриков в области резонансного возбуждения ($U = 0$) резонанс будет соответствовать условию: $|P| = \min$, или

$$\left| \operatorname{Re} \int_s ([EH^*])_n dS \right| = \min, \quad (2.151)$$

где интеграл вычисляется по сечению щели, а n – нормаль к ее поверхности (базисный вектор e_r). Используя представление (2.117), (2.124) для поля с внешней стороны щели, найдем, что

$$\int_S \left(\left[EH^* \right] \right)_n dS = -ik\pi r_c l \sum_{i=0}^{\infty} \left(w_i^{(c)} Y_i^* + \bar{w}_j^{(c)} \bar{Y}_i^* \right),$$

$$\text{где } Y_i = \sigma_i^2 v_i(r_c); \bar{Y}_i = \tau_i v_i(r_c) - (1 + \delta_{0i}) k r_c \sigma_i \bar{v}_i'(r_c), \quad (2.152)$$

или, согласно уравнениям (2.138а), (2.138б),

$$Y_i = \frac{l}{L} \sum_{j=0}^{\infty} \left(w_j^{(c)} P_{ij}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} S_{ij}^{(c)} \right); \bar{Y}_i = \frac{l}{L} \sum_{j=0}^{\infty} \left(w_j^{(c)} S_{ji}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} W_{ij}^{(c)} \right). \quad (2.153)$$

Тогда энергетическое условие резонанса (2.151) примет вид

$$\left| \operatorname{Im} \left(k \sum_{i=0}^{\infty} \left[w_i^{(c)} Y_i^* + \bar{w}_i^{(c)} \bar{Y}_i^* \right] \right) \right| = \min. \quad (2.154)$$

Искомое решение должно одновременно удовлетворять условию равенства тангенциальных компонент полей на границах щели и энергетическому условию резонанса. Эти 2 условия можно объединить в одно:

$$\sum_{i=1}^{4N+2} \left| \sum_{j=1}^{4N+2} A_{ij} w_j \right|^2 + \mu \sum_{i=1}^{4N+2} |w_i|^2 \zeta_i^2 - \frac{L}{l} \operatorname{Im} \left(k \sum_{i=0}^N \left[w_i^{(c)} Y_i^* + \bar{w}_i^{(c)} \bar{Y}_i^* \right] \right) = \min. \quad (2.155a)$$

Дополнительный множитель L/l перед энергетическим слагаемым определяет степень влияния щели на изменение комплексного волнового числа k , а знак минус компенсирует отрицательное значение величины потока энергии, направленного из области возбуждения резонансного поля в сторону диэлектрика через щель,

т. е. в отрицательном направлении координатной оси r . Очевидно, что решения дифракционной задачи с противоположным направлением потока энергии являются нефизическими, поэтому при построении решений следует учитывать только такие точки на комплексной плоскости k , в которых вычитаемое левой части неположительно. При этом для повышения точности расчета в качестве параметров Y_i и $\bar{Y}_i$ можно брать полусуммы соответствующих правых частей (47) и (48):

$$Y_i = \frac{1}{2} \left[\sigma_i^2 v_i(r_c) + \frac{l}{L} \sum_{j=0}^N \left(w_j^{(c)} P_{ij}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} S_{ij}^{(c)} \right) \right]; \quad (2.155б)$$

$$\bar{Y}_i = \frac{1}{2} \left[\tau_i v_i(r_c) - (1 + \delta_{0i}) k r_c \sigma_i \bar{v}_i'(r_c) + \frac{l}{L} \sum_{j=0}^N \left(w_j^{(c)} S_{ji}^{(c)} + \bar{w}_j^{(c)} W_{ij}^{(c)} \right) \right], \quad (2.155в)$$

что будет отвечать усреднению данных параметров по обе стороны границы щели.

Условие (2.155а) не является точным следствием граничных условий на щели (2.123), и потому некоторые варианты решений, отвечающие этому условию, могут давать заметную погрешность в выполнении граничных условий. Отсюда следует, что проверка правильности выполнения всех граничных условий и отбраковка неприемлемых вариантов должна стать необходимым этапом построения искомого решения. Приемлемыми здесь можно считать такие решения, которые дают среднюю относительную погрешность несовпадения полей (2.117) с полевыми функциями (2.124), (2.126) и (2.128) по обе стороны границ щели, не превышающую 30 %.

Однако и этим ограничениям может удовлетворять множество решений. Чтобы выбрать из него единственное, будем пользоваться очевидным критерием минимальной близости волнового числа k (или резонансной частоты) искомого решения к волновому числу (или резонансной частоте) резонансных колебаний такого же резонатора, но без щели и диэлектрика.

Таким образом, алгоритм построения искомого решения дифракционной задачи следующий. Сначала ищется минимум функционала (2.155) относительно комплексного волнового числа

k и одновременно вычисляемых решений системы уравнений (2.148). При этом берутся значения данного числа, дающие неположительные значения вычитаемого в левой части (2.155а) и достаточно близко отстоящие на комплексной плоскости от волнового числа резонансных колебаний простого резонатора без щели. Для нахождения минимума функционала (2.155) можно использовать любые стандартные численные методы поиска минимума функции двух переменных (вещественной и мнимой части волнового числа k) [25]; мы использовали метод покоординатного спуска по вещественной и мнимой части волнового числа $Re\ k$ и $Im\ k$. Затем полученные решения подставляются в выражения (2.136), определяющие амплитуды мод вне и внутри щели, и, наконец, проводится подстановка последних в выражения (2.124), (2.126), (2.128) и (2.117) для пространственных компонент электрического и магнитного поля в различных областях резонатора. В заключение проводится проверка точности выполнения граничных условий (2.123), т. е. совпадения тангенциальных компонент полей по обе стороны границ щели при $\rho = rc \pm 0$ и $\rho = ra \pm 0$.

Следует иметь в виду, что получаемая таким методом дифракционная картина может отличаться от поля возбуждения реального резонатора. С самого начала она строилась на основе однородных уравнений Максвелла без учета источников возбуждения, поэтому не может содержать нерезонансную часть поля, которое создается этими источниками и не соответствует ни одной из простых резонансных мод (2.124), по которым производится разложение поля в коаксиальной области резонансного возбуждения. Рассчитанное по данному методу поле представляет собой в чистом виде обобщенную резонансную моду резонатора со щелью и диэлектриком, т. е. полевую структуру, в которую переходит одна из простых мод (2.124) простого резонатора после прорезания в нем щели и помещения диэлектрика.

Приведем некоторые результаты численных расчетов решения задачи резонаторной дифракции согласно описанному алгоритму. Рассматривался коаксиальный резонатор, схематически изображенный на рис. 2.9, с параметрами:

$$L = 3,6 \text{ см} ; R = 6,4 \text{ см} ; r_c = 3,0 \text{ см} ; r_a = 2,8 \text{ см} ; l = 1 \text{ см} , \quad (2.156)$$

а также рассматривался случай, когда $l = 1,6$ см. Учитывались все простые моды щели (2.126) вплоть до порядка $N = 20$ и внешелевые моды (2.124) до $M = 800$. Предполагалось, что частота возбуждения близка частоте резонансных колебаний моды Н031 пустого резонатора без щели с азимутальным модовым числом $m = 3$ (3,647 ГГц, длина волны $\lambda = 8,23$ см) или моды Н0м1 с $m = 4$ (4,416 ГГц, $\lambda = 6,79$ см). При расчетах брался набор значений диэлектрической проницаемости цилиндрического диэлектрика с монотонно возрастающей вещественной величиной от 1 до 5 и мнимой величиной от 0 до 0,8 ($\epsilon = 1; 1,5 + 0,1i; 2,0 + 0,2i; 2,5 + 0,3i$ и т. д. до $5,0 + 0,8i$), чтобы примерно охватить область изменения диэлектрической проницаемости зерна пшеницы разной влажности. Для этих значений диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ при различных смещениях щели s исследовалась функциональная зависимость $k - k_0 = f(\epsilon - 1)$ изменения комплексного волнового числа k резонансных колебаний резонатора с диэлектриком сравнительно с комплексным волновым числом k_0 резонатора без диэлектрика. Оказалось, что данная зависимость приближенно описывается линейной функцией:

$$k_0 - k = C_k (\epsilon - 1), \quad (2.156a)$$

где для моды $m = 3$ в резонаторе с параметрами (2.156) и смещением щели $s = 0,4$ см коэффициент линейной зависимости

$$C_k = 8,8889913 \cdot 10^{-5} + 1,6924776 \cdot 10^{-5} i. \quad (2.156b)$$

Аналогичные результаты имеют место и для всех других значений s , от нуля до $L - l$.

Результаты расчета пространственной структуры электрического поля в резонаторе для обобщенной моды с азимутальным числом $m = 3$ показаны на рис. 2.10. Величина трех различных компонент поля для каждого из четырех представленных здесь случаев дается в одном масштабе, но для разных случаев этот масштаб неодинаков. Разрыв компоненты E_r на внутренней границе щели обусловлен тем, что эта граница является границей диэлектрика, а данная компонента поля оказывается нормальной к границе. Большая величина компонент E_r, E_z вблизи краев щели $\rho = rc$, а, $z = \pm l$ обу-

словлена существованием сингулярностей, или точек аномальной концентрации поля на изломах (ребрах) идеально проводящих поверхностей [16, 19].

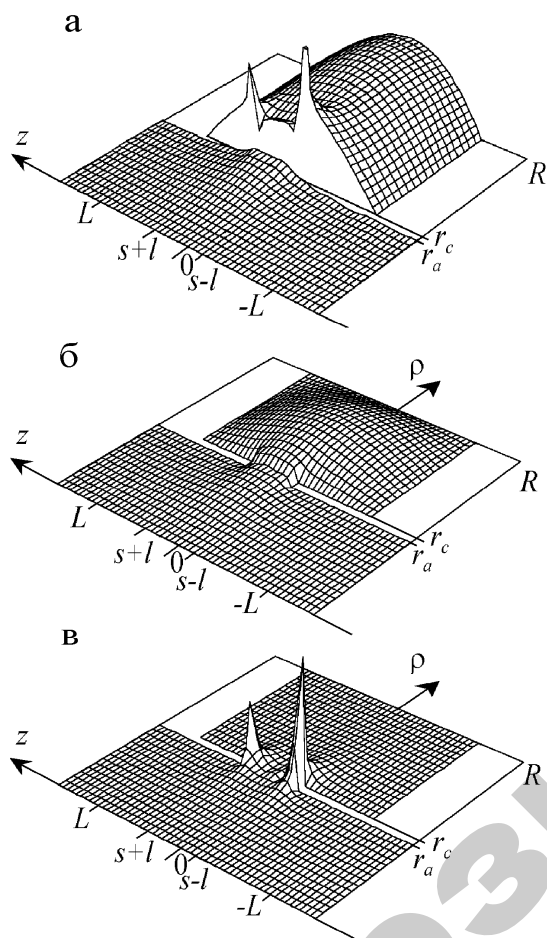


Рис. 2.10. Пространственное распределение величины компонент электрического поля E_ρ (а), E_ϕ (б) и E_z (в) в плоскости rz цилиндрической системы координат для гибридной моды H_{031} открытого объемного коаксиального резонатора, представленного на рис. 2.8, и параметрами (52) ($s = 0,4$ см). Слева показаны поля, рассчитанные для резонатора без диэлектрика, справа – для резонатора с диэлектриком ($\epsilon = 3,0 + 0,6i$)

Для рассмотренной резонансной системы ребрами являются края щели. Хотя величина поля в точках сингулярности становится бесконечно большой, но характер роста ее величины при малом приближении к этим точкам таков, что средняя энергия поля, запасенная в любом конечном объеме вблизи сингулярности, остается конечной [129, 140]. В нашем случае и сама величина поля на ребрах остается конечной, потому что при его вычислении использовалось конечное число простых мод с конечными значениями поля. На практике бесконечные значения полей на ребрах также не наблюдаются, но по другой причине: идеально проводящие поверхности и правильные углы при сколь угодно малых масштабах являются теоретическими идеализациями.

Как показывает рис. 2.10, амплитуды компонент полей в диэлектрике по величине много меньше амплитуд в области резонансного возбуждения и непосредственно на щели.

Однако даже слабого проникновения поля в диэлектрик оказывается достаточно для заметного изменения комплексного волнового числа резонансных колебаний. При этом величина компонент поля в диэлектрике равномерно спадает с уменьшением радиуса до нуля, так что эффективная его глубина проникновения составляет менее половины радиуса диэлектрика.

2.3. Комбинированные методы

Рассмотренные параметры преобразования основаны на изменении одной величины, функционально связанной с влажностью материала,

$$W = F(p). \quad (2.157)$$

В свою очередь, параметр p – интегральный по своей физической природе и зависит от ряда физико-механических характеристик влажного материала:

$$p = f(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n), \quad (2.158)$$

где $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ – характеристики влажного материала. Подставив (2.158) в (2.157), получим выражение для W :

$$W' = \varphi[f(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n)]. \quad (2.159)$$

Очевидно, что минимизация по W' достигается в том случае, если функция φ обратна f по W . Если W входит в (2.158) аддитивно, то (2.159) принимает вид

$$W' = W + \varphi[f(Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n)], \quad (2.160)$$

где второе слагаемое есть минимальная абсолютная погрешность ПП.

Если функция (2.160) реализуется в конкретном влагомере, то ряд характеристик влажного материала измеряют по отдельным каналам (например, температура, В.М., плотность, натура и др.) и корректируют значение W' во вторичных преобразователях влагомеров. Поэтому, даже при полной компенсации, например, температуры и стабилизации Φ , погрешность δ_1 определится выражением

$$\delta_1 = \frac{\varphi[f(Z_2, Z_3, \dots, Z_{n-1})]}{T}. \quad (2.161)$$

Таким образом, при использовании одного ПП не удастся реализовать влагомер с оптимальными метрологическими характеристиками. Научные основы многопараметрического метода высокочастотной влагометрии изложены в [9]. В нашем случае рассмотрим только комплексирование параметров преобразования, а технологические аспекты реализации этих параметров будут освещены в четвертой главе. В общем виде уравнение связи для электрофизических методов влагометрии имеет вид системы уравнений:

$$\begin{aligned} x_1 &= F_1(W, Z_1, Z_2, \dots, Z_n), \\ x_2 &= F_2(W, Z_1, Z_2, \dots, Z_n), \\ &\dots \dots \dots \\ x_n &= F_n(W, Z_1, Z_2, \dots, Z_n), \end{aligned} \quad (2.162)$$

где $X_1, X_2, \dots, X_n$ – параметры первичного преобразователя;

$Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ – параметры влажного материала: насыпной вес, плотность, температура, химический состав, концентрация солей, гранулометрический состав и др.

Ранее было показано, что влажность W , коэффициент заполнения Φ , температура T и концентрация солей оказывают наиболее сильное влияние на диэлектрические характеристики влагосодержащих материалов.

Система (2.162) для указанных параметров запишется:

$$\begin{aligned} X_1 &= F_1(W, \Phi, T, C), \quad X_3 = F_3(W, \Phi, T, C), \\ X_2 &= F_2(W, \Phi, T, C), \quad X_4 = F_4(W, \Phi, T, C). \end{aligned} \quad (2.163)$$

В таком виде эта система уравнений не имеет решения, так как нам известны только три независимых параметра преобразования – α (или ϵ''), β (или ϵ') и P , причем последний имеет только теоретическую оценку и технически не реализован. В (2.163) можно убрать один параметр – концентрацию солей C , снизив его влияние на X до величин второго порядка малости соответствующим выбором частоты. Для крупнодисперсных влажных материалов закон изменения α , β , ϵ'' и ϵ' от температуры известен. Анализ работ по СВЧ-влагометрии, сделанный в первой главе, и наши исследования показывают, что коэффициент заполнения Φ является наиболее значимым параметром, который относят к «мешающим факторам». Поэтому произведем комплексирование параметров α и β с целью получения параметра преобразования, независимого от Φ . Сократив систему (2.163) до двух уравнений и подставив значения α и β , получим:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \Phi \frac{\rho_0 W}{\rho_H (1 - W)} \\ \beta &= \Phi \left[\frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1 - W} (\beta_H - \beta_0) + (\beta_C - \beta_0) \right] \end{aligned} \right\}. \quad (2.164)$$

Эта система решается относительно W с исключением Φ [5]:

$$W = \left\{ 1 - \frac{\rho_0}{\rho_H} \left[\frac{\beta_H - \beta_0}{\beta_C - \beta_0} - \frac{\alpha_H}{\alpha} \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_C - \beta_0} \right) \right] \right\}^{-1}. \quad (2.165)$$

Второй способ состоит в исключении Φ из этих двух уравнений без выделения в явной форме W .

Поделив уравнение α на β в (2.165), приходим к A -параметру [149], независимому от коэффициента заполнения:

$$A(W) = \frac{\alpha}{\beta - \beta_0} = \frac{\alpha_H(W)}{[\beta_H(W) - \beta_0] + \frac{\rho_H}{\rho_0}(\beta_C - \beta_0)\left(\frac{1}{W} - 1\right)}. \quad (2.166)$$

Зависимости $\alpha_H(W)$ и $\beta_H(W)$ отражают тот факт, что по мере увлажнения материала меняется количественное соотношение между различными формами влаги в материале, так что выполняется соотношение

$$\gamma_H = \sum \gamma_{Hi} V_{Hi}(W), \quad (2.167)$$

где γ_{Hi} – комплексное волновое число 1-й фазы воды в материале;
 V_{Hi} – относительная объемная концентрации i -й фазы.

Так как при любой влажности выполняется соотношение

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \leq 0,5,$$

то α и β могут быть представлены в виде

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon'}}, \quad (2.168)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon'}. \quad (2.169)$$

С учетом (2.168) и (2.169) получаем другую полезную для практических целей форму записи A -параметра:

$$A(W) = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1} \left(\frac{\sqrt{\varepsilon'} + 1}{\sqrt{\varepsilon'}} \right), \quad (2.170)$$

функция $\frac{\sqrt{\varepsilon'} + 1}{\sqrt{\varepsilon'}}$ слабо меняется от влагосодержания.

Действительно:

$$\frac{\sqrt{\varepsilon'} + 1}{\sqrt{\varepsilon'}} = \begin{cases} 2... & \text{при } \varepsilon' \rightarrow 1 \\ 1... & \text{при } \varepsilon' \rightarrow \infty \end{cases}. \quad (2.171)$$

Следовательно, для любого диапазона влагосодержания в качестве $\sqrt{\varepsilon'} + 1 / \sqrt{\varepsilon'}$ может быть выбрана некоторая разумная величина K , соответствующая середине диапазона влагосодержания и неменяющаяся от влажности $\partial K / \partial W$. Окончательно имеем:

$$A(W) = \frac{K}{2} \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1}, \quad (2.172)$$

так как ε'' и ε' являются функциями температуры, то и $A(W)$ также зависит от температуры.

Обращаясь опять к уравнению (2.37) и записывая его для двух длин волн λ_1 и λ_2 , можно выделить еще один B -параметр, не зависящий от коэффициента заполнения:

$$B(W) = \frac{\beta_1 - \beta_{01}}{\beta_2 - \beta_{02}} \approx \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\sqrt{\varepsilon'_1} - 1}{\sqrt{\varepsilon'_2} - 1}, \quad (2.173)$$

где ε'_1 и ε'_2 – диэлектрические проницаемости В.М. на двух длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно.

В случае крупнодисперсных В.М. амплитудные параметры преобразования скомплексировать нельзя, так как исчезает зависимость его и от влагосодержания. Однако в случае мелкодис-

персных материалов коэффициент поглощения α при $W > W_{кр}$ может быть скомплексирован в виде C -параметра, не зависящего от коэффициента заполнения:

$$C(W) = \frac{\alpha_1(W)}{\alpha_2(W)} = \frac{\frac{W}{1-W} \alpha_{HO1} + \frac{\mu S_{yg}}{N_A \sigma} a_{\max} f_1(\alpha_{H\Pi1} - \alpha_{HO1})}{\frac{W}{1-W} \alpha_{HO2} + \frac{\mu S_{yg}}{N_A \sigma} a_{\max} f_2(\alpha_{H\Pi2} - \alpha_{HO2})} + \frac{\frac{W_{кр}}{1-W_{кр}} (\alpha_{HC1} - \alpha_{HO1})}{\frac{W_{кр}}{1-W_{кр}} (\alpha_{HC2} - \alpha_{HO2})} \quad (2.174)$$

где α_1 и α_2 – постоянные затухания на длинах волн λ_1 и λ_2 соответственно. Аналогичная индексация введена для α_{HO} , $\alpha_{H\Pi}$ и α_{HC} .

Если теперь поставить задачу комплексирования трех параметров, чтобы устранить влияние температуры, то, на наш взгляд, решить эту задачу аналитически не представляется возможным, так как температура входит в выражения для ϵ^* влажного материала в сложном виде. Решение этой задачи состоит в минимизации степени влияния температуры на введенные выше комплексные параметры преобразования A , B и C путем оптимизации частоты. Действительно, если обратиться к A -параметру в формуле (2.172) и выбрать длину волны λ такую, что $\lambda < \lambda_0$, где λ_0 самая короткая резонансная длина волны влажного материала, то обе производные $\frac{\partial \epsilon''}{\partial T}$ и $\frac{\partial \epsilon'}{\partial T}$ будут возрастать с увеличением температуры и, следовательно, и числитель и знаменатель в выражении (2.172) будут изменяться примерно в одинаковое число раз, так что общее изменение A -параметра при изменении температуры, будет невелико.

На рис. 2.11–2.21 приведены графики зависимостей A -, B - и C -параметров преобразования от влагосодержания.

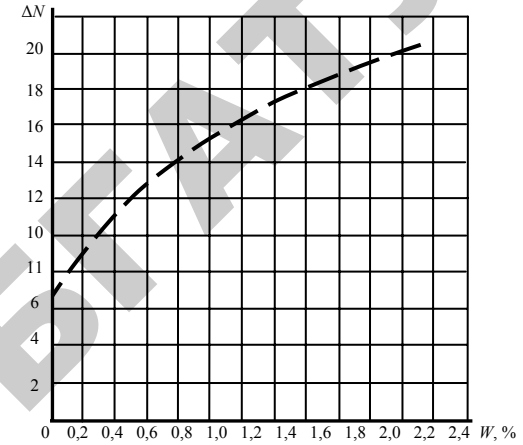


Рис. 2.11. Зависимость переходного ослабления ΔN объемного резонатора типа E_{010} от влагосодержания кварцевого песка на частоте 1,4 ГГц (штриховой линией показана расчетная кривая, полученная по выражению (3.103))

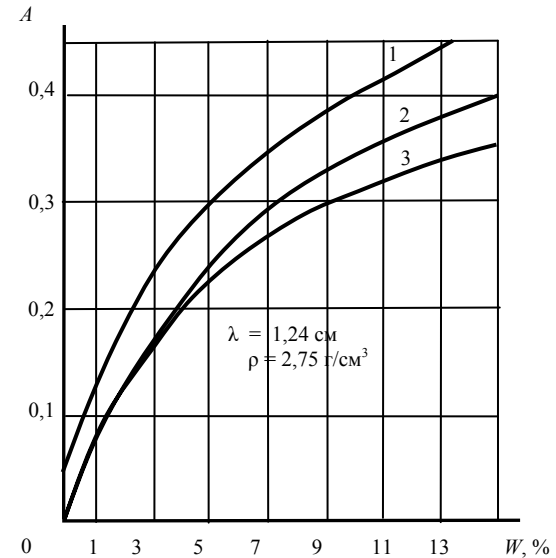


Рис. 2.12. Расчетные зависимости A -параметра от влагосодержания и температуры для крупнодисперсного В.М. (кварцевого песка) при $\lambda = 1,24$ см: 1 – $t = 10$ °C; 2 – $t = 20$ °C; 3 – $t = 30$ °C

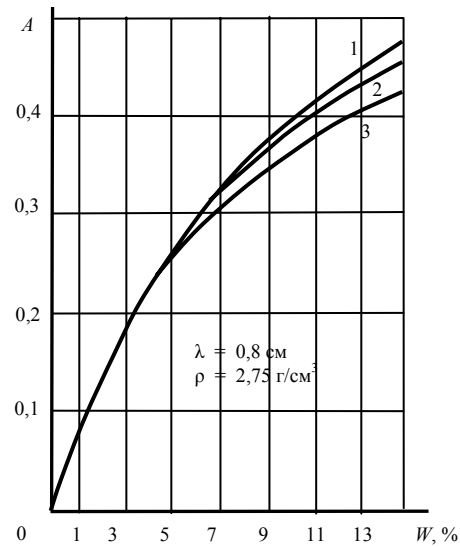


Рис. 2.13. Расчетные зависимости A -параметра от влагосодержания и температуры для крупнодисперсного материала при $\lambda = 0,8$ см:
1 – $t = 10$ °C; 2 – $t = 20$ °C; 3 – $t = 30$ °C

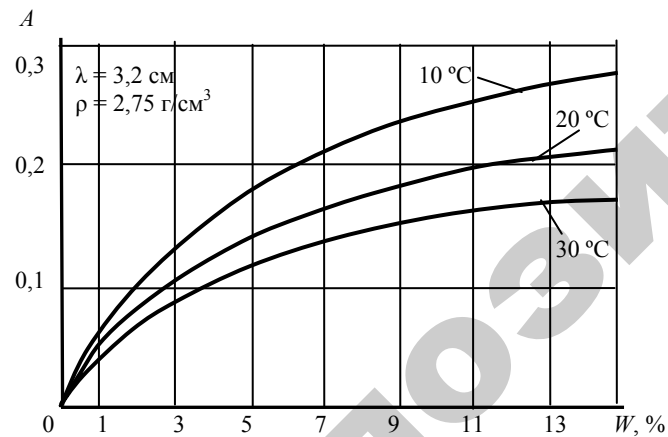


Рис. 2.14. Расчетные зависимости A -параметра для крупнодисперсного материала от влагосодержания и температуры при $\lambda = 3,2$ см

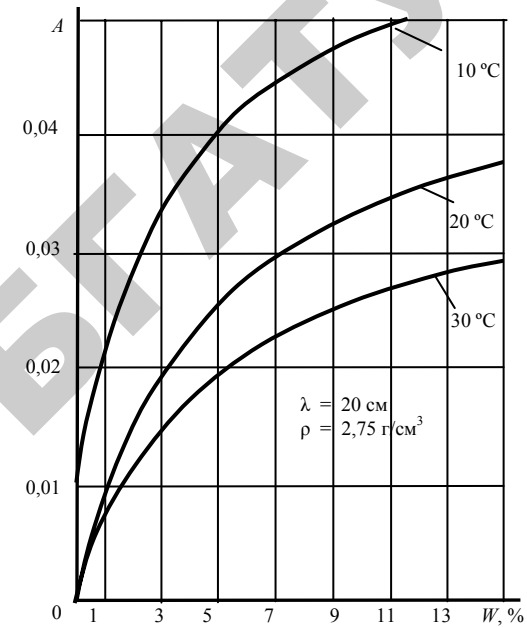


Рис. 2.15. Расчетные зависимости A -параметра для крупнодисперсного материала от влагосодержания и температуры при $\lambda = 20$ см

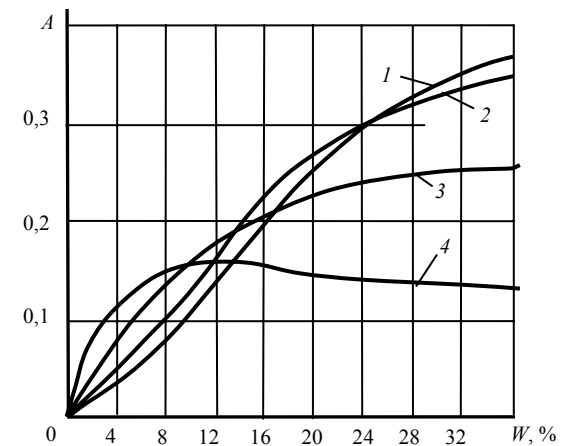


Рис. 2.16. Расчетные зависимости A -параметра от влагосодержания и длины волны λ для пшеницы:
1 – $\lambda = 1$ см; 2 – $\lambda = 3$ см; 3 – $\lambda = 10$ см; 4 – $\lambda = 50$ см; $t = 20$ °C

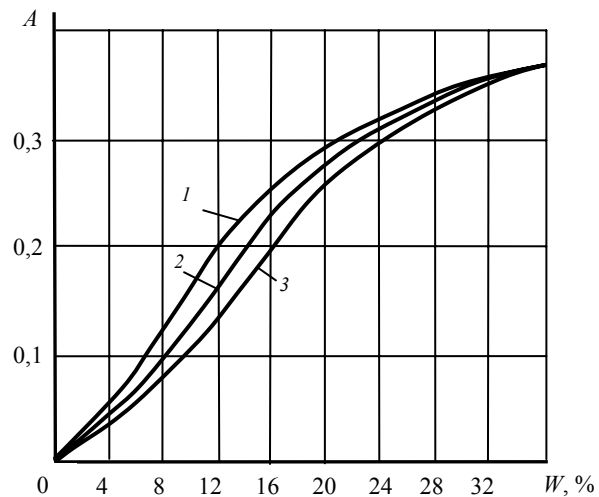


Рис. 2.17. Расчетные зависимости A -параметра влажной пшеницы от влаго-содержания и температуры при $\lambda = 2$ см:
1 - $t = 40$ °C; 2 - $t = 20$ °C; 3 - $t = 0$ °C

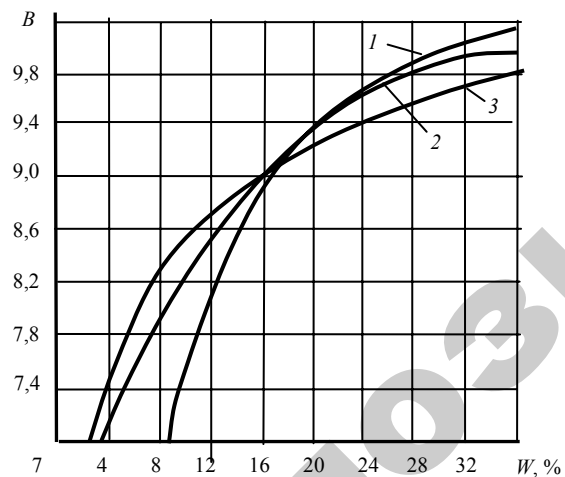


Рис. 2.18. Расчетные зависимости B -параметра пшеницы от влаго-содержания и температуры при $\lambda_1 = 50$ см; $\lambda_2 = 3$ см;
1 - $t = 0$ °C; 2 - $t = 20$ °C; 3 - $t = 40$ °C

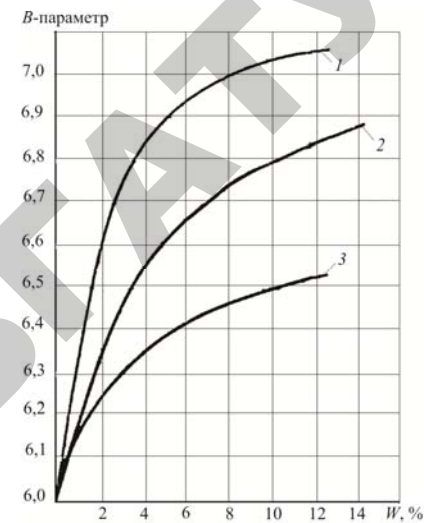


Рис. 2.19. Расчетные зависимости B -параметра от влаго-содержания и температуры для крупнодисперсного В.М. при $\lambda_1 = 50$ см; $\lambda_2 = 3$ см:
1 - $t = 30$ °C; 2 - $t = 20$ °C; 3 - $t = 10$ °C

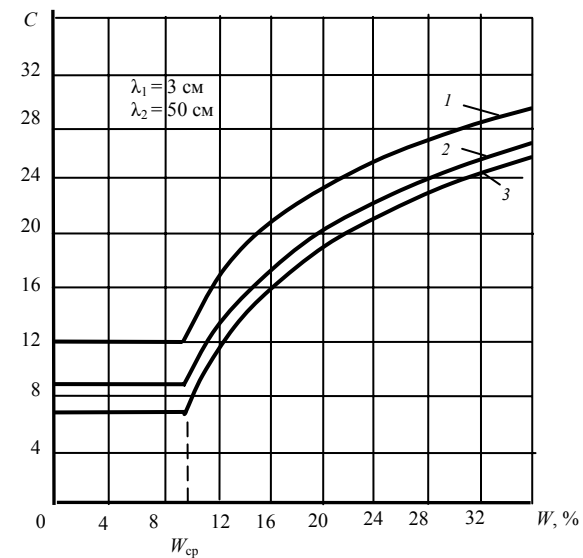


Рис. 2.20. Расчетные зависимости C -параметра пшеницы от влажности и температуры при $\lambda_1 = 3$ см; $\lambda_2 = 50$ см:
1 - $t = 40$ °C; 2 - $t = 20$ °C; 3 - $t = 0$ °C

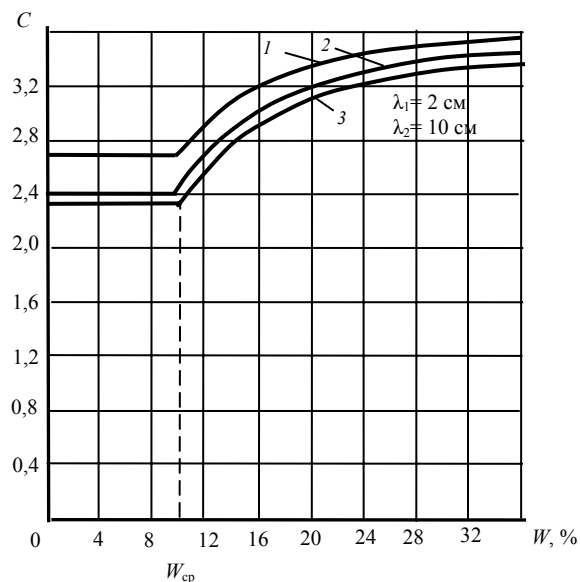


Рис. 2.21. Расчетные зависимости C -параметра пшеницы от влажности и температуры при $\lambda_1 = 30$ см; $\lambda_2 = 10$ см:
1 — $t = 40$ °C; 2 — $t = 20$ °C; 3 — $t = 0$ °C

Из анализа приведенных графиков можно сделать следующие выводы:

- для крупнодисперсных диэлектриков A -параметр является монотонно возрастающей функцией влагосодержания;
- с увеличением частоты электромагнитного поля чувствительность A -параметра к влагосодержанию увеличивается, а степень влияния температуры на него уменьшается с 0,55 %/град при $\lambda = 50$ см до 0,05 %/град при $\lambda = 0,8$ см при $W = 8$ %;
- B -параметр для крупнодисперсного диэлектрика обладает малой чувствительностью к влагосодержанию. При изменении влажности от 0 до 15 % B -параметр изменяется всего в 1,15 раза при 20 °C. Кроме того, влияние температур на B -параметр велико. Все это указывает на неперспективность использования B -параметра в качестве функции преобразования СВЧ-влажмера;
- A -параметр для мелкодисперсных диэлектриков при низких частотах ($f < 2$ ГГц) является неоднозначной функцией влагосодержания.

При повышении частоты ($f > 2$ ГГц) A -параметр является монотонно возрастающей функцией влагосодержания, при этом чувствительность A -параметра к влагосодержанию растет;

- влияние температуры на A -параметр в высокочастотной части СВЧ-диапазона невелико. Например, при $\lambda = 2$ см наибольшее влияние температуры наблюдается при 13 % и составляет 0,1 %/град⁻¹. При других влагосодержаниях это влияние значительно меньше (см. рис. 2.17);
- выводы, сделанные относительно B -параметра для крупнодисперсных диэлектриков, в основном справедливы для мелкодисперсных диэлектриков;
- C -параметр является монотонно возрастающей функцией влагосодержания при $W > W_{кр}$;
- чувствительность C -параметра к влагосодержанию увеличивается с увеличением отношения $\frac{\lambda_2}{\lambda_1}$;
- влияние температуры на C -параметр невелико и составляет 0,25 %/град при $W = 28$ % и 0,1 %/град при $W = 10$ %.

2.3.1. Комбинированный СВЧ-акустический метод

Как правило, в микроволновой влагометрии сельскохозяйственных материалов используют одно- и двухпараметровые методы измерения, ввиду их относительной простоты. Эти методы основаны на использовании одной или двух величин, характеризующих определенные параметры электромагнитного поля, функционально связанные с влажностью материала.

В [1, 5, 28] было показано, что влажность W , коэффициент заполнения Φ , температура T и концентрация солей C оказывают наиболее сильное влияние на диэлектрические характеристики влагосодержащих материалов. Тогда для нахождения влажности с учетом указанных параметров система уравнений запишется:

$$\begin{aligned} x_1 &= F_1(W, \Phi, T, C), \quad x_2 = F_2(W, \Phi, T, C), \\ x_3 &= F_3(W, \Phi, T, C), \quad x_4 = F_4(W, \Phi, T, C). \end{aligned}$$

В таком виде эта система не имеет решения, так как нам известны только два невязимных параметра преобразования – коэффициент затухания α (или ε'') и фазовая постоянная β (или ε'). В (1) можно убрать один параметр – концентрацию солей C , снизив его влияние на x до величин второго порядка малости соответствующим выбором частоты. Для крупнодисперсных влажных материалов закон изменения α , β , ε' и ε'' от температуры известен. Анализ работ по СВЧ-влажнометрии, сделанный в [1], показывает, что коэффициент заполнения Φ является наиболее значимым параметром, который относят к «мешающим факторам». Поэтому произведем комплексирование параметров α и β с целью получения параметра преобразования, независимого от Φ . Сократив систему (1) до двух уравнений и подставив значения α и β из [1], получим:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \Phi \frac{\rho_0 W}{\rho_H (1-W)} \cdot \alpha_H \\ \beta &= \Phi \left[\frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{W}{1-W} (\beta_H - \beta_0) + (\beta_C - \beta_0) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.175)$$

Эта система решается относительно W с исключением Φ

$$W = \left\{ 1 - \frac{\rho_0}{\rho_H} \left[\frac{\beta_H - \beta_0}{\beta_C - \beta_0} - \frac{\alpha_H}{\alpha} \left(\frac{\beta - \beta_0}{\beta_C - \beta_0} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (2.176)$$

Второй способ состоит в исключении Φ из этих двух уравнений без выделения в явной форме W .

Поделив уравнение α на β в (8), приходим к A -параметру [5, 149], не зависящему от коэффициента заполнения:

$$A(W) = \frac{\alpha}{\beta - \beta_0} = \frac{\alpha_H(W)}{[\beta_H(W) - \beta_0] + \frac{\rho_H}{\rho_0} (\beta_C - \beta_0) \left(\frac{1}{W} - 1 \right)} \quad (2.177)$$

Зависимости $\alpha_H(W)$ и $\beta_H(W)$ отражают тот факт, что по мере увлажнения материала меняется количественное соотношение между различными формами влаги в материале, так что выполняется соотношение

$$\gamma_H = \sum \gamma_{Hi} V_{Hi}(W), \quad (2.178)$$

где γ_{Hi} – комплексное волновое число 1-й фазы воды в материале;
 V_{Hi} – относительная объемная концентрации i -й фазы.

Так как при любой влажности выполняется соотношение $\text{tg} \delta = \varepsilon''/\varepsilon' \leq 0,5$, то α и β могут быть представлены в виде

$$\alpha = \pi/\lambda \varepsilon''/\sqrt{\varepsilon'}, \quad (2.179)$$

$$\beta = 2\pi/\lambda \sqrt{\varepsilon'}. \quad (2.180)$$

С учетом (2.179) и (2.180) получаем другую полезную для практических целей форму записи A -параметра:

$$A(W) = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1} \left(\frac{\sqrt{\varepsilon'} + 1}{\sqrt{\varepsilon'}} \right), \quad (2.181)$$

Функция $-\sqrt{\varepsilon'} + 1/\sqrt{\varepsilon'}$ слабо меняется от влагосодержания.

Действительно:

$$\sqrt{\varepsilon'} + 1/\sqrt{\varepsilon'} = 2 \text{ при } \varepsilon' \rightarrow 1 \text{ и } \sqrt{\varepsilon'} + 1/\sqrt{\varepsilon'} = 1 \text{ при } \varepsilon' \rightarrow \infty,$$

следовательно, для любого диапазона влагосодержания в качестве $\sqrt{\varepsilon'} + 1/\sqrt{\varepsilon'}$ может быть выбрана некоторая разумная величина k , соответствующая середине диапазона влагосодержания и неменяющаяся от влажности $\partial K / \partial W$. Окончательно имеем:

$$A(W) = 0,5k\varepsilon''/\varepsilon' - 1, \quad (2.182)$$

Так как ε'' и ε' являются функциями температуры, то и $A(W)$ также зависит от температуры.

Измеряя переходное ослабление ΔN резонатора и уход его резонансной частоты Δf , что не вызывает принципиальных трудностей в технической реализации, получаем алгоритм определения влажности, свободный от влияния коэффициента заполнения Φ для резонаторных методов:

$$A(W) = k_1 \frac{\exp(\Delta N / 8,686) - 1}{\Delta f},$$

$$\text{где } k_1 = k_0 f_0 / 2Q_{H0}. \quad (2.183)$$

На основе этого алгоритма построены принципиальные схемы СВЧ-влажномеров сахара и продуктов свеклосахарного производства, а также табака, чая, сухого молока, казеина и некоторых других сельскохозяйственных материалов.

Если теперь поставить задачу комплексирования трех параметров, чтобы устранить влияние температуры, то, на наш взгляд, решить эту задачу аналитически не представляется возможным, так как температура входит в выражения для ε^* влажного материала в сложном виде.

Решение этой задачи состоит в минимизации степени влияния температуры на A -параметр, путем оптимизации частоты. На рис. 2.22 приведены результаты расчета зависимости A -параметра от влажности для кварцевого песка плотностью $\rho = 2,75$ г/в в трехсантиметровом диапазоне для трех значений температуры, здесь же нанесены экспериментальные точки для различной плотности ρ_0 при $t = 20^\circ\text{C}$.

Аналогичные зависимости получены авторами для чая и резаного табака, причем плотность (коэффициент заполнения) изменялась в 2,5–3 раза. Во всех трех случаях до определенной критической влажности наблюдалось отсутствие влияния плотности на результат измерения влажности по A -параметру.

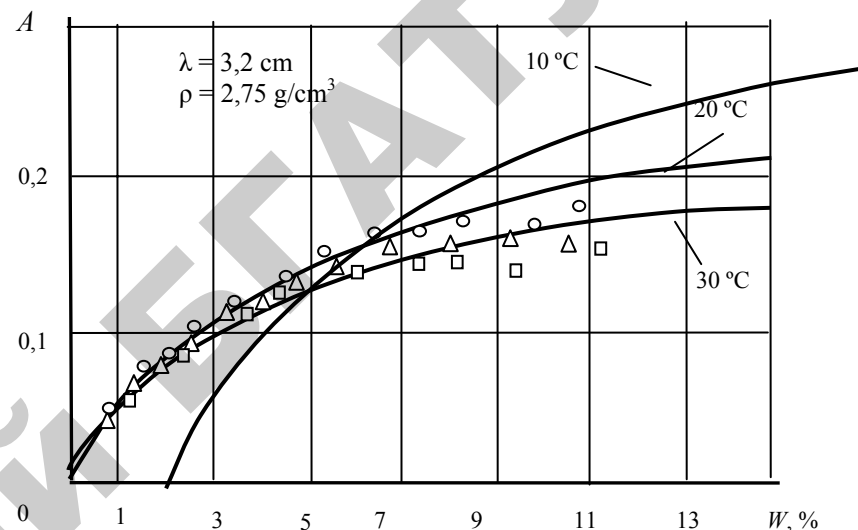


Рис. 2.22. Зависимость A -параметра для кварцевого песка от влажности и температуры на длине волны $\lambda = 3,2$ см. Результаты эксперимента:
○ – $\rho_0 = 2,75$ г/см³; Δ – $\rho_0 = 2,47$ г/см³; □ – $\rho_0 = 2,28$ г/см³

В то же время при влажности больше некоторой критической наблюдалось резкое снижение чувствительности и неоднозначность в определении содержания влаги (рис. 2.22, для песка), либо значительное возрастание влияния плотности (рис. 2.23, для табака). Теоретическое объяснение этому факту дано в работе [150, 151].

Как уже указывалось выше, на параметр преобразования в СВЧ-методах в первую очередь оказывает влияние влажность и лишь затем плотность (коэффициент заполнения) и температура. Если влияние температуры можно уменьшить до допустимых классов точности прибора пределов, например, введением автоматической температурной коррекции, либо, как в случае с A -параметром, выбором рабочей частоты, то влиянием переменной плотности, особенно при поточных измерениях, пренебречь невозможно. Частично эта задача решается в двухпараметровых СВЧ-методах, а также при измерении A -, B - и C -параметров, теоретически зависящих только от влажности (при автоматической температурной коррек-

ции) [1, 5, 149]. Однако, в ряде случаев наблюдается неоднозначность в определении влажности материалов переменной плотности по A -параметру, особенно в области высоких влагосодержаний [150, 151]. Попытки применения амплитудно-фазового метода, а также других СВЧ-методов на основе измерения B - и C -параметров также не всегда позволяют существенно повысить точность измерений влажности материала в потоке при значительных колебаниях его плотности. Например, в случаях поточных измерений влажности табака, чая, хлопка и подобных материалов.

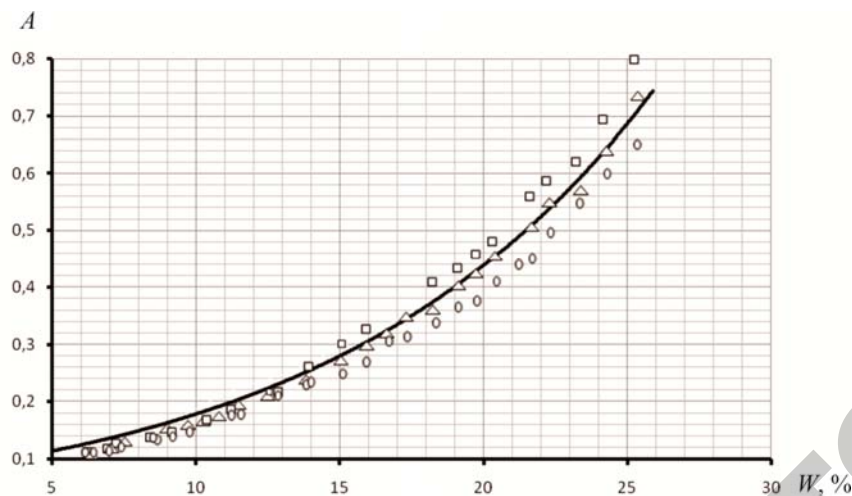


Рис. 2.23. Зависимость A -параметра для резаного табака от влажности и температуры на длине волны $\lambda = 20$ см. Результаты эксперимента:
 $\circ - \rho_0 = 0,12 \text{ г/см}^3$; $\triangle - \rho_0 = 0,34 \text{ г/см}^3$; $\square - \rho_0 = 0,56 \text{ г/см}^3$

В то же время результаты исследования ультразвукового метода измерения влажности твердых сыпучих материалов [152, 153], что стало возможным, когда были разработаны пьезокерамические приемники-излучатели для газовой среды, показали возможность создания акустических влагомеров. Причем, в отличие от СВЧ-методов, чувствительность к изменению плотности у акустических методов оказалась на порядок выше, чем чувствительность к влажности. Это обстоятельство подсказало идею создания комбинированного СВЧ-акустического метода измерения влажности материалов переменной плотности. Сущность предлагаемого способа заключается

в измерении влажности табака на основе резонаторного двухпараметрового метода с коррекцией по плотности путем введения коэффициентов k_1 и k_2 , получаемых на основе измерения амплитуды ΔU и фазы Δt акустической волны, прошедшей через данный материал, т. е. фактически мы должны решить систему как минимум трех уравнений с тремя неизвестными: $\Delta N = \varphi_1(W, \Phi, t)$, $\Delta f = \varphi_2(W, \Phi, t)$, $\Delta U = \varphi_3(W, \Phi, t)$, а также $\Delta \tau = \varphi_4(W, \Phi, t)$.

Последнее выражение вносит структурную избыточность, что позволяет дополнительно повысить достоверность измерений. В [154] приведено выражение, связывающее два измеряемых параметра ΔN и Δf с влажностью материала W . Если его дополнить корректирующими множителями $\ln U_0/U_1$ и τ_0/τ_1 , то оно позволит избавиться от необходимости решения системы уравнений со структурной избыточностью, т. е.

$$W = F \left[k_0 \frac{\exp \left(\frac{\Delta N \ln U_0/U_1 k_1}{8,686} \right) - 1}{\Delta f} \tau_0/\tau_1 k_2 \right], \quad (2.184)$$

где F — функция от измеряемых параметров, связанных с влажностью;
 ΔN — переходное ослабление резонатора, дБ;
 $k_0 = 0,023$ — для данного цилиндрического резонатора на частоте 1,5 ГГц;

U_0 — амплитуда напряжения зондирующего импульса пьезоприемника в отсутствие материала, мВ;

U_1 — амплитуда напряжения зондирующего импульса пьезоприемника прошедшего через материал, мВ;

τ_0 — время прохождения зондирующего импульса в отсутствие материала, мс;

τ_1 — время прохождения зондирующего импульса с материалом в резонаторе, мс;

Δf — смещение частоты резонатора, ГГц;

k_1 и k_2 — коэффициенты, являющиеся константами для данного материала.

Реализован данный способ измерения в модернизированном резонаторном СВЧ-влажнере табака, основанном на измерении A -параметра [1]. Причем в диапазоне влажности табака 4...14 % коррекция на изменение плотности от $0,12 \text{ г/см}^3$ до $0,56 \text{ г/см}^3$ не требуется. При больших влажностях вносится дополнительная коррекция на изменение плотности путем измерения параметров акустической волны прошедшей через материал. Модернизация резонатора влагомера «Микрорадар 114м» производилась путем установки излучателя и приемника ультразвуковых колебаний на противоположных стенках в нижней части измерительной кюветы (лабораторный вариант). При измерении влажности табака, плотность которого изменяется в пределах от $0,1 \text{ г/см}^3$ до $0,6 \text{ г/см}^3$, его засыпают в кювету, находящуюся в цилиндрическом резонаторе, с частотой $f_0 = 1,5 \pm 0,1 \text{ ГГц}$. При этом определяем переходное ослабление ΔN и сдвиг резонансной частоты Δf . В поточном варианте влагомера применен открытый цилиндрический резонатор, конструктивно связанный с формирователем потока. Диапазон изменения влажности табака в технологических процессах составляет от 5 % до 30 %. Для измерения влажности табака в диапазоне 5–14 % лучше пользоваться соотношением (11), так как у комбинированного метода здесь относительно низкая чувствительность, что хорошо видно на зависимости (рис. 2.24). При больших влажностях, как видно из графиков зависимости A -параметра от влажности (рис. 2.21, 2.23), резко увеличивается погрешность измерения от влияния плотности или проявляется неоднозначность в определении влажности.

Этот недостаток устраняется путем введения корректирующих коэффициентов $\ln U_0/U_1 k_1$ и $\tau_0/\tau_1 k_2$, причем амплитуда зондирующего импульса U_0 частотой $100 \pm 20 \text{ кГц}$ принята равной 50 В и стабильна во времени, а амплитуда и фаза первой отрицательной полуволны принятого сигнала измеряются специальным устройством (в лабораторном варианте это цифровой осциллограф). Значения коэффициентов k_1 и k_2 зависят от акустических свойств материала. Так, для кварцевого песка, как для модельного материала, установлены $k_1 = k_2 = 1$, для резаного табака экспериментально (по зависимостям амплитуды U_1 и времени прохождения зондирующего

сигнала τ_1 от плотности при постоянных влажностях) определены средние значения коэффициентов $k_1 = 0,132$ и $k_2 = 2,067$, которые и заносятся в память процессора.

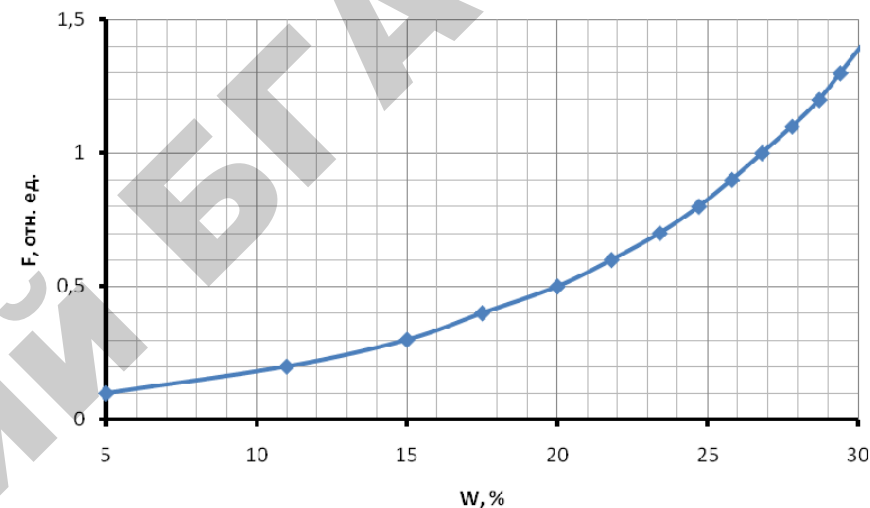


Рис. 2.24. Зависимость параметра F для резаного табака от влажности при температуре 20°C на длине волны $\lambda = 20 \text{ см}$

Графики указанных выше зависимостей для нахождения корректирующих коэффициентов приведены на рис. 2.25 и 2.26. Кроме указанных зависимостей, для облегчения нахождения корректирующих коэффициентов полезно построить семейство вспомогательных кривых $\ln U_0/U_1$ и τ_0/τ_1 в функции влажности для нескольких значений плотности в диапазоне $0,2\text{--}0,5 \text{ г/см}^3$.

Для случая резаного табака зависимость параметра F от влажности при температуре 20°C на длине волны $\lambda = 20 \text{ см}$ можно аппроксимировать выражением: $F = 0,0622 \exp 0,1042W$, откуда $W = 9,596929 \ln(16,077F)$.

Таким образом комбинированные СВЧ-акустические методы позволяют существенно повысить точность измерения влажности материалов переменной плотности в тех случаях, когда комплексирование функций преобразования на базе только микроволновых методов не приносит требуемых результатов.

2.4. Экспериментальная проверка основных параметров преобразования

2.4.1. Амплитудные параметры преобразования

Для проверки амплитудных ПП была собрана установка, блок-схема которой приведена на рис. 2.27. Установка работает следующим образом. СВЧ-колебания от генератора 1 через ферритовый вентиль 2 поступают в поляризованный аттенуатор 3, затем в измерительную линию 4, изгиб 5 (в плоскости H), переход 6, измерительный преобразователь 7, переход 8, ферритовый вентиль 9 и подаются на детекторную секцию 10. Напряжения на измерительной линии 4 и детекторной секции 10 измеряются цифровыми вольтметрами 11 и 12. Измерение переходного ослабления ΔN осуществляется методом замещения [26]. Суммарная погрешность измерения ΔN определяется выражением

$$\delta(\Delta N) = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2}, \quad (2.185)$$

где δ_1 – случайная составляющая погрешности измерения по шкале аттенуатора ($\pm 0,25$ дБ при $N < 60$ дБ);

δ_2 – систематическая составляющая погрешности аттенуатора;

δ_3 – случайная составляющая погрешности измерения ΔN , обусловленная неточностью установки ИП в волноводный тракт ($\delta_3 = 0,15$ дБ при $P = 0,99$), $\delta(\Delta N) = 0,32$ дБ.

Следующая группа погрешностей вызвана неравномерностью засыпки зерна в ИП. Ее величину можно определить только экспериментальным путем.

Исследовались четыре вида зерновых культур – пшеница, рожь, овес и ячмень. Влажность зерна определялась термостатно-весовым методом по ГОСТ 8.432-81 на аттестованной метрологической службой Госстандарта вакуумно-тепловой установке УВТО-1. Систематическая абсолютная погрешность не превышает $\pm 0,1$ %, случайная погрешность $\pm 0,03$ %. Для подготовки проб требуемой влажности использовалась следующая методика. Воздушно-сухое

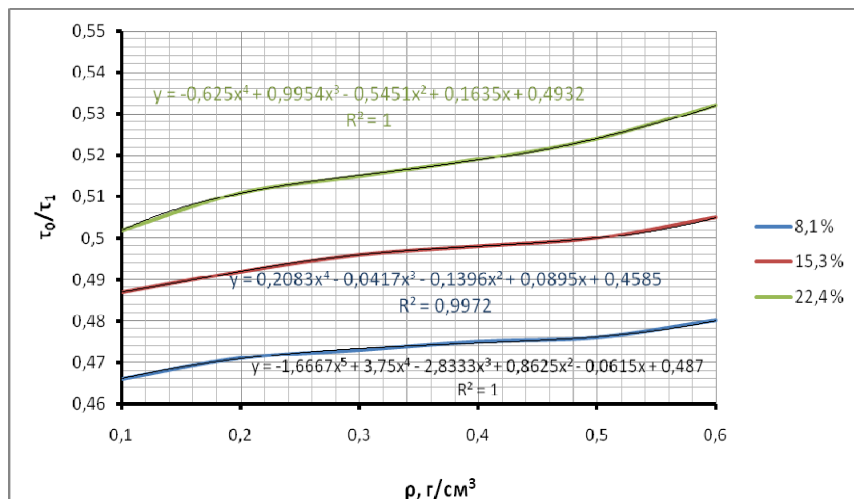


Рис. 2.25. Зависимость относительного изменения времени прохождения акустического сигнала τ_0/τ_1 от плотности табака ρ для трех значений влажности

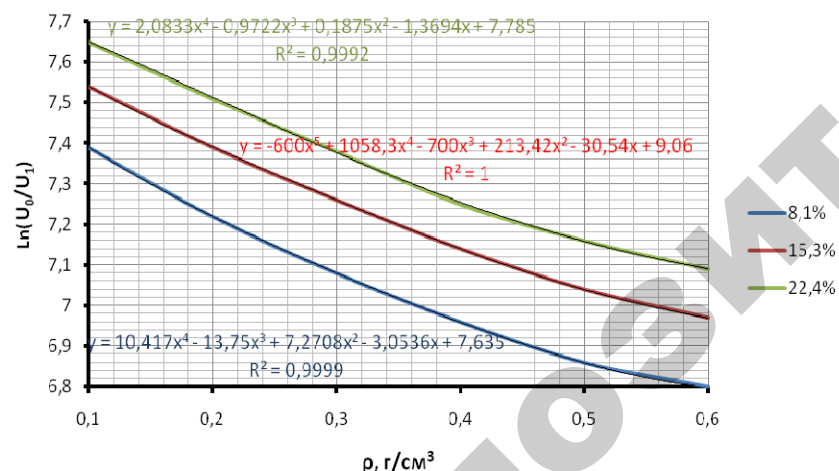


Рис. 2.26. Зависимость логарифма отношения амплитуд напряжений зондирующего импульса в отсутствие и при наличии материала в датчике $\ln U_0/U_1$ от плотности табака ρ для трех значений влажности

зерно очищалось от сорных примесей и зерен с механическими повреждениями, заболеваниями или покрытых плесенью. Согласно ГОСТ 8.432-81 определялась его влажность W_0 . Затем выделялось восемь проб зерна, которые засыпались в стеклянные сосуды с притертой пробкой. Для достижения требуемой влажности в каждую из банок добавлялось P_i грамм дистиллированной воды. Величина P_i определялась по формуле

$$P_i = P_0 \frac{W_i - W_0}{1 - W_i}, \quad (2.186)$$

где P_0 – вес воздушно-сухой пробы.

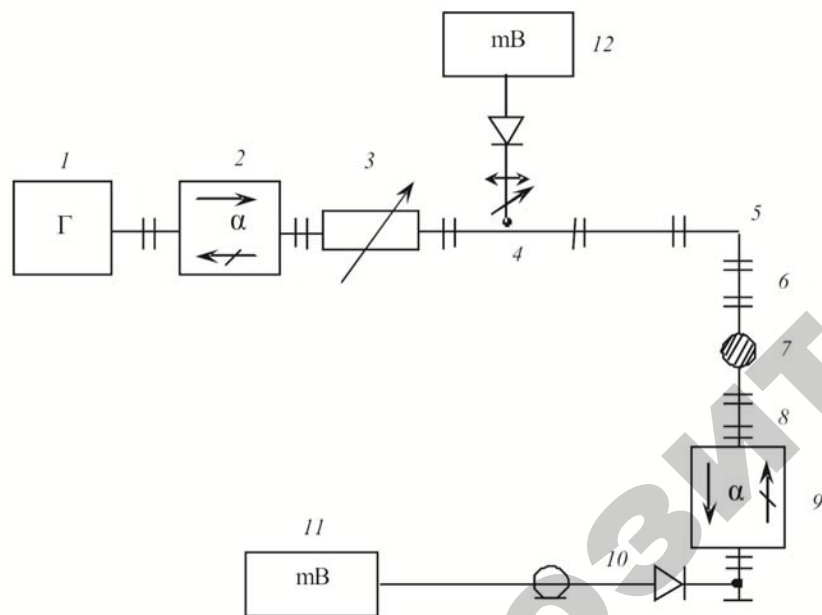


Рис. 2.27. Структурная схема образцовой установки:

1 – генератор ГК4-19А; 2 – ферритовый вентиль, Э6-44; 3 – поляризационный аттенюатор ДЗ-33А; 4 – измерительная линия Р1-28; 5 – изгиб; 6, 8 – переход на круглый волновод; 7 – ПП; 9 – ферритовый вентиль; 10 – детекторная секция; 11, 12 – милливольтметр Р385

Зерно в сосуде занимало 60 % объема. Кондиционирование образцов производилось при температуре $6 \pm 4^\circ\text{C}$ в течение не менее 72 ч. Гомогенизация проб по влажности осуществлялась путем периодического тщательного перемешивания. Перед проведением измерения для снятия ΔN пробы зерна выдерживались при комнатной температуре не менее 12 ч. После проведения измерений ΔN влажность каждой пробы определялась по ГОСТ 8.432-81. Всего было проведено 273 измерения десятикратной повторности [155].

Обратимся к анализу полученных экспериментальных данных. Как следует из рис. 2.23 и 2.24, зависимость $N(W)$ для овса и ячменя носит линейный характер. Уравнение регрессии имеет вид:

$$N = 1,54W - 5,1 \text{ (пшеница)}, N = 2,0W - 12 \text{ (ячмень)}, \quad (2.187)$$

$$N = 1,60W - 6,8 \text{ (рожь)}, N = 1,7W - 9,42 \text{ (овес)}. \quad (2.188)$$

Для пшеницы и ржи при $W \approx 18\% \dots 19\%$ наблюдается перегиб характеристики $N(W)$. Уравнение регрессии при аппроксимации функции $N(W)$ двумя прямыми имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{пшеница} - N &= 1,54W - 5,1 \quad W < 19\%, \\ N &= 2,17W - 16,3 \quad W > 19\%; \end{aligned} \quad (2.189)$$

$$\begin{aligned} \text{рожь} - N &= 1,6W - 6,8 \quad W < 19\%, \\ N &= 2,15W - 16,8 \quad W > 19\%. \end{aligned} \quad (2.190)$$

Наличие точек перегиба свидетельствует о появлении при $W > 19\%$ влаги полисорбции.

Случайная составляющая, обусловленная неидентичностью засыпки зерна в измерительный преобразователь, является мультипликативной величиной.

Среднеквадратическая погрешность измерений определялась по формуле

$$\bar{\sigma}_W = S_{N,W} \sigma_N, \quad (2.191)$$

где $S_{N,W}$ – крутизна характеристики $N(W)$.

Результаты расчета приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Зависимость эмпирической среднеквадратической погрешности измерения W на установке

Пшеница	W	11,7	14,5	16,55	18,74	20,39	23,2	26,16	29,5	
	$\bar{\sigma}_W$	0,09	0,11	0,32	0,17	0,29	0,28	0,57	0,83	
Рожь	W	10,62	12,57	14,6	16,85	18,8	21,9	24,6	27,9	12,25
	$\bar{\sigma}_W$	0,18	0,29	0,25	0,26	0,35	0,45	0,34	0,35	0,18
Овес	W	10,3	11,95	12,5	15,3	16,2	19,3	21,65	23,92	27,65
	$\bar{\sigma}_W$	0,09	0,12	0,20	0,46	0,17	0,32	0,38	0,97	1,05
Ячмень	W	11,3	13,9	15,88	17,65	19,7	23,65	26,4	29,4	
	$\bar{\sigma}_W$	0,18	0,14	0,10	0,15	0,28	0,40	0,39	0,45	

Из данных табл. 2.3 следует, что среднеквадратическая погрешность $\bar{\sigma}_W$ является значительной величиной (до 1 % у овса). Доверительный интервал ε' измеряемой влажности W , согласно [118], определялся по выражению

$$\varepsilon = |W_0 - \bar{W}| \langle t(P, k) \frac{\bar{\sigma}_W}{\sqrt{k}} \rangle, \quad (2.192)$$

где W_0 – истинное значение влажности;

t – коэффициент Стьюдента при заданной доверительной вероятности P и числе степеней свободы $k = n - 1$.

Из (2.192) видно, что ε при заданной P можно уменьшить двумя путями: либо увеличить количество измерений, либо уменьшить $\bar{\sigma}_W$. Первый способ является эффективным только при $n < 10$, так как дальнейшее уменьшение ε приводит к значительному росту n .

Действительно, обозначим отношение $\varepsilon/\bar{\sigma}_W$ через g . Тогда, согласно [156], количество измерений n при $P = 0,99$ можно определить из табл. 2.4.

Таблица 2.4

Зависимость необходимого количества измерений n от g при $P = 0,99$

g	1,0	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
n	11	31	46	78	171	668

Сравнивая данные таблиц 2.3 и 2.4, находим, что для получения доверительной оценки $\varepsilon = 0,4$ % для овса при $W = 28$ % необходимо провести около 50 измерений, что не представляется возможным (длительность, удаление части влаги и др.).

Исследуем второй способ уменьшения погрешности $\bar{\sigma}_W$. Для этого выясним, чем обусловлена эта погрешность. Здесь можно выделить четыре главных источника погрешностей: первый – погрешность измерения ΔN на СВЧ-установке; второй – изменение температуры окружающей среды в процессе исследований; третий – изменение натурального веса пробы (коэффициента заполнения) от измерения к измерению; четвертый – неидентичность ориентации зерен при каждом измерении. Погрешность установки ΔN значительно меньше полученных значений $t\bar{\sigma}_W$. Кроме того, эта погрешность никак не связана с влажностью, а ее относительный вклад с увеличением W уменьшается, полученные же значения $\bar{\sigma}_W$ увеличиваются с ростом W . Относительно второй группы погрешностей можно отметить следующее: в процессе проведения измерений температура зерна, так же как и температура окружающей среды, монотонно изменялась не более чем на 3 °С за 8 ч. На рис. 3.23 представлены экспериментальные температурные зависимости $N(T)$ при различных влагосодержащих для пшеницы и ячменя.

Рожь и овес ведут себя аналогичным образом. Из представленных зависимостей следует, что дополнительная погрешность ΔT от влияния I температуры составляет величину $\approx 0,1$ %/град. Так как длительность измерения одной пробы не превышала 30 мин, то можно заключить, что влиянием температуры на погрешность определения влажности можно пренебречь. Влияние натурального веса ρ на погрешность определения влажности определяется выражением:

$$\bar{\sigma}_{W,p} = \frac{N}{S_{N,W}} \frac{\delta_p}{\rho}, \quad (2.193)$$

из которого следует, что $\bar{\sigma}_{W,p}$ является мультипликативной погрешностью и, кроме того, зависит от абсолютного значения P . Для оценки величины Δp необходимо знать δ_p и зависимость $\rho(W)$. На рис. 2.26 представлены экспериментальные зависимости $\rho(W)$. Каждая экспериментальная точка соответствует среднему арифметическому по результатам 10 измерений. В табл. 2.5 приведены значения $\bar{\sigma}_{W,p}$, рассчитанные по выражению (2.193).

Таблица 2.5

Расчетные значения $\bar{\sigma}_{W,p}$ для пшеницы и ячменя

Пшеница	W	11,7	13,57	14,5	16,55	18,74	20,32	23,2	26,16	29,05
	$\bar{\sigma}_{W,p}$	0,03	0,09	0,08	0,12	0,18	0,14	0,21	0,18	0,22
Ячмень	W	11,3	13,9	15,88	17,65	19,7	23,65	26,4	29,4	
	$\bar{\sigma}_{W,p}$	0,08	0,04	0,15	0,09	0,11	0,16	0,29	0,49	

Из приведенных данных следует, что $\bar{\sigma}_{W,p}$ составляет приблизительно 0,5 $\bar{\sigma}_{W,N}$. Следовательно, оставшаяся часть погрешности обусловлена четвертой группой погрешности. Для уменьшения влияния этой погрешности, исходя из представлений, развитых в [12], разработано засыпное устройство, по существу исключающее влияние оператора на процесс засыпки и позволившее проводить этот процесс достаточно однообразно. Разработанное устройство позволило уменьшить $\bar{\sigma}_{W,N}$ при влажности порядка (29...30) %, до величины 0,18 % для пшеницы, 0,22 % для ржи; 0,32 % для ячменя и 0,38 % для овса. Все данные для $\delta_{W,N}$ получены по результатам десяти измерений, исходя из этого и данных таблицы можно заключить, что $n = 10$ – это минимальное количество измерений,

которое необходимо проводить, чтобы доверительный интервал ε не превышал 0,4 %. Полученные зависимости $N(W)$ для различных зерновых культур не являются абсолютными в том смысле, что для одной и той же культуры они могут отличаться в зависимости от сорта культуры и его районирования. Этот вывод вытекает из следующего. Согласно выражению N пропорционален натурному весу ρ зерна. Это подтверждено также результатами работ в [12]. Согласно данным ГХИ и ВНИИЗа, объемная плотность зерновых культур в зависимости от районирования может существенно колебаться. Этот факт иллюстрируют данные, представленные в табл. 2.6 и 2.7.

Таблица 2.6

Изменчивость объемной плотности зерна пшеницы в пределах одного сорта, выращенного в различных почвенно-климатических условиях

Сорт	Степная зона Украины			Сев.-Кавказский регион		
	Объемная плотность, г/л					
	мин.	макс.	разница	мин.	макс.	разница
Безостая 1	745	809	64	700	814	114
Одесская 51	776	810	34	708	797	89
Мироновская	745	770	25	698	767	69

Таблица 2.7

Изменчивость объемной массы ячменя по зонам произрастания

Район произрастания	Объемная плотность, г/л			
	средняя	минимальная	максимальная	
Северо-западный	646	585	685	100
Центральный	626	538	675	137
Волго-Вятский	658	617	766	149
Централ. Черноз.	634	580	679	99
Поволжский	668	655	689	34
Уральский	670	616	703	87
Донецко-приднпр.	650	627	677	50
Прибалтийский	636	602	688	86

Таким образом, для уменьшения погрешности измерения влажности зерна с использованием амплитудного параметра преобразования необходима коррекция результата на изменение плотности. Она может производиться оператором на основании таблиц или графиков, как, например, в [2, 3]. Другим эффективным способом устранения влияния этого мешающего фактора является применение наряду с СВЧ электрического измерительного преобразователя веса ($\rho_n = P/V$; где $V = \text{const}$).

Если натурный вес в принципе возможно измерить и тем или иным способом внести поправку в результат определения влажности, то 11 не информативные 11 факторы практически не поддаются учету. Это – сорт, химический и биологически состав, район произрастания, климатические условия, год выращивания и др.

Если эти данные, а также степень их влияния на результат измерения неизвестны, то мы имеем дело с самым сложным случаем определения влажности зерна, определяющим минимально возможную погрешность измерительного преобразователя. Так как в нашей стране выращивается около 200 сортов зерновых, климатические условия возделывания которых резко отличаются, произведем оценку предельных метрологических характеристик измерительных СВЧ-преобразователей в более неблагоприятном случае.

Исследования влияния целого ряда «неинформативных» факторов на параметр преобразования производились на протяжении ряда лет (начиная с 1987 г.) на Минском комбинате хлебопродуктов с использованием установки, описанной в [157].

Для исследования влияния района произрастания, а также сорта, химического состава и некоторых других параметров из всего массива данных были отобраны результаты, замеренные при одинаковой температуре различных сортов и видов зерновых, выращенных в Белоруссии, на Украине, а также Венгрии, Канаде и США (весь материал урожая 1987 г.). Для сопоставления результатов измерений все данные приведены к единому натурному весу при данной влажности. Поправка для коррекции величины затухания при изменении плотности относительно средней на 10 % для данной влажности определялась по формуле $\Delta N' = 0,003W \Delta \rho' - 1$.

Как видно из графиков (рис. 2.28), максимальная абсолютная погрешность измерений для пшеницы не превышает $\pm 0,3\%$ (с доверительной вероятностью 0,997), для ржи и ячменя – не выше

$\pm 0,5\%$. Однако здесь следует отметить, что для исследования ржи и ячменя был представлен только местный материал, выращенный в условиях Беларуси. Для зарубежной пшеницы ввиду неполноты данных значения N получены при влажности не выше 16 %.



Рис. 2.28. Зависимость ослабления СВЧ-энергии от влажности зерна, приведенная к одинаковой плотности для $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$:
1 – пшеница; 2 – рожь; 3 – ячмень

Однако, судя по результатам исследований, изложенных в [157–162], можно ожидать получения на СВЧ единой градуировки для пшеницы влажностью до 26 % и выше. Абсолютная погрешность измерений не превышает при этом $\pm 0,3...0,5\%$.

Результаты исследования влияния года урожая на зависимость $N(W)$ для ржи сорта Белта приведены на рис. 2.29. Как видно из графиков, во всех случаях сохраняется линейная зависимость между затуханием и влажностью зерна. Разброс показаний относительно усредненной градуировки здесь значительно больше, чем от сорта

и района произрастания материала и может достигать $\pm 1\%$. Сравнивая наклон зависимостей для разных лет и климатические условия года, можно сделать вывод, что чем больше среднее количество осадков за период выращивания зерна, тем больше крутизна градуировочной характеристики. Для близких по климатическим условиям годов выращивания разброс характеристик не превышает $\pm 0,25\%$.

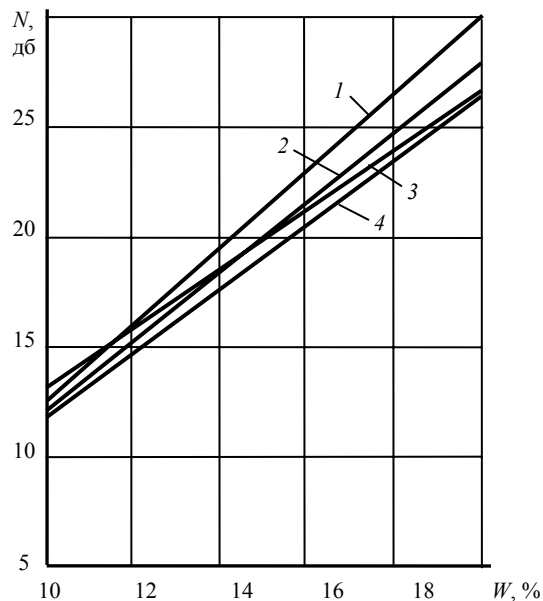


Рис. 2.29. Зависимость ослабления СВЧ-энергии от влажности зерна (рожь Белта). Год уборки: • – 1987; * – 1988; Δ – 1989; – 1990

Для повышения точности определения влажности необходимо производить ежегодное переградуирование измерителя влажности либо коррекцию угла наклона рабочей характеристики в зависимости от климатических условий (засушливое или переувлажненное лето).

В таблице 2.8 приведены экспериментальные результаты определения влажности различных материалов с помощью амплитудных параметров преобразования. Эти данные, а также изложенные выше, подтверждают перспективность амплитудных параметров преобразования. Для материалов с переменной плотностью необходимо вводить коррекцию по объемной массе.

Таблица 2.8

Результаты экспериментальной проверки амплитудного ПП на различных материалах

Исследуемый материал	Диапазон измерения влажности, %	Абсолютная погрешность, % ($P = 0,95$)
Травяная мука	10...30	$\pm 0,63$
Льнотреста	12...25	$\pm 0,42$
-//-/-/-/-/-/-	25...45	$\pm 0,83$
Кукуруза	15...29	$\pm 0,65$
Силосная масса	45...65	$\pm 1,2$
Сено	15...65	$\pm (0,94...2)$
Рис	15...25	$\pm 0,47$
Мука пшеницы	3...12	$\pm 0,27$
Творожная масса	62...87	$\pm 1,6$
Высокожирные сливки	58...66	$\pm 0,6$
Семена льна	12...25	$\pm 0,32$
Хлопок – сырец	10...30	$\pm 0,32$
Просо	12...25	$\pm 0,45$
Горох	19...27	$\pm 0,4$
Фасоль	12...25	$\pm 0,63$
Гречиха	13...37	$\pm 0,63$
Медиум – торф	20...35	$\pm 0,4$
-//-/-/-/-/-/-	35...55	$\pm 0,72$
Сосново – сфагновый торф	20...35	$\pm 0,39$
-//-/-/-/-/-/-	35...55	$\pm 0,7$
Комплексно – верховой торф	20...35	$\pm 0,42$
-//-/-/-/-/-/-	35...55	$\pm 0,73$

Окончание табл. 2.8

Исследуемый материал	Диапазон измерения влажности, %	Абсолютная погрешность, % ($P = 0,95$)
Пески (белорусских карьеров)	4...15	$\pm 0,12$
Пески (белорусских карьеров)	15...20	$\pm 0,21$
Глины (белорусских месторождений)	10...30	$\pm 0,37$
Порошковые медпрепараты	0,2...1,5	$\pm 0,02$
-//-//-//-/-	1,5...10	$\pm 0,05$
Строительная керамика	5...15	$\pm 0,3$
Силикатная масса	12...25	$\pm 0,57$
Различные почвы Беларуси	20...35	$\pm 0,62$
-//-//-//-/-	35...55	$\pm 0,93$
Уголь (марки Г)	5...15	$\pm 0,43$

Функциональная связь ПП с влажностью близка к линейной, для мелкодисперсных материалов имеет сингулярную точку в области, соответствующей влаге моносорбции. Температурная поправка для крупнодисперсных материалов – мультипликативная, с отрицательным коэффициентом, для мелкодисперсных – положительная аддитивная или нулевая.

2.4.2. Фазовые, отражательные, комплексные и комбинированные параметры преобразования

Для проверки фазовых ПП экспериментальная установка должна быть двухканальной [1, 5]. По аналогичной схеме выполняются измерения комплексных ПП [28]. Поскольку методика измерений фазовых и комплексных ПП одинакова, в данном разделе объединены результаты опытной проверки указанных ПП, а также отражательных ПП.

Преимуществом балансных установок является простая методика измерений, позволяющая получать несложные алгоритмы пре-

образования, при обеспечении достаточно высоких метрологических характеристик.

Блок-схема двухсантиметровой установки состоит из генератора СВЧ-колебаний (Г4-11А) 1, четырех волноводных вентилей (Э8-25) 2, Т-моста 3, четырех волноводных изгибов 4, измерительного аттенюатора (Д5-4) 5, измерительной линии 6, датчика с исследуемым материалом 7, трехдецибельного моста 8, аттенюатора для контроля отраженной мощности 9, детекторной секции 10, усилителей 11, индикаторов 12 и согласованной нагрузки 13. Датчик представляет собой волноводную измерительную ячейку.

При измерениях в свободном пространстве были изготовлены кюветы из оргстекла. Их размеры были определены по методике, изложенной в [1]. Главное внимание уделялось способам засыпки сыпучих материалов для улучшения сходимости результатов измерений. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.9. Как видно, свободная засыпка, хотя и является наиболее удобным способом, дает наименьшую сходимость. Лучшие результаты получены при уплотнении материала до постоянного объема, однако такой способ не удобен для измерения в волноводах. Самую высокую сходимость при сохранении относительной простоты и удобства измерений дает засыпка постоянного объема зерна с самоуплотнением (падение под действием собственного веса с постоянной высоты). При этом, однако, не удастся избежать образования слоев с переменной плотностью, поэтому такой способ засыпки исследовался в двух вариантах: материал просвечивался вдоль направления градиента плотности и поперек его. Причем это имеет смысл только для измерения в открытом пространстве, так как в волноводе возможно только одностороннее просвечивание.

Конструкции загрузочных бункеров для свободного пространства и волноводов приведена на рис. 2.30.

Общая идея для создания таких бункеров заключается в обеспечении засыпки с постоянной высоты (для исключения влияния оператора), отделении постоянного объема с помощью специального ножевого устройства и применении быстрооткрывающихся заслонок.

Выведем расчетные формулы для нахождения α и β применительно к данной экспериментальной установке. Работает она следующим образом.

Таблица 2.9а

Влияние способа засыпки зерна в датчике на сходимость результатов

Способ засыпки	Материал	Показания влагомера, дБ										Среднее		Сходим.		Абс. погр. %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	дБ	%	дБ	%	
1	Пшеница $W = 12,2\%$ $\rho = 0,866$	22,4	22,2	22,4	22,2	22,4	22,5	22,4	22,2	22,0	22,1	22,28	12,55	0,5	0,25	+0,35
2		22,8	23,0	23,2	22,8	22,8	22,6	23,2	22,9	22,8	22,6	22,87	12,75	0,6	0,3	+0,55
3		22,0	22,1	22,2	22,2	22,1	22,2	22,3	22,2	22,2	22,1	22,16	12,5	0,3	0,15	+0,3
4		22,4	22,6	22,1	22,4	22,7	22,3	22,4	22,3	22,6	22,3	22,41	12,68	0,4	0,3	+0,4
5		23,2	23,0	23,2	23,1	23,4	23,4	23,0	23,3	23,2	23,3	23,21	12,9	0,2	0,2	+0,7
6		21,8	21,7	21,8	21,8	21,8	21,8	21,9	21,8	21,8	21,8	21,8	12,28	0,6	0,1	+0,08
1	Пшеница $W = 14,6\%$ $\rho = 0,819$	26,8	27,0	27,0	26,8	27,0	27,2	27,0	26,9	26,8	27,0	26,95	14,8	0,6	0,2	+0,2
2		27,2	27,2	27,4	27,1	27,3	27,0	27,2	26,8	27,2	27,0	27,14	14,44	0,6	0,3	-0,16
3		26,9	26,9	26,8	27,0	27,1	26,8	26,9	26,9	27,0	26,8	26,91	14,36	0,3	0,15	-0,24

Окончание табл. 2.9а

Способ засыпки	Материал	Показания влагомера, дБ										Среднее		Сходим.		Абс. погр. %
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	дБ	%	дБ	%	
4	Пшеница $W = 14,6\%$ $\rho = 0,819$	27,0	26,6	27,0	27,0	27,1	26,8	27,0	26,9	26,9	26,8	26,91	14,36	0,5	0,25	-0,24
5		27,2	27,3	27,2	27,4	27,5	27,4	27,2	27,5	27,3	27,2	27,32	14,5	0,3	0,15	-0,2
6		26,8	26,8	26,8	26,8	26,7	26,8	26,7	26,8	26,7	26,7	26,76	14,3	0,1	0,05	-0,3
1	Пшеница $W = 16,6\%$ $\rho = 0,877$	34,0	34,2	34,0	34,2	33,8	34,0	33,7	34,2	34,0	33,8	33,99	17,18	0,5	0,25	+0,58
2		34,2	34,4	34,0	34,4	34,2	34,2	34,4	34,2	34,4	34,2	34,26	17,28	0,4	0,1	+0,68
3		34,0	34,0	34,2	33,8	34,0	34,0	34,2	33,8	34,0	34,0	34,0	17,2	0,4	0,2	+0,6
4		32,8	34,0	33,8	34,0	34,0	33,4	34,0	34,1	33,8	33,6	33,75	17,04	1,3	0,65	+0,44
5		34,4	34,4	33,9	34,0	34,2	33,9	34,4	34,5	34,2	34,2	34,21	17,25	0,6	0,3	+0,65
6		33,8	33,6	33,9	34,0	33,8	33,8	33,8	33,9	33,9	33,8	33,87	17,1	0,4	0,2	+0,5

Способы засыпки: 1 – произвольная; 2 – вибросыпка; 3 – с засыпным бункером № 1; 4 – с засыпным бункером № 1 и переворачиванием; 5 – произвольная с уплотнением; 6 – с засыпным бункером № 2

Таблица 2.96

Зависимость вариации затухания от засыпки ржи в волноводы разного сечения
($W = 25,9 \%$, $\rho = 0,58 \text{ г/см}^3$)

Сечен. волн., мм ²	Затухание, дБ										N_{cp}	$v = N_{max} - N_{min} / N_{cp}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
16×8	33,8	33,0	33,8	33,0	32,1	33,5	32,6	33,8	34,5	33,2	33,33	7,2 %
23×10	27,2	27,3	27,6	27,6	27,2	27,2	27,7	27,5	27,6	26,8	27,37	3,29 %
40×20	21,8	22,2	22,0	22,0	22,4	21,9	22,2	22,3	21,8	22,0	22,06	2,72 %
48×24	19,3	19,3	19,1	19,5	19,6	19,3	19,2	19,2	19,4	19,6	19,35	2,58 %
90×45	16,2	16,3	16,0	15,9	16,2	16,3	16,3	16,2	15,9	16,0	16,14	2,48 %

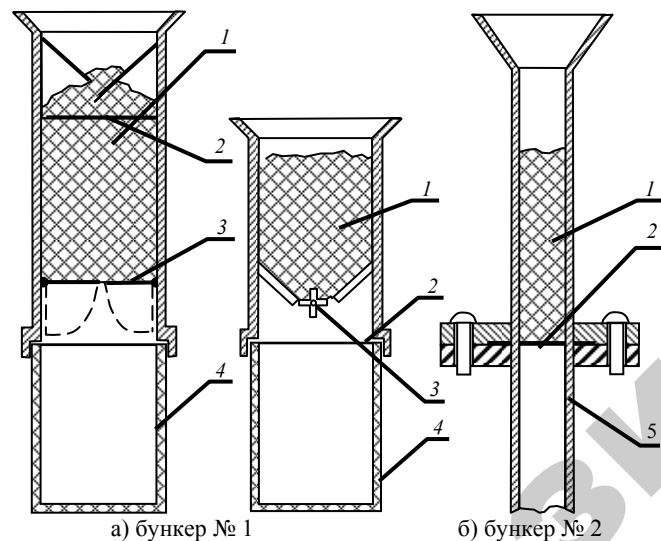


Рис. 2.30. Конструкция загрузочных бункеров для свободного пространства
(а, б) и волноводного (в):

1 – влажное зерно; 2 – нож для отделения постоянного объема зерна;
3 – быстросоткрывающиеся заслонки; 4 – измерительная кювета
из радиопрозрачного материала; 5 – волноводная измерительная ячейка

Модулированные сверхвысокочастотные колебания, вырабатываемые генератором 1, с помощью Т-моста 3 делятся на два канала,

в одном из которых помещается датчик с контролируемым материалом 7, в другом – измерительный аттенюатор 5. После прохождения опорного и измерительного канала оба сигнала встречаются в измерительной линии, образуя стоячую волну. При отсутствии образца в измерительной ячейке и установке начального затухания осуществляется баланс амплитуд моста. Перемещая зонд измерительной линии, находим нулевой min. При внесении в измерительный канал исследуемого образца с помощью аттенюатора Д5-4 осуществляем новый баланс амплитуд. При этом следует учесть, что вследствие увеличения электрической длины волны в образце сместится положение узла (min) стоячей волны. При этом

$$\Delta X = X_{\min 1} - X_{\min 2} = -\frac{d}{2} \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0} \right), \quad (2.194)$$

где d – толщина образца.

Отсюда получаем

$$\beta = \beta_0 \left(\frac{d + 2|\Delta X|}{d} \right). \quad (2.195)$$

Затухание СВЧ-энергии в исследуемом образце определится как

$$N_1 = (N'' - N') - N_{отр}, \quad (2.196)$$

где N' и N'' – показания измерительного аттенюатора до и после внесения образца.

$$\alpha = \frac{N_1}{8,686\alpha}. \quad (2.197)$$

На рис. 2.31 представлена блок-схема двухсантиметровой установки. Аналогично устроена (рис. 2.32) и работает установка для исследования первичных преобразователей в трехсантиметровом диапазоне микроволн.

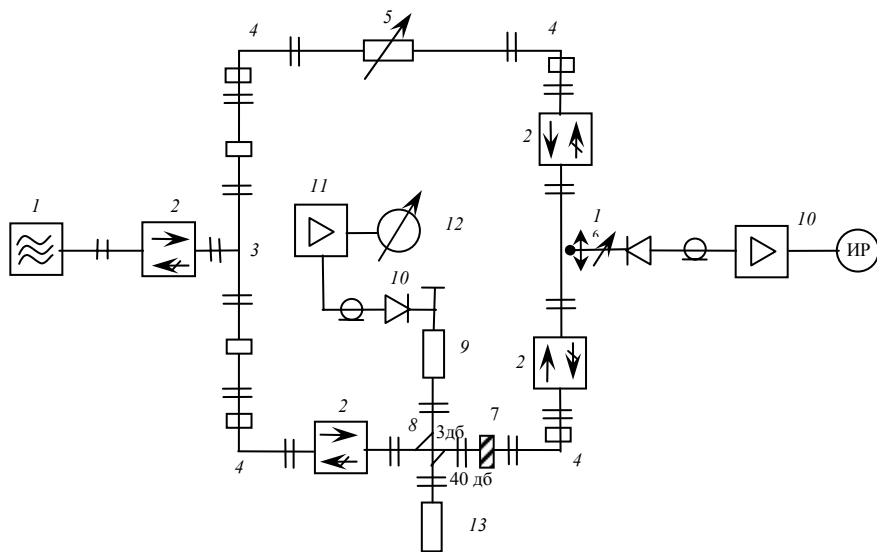


Рис. 2.31. Блок-схема 2-х сантиметровой установки

Сверхвысокочастотные колебания, вырабатываемые генератором 1, с помощью Т-моста 3 делятся на 2 канала. В первом канале они модулируются с помощью управляемого аттенюатора 7, второй канал используется для создания постоянного смещения на СВЧ детекторного диода измерительной линии 8. В измерительном канале последовательно включается ячейка с контролируемым зерном 5 и измерительный аттенюатор 6. В качестве развязывающих элементов применены ферритовые вентили 2. Для сборки установки использованы волноводные изгибы 4. Уровень смещения устанавливается с помощью поглощающего аттенюатора 9. Сигнал с измерительной линии поступает на усилитель 10 и индикатор 11. Отраженную мощность замеряют с помощью направленного ответвителя 12, измерительного аттенюатора 13, детекторной секции 14, усилителя и индикатора. Причем в данном случае необходима тарировка тракта контроля отраженной мощности перед выполнением измерений. Расчетные формулы, выведенные для двухсантиметровой установки справедливы и в этом случае.

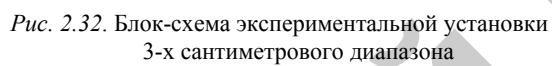


Рис. 2.32. Блок-схема экспериментальной установки
3-х сантиметрового диапазона

Эффект повышения чувствительности детекторного диода измерительной линии достигается за счет наложения вспомогательного СВЧ-поля на измеряемый сигнал. В принципе, путем подачи постоянного смещения U_0 можно регулировать чувствительность детекторного диода. Ток детектора, к которому подводится постоянное U_0 и переменное $U_m \cos \omega t$ напряжение, определяется выражением [124]:

$$I = I_0 + G \left[U_m \cos \omega t + G \left(\frac{T}{4} U_m^2 + \frac{T}{4} U_m^2 \cos 2\omega t \dots \right) \right], \quad (2.198)$$

где $G = \frac{dI}{dU}$ – проводимость детектора.

При изменении переменного напряжения на ΔU_m приращение постоянной составляющей тока составит:

$$\Delta I = \frac{T}{4} \Delta U_m^2 = \frac{1}{2} \frac{t(U)}{G} \Delta P, \dots, \frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{t(U)}{2G}. \quad (2.199)$$

Таким образом, чувствительность по току $\Delta I / \Delta P$ зависит от проводимости G и положения рабочей точки, так как $t(U)$ является мерой кривизны характеристики. Применение такого способа для повышения чувствительности показало, что резко увеличивается возможность выхода из строя детекторного диода.

Значение выпрямленного тока при подаче на детекторный диод сверх-высокочастотного напряжения $U_m \cos \omega t$, определится выражением (2.198), откуда

$$I = \frac{T}{4} U_m^2 G^2. \quad (2.200)$$

Обозначив напряжение контролируемого сигнала, подводимое к детектору через ΔU_m , найдем новое значение выпрямленного тока по принципу наложения:

$$I + \Delta I = \frac{T}{4} G^2 (U_m^2 + \Delta U_m^2) = \frac{T}{4} G^2 (U_m^2 + 2U_m \Delta U_m + \Delta U_m^2). \quad (2.201)$$

Так как напряжение контролируемого сигнала ΔU_m на несколько порядков меньше вспомогательного U_m , то приращение тока детектора определится только вторым слагаемым

$$\Delta I = \frac{T}{2} G U_m \Delta U_m. \quad (2.202)$$

Для сравнения полученного выражения с (2.199) выразим входящие в него величины через мощность P и проводимость детектора G . На основании известного соотношения $P = U^2 G$, переходя к действующим значениям напряжения, получим:

$$\Delta I = \frac{T}{2} \sqrt{\frac{2P}{G}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{G}} = \frac{T}{2G} 2\sqrt{P \cdot \Delta P}. \quad (2.203)$$

Обозначив отношение мощности вспомогательного сигнала к мощности контролируемого ΔP через $K = P / \Delta P$, окончательно получим:

$$\frac{\Delta I}{\Delta P} = \frac{t(U)}{2G} 2\sqrt{K}. \quad (2.204)$$

Анализ этого выражения показывает, что можно получить выигрыш в чувствительности в $2\sqrt{K}$ раз. По данным [28] эта величина может составлять $5 \cdot 10^3$. Выполненная по этому принципу экспериментальная установка имеет значение $K = 10^{-2} / 10^{-8} = 10^6$ и позволяет увеличить чувствительность в $2 \cdot 10^3$ раз. Это позволяет полностью использовать рабочие пределы измерения применяемого аттенюатора типа Д5-5, что соответствует расширению динамического диапазона более чем на 30 дБ.

Оценка инструментальной погрешности волноводной мостовой установки с применением стандартных узлов и приборов проведена в [28, 119]. Проведенная нами экспериментальная проверка метрологических характеристик установок на эталонных жидкостях дала следующие результаты (табл. 2.10).

Таблица 2.10

Результаты проверки лабораторных установок на эталонных жидкостях

Рабочий диапазон установки, см	Наибольшая относительная погрешность измерения, %	
	α	β
$\lambda = 2,45 \dots 3,4$	2 %	0,05%
$\lambda = 1,78 \dots 2,52$	2 %	0,08 %

Исследование фазовых, отражательных и комплексных ПП проводились, как правило, на материале, взятом из одного и того же исходного образца.

Для сопоставления результатов измерений, выполненных на различных установках с применением различных материалов, а также для их сравнения с данными, полученными другими исследователями, результирующие характеристики пересчитывались на полное заполнение датчика. Плотность образцов, значение которой необходимо для таких расчетов, определялась пикнометрическим способом.

Экспериментальные зависимости коэффициента α и β от влажности для трех видов зерновых культур приведены на рис. 2.33.

Для параметров проходящей волны на частоте 9,4 ГГц в обоих случаях наблюдается линейная зависимость их от влажности. Она может быть описана выражением $A = aW + b$. Так, для исследованных материалов уравнения регрессии имеют вид:

для пшеницы – $\alpha = 0,0210W - 0,105$; $r = 0,980$; $\beta = 0,0376W + 2,72$; $r = 0,961$;

для ячменя – $\alpha = 0,0176W - 0,107$; $r = 0,967$; $\beta = 0,0272W + 2,58$; $r = 0,946$;

для ржи – $\alpha = 0,0193W - 0,116$; $r = 0,962$; $\beta = 0,0310W + 2,61$; $r = 0,953$.

Как показано в [5], ослабление СВЧ энергий влажным материалом пропорционально количеству влаги в «просвечиваемом» объеме, т. е. объемной влажности $Q = \rho'W$. На фазовую постоянную также влияет плотность материала. Следовательно, для сопоставления результатов расчета с экспериментом необходимо привести эти зависимости к общей величине Q .

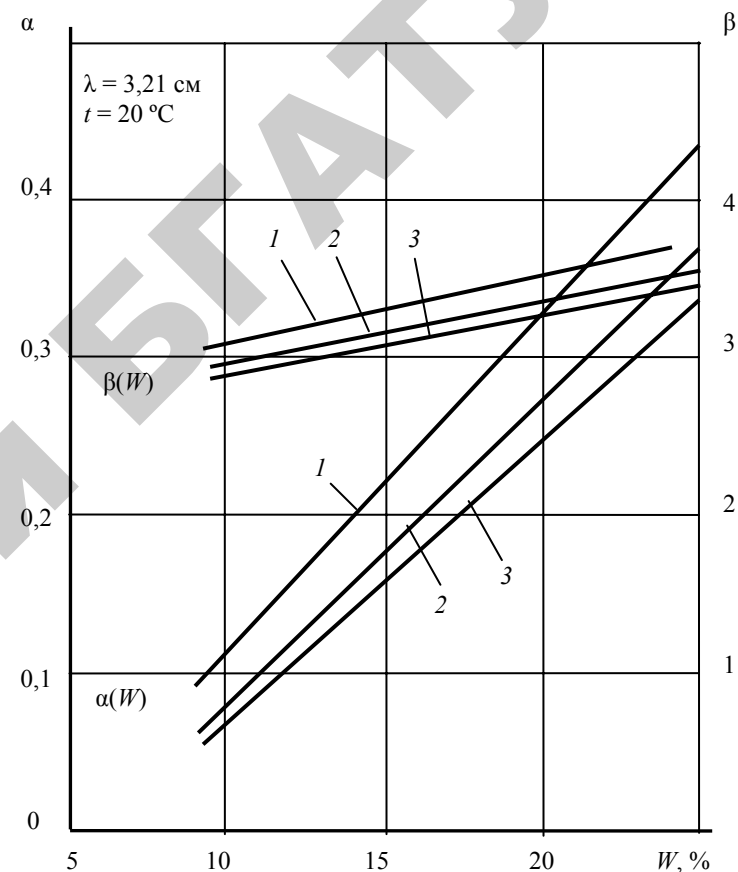


Рис. 2.33. Зависимость коэффициентов ослабления α и фазы β от влажности зерна:
1 – пшеница; 2 – рожь; 3 – ячмень

Как видно из рис. 2.34 совпадение расчетных и экспериментальных данных вполне удовлетворительно. Относительно небольшой разброс точек говорит о наличии большого сходства диэлектрических свойств воды у различных видов зерновых культур. Поэтому в дальнейшем для сокращения объема экспериментальных исследований параметров преобразования целесообразно проводить их на одном виде материала, но в функции объемной влажности.

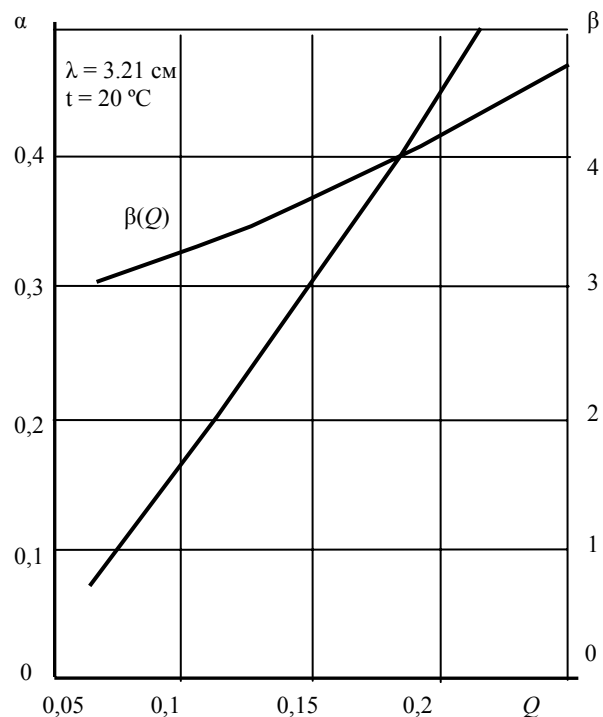


Рис. 2.34. Зависимость коэффициентов ослабления α и фазы β от объемной влажности:
 о – пшеница; Δ – рожь; * – ячмень; ---- – расчет

Зависимость отражательного параметра преобразования $|\Gamma|$ от объемной влажности для трех фиксированных частот приведена на рис. 2.35. Как видно из графиков на всех частотах наблюдается линейная, или близкая к линейной зависимость $|\Gamma|$ от Q , причем наибольшая чувствительность оказывается в диапазоне, близком к трехсантиметровому. В целом, даже в этом диапазоне относительная чувствительность к изменению влажности здесь намного ниже, чем для рассмотренных ранее параметров преобразования. Сравнивая расчетные и экспериментальные зависимости $|\Gamma| = f(Q)$ можно отметить вполне удовлетворительное их совпадение на частоте 9,4 ГГц, на других частотах результаты несколько хуже, однако, максимальное расхождение не превышает 20 %.

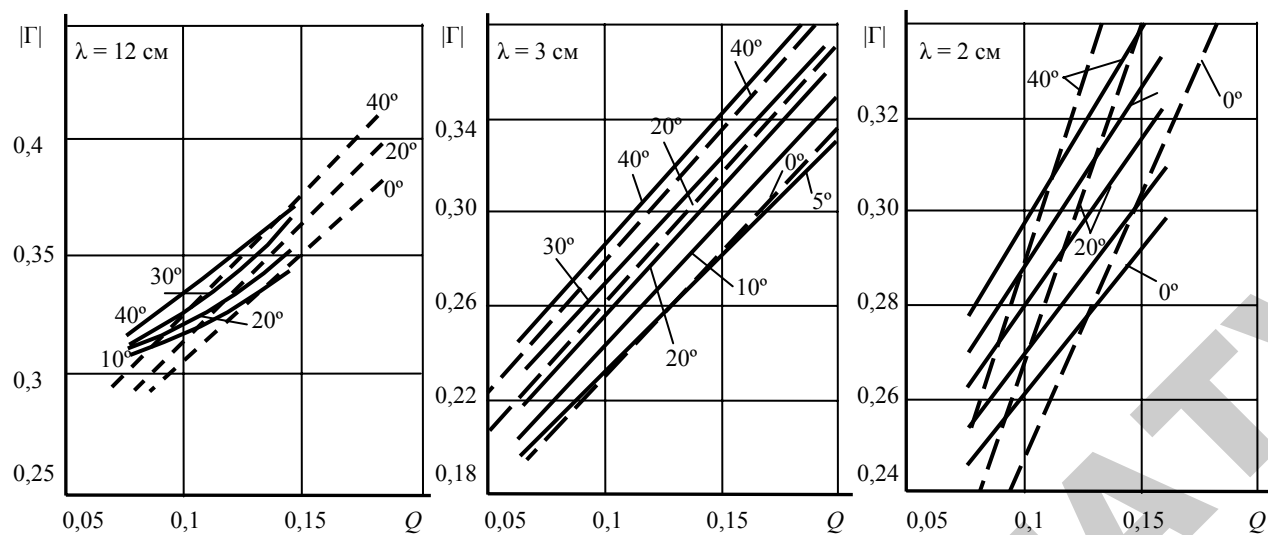


Рис. 2.35. Зависимость модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ от объемной влажности пшеницы:
 --- — расчет; • — эксперимент

В таблице 2.11 представлены результаты измерений влажности некоторых материалов переменной плотности с использованием комплексных П.П.

Таблица 2.11

Результаты измерения влажности различных материалов с использованием комплексных (амплитудно-фазовых) П.П. при $T = 293 \text{ К}$

Тип и вид материала	Плотность образца, $\rho \text{ г/см}^3$	Расчетная влажность	Влажность по ГОСТ	Абсолютная погрешность
Торф	0,618	31,5	31,5	0,0
Низинный	0,318	47,0	47,6	-0,6
Древестно-тростниковый	0,508	48,0	47,6	+0,4
Торф	0,722	47,75	47,6	+0,15
Верховой	0,316	21,0	21,1	-0,1
Магеланикум	0,493	21,3	21,1	+0,2
Торф	0,655	21,2	21,1	+0,1
Верховой	0,322	54,8	55,5	-0,7
Магеланикум	0,519	55,6	55,5	+0,1
Торф	0,732	56,5	57,0	-0,5
Переходной	0,313	34,1	34,0	+0,1
Древестно-осоковый	0,505	34,7	34,6	-0,1
Торф	0,690	34,5	35,3	-0,8
Переходной	0,321	42,2	43,0	-0,8
Древестно-осоковый	0,513	42,4	43,0	-0,6
Торф	0,694	42,8	42,9	-0,1
Пшеница	0,75	20,3	20,1	+0,2
Пшеница	0,67	20,6	20,65	-0,05
Пшеница	0,62	20,35	20,25	+0,1
Рожь	0,72	18,5	18,7	-0,2

Окончание табл. 2.11

Тип и вид материала	Плотность образца, $\rho \text{ г/см}^3$	Расчетная влажность	Влажность по ГОСТ	Абсолютная погрешность
Рожь	0,6	18,2	18,4	-0,1
Рожь	0,56	18,3	18,2	+0,1
Ячмень	0,62	17,0	16,8	+0,2
Ячмень	0,55	17,1	16,9	+0,3
Овес	0,47	18,5	18,3	+0,2
Овес	0,45	18,4	18,5	-0,1
Овес	0,41	18,1	18,2	-0,1
Сено	0,15	20,5	20,1	+0,4
Сено	0,25	19,8	20,1	-0,3
Сено	0,48	20,2	20,1	+0,1
Резаный табак	0,23	12,0	12,1	-0,1
Резаный табак	0,4	12,3	12,1	+0,2
Резаный табак	0,51	11,9	12,1	+0,2

3. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ МИКРОВОЛНОВЫХ ВЛАГОМЕРОВ

Основой для построения микроволновых влагометрических систем является современная элементная база сверхвысокочастотной техники, в том числе полупроводниковые и микрополосковые устройства. Анализ микроволновых влагомеров проведен по литературным источникам, материалам конференций и совещаний, проводимых у нас в стране и за рубежом, изучению патентов США, Англии, Японии, Франции, ФРГ и других стран в главе 1. В работах [1, 5] рассмотрены конструкции влагометрических систем, используемых в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве. Следует отметить, что более 60 % всех микроволновых влагомеров используют амплитудный ПП (с коррекцией по температуре и плотности образца), построены по одноканальной схеме. Отмечается, что этому способствует простота технических решений, достаточно высокая чувствительность и широкий диапазон измерения влажности, хорошие метрологические показатели, невысокая стоимость и простота СВЧ-тракта, наличие парка контрольно-измерительных приборов для контроля и поверки влагомеров. В последнее десятилетие все шире начинают использовать многопараметровые приборы и устройства микроволнового контроля влажности, основанные на резонансных методах [157], начато серийное производство влагомеров почв на основе ВДС-методов [165].

В современном приборостроении широко используется модульный принцип построения измерительных систем, обладающий большой гибкостью и универсальностью. Его применение в разработке микроволновых влагомеров позволяет реализовать конструкции приборов универсального назначения, использующих единую элементную базу.

Представленные на рис. 3.1 блок-схемы реализуют практически все алгоритмы параметров преобразования (ПП) микроволновых влагомеров. Эта задача решается при помощи четырех основных функциональных узлов (ФУ).

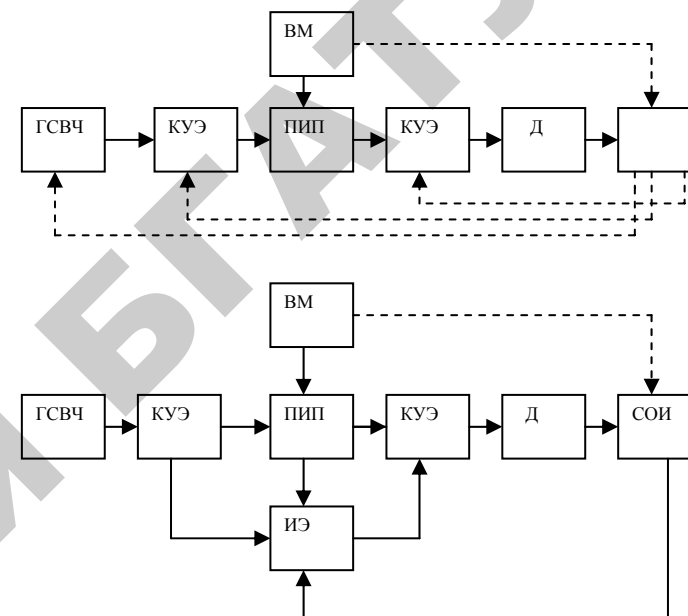


Рис. 3.1. Обобщенные блок-схемы микроволновых влагомеров: одноканальная (а) и двухканальная (б):

ГСВЧ – генератор; КУЭ – коммутационно-управляющие элементы; ВМ – влажный материал; ПИП – первичный измерительный преобразователь; ИЭ – измерительный элемент; Д – детектор колебаний; СОИ – система обработки ПП и индикации

ФУ-генератор с СВЧ (ГСВЧ) осуществляет генерацию электромагнитных колебаний в заданном диапазоне длин волн и с заданной выходной мощностью. Установлено, что на частотах выше 4 ГГц целесообразно применять генераторы на диодах Ганна, на более низких – использовать полупроводниковые генераторы (на СВЧ-транзисторах).

В первичных измерительных преобразователях (ПИП) формируется область взаимодействия электромагнитного поля СВЧ с влажным материалом (ВМ) и выходной сигнал в соответствии с выбранным ПП.

Для канализации и передачи энергии электромагнитного поля СВЧ к остальным ФУ используются волноводные, коаксиальные и полосковые линии передач.

ФУ-коммутационно-управляющих элементов (КУЭ) осуществляет коммутацию и управление электромагнитных колебаний СВЧ, изменение при помощи измерительных элементов (ИЭ) основных ПП.

ФУ-система обработки и индикации (СОИ) осуществляет обработку информационного сигнала, поступающего с детектора Д, вычисление алгоритма ПП, выработку сигналов коррекции и управления ФУ КУЭ и ИЭ, выдачу информации о влажности.

3.1. Требования к конструкции первичных измерительных преобразователей

Простейшим и наиболее распространенным типом ПИП микроволновых влагомеров являются приемная и передающая антенны, между которыми помещается контролируемый материал. В качестве антенн применяют секториальные, пирамидальные и конические рупоры, зеркальные, щелевые, диэлектрические, микрополосковые и волноводные измерители, а также антенны поверхностных волн.

В методах локализованного поля используются ПИП в виде проводных, волноводных, полосковых и коаксиальных линий передач (ЛП), резонаторы закрытого и открытого типов.

Выбор ПИП определяется физико-механическими свойствами контролируемого объекта и условиями измерения. Так, например, конструкции ПИП для измерения влажности твердых, сыпучих и пастообразных материалов, или влагомеров для дискретного контроля и контроля движущихся материалов существенно отличаются друг от друга.

При измерении влажности материалов, веществ и продуктов, имеющих большие размеры или объем (строительные конструкции, тюки соломы, хлопка или табака, почва и др.), ПИП состоит из антенн, открытых резонаторов или открытой ЛП. Поскольку в процессе измерений физико-механические свойства объекта контроля остаются неизменными, параметры ПИП будут определяться их соответствующими конструктивными и электрическими характеристиками (размер, масса, диаграмма направленности, поляризация, тип волны, конструкция открытого резонатора, основная мода и др.).

Сыпучие материалы необходимо помещать в специальную ювету (в волноводных ПИП материал засыпается непосредственно в полость волновода), и в этом случае ПИП будет представлять единую конструкцию, состоящую из антенн соответствующего типа и юветы для сыпучего материала.

При влагометрии движущихся линейно-протяженных, плоских материалов используются такие же ПИП, как и для крупногабаритных объектов контроля (ОК).

При использовании оптических методов локализация электромагнитного поля СВЧ с целью взаимодействия с ОК осуществляется различными антеннами (табл. 3.1). Введем понятие информационный объем взаимодействия (ИОВ) – область пространства, образованного приемной и передающей (или одной приемно-передающей) антеннами, в котором находится ОК. В идеальном случае ИОВ $V_{ип}$ должен быть численно равен объему ОК $V_{вм}$:

$$V_{ип} = V_{вм}. \quad (3.1)$$

В реальных условиях всегда должно выполняться неравенство

$$V_{ип} < V_{вм}. \quad (3.2)$$

Величина $V_{ип}$ определяется по диаграмме направленности (ДН) выбранного типа антенны. Расчет ДН детально разработан. Для решения задач СВЧ-влагометрии достаточными являются графо-аналитические методы расчета, изложенные в [1].

Информационная емкость $C_{ие}$ ПИП численно равна ИОВ:

$$C_{ие} = V_{ип}. \quad (3.3)$$

Так как $C_{ие} = V_{ип} < V_{вм}$, то для ПИП, работающих на просвет, всегда выполняется условие избыточности информации.

Для ПИП, реализующих отражательный ПП, граничным условием для одной из координат ИОВ будет являться глубина проникновения Δ и ИОВ будет равен

$$V_{ип} = \Delta S_{ху}, \quad (3.4)$$

где ΔS_{xy} – площадь «пятна» диаграммы направленности антенны на расстоянии l от поверхности ОК.

Для волноводных ПИП величина ИОВ определяется внутренним сечением волновода и толщиной ОК. Очевидно, что в этом случае

$$V_{\text{ип}} = V_{\text{вм}}. \quad (3.5)$$

В резонаторных ПИП закрытого типа всегда $V_{\text{ип}} < V_{\text{вм}}$.

Геометрические размеры влагосодержащих объектов контроля должны выбираться из условия сокращения до минимума побочных переизлучений и дифракции на краях. Так как излучатели и приемники электромагнитных колебаний СВЧ находятся в непосредственной близости к контролируемым объектам, важно в максимальной степени соблюсти принципы квазиоптики при их проектировании.

Простейшим способом выполнения указанных условий является выбор таких размеров излучателей и объектов контроля, чтобы указанные принципы соблюдались априори. Однако это не всегда удобно, так как конструкции влагомеров становятся громоздкими. На практике геометрические размеры объектов контроля выбираются из условий снижения до минимума энергии СВЧ-колебаний, излучаемой передающей антенной, которая будет проходить в приемную антенну, минуя этот объект. Зная диаграмму направленности излучателя в двух плоскостях, можно рассчитать минимальные поперечные размеры объекта контроля (в направлении нормального падения), удовлетворяющие этим условиям.

Эти размеры могут быть найдены по эмпирическим формулам:

$$\begin{aligned} L_1 &\geq 1,1 l_1 + (d_1 + 0,5d_2)\text{tg}0,5\theta_1; \\ L_2 &\geq 1,1 l_2 + (d_1 + 0,5d_2)\text{tg}0,5\theta_2, \end{aligned} \quad (3.6)$$

где L_1 и L_2 – поперечные размеры объекта контроля;

l_1 и l_2 – поперечные размеры раскрыва антенн;

d_1 – расстояние от антенн до поверхности объекта контроля;

d_2 – толщина объекта контроля в направлении нормального падения;

θ_1 и θ_2 – ширина диаграмм направленности по уровню 0,7 в соответствующих плоскостях.

Для сплошных сред, линейные размеры которых значительно превышают длину волны СВЧ-колебаний (листовые и рулонные материалы, строительные конструкции), условием однородности следует считать граничный размер включений, имеющих отличные друг от друга диэлектрические свойства, удовлетворяющий условиям квазиоптики. Часто, однако, такие структурные фазы соизмеримы с длиной волны. В этом случае необходимо учитывать дополнительные потери СВЧ-излучения за счет эффектов рассеяния на таких неоднородностях. Для вычисления этих потерь необходимо решать сложную дифракционную задачу. Точное решение подобных задач трудно осуществимо, и в большинстве своем исследователи применяют приближенные методы, основанные на использовании принципа Кирхгофа-Гюйгенса. В случае диэлектриков, каковыми являются структурные неоднородности, решение таких задач сопряжено с непреодолимыми математическими трудностями. В простейшем варианте, когда включения имеют форму шара, эффективное сечение рассеяния определяется через медленно сходящийся ряд по полиномам Лежандра, и в общем виде трудно поддается расчетам. В скалярном случае задача о рассеянии на диэлектрической сфере имеет много общего с квантово-механической задачей о рассеянии на потенциальном барьере при больших энергиях [59]. Основные эффекты в этом случае определяются не дифракцией, а отражением и преломлением [117], что имеет место в нашем случае. Ввиду изложенного, нами был применен экспериментальный метод, целью которого явилось установление граничных размеров неоднородности в сплошном поле, при котором влиянием рассеяния можно еще пренебречь при расчете величины затухания или отражения СВЧ-энергии от «плоской» (в приближении квазиоптики) поверхности.

В [46] исследовались панели из керамзитобетона и аглопоритобетона, у которых размеры включений (керамзит и аглопорит), имеющие шарообразную форму, составляли величину $(0,3...1)\lambda$. В табл. 3.1 приведены результаты исследований.

Вариации потерь СВЧ-энергии как функции влажности панелей при десятикратной повторности не выходили за границы абсолютной погрешности измерений СВЧ-влажномером (при $P = 0,95$, $\Delta W = \pm 0,7\%$) и функции преобразования, рассчитанной по линейной модели, из чего следует вывод о малом влиянии неоднородностей структуры на величину потерь СВЧ-энергии.

Таблица 3.1

Влияние размеров неоднородности на коэффициент отражения

Материал	Объемный вес, кг/м ³	Влажность, %		Коэффициент отражения от поверхности панелей с включением $(0,3 \dots 1)\lambda$	Коэффициент отражения от гладкой поверхности
		по СВЧ-влажномеру	По ГОСТ		
Керамзитобетон	950	6,5	6,1	0,35	0,38
Аглопоритобетон	1520	3,8	4	0,28	0,25
Керамзитобетон	1150	12,0	11,3	0,52	0,47
Аглопоритобетон	1320	11,5	10,4	0,49	0,43

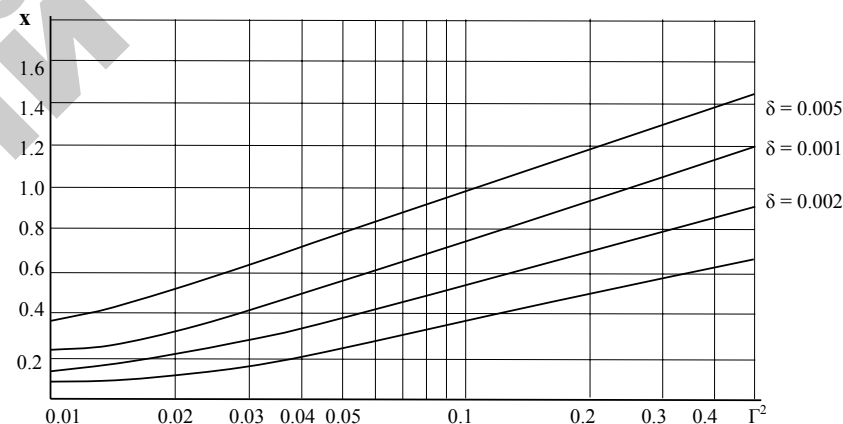
Для исследования вариации коэффициента отражения (при нормальном зондировании поверхности панели) были изготовлены два типа панелей – в одних поверхность была образована аглопоритом и керамзитом с нерегулярностями структурных включений, в других – выравнителем неровностей с последующей заливкой цементным раствором и разравниванием до получения чистоты поверхности $< \frac{\lambda}{8}$. Разница в измеренных величинах модулей коэффициентов отражения не превышает 10 %. Незначительное влияние структурных неоднородностей, соизмеримых с длиной волны, можно отнести за счет многократных переотражений на статистических неоднородностях диэлектрических включений.

3.1.1. Оптимизация конструкции ПИП «на прохождение»

Выведем основные соотношения для определения толщины ОК в направлении просвечивания l (зная ее, по выражениям (3.1)–(3.5) нетрудно вычислить ИОВ). Ранее было установлено, что толщина образца определяет уровень осциллирующий коэффициента прохождения. Очевидно, что величина l должна выбираться из условия минимизации погрешности, вызванной N_3 .

Рассмотрим случаи определения $l_{\min}$ ПИП. Установим, что отношение $\frac{\delta N_3}{N_1 + N_2}$ должно быть меньше заданного числа α , соответствующего минимальной влажности ОК $W_{\min}$. По выражениям (1.34), (1.36) определяем $\epsilon'(W_{\min})$ и $\alpha(W_{\min})$ (в случае мелкодисперсных материалов $\epsilon'(W_{\min})$ и $\alpha(W_{\min})$ определяются экспериментально по методике, изложенной в разделе 2). Далее вычисляют $\Gamma^2(W_{\min})$ и пользуясь номограммой, приведенной на рис. 3.2, определяют x . Величину $l_{\min}$ определяют из выражения

$$l_{\min} = \frac{x}{\alpha(W_{\min})}. \quad (3.7)$$

Рис. 3.2. Номограмма для определения параметра x

Выберем частоту СВЧ-влажмера 9,4 ГГц. Контролируемый влажный материал – кварцевый песок $W_{\min} = 0,5 \%$, $\Phi = 0,58$. ПИП – круглый волновод $d = 2,3$ см. Определим $l_{\min}$ при различных $\alpha = 0,05; 0,1; 0,2; 0,4$. Вычисляем $\alpha_{(0,5\%)}$ и $\epsilon'_{(0,5\%)}$ по соответствующим выражениям: $\alpha_{(0,5\%)} = 0,03$ дБ см⁻¹; $\epsilon'_{(0,5\%)} = 3,00$. Критическая длина волны для данного ПИП на основной моде H_{11} [111]:

$$\lambda_{\text{кр}} = d\pi / v_{11} = 3,92 \text{ см},$$

где v_{11} – корень функции Бесселя, равный 1,841.

Находим P -фактор:

$$p = (\lambda / \lambda_{\text{кр}})^2 = 0,66.$$

Вычисляем β_{1B} , β_{0B} , Γ^2 и по номограмме находим значения x для заданных a :

$$x_{(a=0,05)} = 1,2; x_{(a=0,1)} = 0,96; x_{(a=0,2)} = 0,73; x_{(a=0,4)} = 0,52.$$

Окончательно получаем:

$$l_{\min (a=0,05)} = 40 \text{ см}; l_{\min (a=0,1)} = 32 \text{ см};$$

$$l_{\min (a=0,2)} = 24 \text{ см}; l_{\min (a=0,4)} = 17,3 \text{ см}.$$

Таким образом, в области малых влагосодержаний кварцевого песка минимальная длина $l_{\min}$ первичного преобразователя очень велика. Очевидно, что с уменьшением частоты СВЧ-влажмера $l_{\min}$ будет еще больше возрастать, так как при этом уменьшается постоянная затухания α_0 влажного материала.

Отметим, что большие значения $l_{\min}$ связаны, в первую очередь, с относительно большим значением коэффициента отражения Γ . Для первичных преобразователей, в которых распространяется ТЕМ-волна, $P = 0$ и Γ несколько меньше: $\Gamma^2 = 0,071$. В этом случае $l_{\min (a=0,05)} = 30 \text{ см}; l_{\min (a=0,1)} = 22,7 \text{ см}; l_{\min (a=0,2)} = 16 \text{ см}; l_{\min (a=0,4)} = 10 \text{ см}$. Следовательно, и в этом случае $l_{\min}$ достаточно велико. Необходимо еще сделать одно замечание. При вычислении полагалось, что член $\cos \beta l$ может принимать в процессе измерения влажности значение как $+1$, так и -1 . В реальных условиях, если коэффициент заполнения Φ изменяется незначительно, амплитуда осцилляции δN_3 может быть несколько меньше, так что полученные оценки для $l_{\min}$ могут быть уменьшены на 20...30 %.

Большинство мелкодисперсных материалов являются материалами органического происхождения, удельный вес которых в 2...3 раза меньше, чем у кварцевого песка. Кроме того, они характеризуются небольшими коэффициентами заполнения (например, для зерна пшеницы $\Phi = 0,4...0,5$). Оба этих фактора приводят к тому, что при одной и той же весовой влажности W объемное содержание воды в мелкодисперсных материалах значительно (в 3 и более раза) меньше, чем, например, в кварцевом песке и, следовательно,

ϵ' у этих материалов также меньше, что, в свою очередь, определяет малое значение коэффициента отражения Γ . Например, резанный табак при плотности 0,2 г/см³ и влажности 8 % содержит столько же воды, сколько кварцевый песок при влажности 1 %. При этом постоянные затухания α_0 для обоих диэлектриков отличаются в 2 раза. В то же время коэффициенты отражения отличаются существенно. В случае ТЕМ-волны на частоте 9,4 ГГц Γ^2 для табака при $W = 8 \%$ и $\rho = 0,2 \text{ г/см}^3$ равен $6 \cdot 10^{-3}$. При таком значении влиянием δN_3 можно вообще пренебречь.

Рассмотрим случай, когда $l = \text{const}$, $F = \text{var}$. Для малых влагосодержаний следует повысить частоту настолько, чтобы α стало удовлетворять неравенству

$$\alpha > \frac{x}{l}. \quad (3.8)$$

Причем x , как и ранее, находится из номограммы (см. рис. 3.2) по заданному Γ^2 и a . При вычислении Γ можно пренебречь дисперсией $\sqrt{\epsilon'}$, так как она незначительна для влажных материалов.

До сих пор все оценки относительно l и F сводились к следующим неравенствам, характерным для диапазона малых влагосодержаний:

$$l \geq l_{\min},$$

$$F \geq F_{\min}. \quad (3.9)$$

Возникает вопрос: могут ли быть наложены ограничения в рассматриваемом методе на l и F сверху; т. е. существуют ли некоторые значения $l_{\max}$ и $F_{\max}$?

Как отмечалось выше, мощность ГСВЧ не превышает 50–60 мВт. Минимальное напряжение, которое можно зафиксировать на СВЧ-детекторе в режиме видеодетектирования, составляет величину порядка 10^{-4} В , что соответствует уровню мощности на 55–60 дБ меньше, чем мощность ГСВЧ. Так как ослабление N ПИП связано с x и Γ^2 соотношением

$$N = 8,686[x - \ln(1 - \Gamma^2)], \quad (3.10)$$

то можно получить оценку по максимуму для X

$$X \leq X_{\max} = N_{\max} / 8,686 + \ln(1 - I^2), \quad (3.11)$$

где $N_{\max} = 60$ дБ.

Таким образом, если частота СВЧ-влажмера зафиксирована, то для l получаем оценку

$$l \leq l_{\max} = [1 / (\alpha(W_{\max}))][6,91 + \ln(1 - I^2)], \quad (3.12)$$

где $\alpha(W_{\max})$ – коэффициент ослабления ОК при максимальной влажности.

С учетом (3.7) находим пределы измерения ℓ

$$x / (\alpha(W_{\min})) \leq l \leq [1 / (\alpha(W_{\max}))][6,91 + \ln(1 - I^2)], \quad (3.12a)$$

где x определяется из номограммы (см. 3.14).

В отдельных случаях (3.12a) является противоречивым условием. Действительно, если в рассмотренном выше примере потребовать, чтобы СВЧ-влажмер контролировал влажность до 11 %, то получим, что l должно быть меньше 9,5 см, что как видно из предыдущего противоречит условию минимальности погрешности, связанной с δ_{N3} в области малых влагосодержаний. В таких ситуациях следует выполнять ПИП с двумя фиксированными длинами, либо снизить требования к погрешностям в области малых влагосодержаний.

Аналогично можно найти условие для частоты СВЧ-влажмера, когда длина первичного преобразователя фиксирована

$$F_{\min} \leq F \leq F_{\max}, \quad (3.13)$$

где $F_{\min}$ находится из условия

$$\alpha(F_{\min}, W_{\min}) > x / l, \quad (3.14)$$

а $F_{\max}$ – из условия

$$\alpha(F_{\max}, W_{\max}) < (1 / l) [6,91 + \ln(1 - I^2)]. \quad (3.15)$$

На рис. 3.3 представлена номограмма для решения неравенства (3.13) для крупнодисперсных ВМ.

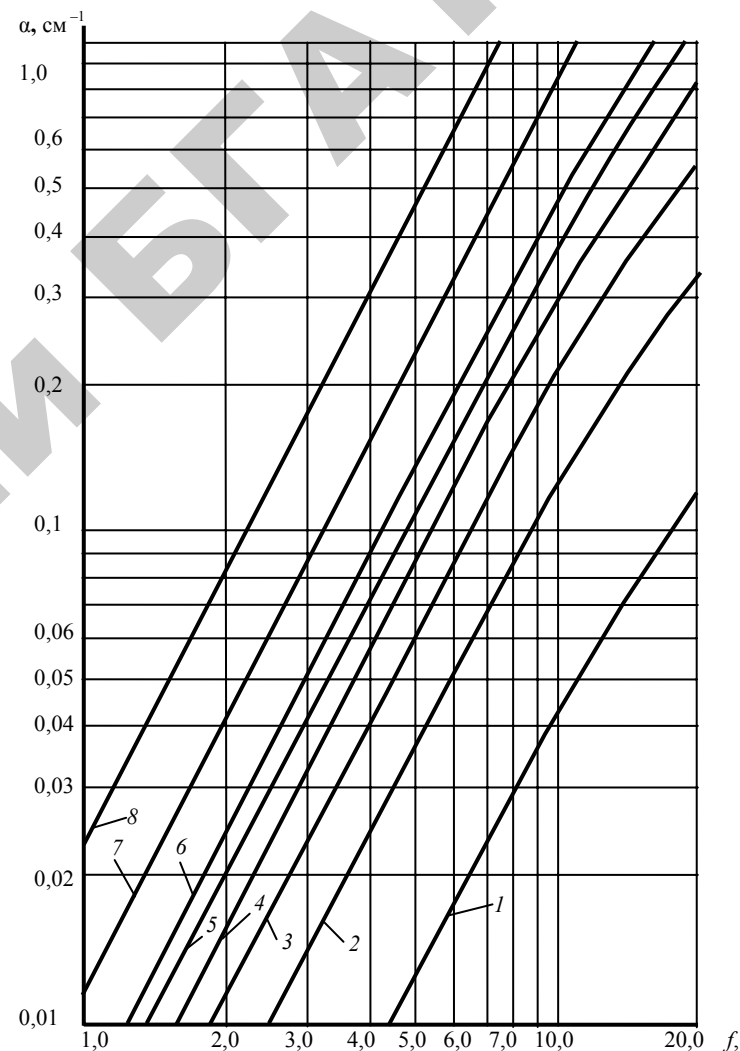


Рис. 3.3. Номограмма для определения оптимальной частоты для метода поглощения. (крупнодисперсный ВМ, $t = 20$ °C):
1 – $Q = 0,01$; 2 – $Q = 0,03$; 3 – $Q = 0,05$; 4 – $Q = 0,07$; 5 – $Q = 0,09$;
6 – $Q = 0,11$; 7 – $Q = 0,2$; 8 – $Q = 0,4$

В случае мелкодисперсных ВМ использование этих номограмм может привести только к приблизительным оценкам. Для более точных оценок необходимо снять диэлектрический спектр $\varepsilon'(W, F)$ по методикам, изложенным в главе 2, либо воспользоваться формулами линейной модели для мелкодисперсных диэлектриков, задаваясь разумными значениями основных констант, входящих в эти формулы.

3.1.2. Оптимизация конструкции ПИП «на отражение»

Обратимся к структурной схеме СВЧ-части влагомера, реализующего алгоритм отражательного ПП (3.4). В качестве ПИП используется приемно-передающая антенна, расположенная на расстоянии от поверхности объекта контроля. Рассмотрим ПИП на основе рупорной антенны. Эффективная поверхность рупорной антенны в режиме излучения равна $F_{\Pi} \cdot \Pi$, если выполняется условие дальней зоны

$$\frac{d}{\lambda_0}, \frac{a}{\lambda_0}, \frac{b}{\lambda_0} \gg 1, \quad (3.16)$$

где a и b – поперечные размеры рупора, то напряженность поля по центру диаграммы направленности на расстоянии d от плоскости апертуры антенны будет определяться выражением

$$|E_1| = \frac{|E_0| F_{\Pi}}{\lambda_0 d}, \quad (3.17)$$

где $|E_0|$ – напряженность поля в плоскости апертуры антенны.

Очевидно, что в месте приема напряженность поля E_1 будет

$$|E_1| = \frac{|E_0| F_{\Pi} |\Gamma_0|}{2\lambda_0 d}. \quad (3.18)$$

Двойка в знаменателе (3.18) появляется за счет двойного прохождения СВЧ-сигналом расстояния d . Вводя обозначение

$$|\Gamma_1| = \frac{|E_1|}{|E_0|}, \quad (3.19)$$

находим:

$$|\Gamma_1| = \frac{F_{\Pi}}{2\lambda_0 d} |\Gamma_0|. \quad (3.20)$$

Таким образом, измеряемый коэффициент отражения $|\Gamma_1|$ пропорционален собственному коэффициенту отражения ОК (влажный материал) $|\Gamma_0|$ и обратно пропорционален расстоянию d . Отметим сразу, что $|\Gamma_1|$ должен быть всегда меньше $|\Gamma_0|$, поэтому выполнение (3.20) можно ожидать на расстояниях d , по крайней мере, удовлетворяющих неравенству

$$d \geq d_0 = F_{\Pi} / 2\lambda_0. \quad (3.21)$$

Учитывая, что эффективная поверхность антенны равна приблизительно 0,8 геометрической площади S_0 апертуры пирамидальной антенны [6], окончательно имеем:

$$d \geq 0,8 S_0 / 2\lambda_0. \quad (3.22)$$

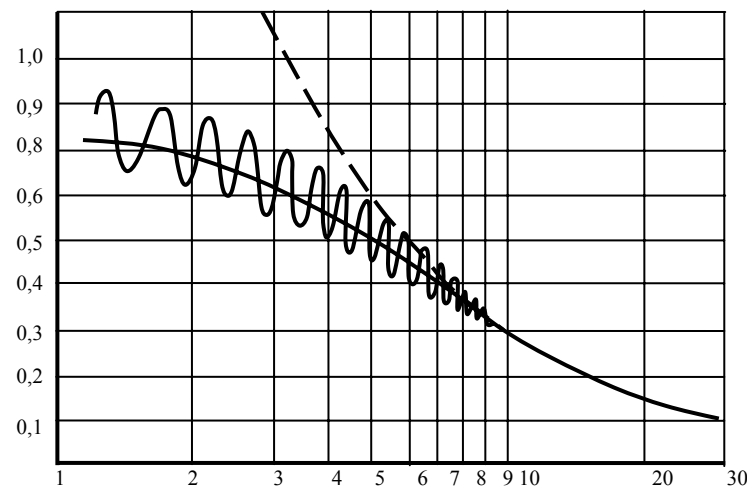


Рис. 3.4. Зависимость отношения $|\Gamma_1|/|\Gamma_0|$ от расстояния d между апертурой приемопередающей антенны и поверхностью влажного материала (штриховой линией показана расчетная зависимость)

На рис. 3.4 показана экспериментальная зависимость $\frac{|\Gamma_1|}{|\Gamma_0|}$ как

функция расстояния d , полученная для рупорной антенны с апертурой 61 мм (плоскость H) $\times$ 48,5 (плоскость E) на длине волны $\lambda = 2$ см при отражении от поверхности, образованной слоем воды. На этом же рисунке показана соответствующая зависимость, рассчитанная по выражению (3.20).

Из приведенных графиков следует, что экспериментальные значения $\frac{|\Gamma_1|}{|\Gamma_0|}$ существенно отличаются от рассчитанных по (3.20)

при $\frac{d}{\lambda} \leq 7 \dots 8$. В этой области значений d крутизна зависимости

$\frac{|\Gamma_1|}{|\Gamma_0|}$ от расстояния значительно ниже, чем $\frac{1}{d}$, что связано с невы-

полнением условия дальней зоны. Кроме того, на экспериментальной зависимости отчетливо проявляются осцилляции функ-

ции $\frac{|\Gamma_1|}{|\Gamma_0|}$ при изменении $\frac{d}{\lambda}$. Относительная амплитуда осцилляции

при $\frac{d}{\lambda} \leq (7 \dots 8)\lambda$ остается постоянной, а затем начинает спадать.

Осцилляции возникают ввиду того, что любая антенна нарушает однородность свободного пространства и поэтому неизбежно отражает часть падающей мощности [115]. Отражающие свойства приемной рупорной антенны, равно, как и любых других антенн, характеризуются эффективной отражающей поверхностью, так что практически во всех случаях часть СВЧ-мощности, поступающей на вход приемной антенны, отражается от ее апертуры в обратном направлении. Примем, что эффективная отражающая поверхность равна A_1 , и рассчитаем амплитуду сигнала, принятого приемо-передающей антенной ППП. Для расчета воспользуемся концепцией парциальных волн, изложенной в [63]. Тогда амплитуда E_1 первой парциальной волны с учетом выражения (3.18) и сделанных замечаний равна:

$$E_1 = \frac{|E_0||\Gamma_0|F_{\Pi}}{2\lambda_0 d}; \quad (3.23)$$

амплитуда второй парциальной волны:

$$E_2 = \frac{|E_0||\Gamma_0|^2 F_{\Pi}}{(2\lambda d)^2} A e^{-2i\beta d}, \quad (3.24)$$

третьей парциальной волны:

$$E_3 = \frac{|E_0||\Gamma_0|^2 F_{\Pi} A^2}{(2\lambda_0 d)^3} e^{-4i\beta d} \text{ и т. д.} \quad (3.25)$$

Суммируя все парциальные волны, находим:

$$E_{\Sigma} = \frac{|E_0||\Gamma_0|F_{\Pi}}{2\lambda_0 d \left(1 - \frac{A_0|\Gamma_0|}{2\lambda d} e^{-2i\beta d}\right)}. \quad (3.26)$$

Избавляясь от комплексности в (3.26), с учетом (3.19), имеем:

$$|\Gamma_1| = \left(\frac{F_{\Pi}}{2\lambda_0 d}\right) \frac{|\Gamma_0|}{\sqrt{1 - \frac{A|\Gamma_0|}{\lambda d} \cos 2\beta d + \frac{A^2|\Gamma_0|}{4\lambda d^2}}}. \quad (3.27)$$

Из полученного выражения действительно следует, что $|\Gamma_1|$ является осциллирующей функцией расстояния. Если в (3.27) положить, что $d \rightarrow \infty$, то $|\Gamma_1|$ будет определяться выражением (3.20), следовательно, амплитуда осцилляций уменьшается с увеличением расстояния d . Отметим, что полученное выражение справедливо только в дальней зоне и для рассмотренного выше примера выполняется только при $\frac{d}{\lambda} \leq 7 \dots 8$.

Из (3.27) легко найти амплитуду осцилляций:

$$\xi = \frac{\left| \frac{\Gamma_{1\max}}{\Gamma_{1\min}} \right|}{1 - \frac{F_{\Pi} |\Gamma_0|}{2\lambda_0 d}} = \frac{1 + \frac{F_{\Pi} |\Gamma_0|}{2\lambda_0 d}}{1 - \frac{F_{\Pi} |\Gamma_0|}{2\lambda_0 d}}. \quad (3.28)$$

Зная амплитуду осцилляций, можно вычислить отражающую поверхность:

$$F_{\Pi} = \frac{2\lambda_0 d}{|\Gamma_0|} \frac{1 - \xi}{1 + \xi}. \quad (3.29)$$

В исследованной выше антенне отражающая поверхность, вычисленная по формуле (3.29), оказалось равной 8,2 см², т. е. приблизительно в 3 раза меньше эффективной излучающей поверхности антенны. Введем следующие безразмерные параметры:

$$B = \frac{A_0 \Gamma_0}{\lambda_0^2}, \quad (3.30)$$

$$y = \frac{d}{\lambda_0}, \quad (3.31)$$

тогда (3.28) можно представить в виде

$$\xi = \frac{1 + \frac{B}{2y}}{1 - \frac{B}{2y}}. \quad (3.32)$$

На рис. 3.5 представлены зависимости для расчета амплитуды осцилляций ξ при различных B и y . Поскольку большинство рупорных антенн, применяемых в ПИП, имеют поперечные размеры $(2 \dots 3)\lambda_0$, то представленными графиками можно пользоваться при $\frac{d}{\lambda} \geq 8$.

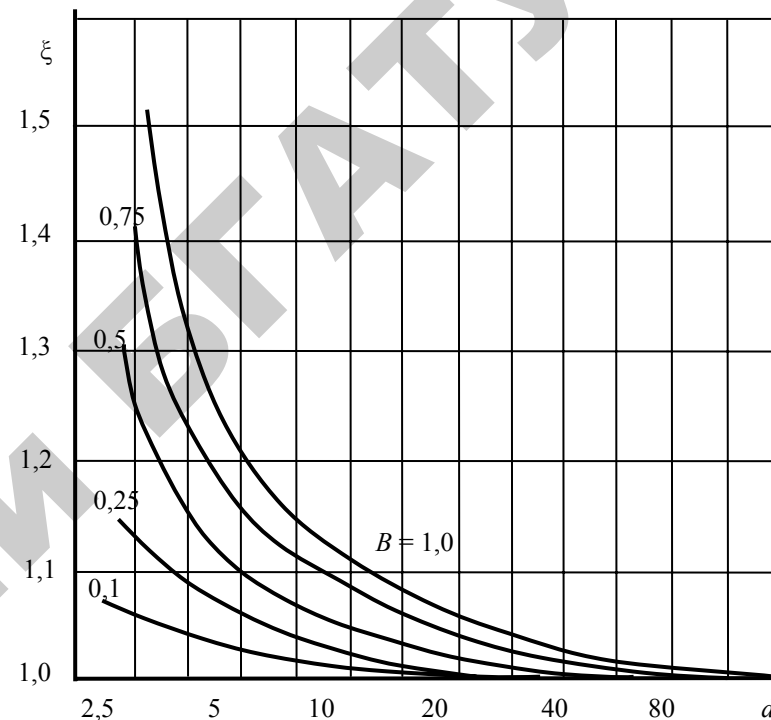


Рис. 3.5. Расчетные зависимости амплитуды осцилляций ξ коэффициента отражения от расстояния d между приемопередающей антенной и поверхностью влажного материала

Отметим, что расстояние d нельзя сколь угодно увеличивать, так как, во-первых, при этом уменьшается амплитуда принимаемого сигнала и, во-вторых, увеличивается поверхность, которая облучается антенной. Площадь облучения S_1 поверхности ВМ можно оценить из элементарных энергетических соображений. Действительно, поток мощности в площади излучений антенны, очевидно, равен:

$$P_0 = \frac{E_0^2 F_{\Pi}}{2z_0}, \quad (3.33)$$

где z_0 – волновое сопротивление свободного пространства.

На расстоянии d от плоскости апертуры

$$P = \frac{E_1^2 S_1}{2z_0}. \quad (3.34)$$

Сравнивая (3.33) и (3.34), с учетом (3.17) имеем:

$$S_1 = S_i = \frac{\lambda^2 d^2}{F_{\Pi}}. \quad (3.35)$$

Считая, что площадь облучения является квадратом, и что ее линейные размеры должны быть как минимум в 1,5...2 раза меньше, чем линейные размеры поверхности облучаемого материала, окончательно получаем ограничения для d по максимуму:

$$d \leq d_{\max} = 0,45 \frac{ab}{\lambda_0}, \quad (3.36)$$

где a, b – поперечные размеры апертуры антенны и поверхности ВМ.

При выполнении работы [193] были сконструированы несколько рупорных пирамидальных антенн с одной и той же апертурой, но с разными размерами рупоров по высоте. В результате установлено, что чем больше глубина рупоров, тем меньше площадь отражения A_1 .

Например, при размерах апертуры 80×95 мм и высоте 630 мм в трехсантиметровом диапазоне волн величина ξ оказалась равной 1,08 при $\frac{d}{\lambda} = 7$. Антенна с этим же поперечными размерами с высо-

той 300 мм при $\frac{d}{\lambda} = 7$ имела $\xi = 1,28$.

Для уменьшения величины ξ можно расположить одинаковые рупорные антенны на расстоянии d и $d \pm \frac{\lambda}{4}$ соответственно, и затем,

синфазно складывая принятые этими антеннами сигналы, можно показать [1], что величина ξ будет определяться выражением

$$\xi = \frac{2\xi_0^2}{\xi_0^2 + 1}, \quad (3.37)$$

где ξ_0 – значение $\left| \frac{\Gamma_{\max}}{\Gamma_{\min}} \right|$ для каждой антенны.

Этого же эффекта можно добиться, применяя два генератора с определенным сдвигом по частоте.

Остановимся еще на одной погрешности, вызванной расстоянием d . Обратимся к рис. 3.6. В этой схеме коэффициент отражения измеряется с помощью направленного ответвителя. Если направленный ответвитель идеальный, то в измерительное его плечо попадает только сигнал, отраженный от поверхности влажного материала. В реальных условиях направленный ответвитель имеет конечную направленность, поэтому в измерительное плечо кроме сигнала, отраженного от поверхности влажного материала, просачивается сигнал непосредственно с СВЧ-генератора. Складываясь в измерительном плече, эти два сигнала интерферируют, а так как с изменением расстояния d фаза отраженного сигнала меняется по закону $\frac{4\pi}{\lambda}d$, а фаза сигнала, просачивающегося с генератора, оста-

ется неизменной, то в результате амплитуда суммарного сигнала испытывает дополнительные осцилляции с изменением расстояния d . Примем, что коэффициент направленности направленного ответвителя равен D , а коэффициент переходного ослабления равен C . Согласно [1] СВЧ-мощность P_2 , просачивающаяся в измерительное плечо ответвителя, определяется из уравнения

$$D + C = 10 \lg \frac{P_0}{P_2}, \quad (3.38)$$

где P_0 – мощность СВЧ-генератора влагомера.

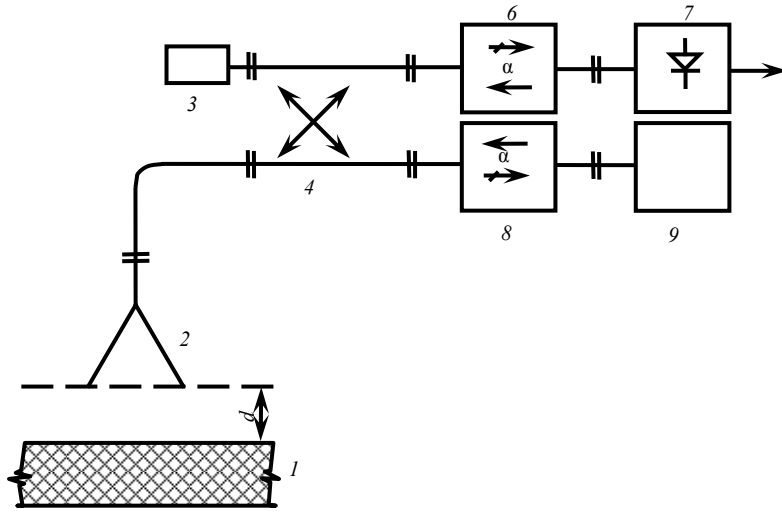


Рис. 3.6. Структурная схема СВЧ-влажнмера, основанного на методе отражения:
1 – объект контроля; 2 – приемопередающая антенна; 3 – изгиб; 4 – направленный ответвитель; 5 – поглощающая нагрузка; 6, 8 – ферритовые вентили; 7 – СВЧ-детектор; 9 – СВЧ-генератор

Из (3.38) находим, что амплитуда сигнала $|E_2|$, попадающая из СВЧ-генератора в измерительное плечо, равна:

$$|E_2| = |E_0| 10^{-\frac{D+C}{20}}, \quad (3.39)$$

где $|E_0|$ – амплитуда сигнала в плоскости генератора.

Амплитуда $|E_1|$ отраженного от поверхности ВМ сигнала, попадающего в измерительное плечо, с учетом (3.18), очевидно, определяется выражением

$$|E_1| = \frac{|E_0| |\Gamma_0| F_{\Pi}}{2\lambda_0 d} 10^{-\frac{C}{20}}. \quad (3.40)$$

Учитывая, что суммарный сигнал E_{Σ} , попадающий в измерительное плечо ответвителя, есть сумма E_1 и E_2 , находим:

$$E_{\Sigma} = |E_2| + |E_1| e^{(-2\beta d + \phi)i}, \quad (3.41)$$

или с учетом (3.39) и (3.40)

$$E_{\Sigma} = |E_0| 10^{-\frac{C}{20}} \left\{ 10^{-\frac{D}{20}} + \frac{F_{\Pi} |\Gamma_0|}{2\lambda_0 d} e^{(-2\beta d + \phi)i} \right\}, \quad (3.42)$$

где ϕ – некоторая начальная разность фаз между E_1 и E_2 , равная приблизительно $\frac{\pi}{2}$.

Умножая (3.42) как комплексно сопряженную величину, находим:

$$|E_{\Sigma}| = |E_0| 10^{-\frac{C}{20}} \sqrt{10^{-\frac{D}{20}} + \frac{F_{\Pi} |\Gamma_0|}{\lambda_0 d} 10^{-\frac{D}{20}} \cos(2\beta_0 d + 4) + \frac{F_{\Pi}^2 |\Gamma_0|^2}{4\lambda_0^2 d^2}}. \quad (3.43)$$

Запишем (3.43) в более удобной форме:

$$|E_{\Sigma}| = \frac{|E_0| |\Gamma_0| F_{\Pi}}{2\lambda_0 d} \sqrt{1 + \frac{4\lambda_0 d}{F_{\Pi} |\Gamma_0|} 10^{-\frac{D}{20}} \cos(2\beta_0 d + 4) + \frac{4\lambda_0^2 d^2}{F_{\Pi}^2 |\Gamma_0|^2} 10^{-\frac{D}{20}}}. \quad (3.44)$$

Из (3.44) следует, что E_{Σ} действительно осциллирует, причем амплитуда осцилляций тем больше, чем больше расстояние d и чем меньше коэффициент направленности ответвителя и коэффициент отражения ВМ $|\Gamma_0|$. Полученный результат очевиден, так как при увеличении d или уменьшении D и $|\Gamma_0|$ сигналы E_1 и E_2 становятся сравнимыми по амплитуде. Таким образом, для уменьшения осцилляций, связанных с просачиванием сигнала E_1 в измерительный канал, следует стремиться к выполнению неравенства

$$\frac{4\lambda_0 d}{F_{\Pi} |\Gamma_0|} 10^{-\frac{D}{20}} \ll 1. \quad (3.45)$$

Отметим, что при не очень большой направленности D и малом коэффициенте отражения $|\Gamma_0|$, чтобы удовлетворить неравенству

(3.45) требуется установить приемопередающую антенну как можно ближе к поверхности ВМ. Это требование, однако, противоречит предыдущим. Преодолеть это можно двумя способами: во-первых, применением в СВЧ-влажнометрах рассматриваемого типа направленных ответвителей с большим коэффициентом направленности ($D \geq 40$ дБ) и, во-вторых, с помощью метода компенсаций. Сущность метода компенсаций состоит в замене поглощающей нагрузки (см. рис. 3.6) последовательно включенными аттенуатором, фазовращателем и короткозамыкателем. Подбирая должным образом значения ослабления аттенуатора и фазового сдвига фазовращателя, можно полностью скомпенсировать сигнал от генератора, попадающий в измерительное плечо ответвителя сигналом, отраженным от короткозамыкателя. Применение схемы, изображенной на рис. 3.7, позволяет полностью избавиться от влияния на погрешности от осцилляций отраженного сигнала конечной направленности ответвителя.

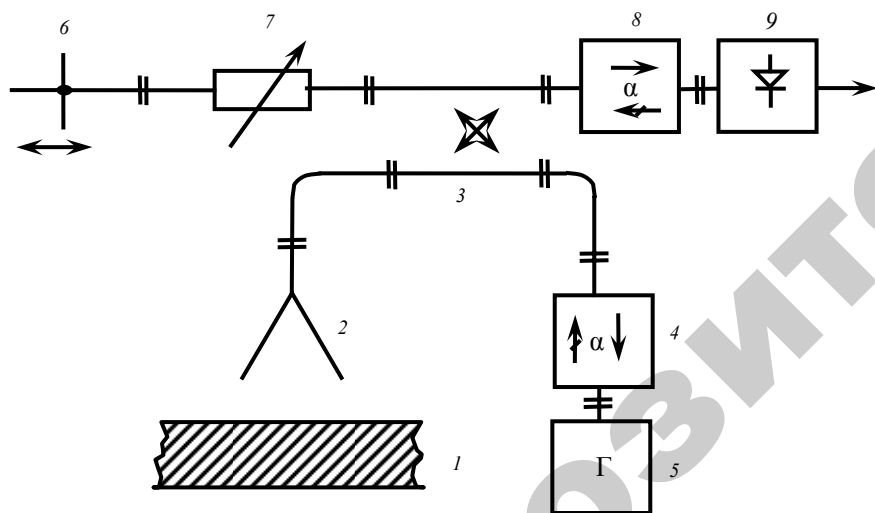


Рис. 3.7. Структурная схема СВЧ-влажнометра, основанного на методе отражения с компенсацией сигнала генератора:
1 – объект контроля; 2 – приемопередающая антенна; 3 – направленный ответвитель; 4, 8 – ферритовые вентили; 5 – СВЧ-генератор; 6 – короткозамыкатель подвижный; 7 – аттенуатор; 9 – СВЧ-детектор

3.1.3. Влияние засыпки сыпучих материалов на параметры ППП

Параметры сыпучего материала, обусловленные его физико-механическими свойствами, оказывают существенное влияние на метрологические характеристики ППП, работающих в устройствах измерения влажности по амплитудному ПП. В разделе 2.3 изучено влияние величины ζ на погрешность измерения влажности и предложены методы комплексных ПП (амплитудно-фазовых и др.) для минимизации величины этой погрешности.

Однако, схемная реализация СВЧ-влажнометров с использованием комплексных ПП не позволяет на основе имеющейся элементной базы (этот вопрос будет рассмотрен ниже) создать портативный и недорогой прибор. Эта задача решается при использовании амплитудных ПП. Повышение метрологических показателей таких влагомеров, в основном, зависит от способов компенсации случайной составляющей погрешности измерений, вызванной вариацией плотности ВМ в процессе измерений.

Изучению этого вопроса посвящен ряд исследований. Так, в работе [46] для анализа зависимости электрических параметров конкретного сыпучего материала от влияния различных факторов, его реальная хаотическая структура заменяется упорядоченной (ей адекватной структурой) в виде частиц сферической формы. Рассматривая такую гипотетическую структуру сыпучего материала и принимая удельное давление в пределах 200–2000 Н/м² (нижний предел, соответствующей случаю свободной засыпки, когда давление определяется только силой тяжести вышележащих слоев сыпучего материала, верхний – принудительному уплотнению), автор работы [46] определяют пределы изменения расстояния между частицами и число контактирующих частиц по осям x, y, z для различных вариантов укладки шаров (при $n = 6, 8, 10, 12$). Полученные результаты не могут быть использованы при рассмотрении ППП СВЧ-влажнометров, так как в СВЧ-методах влагометрии действуют отличные от рассматриваемых в работе [46] эффекты взаимодействия. Как отмечалось ранее, в амплитудных ПП обобщенная координата взаимодействия электромагнитного поля СВЧ и ОК определяется количеством воды, сухого вещества и воздуха в единице объема, так как $\alpha_B < \alpha_{CM} \ll \alpha_{BM}$.

В силу этого допущения можно утверждать, что если $V_{\text{ип}} < V_{\text{ок}}$, то для ПИП с плоскопараллельной кюветой (рис. 3.20) будет иметь место анизотропия свойств СМ в плоскостях x, y, z , обусловленная действием силы $P_{\text{упл}}$. Действительно, если обратимся к концепции плоской модели ВМ, то затухание электромагнитного поля СВЧ, направленного по осям x, y, z , будет равно:

$$N_y = 8,686 \alpha_H y_1 W \rho; \quad (3.46)$$

$$N_x = 8,686 \alpha_H x_1 W \rho; \quad (3.47)$$

$$N_z = 8,686 \alpha_H z_1 W \rho. \quad (3.48)$$

$$\text{Так как } \rho = \frac{P}{V} = \frac{P}{x_1 y_1 z_1} = \frac{S_P}{y_1}, \quad (3.49)$$

то с учетом (3.49) запишем (3.46)–(3.48):

$$N_y = 8,686 \alpha_H y_1 W \frac{S_P}{y_1} = 8,686 \alpha_H W S_P; \quad (3.50)$$

$$N_x = 8,686 \alpha_H x_1 W \frac{S_P}{y_1}; \quad (3.51)$$

$$N_z = 8,686 \alpha_H z_1 W \frac{S_P}{y_1}. \quad (3.52)$$

При действии $P_{\text{упл}}$ увеличивается плотность влажного материала, следовательно, уменьшится y_1 и затухания по осям x, y, z будут равны:

$$N'_y = 8,686 \alpha_H y_2 W \frac{S_P}{y_2} = 8,686 \alpha_H W S_P; \quad (3.53)$$

$$N'_x = 8,686 \alpha_H x_1 W \frac{S_P}{y_2}; \quad (3.54)$$

$$N'_z = 8,686 \alpha_H z_1 W \frac{S_P}{y_2}. \quad (3.55)$$

Сравнивая (3.53)–(3.55) и (3.50)–(3.52) нетрудно увидеть, что затухание по оси Y не зависит от значения y и определяется только потерями в воде, в то время как N'_x и N'_z будут расти с увеличением плотности ВМ (рис. 3.8).

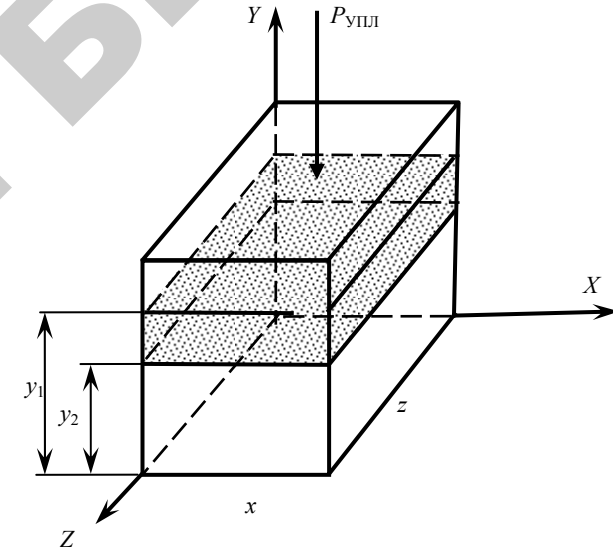


Рис. 3.8. Влияние уплотнения на механические свойства влажного материала

Экспериментальное подтверждение установленной закономерности получено в работе [69]. При плотности образцов торфа $0,3\text{--}0,8 \text{ г/см}^3$ и вариациях влажности от 16 % до 70 % относительное изменение затухания СВЧ не превышало 10 % при максимальных значениях W . Для сельскохозяйственных культур (зерно пшеницы, ячменя, ржи, овса, проса, гречихи и др.) в диапазоне влагосодержаний 15–30 % также не замечено влияния соосного уплотнения на затухание СВЧ [5].

3.1.4. Исследование влияния геометрических размеров приемо-передающих устройств на метрологические характеристики ПИП

В рассматриваемом диапазоне частот ПИП СВЧ-влажномера представляет собой две рупорные пирамидальные антенны, пространство между которыми полностью заполнено влажным зерном. Апертуры антенн отделены от влажного материала посредством тонкой (толщина $d \leq 0,3$ мм) полистироловой пленки.

Для предотвращения отражения СВЧ-энергии от боковых и торцевых стенок ПИП они покрыты поглощающим СВЧ-энергию слоем специальной резины. Примерная конструкция ПИП представлена на рис. 3.9.

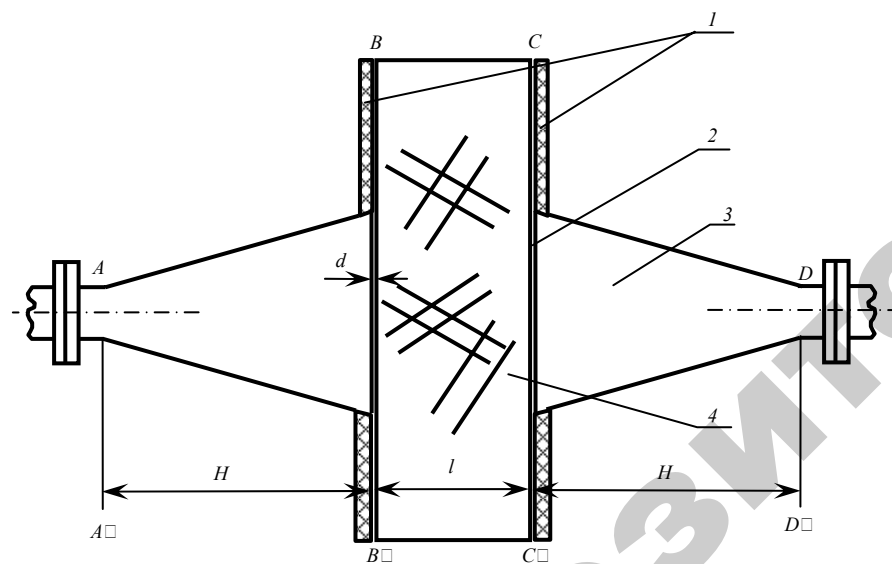


Рис. 3.9. Конструкция первичного измерительного преобразователя СВЧ-влажномера:

1 – слой поглощающей резины; 2 – тонкая полистироловая пленка; 3 – рупорная антенна; 4 – измерительная кювета, заполненная контролируемым зерном

Примем, что в незаполненном состоянии ПИП вносит в волноводный тракт влагомера ослабление СВЧ-энергии N_0 , дБ, а при за-

полнении зерном – N , дБ. Тогда разность ΔN между этими двумя величинами есть параметр преобразования в методе СВЧ-поглощения. Таким образом,

$$\Delta N = N - N_0. \quad (3.56)$$

В идеализированном случае между N_0 и N должна существовать аддитивная связь, т. е. любое изменение N_0 на величину δN_0 автоматически влечет за собой изменение N на такую же величину, так что разность ΔN остается неизменной. Однако в реальных условиях, ввиду рассогласования приемной и передающей антенн со свободным пространством и с волноводным трактом влагомера, а также ввиду конечной диаграммы направленности антенн, условие аддитивности нарушается. Степень рассогласования определяется геометрическими размерами антенн. Таким образом, при заданных размерах антенн воспроизводимость величины ΔN , а следовательно и номинальной градуировочной характеристики [5] отдельных экземпляров одного и того же типа СВЧ-влажномеров будет определяться отличиями в геометрических размерах антенн.

Получим уравнения, позволяющие рассчитать величины N_0 и N при заданных размерах приемной и передающей антенн и расстояния между ними.

Известно, что в рупорных антеннах имеют место три вида отражения: на входе (в месте соединения рупора и питающего волновода); вдоль образующей рупора, т. е. в его промежуточных сечениях; в плоскости апертуры рупора при переходе к свободному пространству [1].

Структура поля основной волны в рупоре идентична основной волне в возбуждающем волноводе (волна H_{10}).

В рупоре, кроме основной волны, образуются высшие типы волн. Эти типы волн образуются в начале рупора и его раскрыве. Энергия высших типов волн в начале рупора тем меньше, чем меньше угол раскрыва рупора (т. е. чем он длиннее). Энергия высших типов волн у раскрыва рупора тем меньше, чем больше величина раскрыва. В СВЧ-влажномерах обычно используется рупоры с небольшими углами и размерами раскрыва ($2 \dots 3 \lambda$), так что влиянием высших типов волн при дальнейшем рассмотрении будем пренебрегать.

Кроме того, как будет показано ниже, отражениями в плоскости апертуры по сравнению с отражениями от горловины и вдоль образующей рупора можно также пренебречь. Оставшиеся два отражения можно свести к плоскости, соответствующей горловине рупора, т. е. к плоскостям AA' и BB' на рис. 3.10.

Исходя из изложенного, эквивалентную схему ПИП СВЧ-влажнителя можно представить при условии идентичности приемной и передающей антенн в виде обратимого пассивного и симметричного четырехполюсника (см. рис. 3.10).

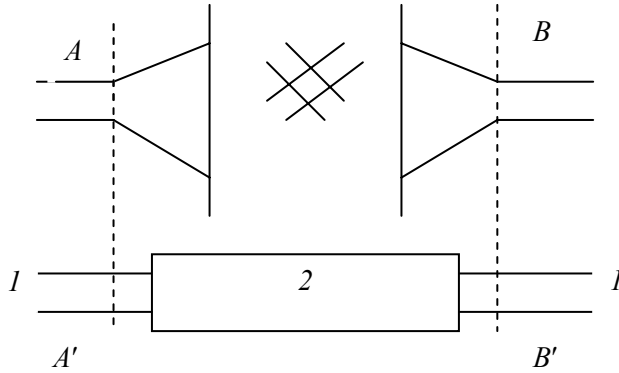


Рис. 3.10. Эквивалентная схема ПИП СВЧ-влажнителя зерна

Примем, что парциальные коэффициенты отражения в плоскостях AA' и BB' равны соответственно Γ_{12} и Γ_{21} ($\Gamma_{12} = -\Gamma_{21}$), а коэффициент передачи между плоскостями AA' и BB' равен G .

Тогда, согласно [9], коэффициент передачи S_{12} ПИП будет определяться выражением

$$S_{12} = G \frac{(1 - \Gamma_{12}^2)}{1 - G^2 \Gamma_{12}^2}. \quad (3.57)$$

Так как $G\Gamma_{12} < 1$, то (3.57) преобразуется к виду

$$S_{12} = G(1 - \Gamma_{12}^2)(1 + G^2 \Gamma_{12}^2). \quad (3.58)$$

Положим, что

$$G = |G|e^{j\varphi_G}, \quad (3.59)$$

$$\Gamma_{12} = |\Gamma_{12}|e^{j\varphi_{\Gamma}}. \quad (3.60)$$

Подставляя (3.59) и (3.60) в (3.58) и отбрасывая ввиду малости члены типа $G^2\Gamma_{12}^4$, $G^4\Gamma_{12}^4$, $G^6\Gamma_{12}^4$, после элементарных алгебраических преобразований находим:

$$|S_{12}|^2 = |G|^2 [(1 - 2|\Gamma_{12}|^2 \cos 2\varphi_{\Gamma} + 2|\Gamma_{12}|^2 |G|^2 \cos 2(\varphi_{\Gamma} + \varphi_G))]. \quad (3.61)$$

Переходное ослабление ПИП определяется выражением

$$N = 8,686 \ln |S_{12}| \quad (3.62)$$

В случае, когда ПИП заполнен зерном, $G \ll 1$, следовательно, с учетом (3.62) и (3.61) окончательно получаем:

$$N = 8,686 \ln |G| + 4,343 \ln (1 - 2|\Gamma_{12}|^2 \cos 2\varphi_{\Gamma}), \quad (3.63)$$

$$N_0 = 8,686 \ln |G_0| + 4,343 \ln (1 - 2|\Gamma_{12}^0|^2 |G^2| \cos 2(\varphi_{\Gamma} + \varphi_{G_0})),$$

$$N_0 = 8,686 \ln |G_0| + 4,343 \ln (1 - 2|\Gamma_{12}^0|^2 |G^2| \cos 2(\varphi_{\Gamma_0} + \varphi_{G_0})), \quad (3.64)$$

$$|\Gamma_{12}^0|^2 \cos 2\varphi_{\Gamma} + 2,$$

где G_0 , $|\Gamma_{12}^0|$, φ_{Γ_0} , φ_{G_0} – соответствующие значения G , $|\Gamma_{12}|$, φ_{Γ} , φ_G при незаполненном ПИП.

Выражения (3.63) и (3.64) можно упростить, учитывая, что при $x \ll 1$ $\ln(1 + x) \approx x$:

$$N = 8,686 [\ln |G| |\Gamma_{12}|^2 \cos 2\varphi_{\Gamma}], \quad (3.65)$$

$$N_0 = 8,686 \left[\ln |G_0| |\Gamma_{12}|^2 (\cos 2\phi_\Gamma - |G|^2 \cos 2(\phi_\Gamma + \phi_G)) \right]. \quad (3.66)$$

Для вычисления ΔN по (3.56), (3.64) и (3.65) необходимо определить Γ_{12} . Получим соответствующие выражения для этих величин.

Рассмотрим сначала коэффициент отражения Γ_{12} . Пусть размеры питающего рупор волновода равны a_0 в плоскости H и b_0 в плоскости E . Положим, что размеры апертуры соответственно равны A и B . Тогда участок, образующей рупоры между плоскостями AA' и BB' (рис. 3.9), можно рассматривать как отрезок нерегулярного волновода. Отражение от этого участка находится по выражению [11]:

$$\Gamma_1 = \int_0^H S_{-m,m} e^{-2j \int_0^z \beta_{H_{10}} dz} dz, \quad (3.67)$$

где $\beta_{H_{10}}$ – волновое число волны H_{10} ;

$$j = \sqrt{-1};$$

$S_{-m,m}$ – коэффициент связи между прямой и отраженной волнами H_{10} , распространяющимися в рупоре.

$$S_{-m,m} = \frac{1}{b} \frac{db}{dz} - \frac{\pi^2}{2a^3 \beta_{H_{10}}^2} \frac{da}{dz}. \quad (3.68)$$

Очевидно, что:

$$\left. \begin{aligned} \frac{db}{dz} &= \frac{B - b_0}{H} \\ \frac{da}{dz} &= \frac{A - a_0}{H} \end{aligned} \right\} \quad (3.69)$$

Кроме того, $\beta_{H_{10}}$ определяется выражением

$$\beta_{H_{10}}(z) = \beta_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}, \quad (3.70)$$

где β_0 – волновое число в свободном пространстве, $\beta_0 = 2\pi / \lambda$;
 $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны в рупоре, $\lambda_{\text{кр}} = 2a(z)$.

Учитывая (3.69) и (3.70), находим:

$$\int_0^z \beta_{H_{10}}(z) dz = \beta_0 \int_0^z \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda_0}{a_0 + \xi_a z} \right)^2} dz, \quad (3.71)$$

где $\xi_a = (A - a_0) / H$.

Подинтегральную функцию можно разложить в степенной ряд, ограничиваясь членами первого порядка малости, так как $(\lambda_0 / \lambda_{\text{кр}})^2 \leq 0,5$:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{a_0 + \xi_a z} \right)^2} = 1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\lambda_0}{a_0 + \xi_a z} \right)^2. \quad (3.72)$$

С учетом (3.72) и после интегрирования (3.71), имеем:

$$\int_0^z \beta_{H_{10}}(z) dz = \beta_0 z \left[1 - \frac{\lambda_0^2}{8a_0(a_0 + \xi_a z)} \right]. \quad (3.73)$$

Подставляя (3.68) и (3.73) в (3.67) и разделяя на действительную и мнимую части коэффициент отражения, находим:

$$\begin{aligned} I_m(\Gamma_1) &= \int_0^H \left\{ \frac{\xi_b}{b} - \frac{\pi^2 \xi_a}{2a^3 \beta_{H_{10}}^2} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{a_0 + \xi_a z} \right)^2 \right] \right\} \times \\ &\times \sin \left\{ 2\beta_0 z \times \left[1 - \frac{\lambda_0^2}{2a_0(a_0 + \xi_a z)} \right] \right\} dz, \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Gamma_1) = & - \int_0^H \left\{ \frac{\xi_b}{b} - \frac{\pi^2 \xi_a}{2a_0^3 \beta_{H_{10}}^2} \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda_0}{a_0 + \xi_a z} \right)^2 \right] \right\} \times \\ & \times \cos \left\{ 2\beta_0 z \times \left[1 - \frac{\lambda_0^2}{2a_0(a_0 + \xi_a z)} \right] \right\} dz. \end{aligned} \quad (3.75)$$

Интегралы (3.74) и (3.75) аналитически не решаются. Поэтому они вычисляются на ПЭВМ численными методами (приложение 3).

Коэффициент отражения Γ_2 , обусловленный изломом образующей рупора в месте соединения его с питающим волноводом, согласно [5] определяется выражением

$$\Gamma_2 = \frac{j}{z} \left(\frac{\xi_b}{b\beta_{H_{10}}} - \frac{\pi^2 \xi_a}{a^3 \beta_{H_{10}}^3} \right). \quad (3.76)$$

Для оценки коэффициента отражения Γ_3 в раскрые рупора можно воспользоваться выражением, приведенным в [1, 7]:

$$|\Gamma_3| = |\Gamma_E| + |\Gamma_H|, \quad (3.77)$$

$$\text{где } |\Gamma_H| = \frac{\frac{A}{\lambda_0} - \sqrt{\frac{A^2}{\lambda_0^2} - \frac{1}{4}}}{\frac{A}{\lambda_0} + \sqrt{\frac{A^2}{\lambda_0^2} - \frac{1}{4}}} e^{-\pi \sqrt{\frac{A^2}{\lambda_0^2} - \frac{1}{4}}}, \quad (3.78)$$

$$|\Gamma_E| = e^{-\frac{\pi B}{\lambda_0}}. \quad (3.79)$$

Учитывая, что размеры апертуры антенны обычно $(2...3)\lambda_0$, выражение (3.78) упрощается:

$$|\Gamma_H| \approx \frac{\lambda_0}{4A} \left(1 + \frac{\pi \lambda_0}{8A} \right) e^{-\frac{\pi A}{\lambda_0}}. \quad (3.80)$$

Расчет по формулам (3.77), (3.79) и (3.80) оказывает, что $|\Gamma_3|$ при размерах апертуры $2\lambda_0 \times 2\lambda_0$ не превышает 5×10^{-3} , что при высоте рупора $H = (2...3)\lambda_0$ почти на два порядка меньше, чем $\Gamma_1 + \Gamma_2$. Таким образом, в рамках принятых приближений, отражением в апертуре рупора можно пренебречь.

Окончательно имеем:

$$|\Gamma_{12}| = \sqrt{(\operatorname{Re}\Gamma_1)^2 + (I_m\Gamma_1 + \Gamma_2)^2}, \quad (3.81)$$

$$\varphi_\Gamma = \arctg \frac{I_m\Gamma_1 + \Gamma_2}{\operatorname{Re}\Gamma_1}. \quad (3.82)$$

На рис. 3.11 и 3.12 приведены расчетные зависимости $|\Gamma_{12}|$ и φ_Γ от частоты f и высоты рупора H при размерах апертуры $6,6 \cdot 5,4 \text{ см}^2$. Из приведенных графиков следует, что с увеличением высоты рупора величина $|\Gamma_{12}|$ уменьшается. Так, при изменении H на порядок от 44 мм до 440 мм величина $|\Gamma_{12}|$ изменяется тоже на порядок от 0,7 до 0,07. Фаза коэффициента отражения (см. рис. 3.12) незначительно изменяется от длины рупора и от частоты СВЧ-колебаний (за исключением высокого рупора).

Рупор, как и любая инженерная конструкция, имеет различные технологические параметры, в разной степени нарушаемые при производстве. В этой связи на рис. 3.11 приведены графики зависимостей $|\Gamma_{12}|$ от φ_Γ при вариации длины рупора $\pm 10\%$ от своего номинального значения (44 мм). Из приведенных зависимостей можно заключить, что такое изменение ΔH практически не вызывает изменений в величине $|\Gamma_{12}|$. В перерасчете на децибелы изменение $|\Gamma_{12}|$ не превышает $\pm 0,3 \text{ дБ}$.

Это, однако, не означает, что антенны могут изготавливаться с допуском по высоте $\Delta H / H = \pm 10\%$. Для оценки допустимых вариаций ΔH необходимо оценить, как эта величина влияет на ослабление N_0 . Обратимся к выражению (3.66). Из него следует, что N_0 является осциллирующей функцией фаз φ_Γ и φ_G . Очевидно, что амплитуда осцилляций зависит от модулей $|G|$ и $|\Gamma_{12}|$. Оценим сна-

чала величину φ_G . В первом приближении ее очевидно можно представить в следующее виде:

$$\varphi_G = 2 \int_0^H \beta_{H_{10}}(z) dz + \beta_0 l. \quad (3.83)$$

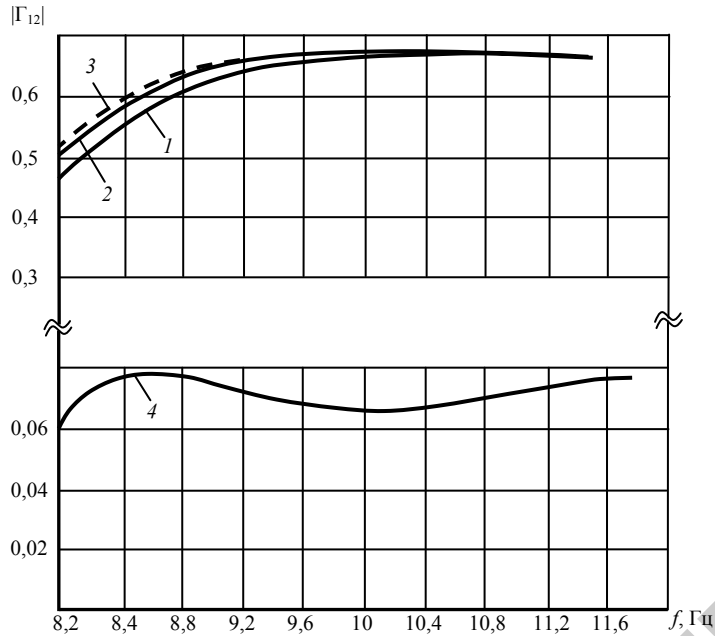


Рис. 3.11. Зависимость $|\Gamma_{12}|$ от частоты и высоты H рупорной антенны:
1 – $H = 40$ мм; 2 – $H = 44$ мм; 3 – $H = 47$ мм; 4 – $H = 440$ мм

Подставляя (3.83) в (3.82), находим:

$$\varphi_G = \beta_0 \left[l + 2H \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{8a_0 A} \right) \right], \quad (3.84)$$

Дифференцируя (4.84) по H , находим, на какую величину $\Delta \varphi_G$ изменится фаза $\Delta \varphi$ при изменении H на ΔH :

$$\Delta \varphi_G = 2\beta_0 \left(1 - \frac{\lambda_0^2}{8a_0 A} \right) \Delta H. \quad (3.85)$$

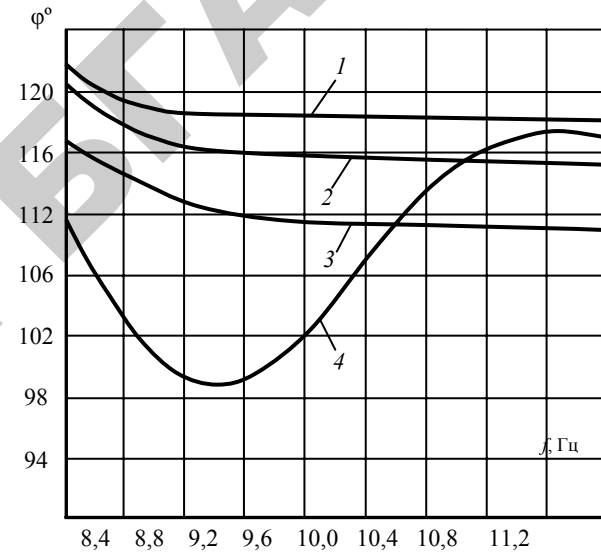


Рис. 3.12. Расчетные зависимости фазы коэффициента отражения рупорной антенны от частоты f и высоты рупора H :
1 – $H = 40$ мм; 2 – $H = 44$ мм; 3 – $H = 47$ мм; 4 – $H = 440$ мм;
 $A = 60$ мм; $B = 54$ мм

Учитывая (3.85) и дифференцируя (3.76) по φ_G , находим соотношение для вариации начального затухания первичного измерительного преобразователя ΔN_0 при изменении высоты рупора на ΔH :

$$\begin{aligned} |\Delta N_0| = & 34,74 |\Gamma_{12}|^2 |G|^2 \left| \sin \left[2\varphi_G + 2\beta_0 (l + 2H) \right] \right| / \beta_0 |\Delta H| + \\ & + 69,5 |\Gamma_{12}|^2 |G|^2 \left| \cos \left[2\varphi_G + 2\beta_0 (l + 2H) \right] \right| / \beta_0^2 \Delta H^2. \end{aligned} \quad (3.86)$$

При выводе (3.86) пренебрегалось величиной $\frac{\lambda_0^2}{8a_0A}$ по сравнению с l .

Из (3.86) следует, что ΔN_0 достигает максимума, когда

$$\varphi_{\Gamma} + \beta_0(l + 2H) = \frac{\pi}{4}(2k + 1), \quad (3.87)$$

$$\Delta N_{0\max} = 34,74 |\Gamma_{12}|^2 |G|^2 \beta_0^2 (\Delta H)^2.$$

Минимальное значение $\Delta N_{0\min}$ достигается при

$$\varphi_{\Gamma} + \beta_0(l + 2H) = \frac{\pi}{2}k, \quad (3.88)$$

$$N_{0\min} = 69,5 |\Gamma_{12}|^2 |G|^2 \beta_0^2 (\Delta H)^2.$$

Из (3.87) находим, что величина ΔN_0 не будет превышать некоторое заданное значение $\Delta N_{\max}$, если ΔH будет удовлетворять неравенству

$$\Delta H \leq 0,12 \frac{\sqrt{\Delta N_{\max}}}{|\Gamma_{12}| |G| \beta_0}. \quad (3.89)$$

Отметим, что (3.89) справедливо только в случае, если длина ПИП и частота f выбраны так, что выполняется соотношение $\varphi_{\Gamma} + \beta_0(l + 2H) = \frac{\pi}{2}k$.

В случае произвольных значений названных параметров неравенство для ΔH становится более жестким (3.88):

$$\Delta H \leq 0,029 \frac{\Delta N_{\max}}{|\Gamma_{12}|^2 |G|^2 \beta_0}. \quad (3.90)$$

Для расчетов по выражениям (3.89) и (3.90) необходимо знать модуль коэффициента передачи $|G|$. Согласно [1], модуль определяется выражением

$$|G| = F_{\text{эф}} / \lambda_0 l, \quad (3.91)$$

где $F_{\text{эф}}$ – эффективная поверхность приемной и передающей антенн ПИП.

Эффективная поверхность $F_{\text{эф}}$ связана с геометрической площадью S апертуры антенны посредством соотношения

$$F = K_n S, \quad (3.92)$$

где K_n – коэффициент использования поверхности (КИП):

$$K_n = \frac{\pi^2}{8} q_E q_H \quad (3.93)$$

Зависимости величин ξ_E и ξ_H от $A / \sqrt{\lambda_0 L_H}$ и $B / \sqrt{\lambda_0 L_E}$ даны на рис. 3.13 [1].

На рис. 3.14 представлена зависимость затухания между антеннами ($8,686 \ln |G|$) от нормированного расстояния l / λ_0 ($\lambda_0 = 3,2$ см) между ними.

Величина G_0 рассчитывалась по выражениям (3.91) и (3.93) с учетом данных, приведенных на рис. 3.15. Параметры антенны выбирались следующие: $A = 66$ мм; $B = 54$ мм; $H = 44$ мм. Из приведенного графика следует, что при $l / \lambda_0 = 2$ $\ln |G_0| = 0$, а при $l / \lambda_0 \geq 2$ $\ln |G_0| \geq 0$.

Это противоречит экспериментальным данным и является следствием применения выражения (3.91), которое справедливо только в дальней зоне.

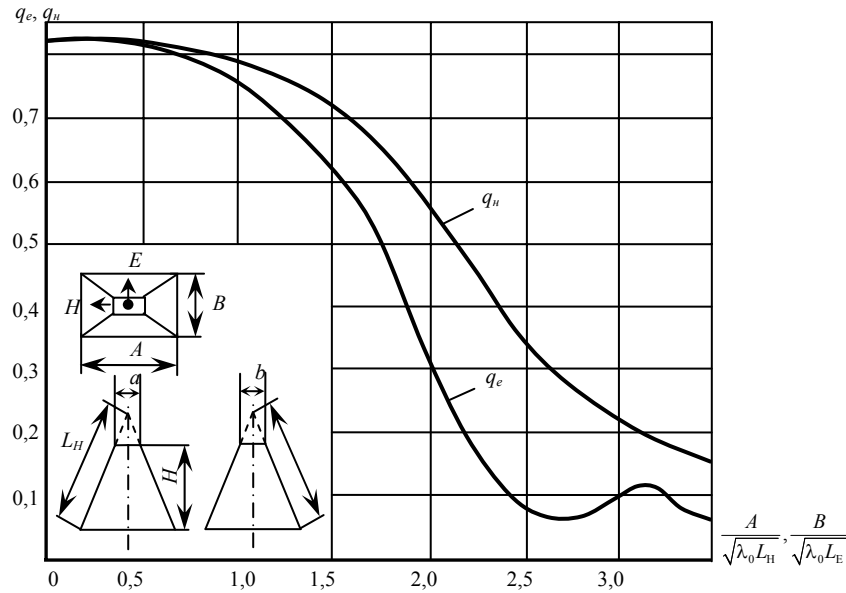


Рис. 3.13. Расчетные зависимости коэффициента использования поверхности (КИП) q_E и q_H от размеров антенны и длины волны для пирамидальных рупоров

Из сопоставления экспериментальных и расчетных зависимостей (см. рис. 3.14) следует, что хорошее совпадение между ними имеет место только при $l/\lambda_0 > 8$. При $l/\lambda_0 < 8$ зависимость отклоняется от закона $1/l$.

Получим соотношение, позволяющее рассчитать величину G . Введем прямоугольную систему координат так, что ее начало совпадает с центром апертуры передающей антенны. Ось X расположим вдоль широкой стороны апертуры, а ось Y – вдоль узкой (ось Z в направлении излучения). Примем, что модуль напряженности электрического поля в начале координат равен $|E_0|$. Тогда, согласно [1], напряженность поля в точке апертуры передающей антенны с координатами (X, Y, O) дается выражением

$$E = |E_0| \cos \frac{\pi x}{A} e^{-\frac{j2\pi}{\lambda_0} \left(\frac{x^2}{2R_H} + \frac{y^2}{2R_E} \right)} \quad (3.94)$$

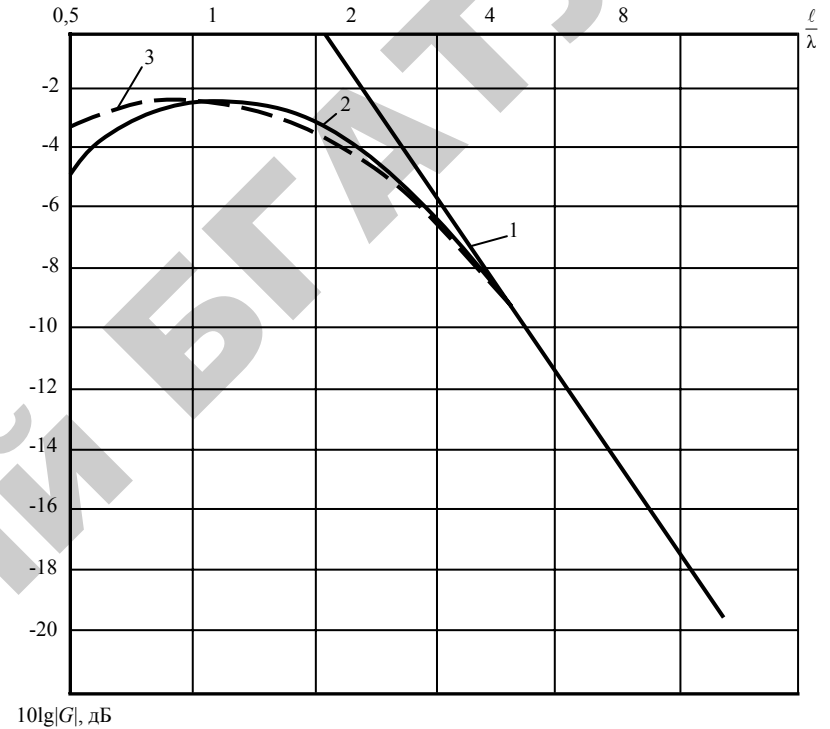


Рис. 3.14. Зависимость модуля коэффициента передачи $|G|$ от расстояния между пирамидальными антеннами:
1 – расчетная зависимость по выражению (3.91) (приближение дальней зоны);
2 – расчетная зависимость по выражению (3.91) с учетом соотношения (3.94) (эффективная поверхность в ближней зоне); 3 – экспериментальная зависимость (параметры антенн: $A = 66$ мм; $B = 54$ мм; $H = 44$ мм)

Напряженность поля, создаваемая элементом апертуры с координатами (X, Y, O) на оси Z на расстоянии l от начала координат, дается выражением:

$$dE = \frac{jE_0}{\lambda_0 R_0} e^{-j\beta_0 l} \cos \left(\frac{\pi x}{A} \right) e^{-\frac{j\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2}{R_H} + \frac{y^2}{R_E} \right)} e^{-j\beta_0 R} dx dy, \quad (3.95)$$

где $R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + l^2}$.

Суммарная напряженность поля в точке приема на расстоянии l по оси Z очевидно определяется выражениями:

$$E_1 = \frac{|E_0|}{\lambda l} J_1; \quad E_2 = \frac{|E_0|}{\lambda l} J_2; \quad |E|^2 = E_1^2 + E_2^2; \quad (3.96)-(3.98)$$

$$J_1 = \int_{-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} l \frac{\cos\left(\frac{\pi x}{A}\right)}{R_0} \cos\beta_0 \left(R_0 + \frac{X^2}{2R_H} + \frac{y^2}{2R_E} \right) dx dy; \quad (3.99)$$

$$\int_{-0,5A}^{0,5A} J_2 = \int_{-\frac{A}{2}}^{\frac{A}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} l \frac{\cos\left(\frac{\pi x}{A}\right)}{R_0} \sin\beta_0 \left(R_0 + \frac{X^2}{2R_H} + \frac{y^2}{2R_E} \right) dx dy. \quad (3.100)$$

Известно, что в дальней зоне выполняется соотношение:

$$|E| = \frac{|E_0| F}{\lambda_0 l}, \quad (3.101)$$

где F – определяется из рис. 3.13 и не зависит от l .

В первом приближении можно принять, что соотношение (3.91) справедливо и в ближней зоне, но эффективная поверхность антенны уже зависит от l .

Сравнивая (3.101), (3.97), (3.98), находим:

$$F_B = \sqrt{J_1^2 + J_2^2}. \quad (3.102)$$

Интегралы J_1 и J_2 аналитически не решаются и вычисляются на ПЭВМ. В результате установлено, что, чем меньше l/λ , тем меньше становится величина F_B . В рамках сделанного предположения о справедливости (3.101) с учетом, что F_B определяется (3.102), можно вычислить и G по выражению (3.99). Результаты расчета

приведены на рис. 3.14. Из сравнения расчетных значений G с экспериментальными данными можно заключить, что полученные соотношения справедливы при $l/\lambda \geq 1$.

Теперь можно возвратиться к выражению (3.98). Примем, что $l = 60$ мм ($\approx 2\lambda$), тогда согласно результатам исследований, приведенных в разделе 2.1, $S_{NW} \approx 1$ Дб/°.

Следовательно, погрешность $\Delta N_{\max}$ не должна превышать 0,3 дБ.

Подставляя это значение в (3.90) и приняв, что $|\Gamma_{12}| = 0,67$ (см. рис. 3.11), $|G| = 0,63$ (см. рис. 3.14), находим:

$$|\Delta H| \leq 0,029 \frac{0,3 \cdot 3,2}{0,63^2 \cdot 0,67^2 \cdot 6,28} 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ см.}$$

Таким образом, в случае произвольных фазовых соотношений высота антенны должна выдерживаться с погрешностью $\pm 0,025$ мм. Если $\varphi_T + \beta_0(l + 2H) = 0,5\pi k$, то $\Delta H \leq \pm 0,8$ мм, т. е. в этом случае требования к точности выполнения антенн снижаются. Полученные выше соотношения для ΔN_0 и ΔH проверялись экспериментально. В результате установлено хорошее (с погрешностью $\pm 10\%$) совпадение экспериментальных и расчетных значений для ΔN_0 и ΔH . Отметим, что полученные выше соотношения для расчета N_0 через $|\Gamma_{12}|$ и G позволяют вычислить не только влияние ΔH на ΔN_0 , но и влияние ΔA и ΔB на погрешность ΔN_0 . Численные расчеты показывают, что ослабление N_0 менее критично к размерам апертуры A и B , чем к высоте H . Завершая настоящий раздел, сделаем замечание относительно величины ΔN . В случае измерения ослабления в закрытой направляющей системе (например, в круглом или в прямоугольном волноводе) ΔN дается выражением [1]:

$$\Delta N = \frac{8,7\pi\epsilon''}{\lambda_0 \sqrt{\epsilon'}} l, \quad (3.103)$$

где ϵ'' и ϵ' являются функциями влажности.

Из (3.55) и (3.56) следует, что при измерении в ПИП СВЧ-влажномера

$$\Delta N_{\text{ПИП}} = 8,7 \ln \frac{G_0}{G}, \quad (3.104)$$

причем

$$G = \frac{F_{\text{Б}}}{\lambda_0 l} \sqrt{\varepsilon'} e^{-\frac{\pi \varepsilon''}{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}}, \quad (3.105)$$

$$G_0 = \frac{F_{\text{Б}}}{\lambda_0 l}. \quad (3.106)$$

Подставляя (3.105) и (3.106) в (3.104), находим:

$$\Delta N_{\text{ПИП}} = 8,7 \left(\frac{\pi \varepsilon''}{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}} l - \frac{1}{2} \ln \varepsilon' \right) \quad (3.107)$$

Сравнивая (3.103) и (3.107), заключаем, что $\Delta N_{\text{ПИП}}$ всегда меньше ΔN в направляющей системе, причем это различие тем больше, чем больше влажность зерна.

Данные, приведенные на рис. 3.15, полностью подтверждают сделанный выше вывод.

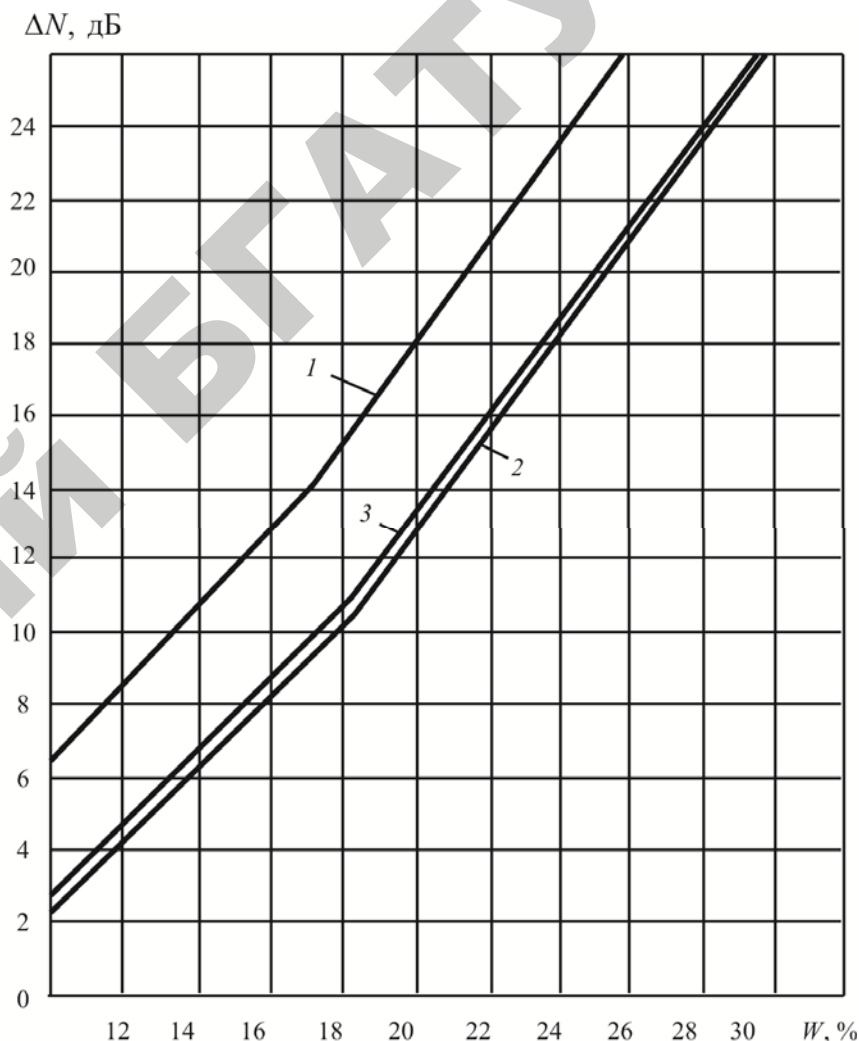


Рис. 3.15. Зависимость параметра преобразования ΔN от влажности пшеницы для ПИП СВЧ-влажномера зерна:

1 – расчетная зависимость по выражению (4.93); 2 – экспериментальная зависимость; 3 – расчетная зависимость с учетом фокусирующего действия влажного материала (по выражению (4.97) (значения для ε' взяты из рис. 3.9)

3.2. Разработка генераторных узлов

Таблица 3.1

Электрические параметры диодов АА703А и АА703Б

Номер	Ом	В	мА	В	мА	$P_{\text{СВЧ}}$, мВт	%
1	6,48	4,26	240	8,4	225	18,5	0,97
2	10,01	3,8	162	8,4	150	9	0,71
3	10,36	3,97	160	8,4	148	17,5	1,4
4	12,73	5,65	191	8,4	164	12,5	0,89
5	10,4	4,22	182	8,4	174	13	0,91
6	9,42	4,14	190	8,4	170	21,5	1,47
7	8,53	4,66	220	8,4	201	18	1,04
8	8,16	4,24	220	8,4	206	19	1,09
9	10,11	4,64	191	8,4	172	15	1,02
10	10,62	4,87	198	8,4	186	11	0,68
11	9,11	4,5	224	8,4	196	23	1,39
12	8,49	4,29	225	8,4	200	23	1,36
13	10,45	4,99	188	8,4	173	11,5	0,76
14	13,08	4,9	158	8,4	152	9,5	0,74
15	8,99	4,46	210	8,4	190	14	0,87
16	10,4	4,55	200	8,4	163	33	2,4
17	10,9	4,7	189	8,4	151	31	2,4
18	5,24	4,18	339	8,4	266	37	2,5
19	8,36	4,74	249	8,4	204	45	2,6
20	7,01	4,87	270	8,4	236	22	1,1
21	8,01	5,08	251	8,4	228	26,5	1
22	8,56	4,86	253	8,4	213	23	1,2
23	9,83	4,87	219	8,4	198	24	2,6
24	6,44	4,16	276	8,4	210	43	2,5
25	6,78	7,51	263	8,4	256	8	0,3
26	7,33	4,6	265	8,4	231	17	0,6
27	7,5	5,17	270	8,4	228	20	1
28	7,74	5,37	291	8,4	242	27,5	1,4
29	7,88	4,2	139	8,4	200	32	3,2
30	8,41	4,23	224	8,4	172	43	2,9

2. Обнаружена корреляция между пороговым напряжением U_n и пролетной частотой генерации. Например, для пролетной частоты 10 ГГц характерное значение U_n составляет 3,8 В. Уменьшению

В большинстве «амплитудных» микроволновых влагомеров (т. е. работающих на «просвет»), используется принцип приемника прямого усиления (ППУ). Сопоставление конструкций различных влагомеров и наши исследования [1, 5, 12, 28] позволили сформулировать и обосновать основные требования к ФУ ГСВЧ.

1. Выходная мощность – не более 50 мВт. Верхний предел мощности выбран из условий получения необходимого динамического диапазона микроволнового влагомера по амплитудному ПП (60...65 дБ) и выполнения требований безопасности работ с закрытыми источниками СВЧ-колебаний.

2. Рабочий диапазон – от 0,5 ГГц до 15 ГГц с предпочтительными фиксированными частотами 1–2 ГГц, ... 4–5 ГГц, 10 ГГц, 15 ГГц и возможностью перестройки в пределах ± 500 МГц на поддиапазонах 10 ГГц и 15 ГГц.

3. Стабильность частоты генератора СВЧ – не хуже $10^{-5} F$ при длительной эксплуатации.

4. Напряжение постоянного тока для питания генератора не должно превышать 12 В с целью использования ФУ ГСВЧ в полевых влагомерах.

5. ФУ ГСВЧ должен обеспечивать возможность сочленения (или конструктивного выполнения) с различными типами линий передач СВЧ.

Этим требованиям удовлетворяют генераторы СВЧ на диодах Ганна, серийный выпуск которых освоен промышленностью.

Согласно справочным данным, генераторные диоды типа АА703 в заводских условиях разбраковываются на две группы по выходной мощности: А – 10 мВт, Б – 20 мВт. Рекомендуется их эксплуатировать при напряжениях не выше 8,5 В; другие параметры в паспортных данных не регламентируются. В результате испытаний приборов (табл. 3.1) типа АА703А и АА703Б было установлено следующее.

1. Генераторные диоды даже в пределах одной группы отличаются большим разбросом электрических параметров. Так, например, сопротивление в низком поле диодов типа АА703А может находиться в пределах от 7 до 22 Ом; пороговые напряжения – от 3,8 до 5,4 В; пороговый ток – от 150 до 450 мА; для диодов типа АА703Б – $R_0 \sim 3\text{--}7$ Ом, $U_n \sim 3,8\text{--}5,4$ В, $I_n \sim 250\text{--}350$ мА.

порогового напряжения соответствует повышение пролетной частоты. Такая корреляция связана с тем, что обе эти величины определяются одним и тем же технологическим параметром, а именно, длиной активного элемента.

3. Обнаружена корреляция между сопротивлением прибора и пороговым током, с одной стороны, и выходной мощностью СВЧ-диода. Так, например, диодам с одинаковым $U_{\text{п}}$ и $R_0 \sim 3\text{--}4$ Ом и $I_{\text{п}} \sim 300$ мА соответствовало $P_{\text{свч}} > 30$ мВт. Увеличению сопротивления диодов, как правило, соответствовало уменьшение выходной мощности СВЧ. Это обусловлено тем, что для диодов с одинаковой длиной пролетной области значения параметров R_0 , $I_{\text{п}}$, $P_{\text{свч}}$ определяются площадью активного элемента, поскольку в заводских условиях эпитаксиальные пленки GaAs предварительно разбраковываются по концентрации электронов с целью получения максимального КПД ($n_0 L \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$); разброс по выходной мощности СВЧ в этом случае целиком обусловлен различием в подвижности носителей заряда.

Таким образом, можно сделать вывод, что дополнительной разбраковкой диодов по электрическим параметрам можно отобрать примерно идентичные приборы по СВЧ-характеристикам.

Наиболее просто осуществить генерацию СВЧ-колебаний диода Ганна AA703 в призматическом резонаторе, выполнявшемся на основе прямоугольного волновода сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ и $17 \times 6 \text{ мм}^2$.

Размеры резонатора рассчитывались, исходя из моды колебаний в резонаторе H_{102} . Мода колебаний выбиралась из следующих соображений.

Как указывалось выше, для эффективной работы диода в резонаторе необходимо выполнение условия

$$R_{\text{н}} = R_{\text{д}}, \quad (3.108)$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки диода;

$R_{\text{д}}$ – внутреннее сопротивление генераторного диода ($R_{\text{д}} \sim 10$ Ом).

Эквивалентное сопротивление резонатора распределено по его длине. Сопротивление в максимуме может быть оценено по формуле

$$R_{\text{м}} \sim pQ, \quad (3.109)$$

где p – эквивалентное сопротивление передающей линии, на основе которой выполнен резонатор;

Q – добротность резонатора.

Для использовавшихся систем $p \sim 10^2$, $Q \sim 10^2$. Таким образом,

$$R_{\text{м}} \sim 10^4 \text{ Ом}. \quad (3.110)$$

Очевидно, что согласование генераторного диода с резонатором возможно только при расположении диода вблизи минимума эквивалентного сопротивления резонатора. То есть для резонатора H_{102} существует 4 точки оптимального согласования – 2 у стенок и 2 у центра. Расположение диода у стенок резонатора затруднительно, так как через торцевые стенки осуществляется вывод мощности из резонатора и связь со стабилизирующим резонатором. Расположение диода в центре резонатора является удобным и с технологической точки зрения.

Как правило, частота призматических резонаторов перестраивается при помощи короткозамыкающего поршня. Но использование такого элемента перестройки частоты приводит к недостатку, характерному для многих конструкций, а именно, рассогласованию диода Ганна и резонатора в процессе перестройки; при перемещении поршня точка оптимального согласования смещается относительно диода, и если диод согласован на одной фиксированной частоте, то при перестройке он не будет отдавать максимально возможную мощность. Поэтому в разрабатываемых ячейках в качестве элемента перестройки были выбраны 2 емкостных винта, перемещающихся перпендикулярно широкой стенке резонатора (рис. 3.16). Винты расположены в пучностях электрического поля, т. е. действуют как укорачивающие емкости. Структура поля при одновременном перемещении винтов остается постоянной в области установки генераторного диода, и он может в широком диапазоне частот отдавать максимально возможную мощность.

Таким образом, диод, закрепленный у центра резонатора (у «физической стенки»), согласован с резонатором в широком диапазоне рабочих частот. Оптимальная величина волнового сопротивления

в точке включения диода задается начальным взаимным смещением емкостных винтов. Изменение частоты генерации резонатора H_{102} достигается одновременным перемещением емкостных винтов. На такой ячейке получен диапазон плавной частотной перестройки ~ 500 МГц, максимальная мощность ~ 35 мВт (диоды АА703Б) и до 60 мВт (диоды 3А703Б), изменение мощности по диапазону ~ 9 дБ. Подвод питания к диоду осуществлялся через изолированную пластину толщиной 3 мм, которая вкладывалась в стандартный волновод 23×10 мм². Пластина образует с корпусом резонатора емкость, что предотвращает утечку мощности по цепи питания и обеспечивает закорачивание по СВЧ. Такой подвод напряжения смещения более пригоден для широкополосного резонатора по сравнению с дроссельным, так как четвертьволновый дроссельный ввод питания обладает ярко выраженной узкополосностью, т. е. обеспечивает закорачивание по СВЧ в узком диапазоне длин волн. Недостатком такой конструкции является возможность закорачивания настроечными винтами напряжения питания при перестройке частоты на краю диапазона.

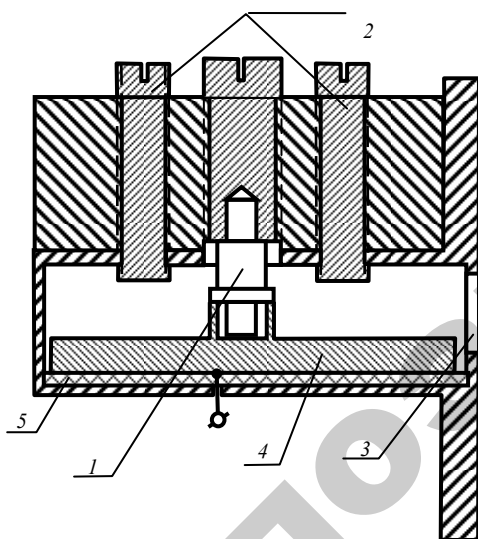


Рис. 3.16. Полупроводниковый генератор СВЧ на основе прямоугольного волновода:
1 – генераторный диод; 2 – настроенные винты; 3 – отверстие связи;
4 – пластина ввода питания; 5 – изолирующая прокладка

Для настроечных характеристик такого генератора характерны срывы частот, гистерезис характеристик, что не позволяет иметь широкий диапазон частотной перестройки. Эти явления связаны с влиянием диода Ганна как неоднородности в резонаторе. Эквивалентная схема подключения диода к СВЧ-резонатору включает в себя емкости домена и диода, индуктивность вывода от кристалла, индуктивность крепящего штыря. Кроме того, в таком резонаторе может возбуждаться квазикоаксиальный резонанс вокруг крепящего стержня. Торцами этого квазикоаксиального резонатора являются широкие стенки волновода.

Анализ эквивалентной схемы такой СВЧ-системы показывает, что возможны колебания как на резонансных частотах корпуса (контур А), так и на частотах призматического резонатора (контур В), а также квазикоаксиального резонатора (контур С). Это объясняет срывы на настроечной характеристике генератора и гистерезис. Колебания, обусловленные квазикоаксиальным резонатором, являются неконтролируемыми, т. е. при перемещении винтов частота резонанса не меняется или меняется слабо. Кроме того, контуры А и С влияют и на колебания на основной моде H_{102} , приводя в некоторых случаях к так называемому эффекту частотного насыщения, т. е. неизменности частоты при изменении положений винтов перестройки.

Максимальная выходная мощность для резонатора $36 \times 23 \times 7$ мм³ достигалась в том случае, когда положение генераторного диода подбиралось экспериментально на расстоянии 3...3,5 мм от изолированной пластины, а отверстие связи (щель) имело размеры 17×4 мм².

Диапазон частотной перестройки составляет $\sim 1,5$ ГГц, отношение мощности на краях диапазона – 2 дБ. Замена диода в такой ячейке может сопровождаться смещением границ диапазона плавной перестройки на 200–300 МГц. Это связано с сильным разбросом параметров диодов в пределах одной партии, и, как следствие, с изменением параметров резонансного контура.

Обнаружено также влияние величины и формы окна диафрагмы на частоту колебаний; использовалась диафрагма с прямоугольным окном 17×4 мм², круглые диафрагмы различных диаметров. Чем меньше размер диафрагмы, тем ниже генерируемая частота (табл. 3.2).

Выбор диафрагмы для конкретного генератора определяется заданным диапазоном перестройки и величиной выходной мощности.

Таблица 3.2

Зависимость диапазона перестройки и выходной мощности от типа и величины отверстия связи для генератора на основе призматического резонатора

Диафрагма	17×4 мм	9,8 мм	8,6 мм	6,4 мм
$F_{\text{ВЕРХ}}$, МГц	9 970	9 300	9 070	8 900
$F_{\text{НИЖН}}$, МГц	8 900	8 800	менее 8 800	менее 8 800
$P_{\text{МАХ}}$, мВт	55	35	15	5
$P_{\text{МИН}}$, мВт	20	12	–	–

Для того чтобы уменьшить влияние указанных эффектов и обеспечить генерацию на моде H_{102} , надо изменить импеданс контуров A и C на зажимах активного элемента. Оптимальные условия колебаний в системе определяются выбором формы держателя, высоты положения диода (т. е. перемещением его вдоль узкой стенки волновода), изменением высоты волновода.

С целью выбора оптимальной конструкции двухполуволнового генератора, перестраиваемого емкостными винтами, были проведены исследования зависимости энергетических и частотных характеристик таких генераторов от расположения диода по высоте, размеров резонатора H_{102} , формы и размера окна связи.

3.2.1. Результаты исследований резонатора 30×17,5×6

Генераторный диод был закреплен на подвижном плоском держателе ($d = 6$ мм), который обеспечивал перемещение диода перпендикулярно широкой стенке резонатора (рис. 3.17). Зависимости P и F от положения диода, приведенные на рис. 3.20 и 3.21 получены при перемещении диода вниз, в плоскость резонатора H_{102} , начальное положение диода показано на рис. 3.20. Как видно из рис. 3.19, при смещении диода на 0,5 от начального пояснения наблюдался максимум выходной мощности СВЧ на частоте 9,45 ГГц.

Можно предположить, что это положение диода соответствует одной из точек оптимального согласования генераторного диода с резонатором; так как измерения проводились без диафрагмы и без емкостных винтов, то можно предполагать, что в этом случае резонатор можно представить в виде двух сильно связанных контуров: прямоугольного на моде H_{102} , между закорачивающей стенкой прямоугольного резонатора и диодом, и коаксиальной, образованной коаксиальным ответвлением, в которое помещен диод.

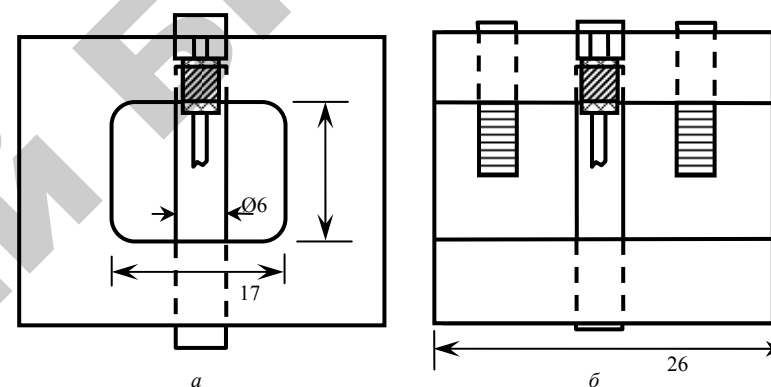


Рис. 3.17. Конструкция резонатора 30×17,5; 5×6 мм³

Смещение диода в прямоугольную резонансную полость (рис. 3.3) приводило к уменьшению выходной мощности. При перемещении диода на расстояние от 4,5 до 8,5 мм выходная мощность отсутствовала. Вторая область генерации (рис. 3.18), как и следовало ожидать, наблюдалась при перемещении диода от широкой стенки резонатора H_{101} в нижнее коаксиальное ответвление.

Обнаружено влияние размеров и формы окна диафрагмы на энергетические и частотные характеристики генератора при расположении диода в верхнем оптимальном по высоте положении: a – щелевая диафрагма 18×11 мм² приводила к увеличению выходной мощности на 30...40 %, частота генерации практически не изменялась (уменьшалась на 90 МГц), по сравнению с не диафрагмированным генератором; $б$ – прямоугольная, диафрагма 13×4,2 мм² приводила к уменьшению мощности на 30 %, уменьшение частоты составляло 900 МГц; $в$ – круглая диафрагма $d = 8,2$ мм, $P \sim 3$ мВт,

$F = 400$ МГц; z – круглая диафрагма диаметром меньше 6 мм не вводила мощности из резонатора.

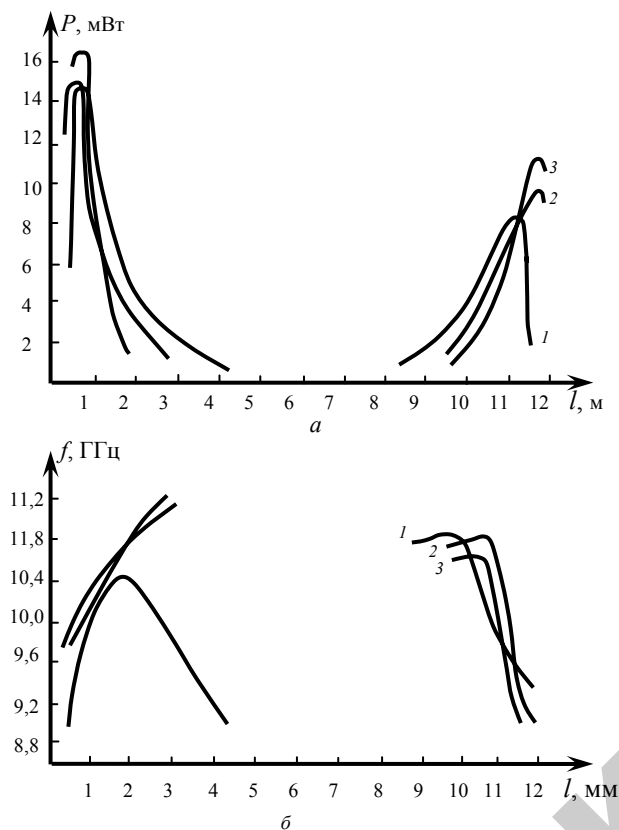


Рис. 3.18. Зависимость выходной мощности (а) и частоты (б) от положения генераторного диода по высоте:
1 – без диафрагмы и емкостных винтов; 2 – без диафрагмы, подстройка емкостными винтами; 3 – щелевая

Таким образом, диафрагма 18×1 не меняет тип колебаний в резонаторе, т. е. работает как согласующий элемент (трансформатор) в режиме бегущей волны. Увеличение генерируемой мощности объясняется улучшением согласования резонатора с волноводом 23×10 мм².

Другие диафрагмы, по-видимому, приводят к срыву колебаний коаксиального типа и возбуждению резонанса прямоугольного типа H_{101} , либо резонанса, обусловленного корпусом диода. В этом случае резонатор не согласован с нагрузкой, что приводит к уменьшению генерируемой мощности.

Для получения колебаний на моде H_{102} в резонатор вводились емкостные винты диаметром 5 мм в пучность электрического поля; перестройка частоты генерации осуществлялась, как в вышеописанном случае, перемещением генераторного диода по высоте резонатора; при каждом положении диода емкостными винтами производилась настройка генератора на максимум выходной мощности. Обнаружено, что максимумы выходной мощности соответствовали расположению диода в коаксиальных ответвлениях, перемещение диода на 0,3...0,4 мм от широкой стенки прямоугольного резонатора приводило к прекращению генерации. Диапазон плавной перестройки частоты (рис. 3.19) за счет перемещения диода составлял от 8,8 до 11,2 ГГц при использовании щелевой диафрагмы 18×1 мм² при $P \sim 17$ мВт; с круглой диафрагмой $d = 8,2$ – от 8,80 до 10,0 ГГц при $P \sim 12$ мВт; с прямоугольной диафрагмой $d = 17 \times 4,2$ мм² – от 8,8 до 10,80 ГГц при $P \sim 15,5$ мВт. Несмотря на то, что генераторные диоды имеют большой разброс параметров, настройка генератора перемещением диода и емкостными винтами позволяет получить необходимый диапазон перестройки (например, от 8,8 до 9,6 ГГц).

При оптимальном положении генераторного диода у верхней стенки прямоугольного резонатора с прямоугольной $13 \times 4,2$ мм² или щелевой 18×1 мм² диафрагмами диапазон плавной перестройки генератора только емкостными винтами составлял 400...500 МГц (рис. 3.20). В том случае, если корпус диода находился в прямоугольной части резонатора, на настроечных кривых (рис. 3.21) обнаруживалось две области генерации и при настройке емкостными винтами наблюдались срывы частоты.

Рассмотрим структуру электромагнитного поля в прямоугольном и коаксиальном резонаторах (рис. 3.22). Как видно из рис. 3.22, в резонаторе H_{102} структура поля при перемещении диода в пучности магнитного поля параллельно узкой стенке не должна изменяться, т. к. силовые линии являются тангенциальными к держателю, на котором закреплен диод. Следовательно, энергетические

и частотные характеристики генератора на моде не должны существенно зависеть от расположения диода по высоте, если диод помещен в место оптимального согласования с резонатором.

В том случае, если емкостными винтами в прямоугольной части резонатора не сформирована структура H_{102} , такой резонатор можно рассматривать как коаксиальный, в котором наружный проводник имеет прямоугольную форму. Поскольку в исследованной конструкции $30 \times 17,5 \times 6$ диод мог располагаться в коаксиальном ответвлении, рассматриваемый генератор можно представить как чисто коаксиального типа с различными волновыми сопротивлениями в двух частях (рис. 3.22в).

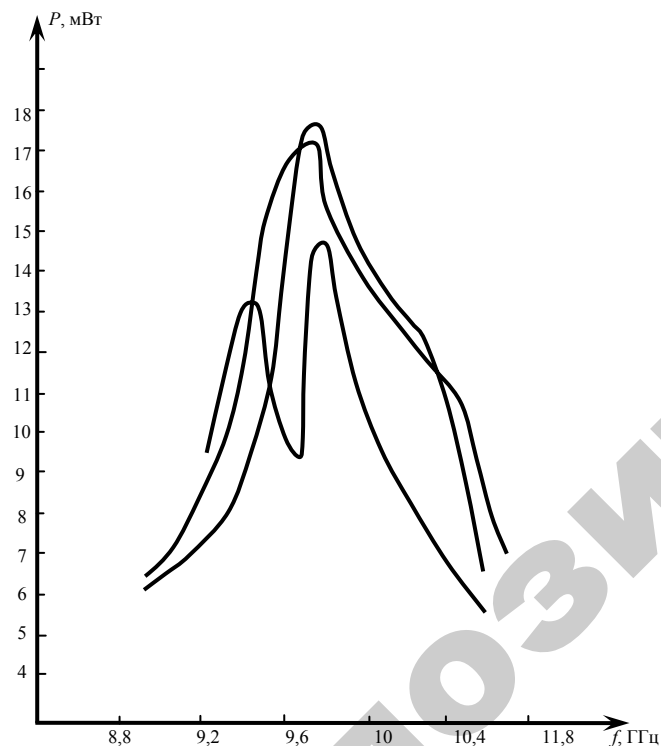


Рис. 3.19. Зависимости выходной мощности двухполноволнового (H_{102}) генератора от частоты для различных диафрагм:
1 – без диафрагмы; 2 – щелевая 18×4 мм²; 3 – щелевая 18×1 мм²; 4 – прямоугольная $13 \times 4,12$ мм²

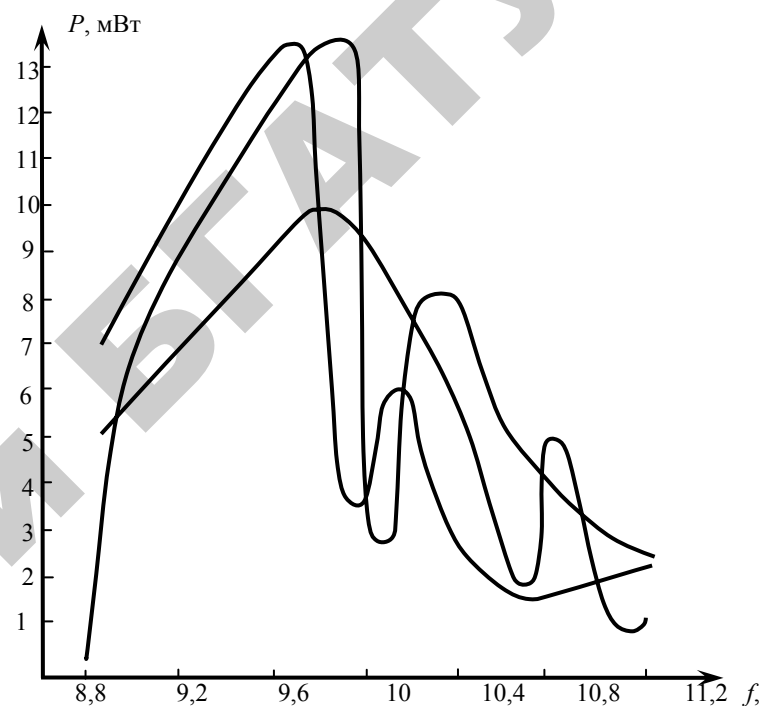


Рис. 3.20. Зависимость выходной мощности от частоты для двухполноволнового генератора, перестраиваемого перемещением генераторного диода:
1 – без диафрагмы и емкостных винтов; 2 – со щелевой диафрагмой 18×1 мм²; 3 – без диафрагмы, дополнительная настройка винтами

Приближенный расчет характеристических сопротивлений отрезков коаксиальных волноводов дает $Z_I \sim 50$ Ом ($D = 5$ мм, $d = 1,9$ мм) и $Z_{II} = 80 \dots 90$ Ом ($D = 17,5$ мм, $d = 5$ мм). Вследствие того что точки оптимального согласования генераторного диода в коаксиальном резонаторе находятся у стенок, на эксперименте наблюдается зависимость энергетических и частотных характеристик от положения диода по высоте.

Таким образом, можно сделать вывод, что в исследованной конструкции можно реализовать коаксиально-волноводный режим, с плавными настроечными характеристиками с большой крутизной, диапазон перестройки от 8,8 до 11 ГГц.

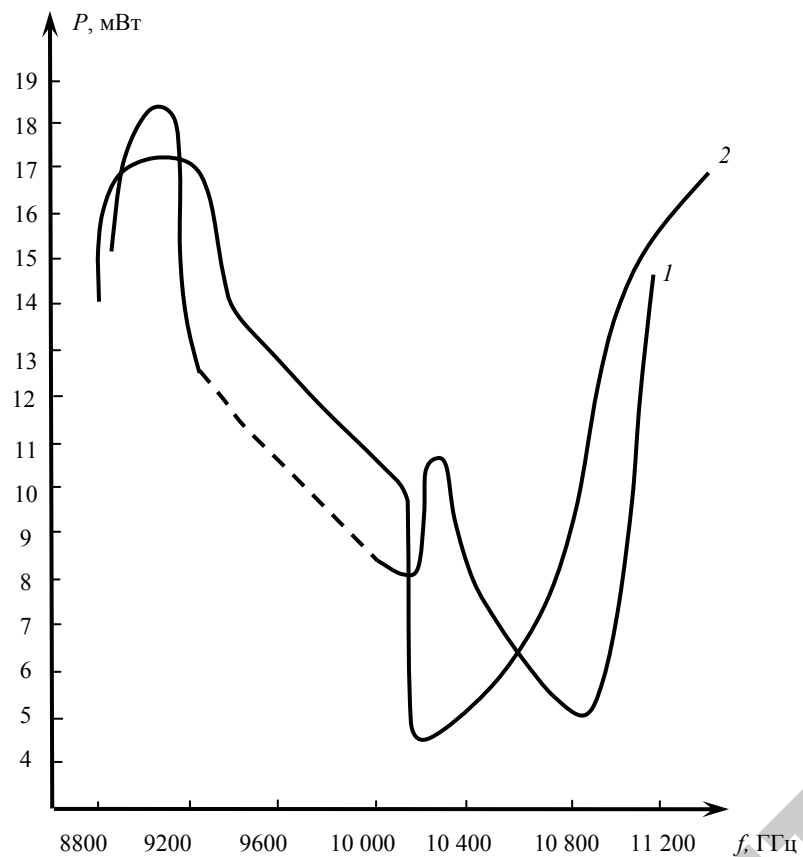


Рис. 3.21. Зависимости выходной мощности от частоты генератора с призматическим резонатором:
1 – без диафрагмы; 2 – диафрагма $18 \times 1 \text{ мм}^2$

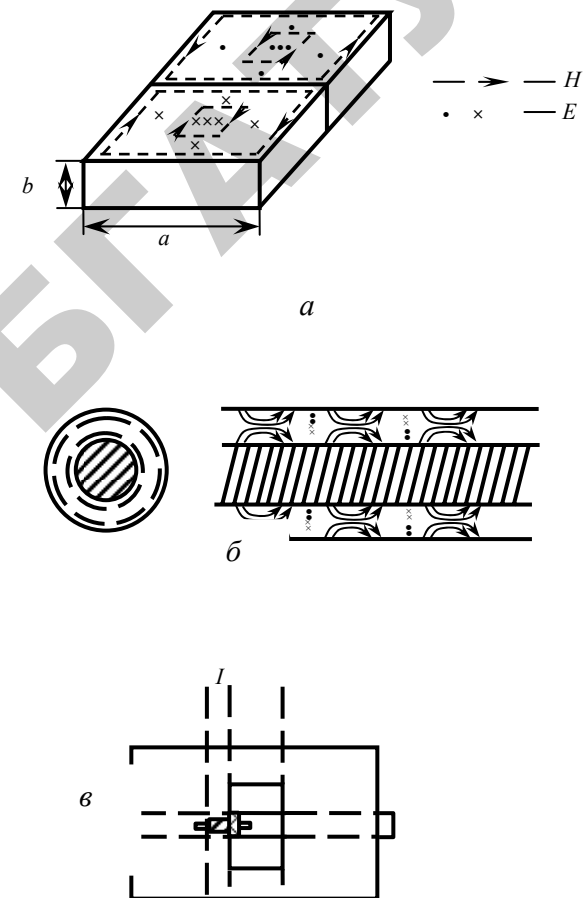


Рис. 3.22. а – распределение электромагнитного поля в прямоугольном резонаторе; б – распределение электромагнитного поля в коаксиальной линии; в – схематическое изображение генератора в виде 2-х отрезков

3.2.2. Разработка конструкции СВЧ-генератора

Реализация генератора, настраиваемого на заданную частоту при значительной и достаточно стабильной выходной мощности выполнена на основе коаксильно-волноводной системы. Конструкция такого типа генератора приведена на рис. 3.23.

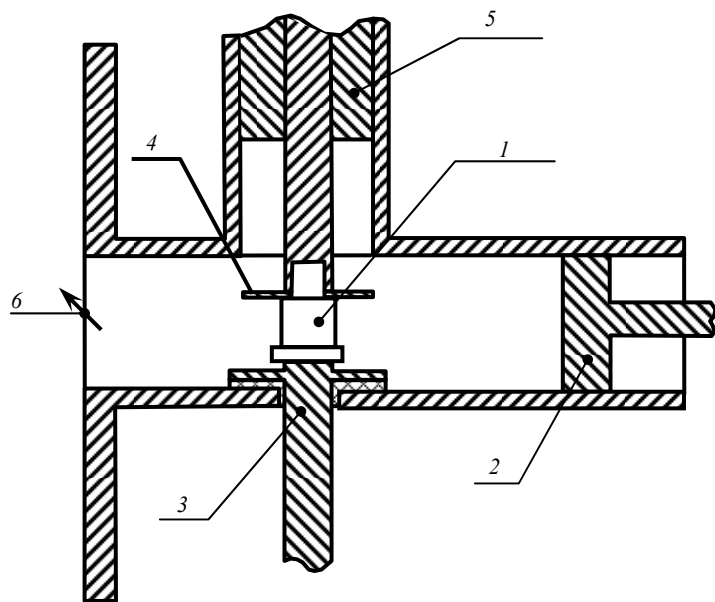


Рис. 3.23. Конструкция полупроводникового генератора СВЧ коаксиально-волнового типа:

1 – генераторный диод; 2 – настроечный короткозамыкающий поршень;
3 – подвод питания к диоду; 4 – металлическая пластинка диаметром 8 мм;
5 – коаксиальный плунжер; 6 – регулируемая диафрагма

Так как положение генераторного диода в ней жестко фиксировано, то при перестройке частоты генератора короткозамыкающим поршнем в прямоугольной части не обеспечивается одновременно согласование генераторного диода с резонатором. Строго говоря, генераторный диод согласован с резонатором только на одной фиксированной частоте. Проводилось изучение коаксиально-волноводных ячеек, в которых частота перестраивалась изменением резонансного объема как коаксиальной, так и прямоугольной части системы. В исследовавшихся системах при помощи короткозамыкающих поршней и коаксиальных плунжеров создавались различные конфигурации резонансной полости, размеры которой менялись в широких пределах. Для дискретной перестройки частоты использовались медные пластинки, закреплявшиеся в различных местах резонатора.

Обнаружено, что в такой ячейке без использования дополнительных элементов не удастся получить плавные настроечные характеристики с большой крутизной, охватывающие возможно больший диапазон частот. На рис. 3.24 и 3.25 приведены графики зависимости частоты от размеров прямоугольной полости резонатора, а также от положения коаксиального плунжера при расположении диода Ганна в центре волновода с помощью штыря. Как видно из графиков, обнаруживаются уже упоминавшиеся традиционные недостатки волноводно-коаксиальных и волноводных конструкций. Так, кривые имеют прерывистый характер, обнаруживается гистерезис – 2 частоты при одном положении плунжера, т. е. частота генератора может быть различной в зависимости от того, с какой стороны диапазона производилась настройка короткозамыкающим плунжером. Кроме того, в коаксиально-волноводной системе наблюдается малая крутизна этих кривых, а при некоторых положениях диода – и насыщение частоты. Диапазон плавной перестройки 500 МГц. Получаемая на эксперименте крутизна составляет 30 МГц/мм, тогда как рассчитанная теоретически – 200...300 МГц/мм. Это связано с влиянием диода Ганна как составляющей части СВЧ-резонатора на общий импеданс системы.

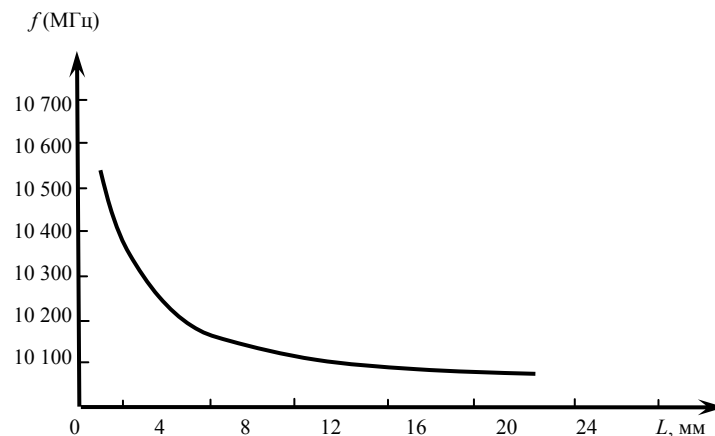


Рис. 3.24. Зависимость частоты генерации от длины прямоугольной части резонатора

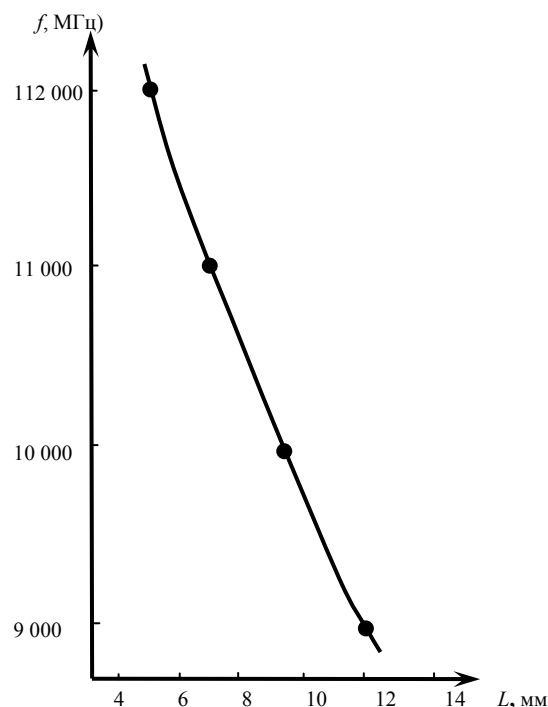


Рис. 3.25. Зависимость частоты генерации от длины прямоугольной части в оптимальной конструкции генератора

Перескоки частоты в такой системе связаны с тем, что в резонаторе могут существовать различные моды колебаний при фиксированных размерах. При перестройке объема резонатора, когда колебания на некоторой моде становятся невозможными, происходит срыв генерации на ней и возбуждение колебаний на другой (и другой частоте). В исследованных ячейках наблюдались перескоки частоты 2–3 раза на настроечной характеристике, скачки частоты достигали 300 МГц. Колебаниями на различных модах объясняется и явление гистерезиса частоты на настроечной характеристике, когда система имеет 2 значения резонансной частоты при одних и тех же размерах.

Из графиков перестройки волноводных и волноводно-коаксиальных систем можно выделить особенность настроечных кривых именно такого типа резонаторов – насыщение частоты при

изменении объема прямоугольной части. В то же время при перемещении плунжера в коаксиальном ответвлении наблюдается существенное изменение частоты (что позволяет использовать такие системы в качестве узкополосных мощных генераторов). Это дает основание предположить, что в системе наблюдается коаксиальный резонанс, локализованный вокруг крепящего диод стержня, т. е. прямоугольный поршень не меняет конфигурацию поля и, следовательно, частоту, коаксиальный же плунжер существенно меняет объем, в котором сосредоточено СВЧ-поле. Можно предложить следующие пути увеличения диапазона плавной частотной перестройки в коаксиально-волноводных системах с диодами Ганна:

1) необходимо ликвидировать перескоки частоты генератора размещением в резонаторе дополнительных элементов, затрудняющих колебания на моде, на которую происходит переброс;

2) необходимо добиться срыва коаксиального резонанса, например, уменьшением высоты волновода (как в призматических ячейках) или использованием проводящих пластин, затрудняющих коаксиальный резонанс.

Была исследована коаксиально-волноводная конструкция резонатора, в которой непосредственно у диода в разрыве крепящего штыря помещалась медная пластина размерами $\lambda/8$. Как видно на рис. 3.25, на настроечной кривой не наблюдается перескоков частоты, отсутствует эффект насыщения. Диапазон плавной перестройки в данном случае более 2,5 ГГц.

Вопросы согласования диода с резонатором оказываются весьма сложными в таких генераторах. В том случае, если диод расположен неподвижно в центре волновода в разрыве крепящего стержня в относительно небольшом диапазоне частот (–400 МГц) было обнаружено уменьшение мощности до 90 % от максимальной. Кроме рассогласования диода с резонатором, о котором упоминалось выше, причинами этого могут быть изменение степени связи резонатора с нагрузкой вследствие изменения при настройке структуры поля в месте расположения элементов связи с нагрузкой, а также значительный уход частоты генерации от пролетной при перестройке.

На рис. 3.26 приведена зависимость мощности от частоты в системе с неизменным согласованием диода и постоянной связью с нагрузкой. Видно, что при перестройке на 500 МГц мощность меняется на 3 дБ. Это изменение обусловлено только уходом от пролетной частоты.

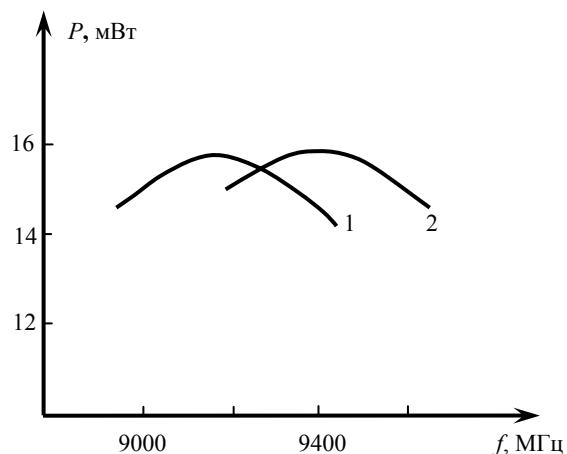


Рис. 3.26. Зависимость выходной мощности от частоты генерации для двух диодов с различными сопротивлениями в слабом поле (диоды согласованы с резонатором в диапазоне частот)

Для повышения выходной мощности в более широкой полосе частот перестройки разработан и защищен авторским свидетельством № 714990 генератор СВЧ на основе коаксиального резонатора.

3.3. Сравнительный анализ промежуточных измерительных преобразователей (ПРИП)

Как уже указывалось в разделе 3.3, основное назначение промежуточных измерительных преобразователей (ПРИП) состоит в выработке электрического сигнала, величина которого прямо пропорциональна параметру преобразования микроволнового влагомера. Существует множество способов построения таких преобразователей. Их метрологические характеристики определяются конкретными физическими принципами, лежащими в основе измерения параметра преобразования, а также метрологическими характеристиками используемых в них элементов.

Задачей настоящего раздела является определение функций преобразования и анализ метрологических характеристик, наиболее часто употребляемых ПРИП.

3.3.1. Измерительные преобразователи на основе видеодетектирования

В измерительных преобразователях данного типа в качестве чувствительного элемента, в котором осуществляется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал постоянного тока, используется детекторный СВЧ-диод.

Структурная схема простейшего ПРИП с детекторным СВЧ-диодом представлена на рис. 3.27.

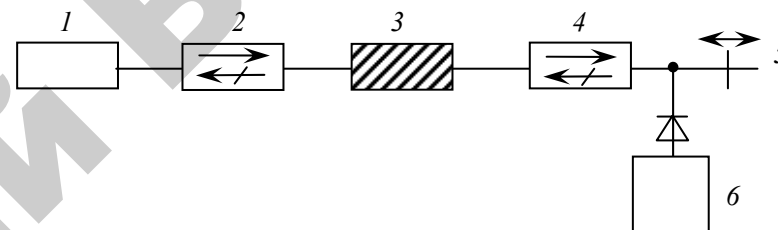


Рис. 3.27. Структурная схема ПРИП прямопоказывающего типа на основе детекторного СВЧ-диода:

1 – генератор; 2, 4 – ферритовые вентили; 3 – ПРИП;
5 – детекторная секция; 6 – измеритель тока или измеритель напряжения

Схему ПРИП такого типа будем называть прямопоказывающей. В качестве детекторных диодов в СВЧ-влажномерах наиболее часто используются точечные диоды (Д 604, Д605 и др.) и реже диоды с барьером Шотки (КА 203А). Теория выпрямления, разработанная Шотки, применима как к точечным диодам, так и к диодам с барьером Шотки.

Получим основные соотношения, связывающие величину СВЧ-мощности, поступающей на детекторный диод, с величиной продетектированного сигнала. Для этого рассмотрим эквивалентную схему детекторного диода, включенного в СВЧ-тракт влагомера (рис. 3.28). На схеме графическое изображение диода соответствует только непосредственно выпрямляющему переходу. Кроме того, на схеме показаны емкость перехода C_j , сопротивление перехода по СВЧ R_j , индуктивность и емкость патрона L_{Π} и C_p соответственно.

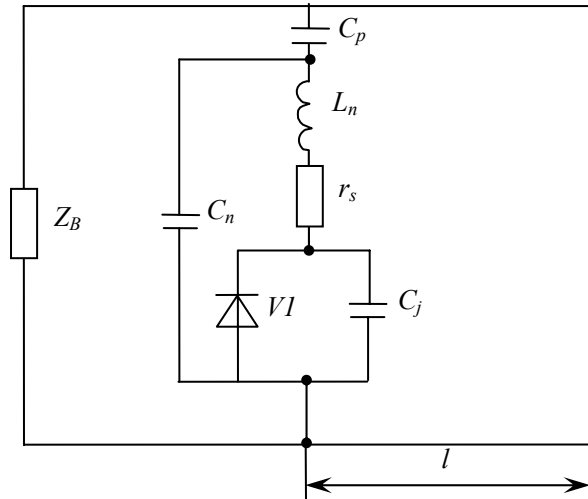


Рис. 3.28. Эквивалентная схема детекторного диода, включенного в волноводный тракт:

z_B – волновое сопротивление волновода; C_n – емкость патрона; C_p – конструктивная разделительная емкость; L_n – индуктивность патрона; C_j – емкость барьера; $V1$ – выпрямляющий переход; l – расстояние от места включения детекторного диода до плоскости короткого замыкания

Для предотвращения замыкания СВЧ-диода по постоянному току и компенсации индуктивной проводимости патрона L_n один из электродов диода отделен от волноводного тракта посредством конструктивной разделительной емкости C_p .

Примем, что к СВЧ-диоду приложено СВЧ-напряжение, амплитуда которого U_0 . Тогда, мощность P , поглощаемая СВЧ-диодом, в предположении, что $i\omega L_n = \frac{1}{j\omega C_p}$, дается уравнением [1]:

$$P = \frac{U_0^2}{2} \cdot \frac{\frac{1}{Rj} \left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) + \omega^2 C^2 r_s}{\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right)^2 + \omega^2 C^2 r_s^2}, \quad (3.108)$$

где Rj – сопротивление барьера диода на СВЧ.

Из приведенной эквивалентной схемы СВЧ-диода следует, что только часть СВЧ-напряжения приложена непосредственно к выпрямляющему барьеру:

$$U_b^2 = \frac{U_0^2}{\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right)^2 + \omega^2 C^2 r_s^2}, \quad (3.109)$$

где U_b – СВЧ-напряжение, приложенное к барьеру диода.

Из (3.108) и (3.109) находим связь между поглощенной диодом мощностью и напряжением барьера U_b :

$$P = \frac{U_b^2}{2} \left[\frac{1}{Rj} \left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) + \omega^2 C^2 r_s \right]. \quad (3.110)$$

Для получения явного вида для Rj воспользуемся уравнением Шотки [117]:

$$I = I_s (e^{\alpha U_b} - 1), \quad (3.111)$$

где $\alpha = \frac{q}{nkT}$;

I_s – ток насыщения, зависящий от высоты барьера, площади контакта, температуры и от некоторых других величин;

q – заряд электрона;

T – температура;

k – постоянная Больцмана;

n – коэффициент «неидеальности», значение которого лежит в пределах 1,05...1,5.

Примем, что кроме переменного СВЧ-напряжения $U = U_b \cos \omega t$ к барьеру приложено напряжения смещения E_{cm} .

Тогда

$$I = I_s (e^{\alpha(U_b \cos \omega t + E_{cm})} - 1). \quad (3.112)$$

Из (3.112) находим амплитуду Im_1 первой гармоники СВЧ-тока, текущего через барьер:

$$Im_1 = 2I_s e^{\alpha E} B_1(\alpha U_b), \quad (3.113)$$

где $B_1(\alpha U_b)$ – модифицированная функция Бесселя от чисто мнимого аргумента 1-го порядка.

Так как $Rj = \frac{U_b}{Im_1}$, то из (3.113) находим:

$$\frac{1}{Rj} = 2 \frac{I_s e^{\alpha E}}{U_b} B_1(\alpha U_b). \quad (3.114)$$

Разлагая в степенной ряд (3.114), получаем:

$$\frac{1}{Rj} = \alpha I_s e^{\alpha E} \left[1 + \frac{1}{8} (\alpha U_b)^2 + \dots \right]. \quad (3.115)$$

При нулевом внешнем смещении и при небольших сигналах

$$\frac{1}{8} (\alpha U_b)^2 \ll 1; \quad \frac{1}{Rj} \approx \alpha I_s. \quad (3.116)$$

Величина α для кремниевых диодов типа D604 колеблется в пределах $20 \dots 35 \text{ В}^{-1}$, $I_s = -10^{-7} \dots 10^{-5} \text{ А}$ [5]. Таким образом, сопротивление барьера $Rj = 3 \dots 500 \text{ кОм}$. В большинстве случаев $Rj \approx 10 \text{ кОм}$.

Как следует из (3.115), с увеличением тока внешнего смещения $I_{cm} = I_s (e^{\alpha E_{cm}} - 1)$ сопротивление Rj уменьшается:

$$\frac{1}{Rj} = \alpha (I_s + I_{cm}). \quad (3.117)$$

Так, для диода КА 203А при $I_{cm} = 20 \text{ мкА}$; $Rj \approx 1 \dots 2 \text{ к}$, а для диода D604 при $I_{cm} = 50 \text{ мкА}$; $Rj \approx 500 \dots 900 \text{ Ом}$ [166].

Установим связь между выпрямленным напряжением холостого хода U_0 на диоде (сопротивление во внешней цепи диода отсутствует) и уровнем поглощенной СВЧ-мощности. В этом случае постоянная составляющая I_0 тока, текущего через переход, должна обращаться в ноль, в противном случае будет происходить постоянный заряд конденсатора C_p . Из (3.112) находим:

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T e^{\alpha \left(U_b \cos \frac{2\pi}{T} t + E_{cm} + U_0 \right)} dt = 0. \quad (3.118)$$

Интегрируя (3.118), получаем:

$$U_0 = E_{cm} - \frac{1}{\alpha} \ln B_0(\alpha U_b). \quad (3.119)$$

Таким образом, наличие E_{cm} при работе диода в режиме генератора напряжения не изменяет его чувствительность по напряжению.

Разлагая (3.119) в ряд, имеем (при $E_{cm} = 0$):

$$U_0 = -\frac{1}{4} \alpha U_b^2 + \frac{1}{64} \alpha^3 U_b^4 + \dots \quad (3.120)$$

При условии, что $\frac{\alpha}{4} U_b^2 \gg \frac{1}{64} \alpha^3 U_b^4$, имеет место квадратичное детектирование. Подставляя (3.110) и (3.116) в (3.121), находим:

$$U_0 = -\frac{1}{4} \alpha U_b^2; \quad (3.121)$$

$$U_0 = -\frac{P}{2} \alpha \frac{r_s}{(r_s I_s \alpha)(1 + r_s I_s \alpha) + (w C r_s)^2}. \quad (3.122)$$

Оценим порядок входящих в (3.122) величин: $r_s = 10 \dots 50 \text{ Ом}$; $C \approx 3 \cdot 10^{-13} \text{ Ф}$; $w = 6,28 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$; $I_s \alpha \approx 10^{-4} \text{ Ом}^{-1}$ [125]. Следовательно, выполняется условие $r_s I_s \alpha \ll (w C r_s)^2$.

С учетом этого неравенства (3.122) преобразуется к виду

$$|U_0| = \frac{\alpha P}{2 r_s w^2 C^2}. \quad (3.123)$$

Таким образом, напряжение холостого хода детектора прямо пропорционально поглощенной диодом мощности при условии, что эта мощность невелика.

Величина напряжения зависит от коэффициента $\frac{\alpha}{2 r_s w^2 C^2}$, который носит название чувствительность СВЧ-детектора по напряжению – γ . Именно факт прямо пропорциональной зависимости между U_0 и P используется в ПРИП СВЧ-влагомеров. Так как параметром преобразования в методе поглощения является ослабление СВЧ-энергии $N_{\text{дб}}$, то логарифм напряжения U_0 пропорционален N .

Установим соотношения, позволяющие оценить величину погрешности δN (дБ), обусловленную отклонением U_0 от квадратичного закона по отношению к U_b . Для этого воспользуемся (3.120), учитывая два члена ряда разложения:

$$U_0 = -\frac{1}{4} \alpha U_b^2 + \frac{1}{64} \alpha^3 U_b^4. \quad (3.124)$$

Из (3.110) следует, что

$$\frac{U_b^2}{2} = \frac{P}{w^2 C^2 r_s}. \quad (3.125)$$

Подставляя (3.125) в (3.124), получаем соотношение для U_0 :

$$U_0 = -\gamma P + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P^2, \quad (3.126)$$

где $\gamma = \frac{\alpha}{2 r_s w^2 C^2}$ – чувствительность по напряжению (для диодов D604 $\gamma \approx 4,2 \text{ В/мВт}$).

Согласно определению,

$$N = 4,343 \ln \frac{P_0}{P} \text{ (дБ)}, \quad (3.127)$$

где P_0 и P – соответственно мощности, поглощенные СВЧ-детектором до и после внесения ВМ в ПРИП.

Примем, что U_0 соответствует поглощенной детектором мощности P_0 .

Тогда из (3.126) находим:

$$N_1 = 4,343 \ln \frac{U_0^0}{U_0} = 4,343 \ln \frac{-\gamma P_0 + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P_0^2}{-\gamma P + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P^2}. \quad (3.128)$$

Выражение под знаком логарифма можно преобразовать:

$$\frac{-\gamma P_0 + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P_0^2}{-\gamma P + \frac{\alpha}{4} \gamma^2 P^2} \approx \frac{P_0}{P} - \frac{\alpha}{4} \gamma \frac{P_0^2}{P} + \frac{\alpha}{4} \gamma P_0. \quad (3.129)$$

Учитывая (3.127) и (3.129), находим выражение для погрешности δN_{KU} :

$$\delta N_{KU} = N_1 - N = 4,343 \ln \left(1 - \frac{\alpha}{4} \gamma P_0 \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \right). \quad (3.130)$$

При $\frac{P}{P_0} \ll 1$ величина δN_K не зависит от абсолютного значения P :

$$\lim_{\frac{P}{P_0} \rightarrow 0} \delta N_{KU} = 4,343 \ln \left(1 - \frac{\alpha}{4} \gamma P_0 \right). \quad (3.131)$$

Из (3.131) можно найти абсолютное значение мощности P_0 , при котором погрешность δN_{KU} не превышает некоторое заданное значение δN_{KU}^0 .

$$P_0 \leq \frac{4}{\gamma \alpha} \left(1 - e^{\frac{\delta N_{KU}^0}{4,343}} \right). \quad (3.132)$$

Расчет по формуле (3.132) дает, что при $\delta N_{K0} = 1$ дБ, $\gamma = 4,2$ и $\alpha = 30$, мощность P , поглощенная СВЧ-диодом, не должна превышать 6,5 мкВт, что находится в хорошем согласии с экспериментом.

На рис. 3.29 представлены расчетные зависимости δN_{KU} от P и P_0 . На этом рисунке нанесены экспериментальные точки, полученные при исследовании 10 диодов D604. Приведенные данные подтверждают справедливость выражений (3.130) и (3.132).

При анализе работы детекторного СВЧ-диода следует иметь в виду еще одно обстоятельство. Так как импеданс диода в общем случае не равен волновому сопротивлению волновода, то не вся подводимая СВЧ-мощность поглощается диодом. За счет рассогласования СВЧ-сигнал частично отражается от диода.

$$U_0 = (1 - |\Gamma|^2) \frac{\alpha P_n}{2r_s w^2 C^2}, \quad (3.133)$$

где $|\Gamma|$ – модуль коэффициента отражения СВЧ-диода;

P_n – подводимая к диоду СВЧ-мощность.

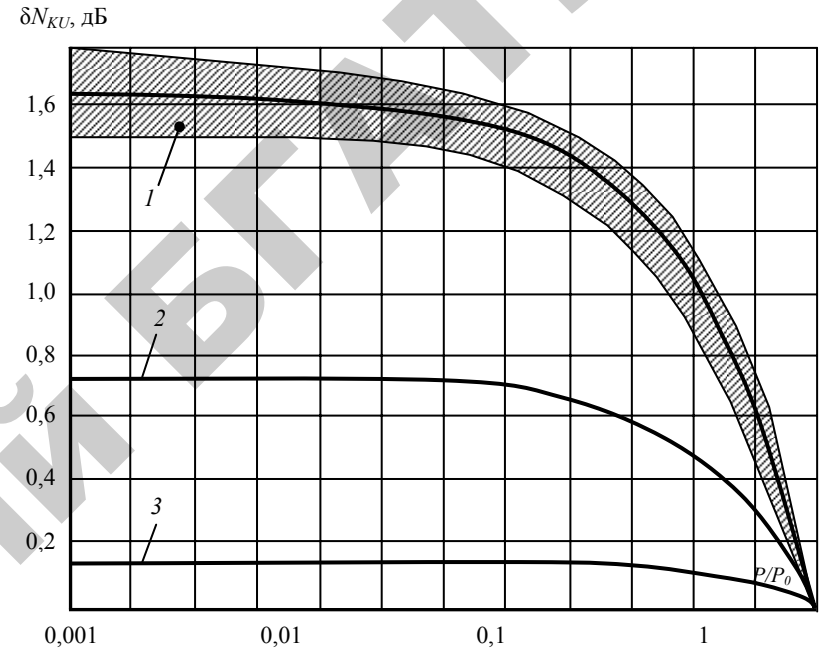


Рис. 3.29. Зависимость погрешности измерения ослабления по напряжению на СВЧ-детекторе в зависимости от поглощенной мощности: 1, 2, 3 – расчетные зависимости (по выражению (3.130)); 1 – $P_0 = 10$ мВт; 2 – $P_0 = 1$ мВт; 3 – $P_0 = 0,1$ мВт; параметры диода: $\alpha = 30$; $\gamma = 4,2$ (заштрихована найденная экспериментально область значений δN_{KU} для партии 10 шт. диодов D604)

Оценим степень влияния температуры на чувствительность детектора по напряжению. Для этого введем обобщенную чувствительность детекторного СВЧ-диода по напряжению ($\gamma_{об}$) в которой учтены потери рассогласования.

$$\gamma_{об} = (1 - |\Gamma|^2) \frac{\alpha}{2r_s w^2 C^2}. \quad (3.134)$$

Из эквивалентной схемы следует, что общая проводимость Gg детекторного диода на СВЧ при условии, что $wL_n = \frac{1}{wC_p}$, дается выражением:

$$Gg = \frac{\frac{1}{Rj} \left(1 + \frac{r_s}{Rj}\right) + w^2 C^2 r_s}{\left(1 + \frac{r_s}{Rj}\right)^2 + w^2 C^2 r_s^2} + j \frac{wC \left[1 + \frac{Rs}{Rj} - wCRs\right]}{\left(1 + \frac{r_s}{Rj}\right)^2 + w^2 C^2 r_s^2}. \quad (3.135)$$

Реактивная составляющая Gg компенсируется подвижным короткозамыкателем:

$$\text{ctg} \beta l + I_m Gg = 0,$$

где β – волновое число в волноводе;
 l – расстояние от диода до короткозамыкателя.

Учитывая, что $\frac{r_s}{Rj} \ll 1$ и $\frac{r_s}{Rj} \ll w^2 C^2 r_s^2$, имеем:

$$Rg = \frac{1}{Gg} = \frac{1}{w^2 C^2 r_s}. \quad (3.136)$$

Приняв, что $w = 6,28 \cdot 10^{10}$ Гц, $C = 0,3 \text{ нФ}$ и $r_s = 10$ Ом, находим, что $R_g \approx 257$ Ом. Волновое сопротивление волновода стандартного сечения при $f = 10$ ГГц составляет величину $Z_B \approx 500$ Ом. Таким образом,

$$Z_B \approx 2Rg. \quad (3.137)$$

Учитывая, что $\Gamma = \frac{Z_B - R_g}{Z_B + R_g}$, для $\gamma_{об}$ получим:

$$\gamma_{об} = \frac{1,8}{Z_0 w^4 C^4} \frac{\alpha}{r_s^2}. \quad (3.138)$$

Дифференцируя (4.138) по температуре, имеем:

$$\frac{1}{\gamma_{об}} \frac{d\gamma_{об}}{dT} = \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dT} - \frac{2}{r_s} \frac{dr_s}{dT}. \quad (3.139)$$

Так как $\alpha = \frac{q}{nkT}$, то

$$\frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dT} = -\frac{1}{T}. \quad (3.140)$$

Сопротивление растеканию r_s пропорционально удельному сопротивлению полупроводника, температурная зависимость которого определяется множителем $\exp\left(\frac{\Delta E_0}{2kT}\right)$, где ΔE_0 – энергия ионизации примесного состояния.

Следовательно,

$$-\frac{2}{r_s} \frac{dr_s}{dT} = \frac{\Delta E_0}{kT^2}. \quad (3.141)$$

Подставляя (3.140) и (3.141) в (3.139), имеем:

$$\frac{1}{\gamma_{об}} \frac{d\gamma}{dT} = \frac{\Delta E_0}{kT^2} - \frac{1}{T}, \quad (3.142)$$

или в децибелах:

$$\frac{dN_g}{dT} \approx 4,343 \left(\frac{\Delta E_0}{kT^2} - \frac{1}{T} \right). \quad (3.143)$$

Подставляя численное значение $\Delta E_0 = 0,08$ э.в. [1] получаем, что $\frac{dN_g}{dT} \approx 0,03$ дБ/град при 300 К. Полученное расчетное значение $\frac{dN}{dT}$ хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 3.30).

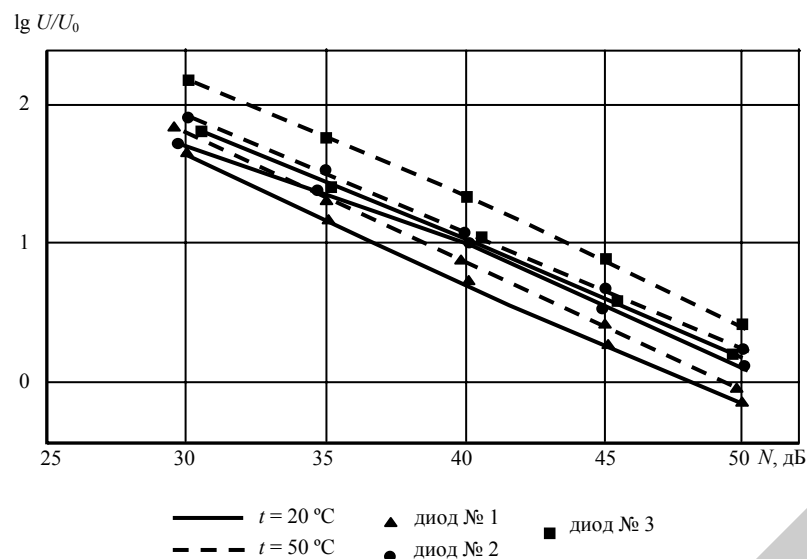


Рис. 3.30. Зависимость выпрямленного напряжения на детекторных диодах от ослабления N при различных температурах

Суммарная дополнительная погрешность ξ_{NT} , обусловленная влиянием температуры в ПРИП данного типа, складывается из двух составляющих: температурной погрешности детекторного СВЧ-диода $\frac{dN_g}{dT}$ и температурной погрешности СВЧ-генератора:

$$\xi_{NT} = \frac{dN_g}{dT} + \frac{dN_\Gamma}{dT}. \quad (3.144)$$

Наиболее часто в качестве генераторов в СВЧ-влажномерах используются генераторы на диодах Ганна (ДГ). На рис. 3.31 представлена температурная зависимость мощности $P(t)$ генератора на ДГ АА 723 на частоте 10 ГГц, постоянная на основании данных, приведенных в [1]. Из графика находим, что при $T = 300$ К величина $\frac{dN_\Gamma}{dT} \approx -0,02$ дБ/град. Следовательно, $\frac{dN_g}{dT}$ и $\frac{dN_\Gamma}{dT}$ имеют разные знаки, и суммарная погрешность $\xi_{NT} \approx 0,01$ дБ/град. Таким образом, инструментальная погрешность выходного сигнала данного ПРИП практически не подвержена влиянию температуры.

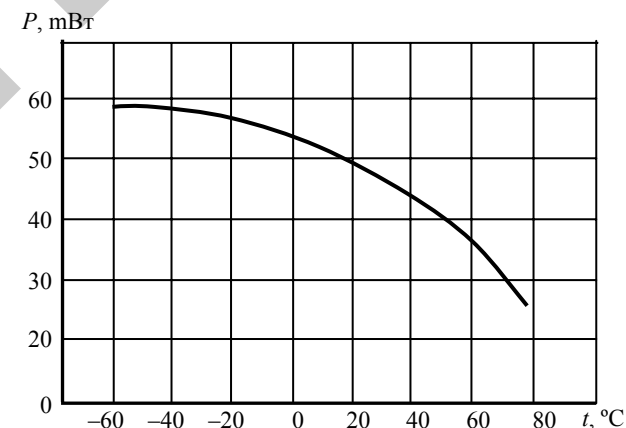


Рис. 3.31. Зависимость мощности генератора на диоде Ганна АА 723А от температуры на частоте 10 ГГц

Оценим динамический диапазон ΔN измеряемых ослаблений СВЧ-энергии в рассматриваемом случае. Согласно [167] тангенциальная чувствительность P_{tg} точечных детекторных диодов составляет величину 50...55 дБ от уровня 1 мВт, т. е. $10^{-8} \dots 3 \cdot 10^{-9}$ Вт. Учитывая, что уже при $P = 6$ мкВт погрешность $\delta N_{k0} = 1$ дБ, находим, что $\Delta N \leq 28 \dots 33$ дБ.

Такой динамический диапазон соответствует, как это следует из материалов раздела 2.1, чувствительности параметра преобразова-

ния $S_{N,w} = 1$ дБ/%. Следовательно, в рассматриваемом ПРИП реализуется измерение параметра преобразования с систематической погрешностью, которая, выраженная в процентах влажности, составляет величину $\pm 0,5\%$.

Выше рассмотрены метрологические характеристики ПРИП, выполненные по прямопоказывающей схеме, когда детекторный диод работает в режиме генератора напряжения. Исследуем основные параметры ПРИП для случая, когда детекторный диод работает в режиме генератора тока.

Постоянная составляющая тока, текущего через короткозамкнутый контур, определяется уравнением,

$$I_0 = \frac{I_s + I_{cm}}{T} \int_0^T \left(e^{\alpha U_b \cos \frac{2\pi}{T} t} - 1 \right) dt.$$

После интегрирования имеем:

$$I_0 = (I_s + I_{cm}) \{ B_0(\alpha U_b - 1) \}. \quad (3.145)$$

Разлагая (3.145) в степенной ряд, получаем:

$$I_0 = (I_s + I_{cm}) \left[\frac{1}{4} (\alpha U_b)^2 + \frac{1}{64} (\alpha U_b)^4 \dots \right]. \quad (3.146)$$

Ограничиваясь первым членом в (3.146), выражая U_b^2 через P из (3.110) и учитывая (3.117), имеем:

$$I_0 = \frac{P\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) + w^2 C_j^2 r_s Rj \right]^{-1}. \quad (3.147)$$

Выражение (3.147) соответствует случаю, когда короткозамкнутый контур подключен непосредственно к барьеру. Однако, в реальных условиях контур подключается к переходу через сопротив-

ления растекания r_s . Считая, что внутреннее сопротивление перехода по постоянному току равно Rj (это имеет место при малых сигналах), переписываем (3.147) в следующем виде:

$$I_0 = \frac{P\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) + w^2 C_j^2 r_s Rj \right]^{-1} - I_0 \frac{r_s}{Rj}, \quad (3.148)$$

откуда находим:

$$I_0 = \frac{P\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right)^2 + \left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) w^2 C_j^2 r_s Rj \right]^{-1}. \quad (3.149)$$

Отношение $\beta = \frac{I_0}{P}$ есть чувствительность детекторного диода по току:

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \left[\left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right)^2 + \left(1 + \frac{r_s}{Rj} \right) w^2 C_j^2 r_s Rj \right]^{-1}. \quad (3.150)$$

Из (3.150) следует, что чувствительность детекторного диода по току зависит от Rj , который выражением (3.117) связан с I_{cm} .

Дифференцируя знаменатель (3.150) и приравнявая производную к нулю, находим, что чувствительность по току достигает максимума, когда Rj удовлетворяет уравнению:

$$R_j^3 - \frac{2}{w^2 C^2} Rj_{opt} - \frac{2r_s}{w^2 C^2} = 0. \quad (3.151)$$

Согласно [1], решение этого уравнения дается формулой

$$Rj = 2 \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{wC} \cos \frac{\Phi}{3}, \quad (3.152)$$

где $\varphi = \arccos \left[\left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} r_s w C \right]$.

Так как $\left(\frac{3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} r_s w C \ll 1$, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Следовательно, $Rj_{opt} = \frac{\sqrt{2}}{wC}$. (3.153)

Подставляя в (3.143) выражение для Rj (3.117), получаем уравнение для тока $I_{cm, opt}$, при котором наблюдается максимальная чувствительность:

$$I_{cm, opt} = \frac{wC}{\alpha\sqrt{2}} - I_s. \quad (3.154)$$

Из полученного выражения следует, что чем выше частота w , тем больший ток I_{cm} надо пропускать через диод. Подстановка в (3.153) и (3.154) численных значений $w = 6,28 \cdot 10^{10}$ Гц; $C = 3 \cdot 10^{-13}$ Ф; $\alpha = 30$ В⁻¹ приводят к следующим оценкам:

$$Rj_{opt} = 75 \text{ Ом}; I_{cm, opt} = 440 \text{ мкА}; \beta_{max} = 9,48 \frac{\text{А}}{\text{Вт}}.$$

Экспериментальные значения $I_{cm, opt}$ обычно приблизительно в 2 раза меньше. Это обусловлено тем, что при выводе (3.154) не учитывалось отражение СВЧ-мощности от диода. Если по аналогии с (3.134) ввести обобщенную чувствительность по току $\beta_{об}$, то

$$\beta_{об} = (1 - |\Gamma|^2) \beta. \quad (3.155)$$

Так как при пропускании тока I_{cm} через диод условие $\frac{r_s}{Rj} \ll w^2 C^2 r_s^2$ уже не выполняется, то из (3.125) имеем:

$$R_g = \frac{Rj}{1 + w^2 C^2 r_s Rj}. \quad (3.156)$$

Очевидно, что

$$1 - \Gamma^2 = \frac{4R_g Z_B}{(R_g + Z_B)^2}. \quad (3.157)$$

Так как $\frac{R_g}{Z_B} < 0,5$, то из (3.157) получаем приближенное выражение:

$$1 - \Gamma^2 = \frac{4}{Z_B} \frac{Rj}{(1 + w^2 C^2 r_s Rj)} \left(1 - 2 \frac{Rj}{Z_B (1 + w^2 C^2 r_s Rj)} \right). \quad (3.158)$$

Подстановка (3.158) в (3.155) и последующие дифференцирование по Rj приводит к следующему выражению для Rj_{opt} :

$$R_{j, opt}^2 - \frac{Rj}{w^2 C^2 r_s} (2 + w^2 C^2 r_s Z_0) + \frac{Z_0}{w^2 C^2 r_s} = 0. \quad (3.159)$$

Решение (3.159) для принятых значений r_s, w, Cj приводит к следующим оценкам:

$$R_{j, opt}^2 = 168 \text{ Ом}, I_{cm, opt} = 200 \text{ мкА}, \beta_{max} = 6,41 \text{ А/Вт}.$$

Полученные значения $R_{j, opt}^2, I_{cm, opt}$ и β_{max} хорошо согласуются с экспериментом.

Выигрыш в чувствительности при пропускании через диод тока I_{cm} по отношению к чувствительности β , когда $I_{cm} = 0$, составляет по расчету и по эксперименту величину 5...6 дБ.

Обратимся к оценке погрешности δN_{kl} , обусловленной отклонением I_0 от квадратичного закона по отношению к U_b . Аналогично тому, как это делалось при выводе (3.126), получаем:

$$I_0 = \beta P + \frac{1}{4(I_s + I_{cm})} \beta^2 P^2. \quad (3.160)$$

Следовательно (3.130)–(3.132),

$$\delta N_{kl} = 4,343 \ln \left[1 + \frac{P_0 \beta}{4(I_0 + I_{cm})} \left(1 - \frac{P}{P_0} \right) \right]. \quad (3.161)$$

Абсолютное значение мощности P_0 , при котором погрешность δN_{kl} не превышает заданное значение δN_{kl}^0 , дается выражением

$$P_0 \leq \frac{4(I_0 + I_{cm})}{\beta} (e^{\frac{\delta N_{kl}}{4,343}} - 1). \quad (3.162)$$

Из сравнения (3.130) и (3.160) находим, что δN_{ku} и δN_{kl} имеют разные знаки $\delta N_{kl} > 0$, $\delta N_{ku} < 0$. Однако основное отличие между ними состоит в том, что если величина δN_{ku} зависит только от индивидуальных свойств детекторного диода и является величиной неизменной, то δN_{kl} можно изменять в широких пределах, меняя величину тока смещения. Если принять, что $I_{cm} = I_{cm\ opt} = 200$ мкА,

$\beta = \beta_{max} = 6,41 \frac{A}{Bt}$, то расчет по формуле (3.162) дает при $\delta N_{kl}^0 = 1$ дБ оценку для $P_0 \leq 32$ мкВт, что на 7 дБ превышает соответствующее значение, когда детекторный диод работает в режиме генератора напряжения. Таким образом, изменяя ток I_{cm} , можно значительно расширить динамический диапазон линейной зависимости между P и I_0 .

Действительно, тангенциальная чувствительность P_{tg} обратно пропорциональна β [1, 5]:

$$P_{min} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\beta} \sqrt{\frac{1}{Rj} + \frac{IT}{2kT}} = \frac{\sqrt{4kT\Delta f}}{\beta} \sqrt{(I_0 + I_{cm})} \sqrt{\left(\alpha + \frac{l}{2kT} \right)}, \quad (3.163)$$

где $k = \text{const}$;

Δf – ширина полосы пропускания индикаторного устройства.

Комбинируя (3.163) и (3.164), находим:

$$\begin{aligned} \Delta N &= 4,343 \ln \frac{(I_0 + I_{cm})}{\sqrt{4kT\Delta f} \sqrt{\alpha + \frac{l}{2kT}} \sqrt{I + I_{cm}}} = \\ &= 4,343 \ln \frac{\sqrt{(I_0 + I_{cm})}}{\sqrt{4kT\Delta f} \left(\alpha + \frac{l}{2kT} \right)}. \end{aligned} \quad (3.164)$$

Таким образом,

$$\Delta N \approx \ln(I_0 + I_{cm})^{\frac{1}{2}}. \quad (3.165)$$

Оценим степень влияния температуры на чувствительность детекторного диода по току. Аналогично тому, как это делалось ранее при выводе температурного коэффициента по напряжению, получаем:

$$\xi_g = 4,343 \frac{1}{\beta_{06}} \frac{d\beta_{06}}{dT} = 4,343 \left[\frac{1}{1 - |\Gamma|^2} \frac{d(1 - |\Gamma|^2)}{dT} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial T} \right]. \quad (3.166)$$

Согласно [1, 5, 28] $\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -1,7 \cdot 10^{-2}$ град⁻¹ при токе

$I_{cm} = 50$ мкА и $\frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dT} = -6 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹ при $I_{cm} = 15$ мкА. Дифферен-

цирование выражения (3.157) по температуре и последующая подстановка численных значений дает:

$$\frac{1}{1 - |\Gamma|^2} \frac{d(1 - |\Gamma|^2)}{dT} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ град}.$$

Таким образом

$$\xi_g = 4,343 \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dt} = \left\{ \begin{array}{l} -7 \cdot 10^{-2} \text{ дБ/град при } I_{cm} = 50 \text{ мкА} \\ -2,6 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/град при } I_{cm} = 15 \text{ мкА} \end{array} \right\}.$$

Следовательно, суммарная погрешность $\xi_{N,T}$ в данном ПРИП имеет значение $\approx -0,1 \text{ дБ/град}$, т. е. на порядок выше, чем в ПРИП с детекторным диодом, работающим в режиме генератора напряжения.

3.3.2. Измерительные преобразователи компенсационного типа

Структурная схема ПРИП компенсационного типа представлена на рис. 3.32 [5]. Сущность работы представленного преобразователя заключается в компенсации ослабления, вносимого влажным материалом в ПИП, ослабление $p-i-n$ -аттенюатора. Обозначим ослабление СВЧ-мощности в ПИП через N_{Π} , а ослабление, вносимое аттенюатором, через N_A . При любой влажности материала выполняется соотношение

$$N_A = N_0 - N_{\Pi}, \quad (3.167)$$

где N_0 определяется напряжением U_0 , установленным на входе сравнивающего устройства. Абсолютная величина N_0 обычно составляет величину 50...55 дБ от уровня 10 мВт, что соответствует напряжению на СВЧ-детекторном диоде порядка 0,5...1 мВ.

Из (3.167) следует, что любое изменение ΔN_n всегда равно $|\Delta N_A|$. Таким образом, величина N_A характеризует ослабление в ПИП. Мерой ослабления N_A является ток I , текущий через $p-i-n$ диод. На рис. 3.33 и 3.34 представлены зависимости $N_A(I)$ для двух типов $p-i-n$ -аттенюаторов. Из приведенных зависимостей следует, что временная нестабильность аттенюаторов, а также индивидуальность их характеристик $N_A(I)$ не позволяет использовать рассматриваемый ПРИП при массовом изготовлении СВЧ-влажнометров зерна.

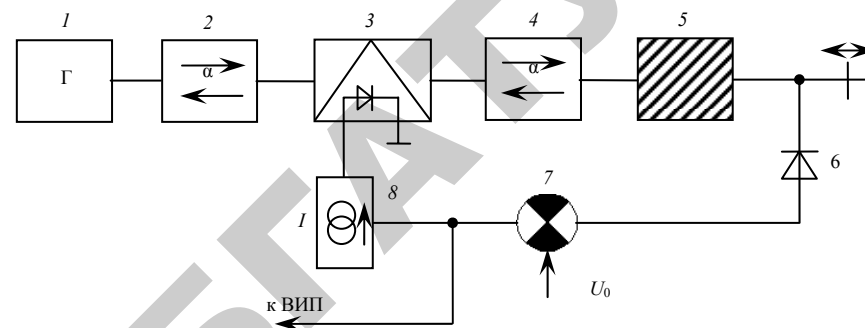


Рис. 3.32. Структурная схема ПРИП компенсационного типа с $p-i-n$ -аттенюатором в контуре обратной связи:

1 – СВЧ-генератор; 2, 4 – ферритовые вентили; 3 – $p-i-n$ -аттенюатор; 5 – ПИП; 6 – СВЧ-детектор; 7 – сравнивающее устройство; 8 – генератор тока

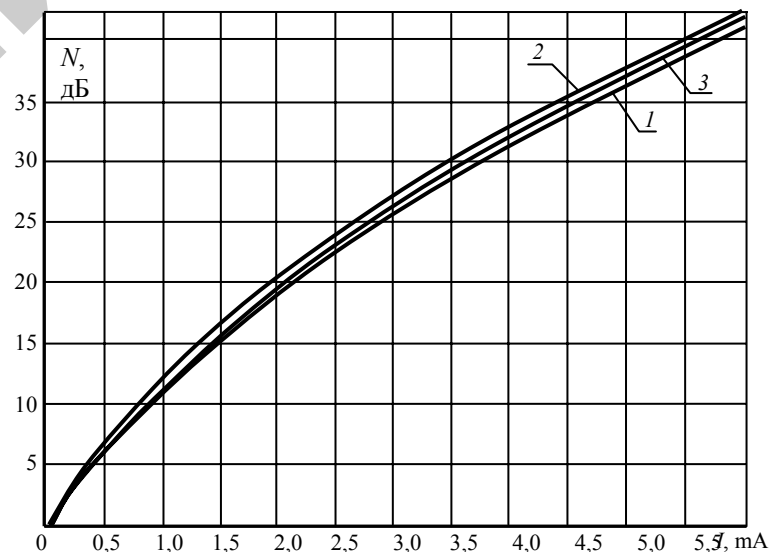


Рис. 3.33. Зависимость ослабления СВЧ-энергии, вносимого двумя последовательно включенными $p-i-n$ -аттенюаторами АП-5 от тока:

1 – $f = 9400 \text{ МГц}$ – через 5 мин после подачи тока на диод;
2 – $f = 9400 \text{ МГц}$ – через 120 мин после подачи тока на диод;
3 – $f = 9800 \text{ МГц}$ – через 5 мин после подачи тока на диод

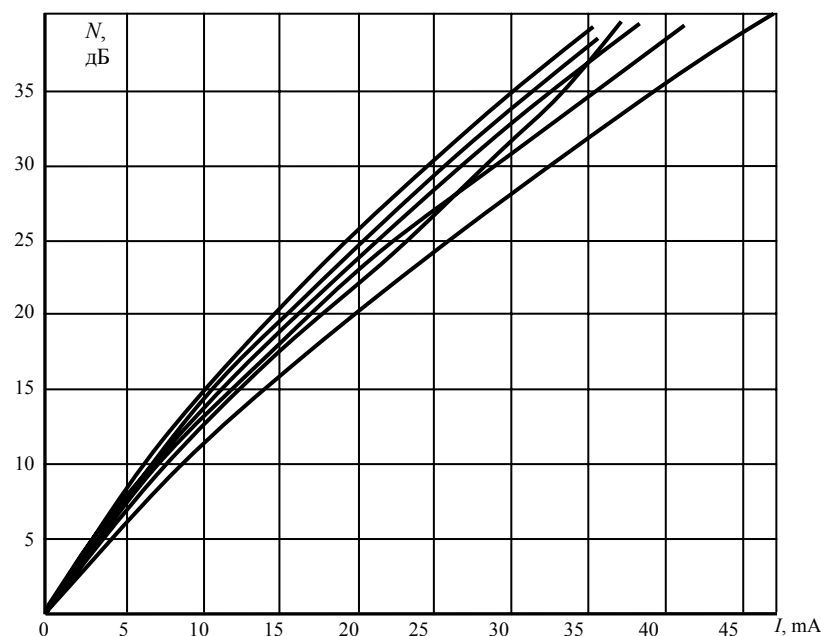


Рис. 3.34. Зависимость ослабления СВЧ-энергии, вносимого *p-i-n*-аттенуатором РЭМ от тока;
РЭМ №1 — $f = 9800$ МГц; — $f = 9400$ МГц; — $f = 9000$ МГц;
РЭМ №2 — $f = 9800$ МГц; — $f = 9400$ МГц; — $f = 9000$ МГц

3.3.3. Автодинный измерительный преобразователь

Структурная схема СВЧ-влажмера, использующего автодинный принцип приема сигнала, представлена на рис. 3.35. Схема работает следующим образом. СВЧ-мощность генератора на диоде Ганна (ГДГ) 1, проходя через ферритовый вентиль 3, поглощается во влажном материале, помещенном в первичный измерительный преобразователь 4. Величина поглощаемой мощности пропорциональна затуханию во влажном материале. Ослабленный по мощности СВЧ-сигнал модулируется периодической последовательностью импульсов с помощью полупроводникового *p-i-n*-модулятора 7, управляемого от генератора прямоугольных импульсов 9. Модулированный СВЧ-сигнал через фазовращатель 6 и направленный от-

ветвь 2 поступает на выход ГДГ. Величина возвращаемой к ГДГ СВЧ-мощности зависит от затухания и фазового сдвига цепи внешней обратной связи (ВОС). Информация о величине затухания в цепи ВОС содержится в амплитуде напряжения импульсов, выделяющейся на резисторе R , который включен в цепь питания ГДГ по постоянному току. В данной схеме ГДГ 1 и резистор 5 обеспечивают детектирование и выделение напряжения импульсов, величина которого пропорциональна затуханию во влажном материале, т. е. здесь реализуется автодинный принцип приема сигнала [5].

Отметим, что применение импульсной модуляции СВЧ-сигнала обеспечивает более надежную регистрацию слабых сигналов измерителем напряжения.

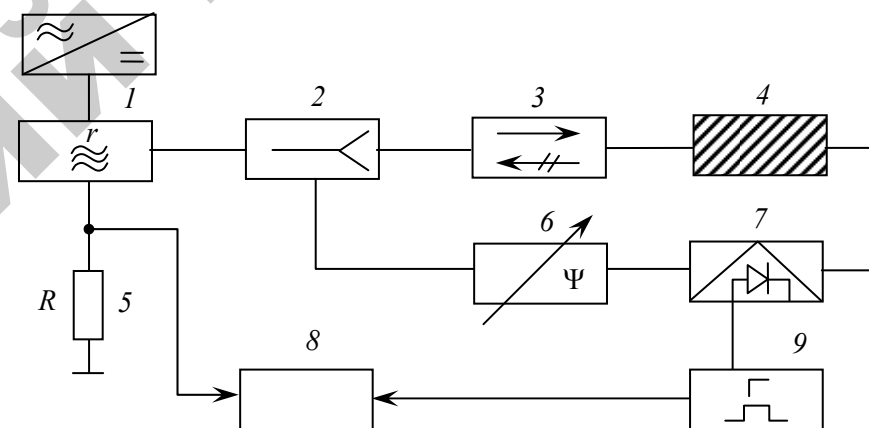


Рис. 3.35. Структурная схема СВЧ-измерителя влажности с использованием автодинного измерительного преобразователя:

1 — генератор СВЧ на диоде Ганна; 2 — делитель мощности (направленный ответвитель); 3 — ферритовый вентиль; 4 — первичный измерительный преобразователь, заполненный влажным материалом; 5 — резистор; 6 — фазовращатель; 7 — полупроводниковый модулятор СВЧ; 8 — устройство формирования сигнала и измеритель напряжения; 9 — генератор прямоугольных импульсов

Получим соотношения, связывающие изменение постоянной составляющей тока ДГ или падения напряжения на резисторе R с затуханием во влажном материале и фазовым набегом в цепи ВОС. Исходя из принципа работы автодинного СВЧ-влажмера, генератор на ДГ работает на несогласованную нагрузку, изменение пара-

метров которой приводит к изменению выходной мощности, высокочастотного напряжения и постоянной составляющей тока генератора СВЧ.

Запишем уравнение баланса активных проводимостей ГДГ, работающего на согласованную нагрузку, в виде

$$G_{HO} + G_e(U_m U_0) + G_p(w) = 0, \quad (3.168)$$

где G_{HO} – активная проводимость согласованной нагрузки;

$G_e(U_m U_0)$ – средняя по первой гармонике активная проводимость ДГ, зависящая от высокочастотного напряжения U_m и постоянного напряжения смещения на ДГ U_0 ;

$G_p(w)$ – проводимость колебательной системы генератора, в общем случае, зависящая от частоты w . В дальнейшем будем полагать, что $G_p(w) = G_p = \text{const}$, т. е. проводимость колебательной системы при малых изменениях генерируемой частоты постоянна.

Пусть при изменении активной проводимости нагрузки G_{HO} на величину ΔG_H амплитуда высокочастотного напряжения U_m получит приращение ΔU_m , а проводимость G_e – приращение ΔG_e .

Из (3.168) находим:

$$-\Delta G_e = \Delta G_H. \quad (3.169)$$

Здесь приращение активной составляющей ДГ по первой гармонике высокочастотного тока равно:

$$\Delta G_e = \Delta G'_e \Delta U_m + \frac{G''_e}{2} (\Delta U_m)^2, \quad (3.170)$$

$$\text{где } G'_e = \frac{\partial G_e(U_e, i_0)}{\partial U_m} \quad U_m = U_{m0};$$

$$G''_e = \frac{\partial^2 G_e(U_m, i_0)}{\partial U_m^2} \quad U_m = U_{m0}.$$

Здесь U_{m0} – амплитуда высокочастотного напряжения при согласованной нагрузке.

Из (3.169) с учетом (3.170) получим квадратное уравнение:

$$\Delta U_m^2 + 2 \frac{G'_e}{G''_e} \Delta U_m + 2 \frac{\Delta G_H}{G''_e} = 0,$$

решение которого дает соотношение для приращения амплитуды высокочастотного напряжения в виде

$$\Delta U_m = -\frac{G'_e}{G''_e} + \sqrt{\left(\frac{G'_e}{G''_e}\right)^2 - 2 \frac{\Delta G_H}{G''_e}}. \quad (3.171)$$

Знак плюс в выражении (3.171) принят исходя из условия равенства нулю приращения амплитуды высокочастотного напряжения ΔU_m при $\Delta G_H = 0$.

Учитывая, что для ДГ $\frac{2\Delta G_H G''_e}{G'^2_e} \ll 1$, раскладываем второе слагаемое в (3.171) в ряд до величин второго порядка малости включительно:

$$\Delta U_m \approx -\frac{\Delta G_H}{G'_e} \left(1 + \frac{G''_e}{2G'_e} \Delta G_H\right). \quad (3.172)$$

Относительное изменение постоянной составляющей тока Δi_0 генератора СВЧ за счет изменения нагрузки диода Ганна обычно составляет величину $\leq 0,1$. Следовательно, для приращения постоянной составляющей тока можно записать:

$$\Delta i_0 = \frac{\partial i_0}{\partial U_m} \frac{\Delta U_m}{U_m = U_{m0}}. \quad (3.173)$$

После подстановки в (3.173) выражения (3.172) получим:

$$\Delta i_0 = -\frac{\partial i_0}{\partial U_m} \left(1 + \frac{G_e''}{2(G_e')^2} \Delta G_H \right) \frac{\Delta G_H}{G_e'}. \quad (3.174)$$

Активная составляющая проводимости нагрузки ГДГ, выраженная через модуль Γ и фазу ψ коэффициента передачи цепи обратной связи имеет вид [5]

$$G_H = \frac{G_{H0} (1 - |S_{12}|^2)}{1 + |S_{12}|^2 + 2|S_{12}| \cos \psi},$$

откуда приращение проводимости нагрузки

$$\Delta G_H = G_H - G_{H0} = \frac{-2|S_{12}| G_{H0} [|S_{12}| + \cos \psi]}{1 + |S_{12}|^2 + 2|S_{12}| \cos \psi}. \quad (3.175)$$

Модуль коэффициента передачи цепи ВОС $|S_{12}| = \sqrt{\frac{P_{ос}}{P_H}} = \frac{U_{ос}}{U_m}$

характеризует потери мощности в ее элементах, в том числе во влажном материале.

Связь коэффициента передачи $|S_{12}|$ с затуханием во влажном материале, выраженным в децибелах, определяется равенством:

$$N = 8,686 \ln |S_{12}|.$$

Величины производных $\frac{\partial i_0}{\partial U_m}$, $\frac{\partial G_e}{\partial U_m}$ и $\frac{\partial^2 G_e}{\partial U_m^2}$ определяются соответственно из выражений для постоянной составляющей тока [1, 5]

$$i_0 = i_{kp} e^{1-Z_0} [Z_0 B_0(Z_1) - Z_1 B_1(Z_1)] + i_{kp} \beta Z_0$$

и активной составляющей проводимости ДГ по первой гармонике тока

$$G_e = g_{kp} \left[2e^{1-Z_0} \left(B_0(Z_1) - (1+Z_0) \frac{B_1(Z_1)}{Z_1} \right) - \beta \right],$$

где $Z_0 = \frac{U_0}{U_{kp}}$; $Z_1 = \frac{U_m}{U_{kp}}$; $g_{kp} = \frac{i_{kp}}{U_{kp}}$;

U_0 – постоянное напряжение на ДГ;

β – коэффициент, характеризующий потери в ДГ;

$B_0(Z)$, $B_1(Z)$ – функция Бесселя от мнимого аргумента первого рода нулевого и первого порядков. Смысл обозначений i_{kp} , U_{kp} ясен из рис. 3.36, на котором представлена вольт-амперная характеристика ДГ.

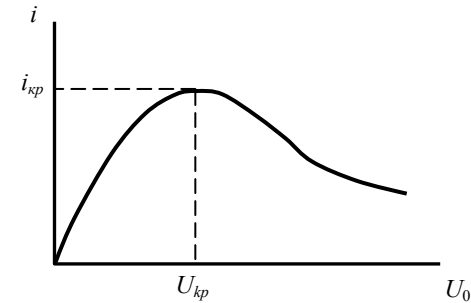


Рис. 3.36. Вольт-амперная характеристика диода Ганна

В результате вычислений находим:

$$\frac{\partial i_0}{\partial U_m} = g_{kp} e^{1-Z_0} [Z_0 B_1(Z_1) - Z_1 B_0(Z_1)]; \quad (3.176)$$

$$G_e' = \frac{2g_{kp}}{U_{kp}} e^{1-Z_0} \left[B_1(Z_1) \left[1 + \frac{2(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] - \frac{1+Z_0}{Z_1} B_0(Z_1) \right]; \quad (3.177)$$

$$G_e'' = \frac{2g_{kp} \exp(1-Z_0)}{U_{kp}^2} \times \left\{ \left[B_0(Z_1) \left[1 + \frac{3(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] \right] - \frac{B_1(Z_1)}{Z_1} \left[2+Z_0 + \frac{6(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] \right\}. \quad (3.178)$$

На рис. 3.37 приведены результаты расчета нормированного приращения постоянной составляющей тока, протекающего через ДГ и резистор R в цепи его питания в зависимости от затухания во влажном материале N при значениях фазы в цепи ВОС $\psi = 0$ и $\psi = \pi$. Нормировка текущего значения приращения постоянного тока произведена по приращению тока Δi_0^0 , соответствующему затуханию $N^0 = -80$ дБ.

По экспериментальной вольт-амперной характеристике ДГ найдены значения $i_{kp} = 0,36$ А, $U_{kp} = 3,6$ В, $g_{kp} = 0,1$ Ом⁻¹. Согласно нагрузке соответствует проводимость $G_{HO} = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹. Напряжение источника питания $U_0 = 9$ В. Оптимальными с точки зрения выходной мощности нормированные величины Z_0 и Z_1 являются: $Z_0 = 2 \dots 3$, $Z_1 = 2,5 \dots 3,5$ [1, 5]. При расчете принимаем $Z_0 = Z_1 = 2,5$.

Из приведенных графиков видно, что линейная зависимость приращения постоянной составляющей тока от затухания влажного образца для $\psi = 0$ и $\psi = \pi$ сохраняется до $N = -20$ дБ.

Отметим, что при $\psi = \frac{\pi}{2}$ динамический диапазон линейного участка значительно уменьшается. Действительно, из (3.174) с учетом (3.175) получим для приращения постоянной составляющей тока ДГ следующее равенство:

$$\Delta i_0 = 2 \frac{\partial i_0}{\partial U_m} \left(1 - \frac{G_e'' G_{HO} |S_{12}|^2}{G_e' (1 + |S_{12}|^2)} \right) \frac{G_{HO} |S_{12}|^2}{G_e' (1 + |S_{12}|^2)}.$$

Из него видна квадратичная зависимость Δi_0 от модуля коэффициента передачи $|S_{12}|$ ВОС. Это обуславливает при $|S_{12}| \ll 1$ более быстрый (в 2 раза) спад функции $\ln \frac{\Delta i_0}{\Delta i_0^0}$ в зависимости от N .

Результаты измерения напряжения на нагрузке автодина (сопротивлении R в цепи питания ГДГ), обусловленного изменением постоянной составляющей тока, приведены на рис. 3.37 и 3.38 следует, что результаты расчета и эксперимента находятся в удовлетворительном соответствии.

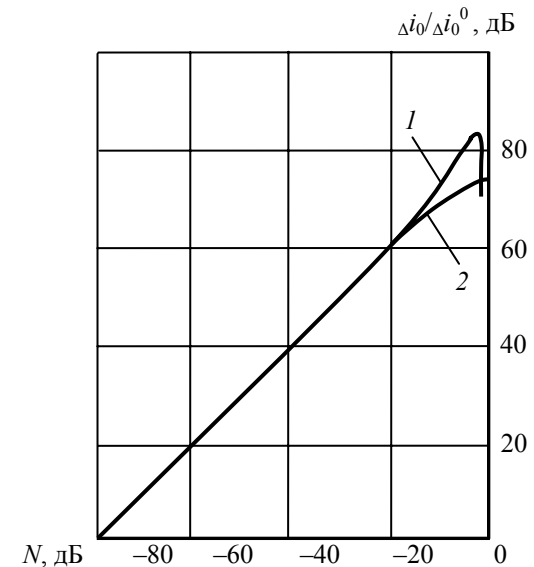


Рис. 3.37. Зависимость нормированного приращения постоянного тока генератора от затухания во влажном материале:
1 — $\psi = \pi$; 2 — $\psi = 0$

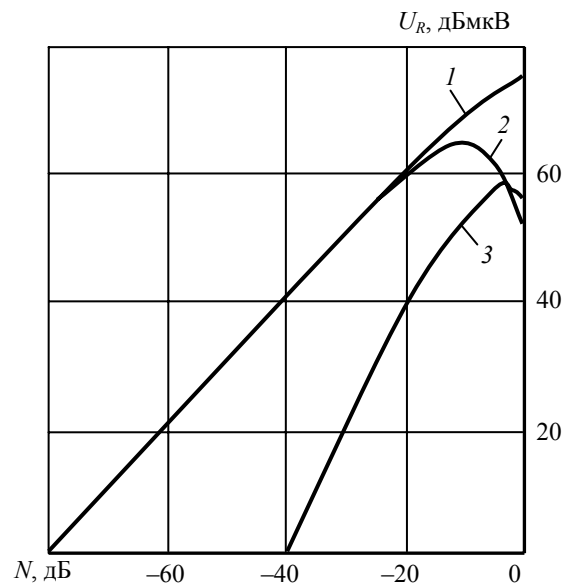


Рис. 3.38. Экспериментальные зависимости напряжения на нагрузке автодинного измерительного преобразователя от затухания во влажном материале: 1 – $\psi = \pi$; 2 – $\psi = 0$; 3 – $\psi = \pi/2$

3.3.4. Измерительный преобразователь на основе автодинного смесителя частоты

Структурная схема измерителя влажности приведена на рис. 3.39. Схема работает следующим образом. Сигнал от генератора СВЧ 1 на частоте ω_c , проходя через ферритовые развязывающие вентили 2 и первичный измерительный преобразователь (ПИП), заполненный влажным материалом, поступает на автогенератор на диоде Ганна (ДГ), который генерирует частоту $\omega_c \neq \omega_\Gamma$. Разность частот $\Delta\omega = \omega_c - \omega_\Gamma$ выбирается больше полосы синхронизации генератора, чем обеспечивается так называемый асинхронный режим работы. В этом режиме амплитуда огибающей СВЧ-колебаний изменяется с частотой биений [48]. В результате автоде-

тектирования с помощью диода Ганна на колебательном контуре 6, настроенном на частоту биений, выделяется огибающая напряжения биений. Амплитуда напряжения биений, зависящая от затухания во влажном материале, с выхода резистора 5 подается на измеритель низкочастотного напряжения 7.

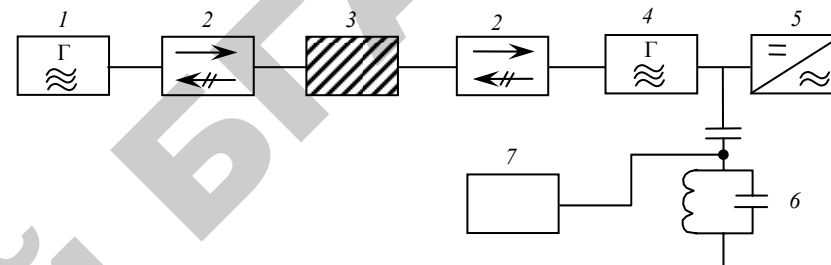


Рис. 3.39. Структурная схема СВЧ-измерителя влажности с использованием измерительного преобразователя на основе автодинного смесителя частоты: 1 – генератор стандартных СВЧ-сигналов; 2 – ферритовый вентиль; 3 – первичный измерительный преобразователь, заполненный влажным материалом; 4 – генератор на диоде Ганна; 5 – источник постоянного напряжения; 6 – параллельный колебательный контур, настроенный на частоту биений; 7 – измеритель низкочастотного напряжения

Приведем краткий теоретический анализ автодинного смесителя частоты. Пусть собственная частота генератора ω_Γ , а частота внешнего сигнала ω_c находятся за пределами полосы синхронизации (асинхронный режим генератора), тогда выходное напряжение генератора можно выразить как [45]:

$$U(t) = A(t) \cos[\omega_c(t) + \varphi(t)]. \quad (3.179)$$

Здесь $A(t), \varphi(t)$ – соответственно амплитуда СВЧ-колебаний и мгновенная разность фаз между амплитудами напряжений автономного генератора E и внешнего сигнала A , зависящие от частоты биений СВЧ-колебаний Ω .

Форма записи выходного сигнала в виде (3.179) характеризует сложное колебание с амплитудной и угловой модуляцией, спектр которого состоит из составляющих разных амплитуд, разнесенных друг относительно друга на величину частоты биений [45].

Разность фаз $\varphi(t)$ в асинхронном режиме генератора ($m > 1$) определяется соотношением

$$\varphi(t) = 2 \arctg \left[1/m + \sqrt{(m^2 - 1)/m^2} \operatorname{tg}(0,5\Omega t) \right], \quad (3.180)$$

где $m = \Delta\omega / A = x / (E/A)$ – параметр, определяющий отношение расстройки частот внешнего сигнала ω_c и генерируемых колебаний ω_Γ ($\Delta\omega = \omega_c - \omega_\Gamma$) к полосе захвата генератора $\alpha = \omega_0 E / AQ_{BH}$;

Q_{BH} – внешняя добротность;

$X = Q_{BH} \Delta\omega / \omega_0$ – обобщенная расстройка;

ω_0 – собственная частота колебательной системы генератора СВЧ;

A_0 , E – амплитуды СВЧ-колебаний автогенератора и внешнего сигнала.

Частота биений, выделяющаяся на нагрузке автодинного смесителя, равна [45]:

$$\Omega = (\omega_c - \omega_\Gamma) \sqrt{(m^2 - 1)/m^2}. \quad (3.181)$$

Амплитуда биений СВЧ-колебаний, меняющаяся по интенсивности с частотой Ω , равна [1,5]:

$$A(t) = A_0 + (2EQ_H / Q_{BH}) \cos \varphi(t), \quad (3.182)$$

где Q_H – нагруженная добротность.

Для нахождения функции $\cos \varphi(t)$ воспользуемся выражением (3.180). После тригонометрических преобразований с учетом неравенства $m^{-1} < 1$, которое выполняется в асинхронном режиме генератора [45], получим:

$$\cos \varphi(t) = b \sin(\Omega t - \tau) - \left(\frac{b}{2m} \right) \sin 2(\Omega t - \tau), \quad (3.183)$$

где $b = \sqrt{\frac{m^2 - 1}{m^2}}$; $\operatorname{tg} \tau = \sqrt{m^2 - 1}$.

Контур в цепи питания смесителя настроен на частоту Ω , поэтому вторым слагаемым в (3.183) можно пренебречь. С учетом этого допущения из (3.182) и (3.183) получим выражение для нормированной амплитуды огибающей СВЧ-биений в виде

$$\frac{U_\Omega}{A_0} = \frac{2EQ_H}{AQ_{BH}} \sqrt{\frac{m^2 - 1}{m^2}}. \quad (3.184)$$

Синхронному режиму генератора соответствует $m = 1$ и в этом случае $U_\Omega = 0$. Вдали от границы с синхронным режимом $m \gg 1$ частота биений Ω практически равна разности частот $\omega_c - \omega_\Gamma$ и не зависит от мощности внешнего сигнала. Напряжение биений в этом случае меняется во времени по закону, близкому к гармоническому. По мере приближения параметра m к единице амплитуда напряжения и частота биений уменьшаются и при захвате частоты генератора внешним сигналом обращаются в нуль. Вблизи области захвата частоты напряжение частоты биений имеет не гармонический характер.

Определим значение нормированной входной мощности N_Γ , при которой начинает проявляться отклонение от линейности в зависимости амплитуды напряжения биений от мощности внешнего сигнала. Реально наблюдаемые зависимости амплитуды напряжения и частоты биений от входной мощности показывают, что нелинейность и отклонение частоты биений от разности частот $\Delta\omega$ проявляются одновременно в режиме, близком к синхронному, называемому режимом частичного увеличения частоты. В режиме частичного увеличения частоты в значительной степени начинает сказываться нелинейность диода Ганна на его выходные параметры.

Используя формулы $\Omega = \Delta\omega \sqrt{\frac{m^2 - 1}{m^2}}$ и $m = \frac{x}{(E/A)}$, с учетом обо-

значения $\beta = \frac{\Omega}{\Delta\omega}$, найдем формулу для нормированной мощности внешнего сигнала, выраженную в децибелах, которая дает приближенно границу перехода амплитудной характеристики смесителя по разностной частоте, а так же частоты биений от линейных к нелинейным зависимостям в виде $N_\Gamma = +8,686 \ln(x\sqrt{1 - \beta^2})$, где коэф-

коэффициент β в режиме частичного увеличения частоты близок к единице (0,9–0,95).

Расчетные нормированные графики амплитуды напряжения и частоты биений приведены на рис. 3.40 для трех значений обобщенной расстройки X , из которых следует, что с увеличением расстройки линейный участок динамического диапазона смесителя возрастает на 20–25 дБ. Нормировка текущего значения амплитуды напряжения биений произведена относительно амплитуды напряжения биений U_{Ω}^0 , соответствующей затуханию $N = 70$ дБ. Частота биений на линейном участке выходной характеристики не меняется, а при достижении уровня входной мощности N_{Γ} начинает уменьшаться, стремясь к нулю. Линейный участок амплитудной характеристики в соответствии с расчетом по формуле (3.175) для $\beta = 0,9$ ограничивается значениями $N_{\Gamma} = -11,2$ дБ, $X = 0,63$, $N_{\Gamma} = -31,2$ дБ, $X = 0,063$. Увеличение линейного участка динамического диапазона смесителя с увеличением расстройки происходит ввиду расширения полосы синхронизации, а при широкой полосе синхронизации требуется большой входной сигнал для захвата частоты генератора внешним сигналом [1].

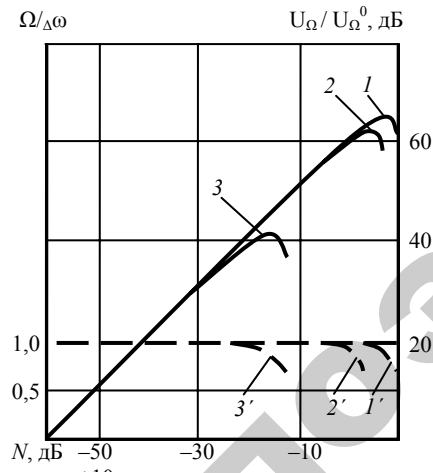


Рис. 3.40. Расчетные нормированные графики амплитуды напряжения и частоты биений от затухания во влажном материале:

1, 1' – $x = 1,05$; 2, 2' – $x = 0,63$; 3, 3' – $x = 0,063$

Для увеличения динамического диапазона измерителя влажности (рис. 3.39), построенного на автодинном смесителе частоты, в сторону больших мощностей входного сигнала (меньших значений затухания влажного материала) используем в генераторе внешнюю обратную связь (ВОС) по СВЧ.

Такое построение схемы (рис. 3.40) позволит выбором фазы в цепи ВОС управлять характеристиками автогенератора и автодинного смесителя в целом [1]. Внешняя обратная связь по СВЧ в схеме СВЧ-влажномера на рис. 3.33 выполнена с помощью циркулятора 11, делителя мощности 8 и короткозамкнутых отрезков передающей линии 9 и 12. Величины коэффициента передачи и фазы в цепи обратной связи регулируются соответственно аттенуатором 10 и подвижным короткозамыкателем 12.

Найдем соотношение для амплитудной характеристики по разностной частоте и граничного значения мощности внешнего сигнала N_{Γ} для рассматриваемой схемы.

Для этой цели воспользуемся соотношениями для полосы захвата α_{oc} и коэффициента m_{oc} для автогенератора СВЧ с ВОС из [1]:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{oc} &= \frac{E/A}{2Q_{BH} \left(1 + |S_{12}^2| + 2[|S_{12}^2| \cos \psi] \right)^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{(E/A)(1 - |S'_{12}| \cos \psi)}{2Q_{BH}} \\ m_{oc} &= \frac{x(1 + S_{12}^2 + 2S_{12} \cos \psi)^{\frac{1}{2}}}{E/A} \approx \frac{x(1 + S_{12} \cos \psi)}{E/A} \end{aligned} \right\} (3.185)$$

где $|S_{12}| = 2\sqrt{\frac{P_{oc}}{P}}$,

ψ – модуль и фаза коэффициента передачи ВОС;

P_{oc}, P – соответственно мощности в цепи ВОС и автогенератора.

Соотношения для амплитудной характеристики по разностной частоте и N_{Γ} получим соответственно из (3.184) и (3.185) заменой в них $\alpha = \alpha_{oc}$ и $m = m_{oc}$ в виде

$$\frac{A(t)-A}{A} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{U\Omega}{A} = \frac{E}{A} 2\eta_p \frac{\sqrt{(m_{oc}^2-1)/m_{oc}^2}}{(1+S_{12}^2+2S_{12}\cos\psi)^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.186)$$

$$N_{\Gamma} = 8,68 \ln \left[(1+S_{12}^2+2S_{12}\cos\psi)^{\frac{1}{2}} x \sqrt{1-\beta^2} \right], \quad (3.187)$$

$$\frac{\Omega}{\Delta\omega} = \left[(m_{oc}^2-1)/m_{oc}^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.188)$$

где $\eta_p = \frac{Q_H}{Q_{BH}}$ – КПД колебательной системы.

Влияние внешней обратной связи на амплитуду напряжения и частоту биений иллюстрируется на рис. 3.41. Расчет выполнен по формулам (3,186)–(3,188) при $X = 0,63$, $\frac{P_{oc}}{P} = -10,5$ дБ.

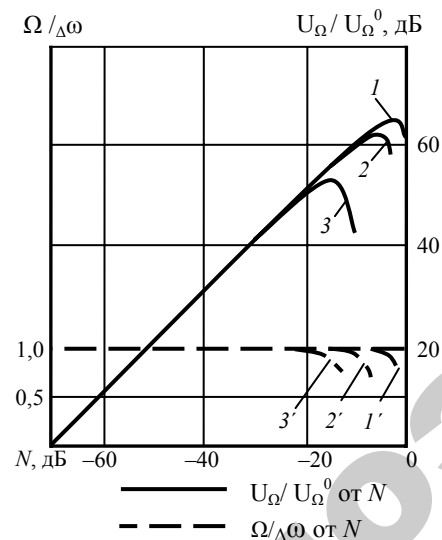


Рис. 3.41. Зависимость нормированных амплитуды и частоты биений от затухания во влажном материале при разных фазах в цепи внешней обратной связи:

1, 1' – $\psi = 0$; 2, 2' – $|S_{12}| = 0$; 3, 3' – $\psi = \pi$

Граничные значения входной мощности для $\beta = 0,9$ составляют: $N_{\Gamma} = -19,2$ дБ, $\psi = \pi$ и $N_{\Gamma} = -7,2$ дБ, $\psi = 0$. Таким образом, линейный участок динамического диапазона измерителя влажности увеличивается при $\psi = 0$ на 4 дБ по сравнению с прибором без обратной связи по СВЧ, частота биений при этом начинает уменьшаться при меньшем затухании (большей входной мощности). Эти факты объясняются уменьшением выходной мощности и повышением стабильности частоты генератора на ДГ с ВОС при $\psi = 0$ [1, 5].

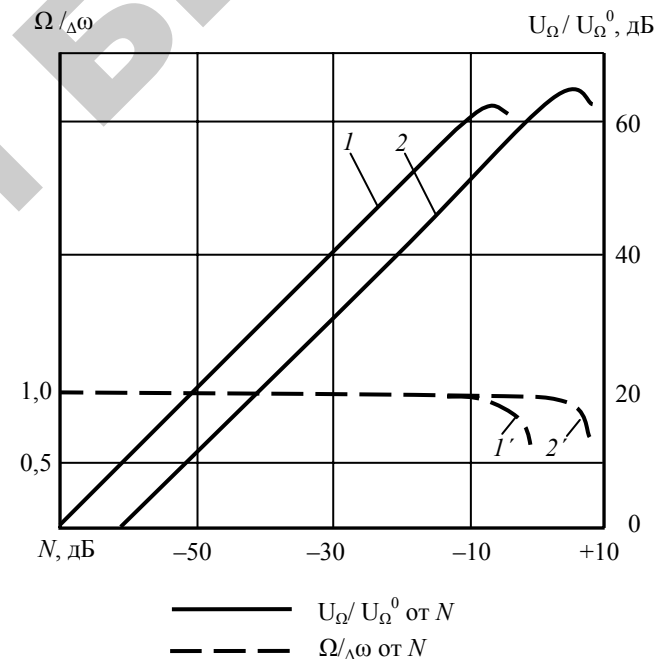


Рис. 3.42. Экспериментальные зависимости нормированных амплитуды напряжения и частоты биений от затухания во влажном материале:

1 – $|S_{12}| = 0$; 2 – $\psi = \pi$; 2' – $\psi = \pi$

Экспериментальные зависимости амплитуды напряжения и частоты биений от затухания во влажном материале представлены на рис. 3.42, из сравнения которых с расчетными видно их соответствие. Увеличение линейного участка динамического диапазона смесителя составляет 6–8 дБ, что согласуется с расчетными величинами.

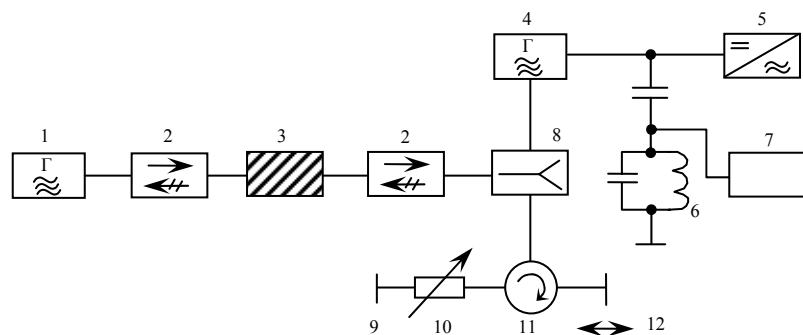


Рис. 3.43. Структурная схема СВЧ-измерителя влажности на автодинном смесителе частоты с расширенным динамическим диапазоном линейного участка амплитудной характеристики:

1 – генератор стандартных СВЧ-сигналов; 2 – ферритовый вентиль; 3 – первичный измерительный преобразователь, заполненный влажным материалом; 4 – генератор на диоде Ганна; 5 – источник постоянного напряжения; 6 – параллельный колебательный контур, настроенный на частоту биений; 7 – измеритель низкочастотного напряжения; 8 – делитель мощности; 9, 12 – неподвижный и подвижный короткозамкнутые поршни; 10 – переменный аттенуатор; 11 – циркулятор

3.3.5. Сравнительный анализ метрологических характеристик промежуточных измерительных преобразователей

Рассмотрим следующие метрологические характеристики автодинных (автодина и автодинного смесителя) промежуточных измерительных преобразователей: динамический диапазон и погрешность измерения затухания во влажном материале с учетом изменения температуры окружающей среды. Динамический диапазон линейного участка амплитудной характеристики автодинных промежуточных измерительных преобразователей (ПРИП) определяется как отношение мощности, прошедшей через влажный материал, в конце линейного участка (точка 1, рис. 3.42) к мощности собственных шумов автодина $P_{ш.авт.}$. В полосе частот Δf

$$\Delta N = 10 \lg \frac{P_{лин}}{P_{ш.авт.}} = 10 \lg \frac{P_{Г}}{P_{ш.авт.}} + 10 \lg \frac{P_{лин}}{P_{Г}} = \Pi_{авт.} + N_{лин}, \quad (3.189)$$

где $P_{Г}$ – выходная мощность автогенератора.

Потенциал автодина определяется по формуле

$$\Pi_{авт.} = 10 \lg (P_{Г} / P_{ш.авт.}). \quad (3.190)$$

Для автодина, используемого в качестве смесителя частоты в схемах на рис. 3.39 и 3.43, мощность собственных шумов определяется как [1, 5]:

$$P_{ш.авт.} = kT \Delta f F k_{ш}^2, \quad (3.191)$$

где $kT = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц,

$k_{ш}$ – отношение сигнал-шум на выходе автодина.

Коэффициент шума автодинного смесителя часто составляет величину $F = 20 - 30$ дБ [1, 5]. Принимая $k_{ш} = 1$ и полосу пропускания $\Delta f = 100$ кГц, по формуле (3.191) находим $P_{ш.авт.} = 4 \cdot 10^{-13}$ Вт. Мощность автогенератора на диоде Ганна (ДГ) $P_{Г} = 10$ мВт. С учетом этих данных потенциал автодинного смесителя частоты равен $\Pi_{авт.} = 104$ дБ.

Мощность собственных шумов автодина, используемого в схеме ПРИП на рис. 3.28, может быть выражена через относительную спектральную плотность амплитудных шумов W_a в заданной полосе частот Δf как $P_{ш.авт.} = W_a \Delta f P_{Г}$. Здесь W_a выражается в единицах на герц. Относительная спектральная плотность амплитудных шумов диода Ганна в полосе частот $\Delta f = 100$ кГц равна $W_a = 165$ дБ/Гц [123]. Принимая, как и ранее $P_{Г} = 10$ мВт, находим $\Pi_{авт.} = 105$ дБ.

Верхняя граница линейного участка амплитудной характеристики, или верхняя граница динамического диапазона $N_{лин}$ зависит от нелинейных процессов, протекающих в ГДГ и автодине в целом. В качестве верхней границы динамического диапазона примем ве-

личину затухания $N_{\text{лин}}$, при котором напряжение низкой частоты на выходе ПРИП отклоняется от линейной зависимости на величину δ_a , равную

$$\delta_a = \frac{y_3(a) - y_2(a)}{y_3(a)}, \quad (3.192)$$

где $a = \frac{E}{A_0}$.

Смысл обозначений $y_3(a)$ и $y_2(a)$ ясен из рис. 3.44.

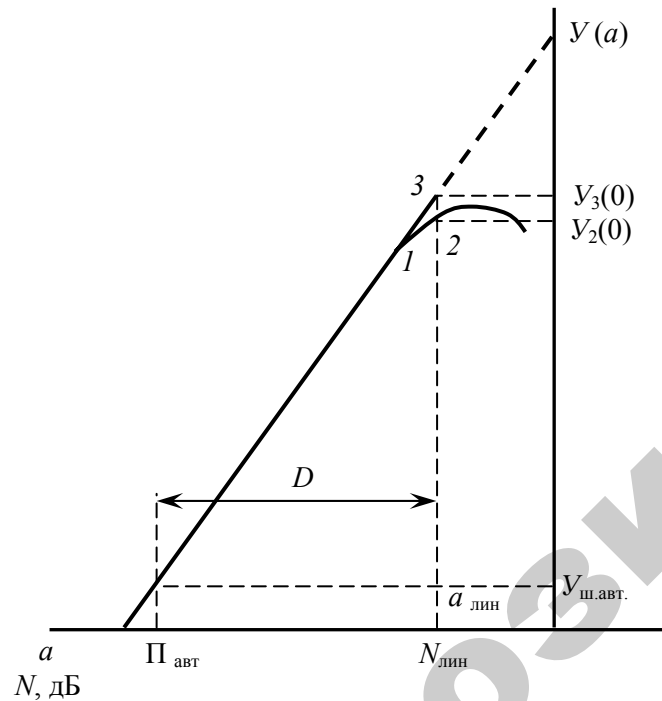


Рис. 3.44. Амплитудная характеристика автодинного первичного преобразователя:

1 – начало нелинейного режима; 2, 3 – отклонение от линейности амплитудной характеристики $Y(a)$ на величину δ_a процентов; $a = \frac{E}{A_0}$

Для ПРИП с использованием автодинного смесителя частоты формула для расчета отношения $N_{\text{лин}} = \frac{E}{A_{\text{лин}}}$, выраженного в децибелах, находится подстановкой (3.187) в (3.192) и имеет вид

$$N_{\text{лин}} = 8,686 \ln \left[\left(1 + |S_{12}|^2 + 2|S_{12}|^2 \cos \psi \right) (1 - (1 - \delta_a)^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.193)$$

В ПРИП на автодине (рис. 3.28) верхняя граница линейного участка динамического диапазона $N_{\text{лин}}$ для $\psi = 0$ вычисляется по формуле

$$N_{\text{лин}} = 8,686 \ln \frac{-(1 + k_2 - 2\delta_a) + \sqrt{(1 + k_2)^2 - 4\delta_a k_2}}{2(1 - \delta_a)}, \quad (3.194)$$

где $K_2 = G_e'' G_{HO} / (G_e')^2$, которая получена подстановкой выражений (3.174) и (3.175) в формулу (3.193).

Для линейного режима автодина справедливы неравенства $\Gamma \ll 1$ и $k_2 \Gamma \ll 1$, учет которых в выражениях (3.174) и (3.175) дает значение $y_3(0) = y_3\left(\frac{E}{A_0}\right) = \Gamma k_1$, где

$$k_1 = -2 \frac{\partial i_0}{\partial U_m} \frac{G_{HO}}{G_e'}.$$

Результаты расчета динамического диапазона автодинных ПРИП приведены в табл. 3.5. Расчет выполнен при следующих исходных данных: обобщенная расстройка $x = 0,63 \frac{\Delta \omega}{2\pi} = 20$ МГц; $|S_{12}| = 0,6$; отклонение от линейной амплитудной характеристики – один децибел ($\delta_a = 0,1$); нормированные значения напряжений ГДГ – $Z_0 = Z_1 = 2,5$.

Таблица 3.5

Результаты расчета динамического диапазона автодинных ПРИП

Наименование параметра	ПРИП на автодине (рис. 3.35)		ПРИП на автодином смесителе частоты		
	$\psi = \pi$	$\psi = 0$	Рис. 3.39	Рис. 3.43	
				$\psi = \pi$	$\psi = 0$
$N_{\text{лин}}, \text{дБ}$	-15	-20	-11,2	-19,2	-7,2
$\Delta N, \text{дБ}$	90	85	92,8	84,2	96,8

Из табл. 3.5 следует, что динамический диапазон автодинных ПРИП находится в пределах 84–96 дБ и наиболее высокое его значение достигается в автодинном смесителе с внешней обратной связью по СВЧ при $\psi = 0$.

Погрешность измерения затухания во влажном материале зависит от непостоянства напряжения U_{Ω} на нагрузке автодинного ПРИП. Непостоянство величин низкочастотного напряжения U_{Ω} обуславливается изменением амплитуды и частоты автогенератора (автодина), а в ПРИП на автодинном смесителе частоты еще и изменением мощности и частоты генератора внешнего сигнала. Амплитуда и частота колебаний автодина и внешнего генератора меняются под действием ряда дестабилизирующих факторов: пульсации напряжения источников питания, температуры, влажности, вибрации и т. п. [5].

Для уменьшения влияния непостоянства собственных частот автодина и внешнего генератора на результаты измерения величина низкой (промежуточной) частоты выбирается 20 и более мегагерц [111].

Абсолютное ΔU_{Ω} и относительное $\frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}}$ изменения выходного низкочастотного напряжения ПРИП на автодинном смесителе частоты при непостоянстве мощностей автогенератора P_{Γ} и внешнего генератора P_c получим из выражения (3.176), используя методику [111], в виде:

$$\Delta U_{\Omega} = \pm \left| \frac{r_p' (m_{oc}^2 - 2)}{m_{oc} \sqrt{m_{oc}^2 - 1}} \right| \frac{4\Delta P_c}{G_H E}; \quad \frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} = \pm \left| \frac{m_{oc}^2 - 2}{m_{oc}^2 - 1} \right| \frac{\Delta P_c}{2P_c}; \quad (3.195)$$

$$\Delta U_{\Omega} = \pm \left| \frac{2r_p' x'}{m^2 \sqrt{m^2 - 1}} \right| \frac{\Delta P_{\Gamma}}{G_H A_0}; \quad \frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} = \pm \left| \frac{\Delta P_{\Gamma} / P_{\Gamma}}{2(m_{oc}^2 - 1)} \right|. \quad (3.196)$$

Выражения (3.195) и (3.196) позволяют вычислить величины относительного и абсолютного изменения U_{Ω} на линейном участке динамического диапазона, а также в начале его нелинейного участка. В первом случае, как это было показано в подразделе 3.3.4, принимаем $\beta = 0,99$, а во втором – $\beta = 0,9$. Наибольший практический интерес представляет первый случай, для которого относительные изменения U_{Ω} при вариациях мощностей автодина и внешнего генератора равны:

$$\left(\frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} \right)_c = \pm 0,495 \left(\frac{\Delta P_c}{P_c} \right); \quad (3.197)$$

$$\left(\frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} \right)_c = \pm 0,115 \left(\frac{\Delta P_{\Gamma}}{P_{\Gamma}} \right). \quad (3.198)$$

Из сравнения формул (3.197) и (3.198) следует, что при прочих равных условиях изменение мощностей внешнего генератора сильнее сказывается на относительном изменении напряжения на нагрузке автодинного смесителя частоты и, следовательно, на погрешности измерения затухания влажного материала. В СВЧ-влажномере на автодинном смесителе частоты автодин и внешний генератор построены на одностипном ГДГ, поэтому будем полагать

$$\Delta P / P = \Delta P_c / P_c = \Delta P_{\Gamma} / P_{\Gamma} = T_{\text{км}} \Delta T / P_{\Gamma \text{гр}},$$

где ΔT – перепад температур;

$P_{\Gamma_{\text{ср}}}$ – мощность ГДГ при температуре, соответствующей середине выбранного участка;

$T_{\text{км}}$ – крутизна зависимости мощности ГДГ от температуры.

Определим относительное изменение низкочастотного напряжения на выходе автодинного смесителя частоты при изменении температуры на один градус. На рис. 3.44 приведены графики зависимостей выходной мощности ГДГ от температуры, заимствованные из [60], по которым находим для частоты $f_{\Gamma} = 10$ ГГц $T_{\text{км}} = -0,375$ мВт/град. При этих данных относительное изменение мощности для $P_{\Gamma_{\text{ср}}} = 40$ мВт будет составлять величину $\frac{\Delta P}{P} = 9,375 \cdot 10^{-3}$ град $^{-1}$ или $\frac{\Delta P}{P} = 4,07 \cdot 10^{-2}$ дБ/град. Тогда по формулам (3.197) и (3.198) находим температурную погрешность генератора СВЧ-сигналов ξ_c и автодина ξ_{Γ} :

$$\xi_c = \left(\frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} \right)_c = \pm 0,02 \text{ дБ/град};$$

$$\xi_{\Gamma} = \left(\frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} \right)_{\Gamma} = \pm 0,0047 \text{ дБ/град}.$$

Таким образом, изменение температуры автодинного генератора-смесителя практически не вносит погрешностей в измерение затухания ВМ.

Абсолютное $\Delta S_{\Omega} = \Delta i_0 R$ и относительное $\frac{\Delta U_{\Omega}}{U_{\Omega}} = \frac{\Delta i_0 R}{i_0 R}$ изменения выходного низкочастотного напряжения ПРИП на автодине найдем из выражения постоянного тока ГДГ (3.164), которое с учетом (3.165) при $\psi = 0$ перепишем в виде

$$\Delta i_0 = k_1 \left(1 - \frac{k_2 \Gamma}{1 + \Gamma} \right) \frac{\Gamma}{1 + \Gamma}, \quad (3.199)$$

$$\text{где } k_1 = -2 \frac{\partial i_0}{\partial U_m} \frac{G_{HO}}{G'_e} = -F_1 F_2 G_{HO} U_{kp},$$

$$k_2 = \frac{G''_e G_{HO}}{(G'_e)^2} = \frac{F_3}{F_2} \frac{G_{HO}}{2g_{kp} e^{1-Z_0}},$$

$$F_1 = Z_0 B_1(Z_1) - Z_1 B_0(Z_1),$$

$$F_2 = B_1(Z_1) \left[1 + \frac{2(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] - \frac{1+Z_0}{Z_1} B_0(Z_1),$$

$$F_3 = B_0(Z_1) \left[1 + \frac{3(1+Z_0)}{Z_1^2} \right] - B_1(Z_1)/Z_1 \left[2 + Z_0 + \frac{6(1+Z_0)}{Z_1^2} \right].$$

Вариации амплитуды низкочастотного тока Δi_0 при изменении температуры, как это следует из выражения (3.199), рис. 3.45 и 3.46, обуславливаются изменением амплитуды СВЧ-напряжения

$$U_m = \sqrt{\frac{2P_r}{G_{HO}}} \text{ или } Z_1, \text{ тогда ГДГ } i_{kp} \text{ в критической точке вольт-}$$

амперной характеристики. С учетом влияния этих факторов запишем (3.200) в более удобном для дальнейших математических выкладок и расчетов виде

$$\Delta i_0 = I_{\Omega} = -B_1 F_1 F_2 + B_2 \frac{F_1 F_3}{i_{kp}}, \quad (3.200)$$

$$\text{где } B_1 = G_{HO} U_{kp} \frac{\Gamma}{1 + \Gamma};$$

$$B_2 = B_1^2 / 2e^{1-Z_0}.$$

Относительное изменение амплитуды низкочастотного тока (напряжения) в соответствии с методикой [6] в формулы (3.200)

$$\delta I_{\Omega} = \frac{\Delta I_{\Omega}}{I_{\Omega}} = - \frac{(F_1 F_3 B_2 / i_{кр})}{-F_1 F_2 B_1 + (F_1 F_3 B_2 / i_{кр})} \frac{\Delta i_{кр}}{i_{кр}} + \frac{Z_1 \frac{dI_{\Omega}}{dZ_1} \left(\frac{\Delta Z_1}{Z_1} \right)}{-F_1 F_2 B_1 + (F_1 F_3 B_2 / i_{кр})}, \quad (3.201)$$

$$\text{где } \frac{\Delta Z_1}{Z_1} = \frac{\Delta P_{\Gamma}}{2P_{\Gamma}}.$$

Из графиков на рис. 3.45 и 3.46 находим крутизну изменения мощности $T_{км} = -0,375$ мВт/град и критического тока $T_{кт} = -2 \cdot 10^{-3}$ А/град от температуры. Тогда относительные изменения мощности и критического тока при изменении температуры на 1 °С будут: $\frac{\Delta Z_1}{Z_1} = -4,687 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹, $\frac{\Delta i_{кр}}{i_{кр}} = -5,55 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹.

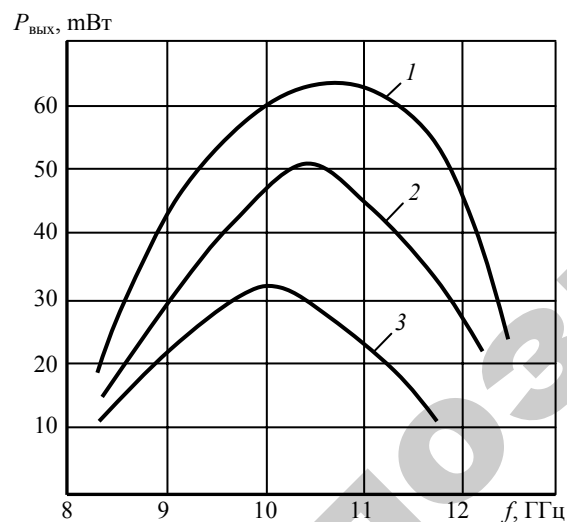


Рис. 3.45. Зависимость выходной мощности диода Ганна типа АА 723 от частоты при разных температурах:
1 – $T = -60$ °С; 2 – $T = 25$ °С; 3 – $T = 70$ °С

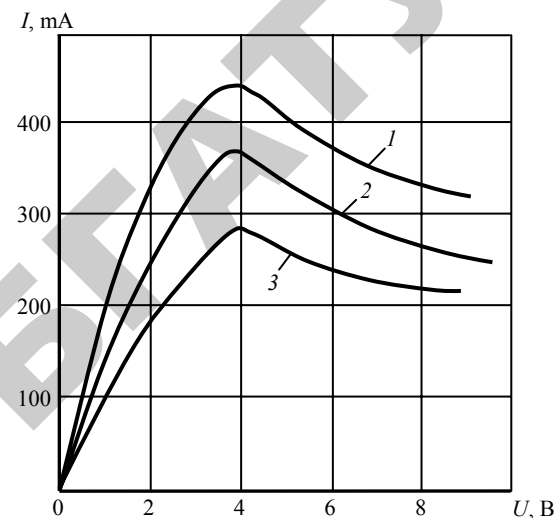


Рис. 3.46. Вольт-амперные характеристики диода Ганна типа АА 723А при разных температурах:
1 – $T = -60$ °С; 2 – $T = 25$ °С; 3 – $T = 70$ °С

В результате расчета при $z_1 = z_0 = 2,5$, $U_{кр} = 3,6$ В, $i_{кр} = 0,36$ А, $G_{HO} = 4 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹, получим:

$$\delta I_{\Omega} = 1,88 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\Delta i_{кр}}{i_{кр}} + 4,57 \frac{\Delta z_1}{z_1} = 0,1 \cdot 10^{-5} + 0,021 \approx 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}.$$

Относительная погрешность определения амплитуды напряжения на нагрузке автодина или затухания влажного материала определяется, главным образом, влиянием температуры на мощность автодина на диоде Ганна и составляет $\xi_{вм} = 9,12 \cdot 10^{-2}$ дБ/град.

Наименьшую температурную погрешность имеют ПРИП на детекторном СВЧ-диоде и автодинном смесителе частоты, а наибольший динамический диапазон линейного участка – автодинный смеситель частоты. По приведенным в табл. 3.6 метрологическим характеристикам лучшим является ПРИП на автодинном смесителе частоты, однако для его реализации требуется дополнительный генератор СВЧ, что приведет к возрастанию габаритно-весовых показателей СВЧ-влагомера.

Таблица 3.6

Сравнительная оценка рассмотренных ПРИП
по их метрологическим характеристикам

№	Тип ПРИП	Динамич. диапазон, дБ	Температурная погрешность, дБ / °С
1	Детекторный СВЧ-диод в режиме генератора напряжения	28–33	$1 \cdot 10^{-2}$
2	Детекторный СВЧ-диод в режиме генератора тока	60–65	$10 \cdot 10^{-2}$
3	Автодин	85–90	$9,1 \cdot 10^{-2}$
4	Автодинный смеситель частоты	84–97	$2,1 \cdot 10^{-2}$

В заключение отметим:

- разработаны конструкции генераторов на диодах Ганна для использования в СВЧ-влажномерах. Исследованы их основные характеристики – мощность, стабильность выходной мощности и частоты, температурный дрейф, спектр выходного сигнала, амплитудно-фазовые шумы;
- сформулированы основные требования к конструкции ПИП и оптимизированы параметры ПИП на прохождение и отражение;
- сформулированы основные требования к промежуточным измерительным преобразователям СВЧ-влажномеров;
- исследованы промежуточные ИП и рассмотрены их метрологические характеристики для ПИП на основе видеодетектирования, компенсационного типа, автодинного смесителя частоты и автодина;
- дан сравнительный анализ метрологических характеристик промежуточных ИП и даны рекомендации по их использованию;
- дана классификация методов СВЧ-влажнометрии и рекомендованы области их применения.

4. СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МИКРОВОЛНРОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК

Среди СВЧ-влажномеров, использующих оптические методы (методы свободного пространства) для измерения влажности, наибольшее распространение получили приборы на основе амплитудных параметров преобразования (раздел 3.1.1). Свыше 60 % из всех СВЧ-влажномеров, созданных в мире, построено по принципу измерения затухания СВЧ-мощности во влажном материале [1]. Их отличительные особенности – простота технических решений, высокая чувствительность, широкий динамический диапазон, достаточно высокая точность измерения, невысокая стоимость и относительная простота СВЧ-тракта, наличие парка контрольно-измерительных приборов и образцовых средств измерения затухания СВЧ-мощности, хорошее метрологическое обеспечение и ряд др., менее существенных преимуществ.

Основной недостаток метода по сравнению с фазовым и отражательным – это большее влияние на параметр преобразования плотности и температуры ВМ. В связи с этим приходится усложнять схемы температурной коррекции. Причем самый неблагоприятный случай – это влажнометрия среднedisперсных материалов, у которых знак температурной зависимости параметра преобразования и величина температурного коэффициента являются функцией влажности. Если для дискретных влажномеров это затруднение удается обойти, то для поточных приходится сужать динамический диапазон измерения влажности, что не всегда возможно. Остановимся на основных технических решениях СВЧ-влажномеров, разработанных в лабораториях СВЧ-влажнометрии БГАТУ и ИПФ БГУ, внедренных в сельскохозяйственное производство.

4.1. Влагомеры серии «Микрорадар»

4.1.1. Лабораторный СВЧ-влагомер «Микрорадар-101»

Влагомер лабораторный «Микрорадар-101» разработан в соответствии с ТУ РБ 14792938.001-98. Он предназначен для точного экспрессного измерения влажности зерна, зернопродуктов, муки и других сыпучих сельскохозяйственных материалов в лабораторных, а также цеховых условиях предприятий АПК.

В нем на современном уровне реализован одноканальный амплитудный метод измерения влажности сыпучих сельскохозяйственных материалов, основанный на измерении величины поглощения СВЧ-энергии микроволнового диапазона влагосодержащим диэлектриком с автоматической температурной коррекцией результата.

Влагомер разработан и изготовлен в соответствии с ГОСТ 29027-91 и международным стандартом МОЗМ Р59 и аттестован Госстандартом Республики Беларусь и Госстандартом Российской Федерации как средство измерения влажности повышенной точности (Сертификат № 5577 от 28.10.98 г.).

Внесен в Государственный реестр как базовая модель типоразмерного ряда амплитудных СВЧ-влагомеров серии «Микрорадар» под № РБ 03 09 00574-98, имеет сертификат соответствия Российской Федерации, внесен в Государственный реестр Российской Федерации под № 17787-98.

Основные технические характеристики «Микрорадар-101»:

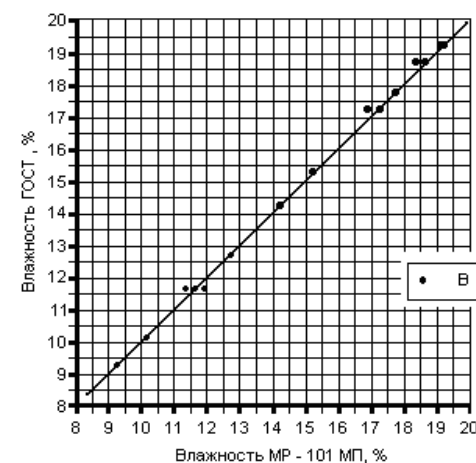
- диапазон измерения влажности зерна – 10–25 %;
- основная погрешность измерения – 0,5 % абс.;
- диапазон измерения влажности муки и макаронных изделий – 0,35 % абс.;
- время измерения, не более – 45 с;
- питание – 220 В, 50 Гц, 20 ВА;
- исполнение – IP-30.

Внешний вид влагомера «Микрорадар-101» приведен на рис. 4.1а, а его градуировочные характеристики – на рис. 4.1б. Являясь самым точным из ныне существующих экспресс-влагомеров зерна и зернопродуктов (СКО для зерна, муки, круп, макаронных изделий, семян подсолнечника, шрота и некоторых др. сыпучих материалов состав-

ляет от 0,06 до 0,2 %), влагомер прост и удобен в работе; позволяет легко и быстро прямо с клавиатуры менять градуировки, самостоятельно, без специальных знаний и навыков градуировать его на новые материалы. Фактически во влагомере реализован метод автоматической градуировки, при котором пользователю остается лишь ряд рутинных операций. Инструкция по методике поверки и градуировки влагомера приведена в разделе 5.



а)



б)

Рис. 4.1. Внешний вид лабораторного СВЧ-влагомера «Микрорадар-101» и градуировочная характеристика для зерна

При измерении влажности с помощью «Микрорадар-101» практически исключены ошибки персонала, так как процессор запрограммирован на режим общения с персоналом и сам контролирует процесс измерения. Влагомер МР-101 положил начало интеллектуализированному ряду измерителей влажности для сельскохозяйственного производства.

«Микрорадар-101» экспонировался на выставке новейших разработок лучших зарубежных фирм на международной конференции по СВЧ-влажнометрии в апреле 1999 г. (Athens, Georgia, USA) и получил высокую оценку специалистов [170–171].

4.1.2. Влагомеры зерна поточные серии «Микрорадар-113» МР-113, МР-113М и МР-113-2

Влагомеры «Микрорадар» серии 113 также реализуют алгоритм затухания СВЧ-энергии от влажности при поточных измерениях в технологических процессах сушки и первичной переработки зерна, мукомольном производстве, а также других технологических процессах в АПК.

Правильный выбор частотного диапазона [1, 5, 7, 12, 18] приводит к тому, что на погрешности измерения влажности зерна и зернопродуктов практически не влияют: засоренность, сезонность, район произрастания, сорт и тип зерна, распределение влаги и ряд других «неинформативных» мешающих факторов. В сочетании с автоматической температурной коррекцией и специальной конструкцией первичного преобразователя с формирователем потока это обеспечивает высокую точность измерения влажности.

Основные технические характеристики МР-113:

- основной диапазон измерения влажности – 10–25 %;
- по специальному заказу – 50 %;
- основная погрешность измерения влажности – $\pm 0,5$ %;
- исполнение – пылевлагозащитное (IP-54);
- аналоговый выход – 4–20 мА;
- выход для подключения к компьютеру – в стандарте RS-485;
- гарантия работы – 10 000 ч.

Внешний вид первичных преобразователей влагомеров серии МР-113 приведен на рис. 4.2, а примеры установки их в технологических линиях переработки зерна – на рис. 4.3.

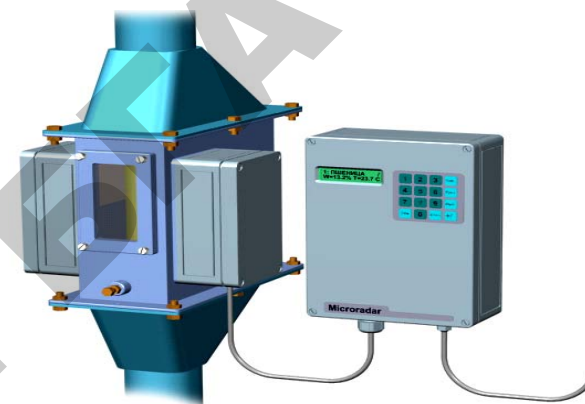
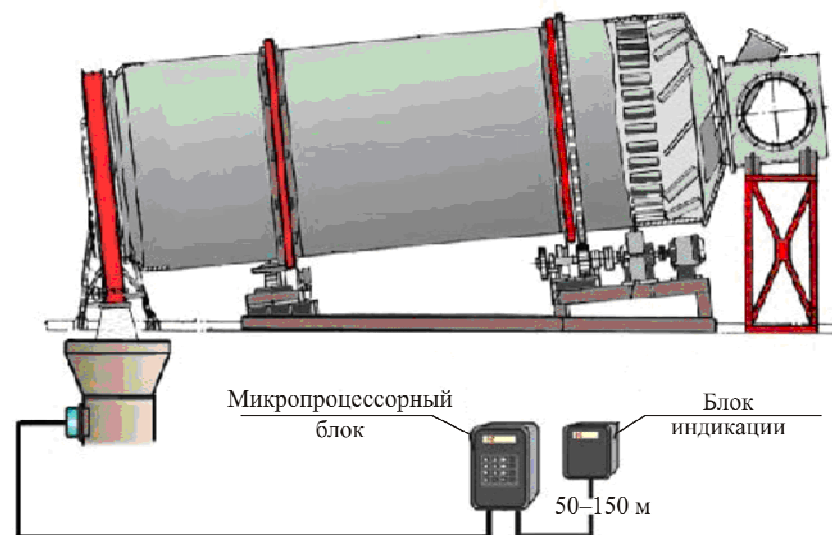


Рис. 4.2. Внешний вид влагомера «Микрорадар-113»



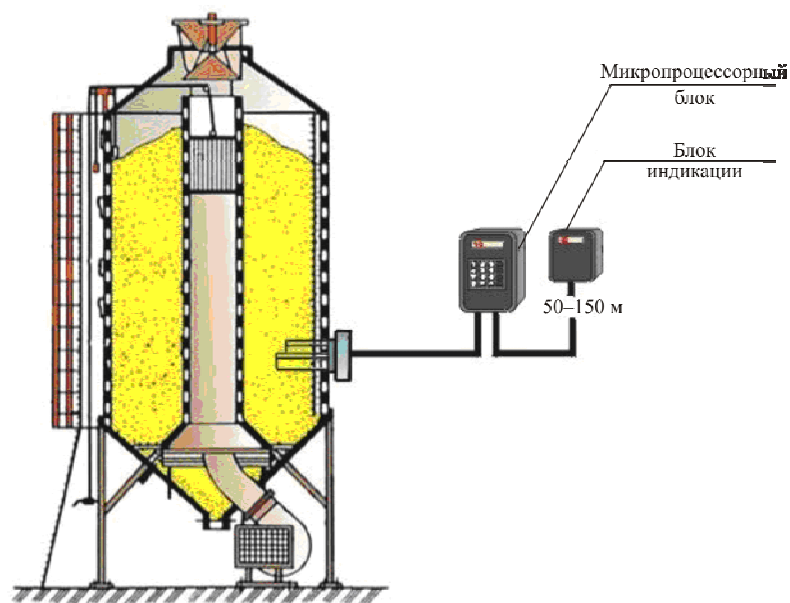


Рис. 4.3. Варианты установки МР-113 в технологических процессах сушки зерна

Микропроцессорная обработка позволяет: совмещать МР-113 с любым оборудованием (стандартизированный интерфейс); градуировать прибор одновременно на 9 зерновых культур с мгновенной перестройкой на любую из них; обеспечивать работу в режиме общения с оператором, выводя на экран усредненное значение влажности потока зерна; измерять его температуру и вводить автоматическую поправку, обеспечивая при этом простоту обслуживания системы контроля и ее диагностику.

Применение поточных влагомеров «Микрорадар» серии МР-113 [5] особенно эффективно в мукомольном производстве, на сушке зерна и в ряде других технологических процессах. Так, комплекс мероприятий по внедрению информационных технологий на комбинатах хлебопродукции приводит к увеличению выхода муки высшего сорта на 4–7 %, что дает экономический эффект не менее 0,5 тыс. дол. на 1 тыс. т перерабатываемого зерна. Применение «Микрорадар-113м» на шахтных прямооточных и рециркуляционных зерносушилках за счет точного (не хуже $\pm 0,5$ %) контроля влажности на выходе сушильных

агрегатов и исключения пересушивания зерна позволяет экономить 2 кг условного топлива на каждую тонну перерабатываемого зерна. Расчетная экономия топлива при переработке 50 000 т составит порядка 130 т в год или около 20 млн руб. С учетом же повышения качества зерна экономический эффект будет еще выше.

Использование в указанных выше влагомерах стандартных интерфейсов для связи с другим оборудованием позволяет достаточно просто создавать автоматизированные системы управления в различных отраслях АПК. Принятый стандарт позволяет включать в измерительную информационную систему до нескольких десятков источников информации, расположенных на удалении сотен метров от компьютера.

В заключение следует отметить, что для метода поглощения характерно разнообразие датчиков, позволяющих решать многочисленные задачи влагометрии. В дополнение к рассмотренным ранее можно указать на щелевые, волноводные, полосковые, поверхностной волны и ряд других [1, 5]. Все они (за исключением волноводных и полосковых) нашли применение в промышленности строительных материалов.

4.1.3. Резонаторные поточные СВЧ-влагомеры для свеклосахарного производства «Микрорадар-114с»

Разработаны две модификации СВЧ-влагомера сахара и один влагомер утфеля. Применение влагомеров МР-114ск, МР-114ст, МР-114у возможно в нескольких точках технологического процесса (рис. 4.4а). На этапе кристаллизации в вакуум-аппаратах влагомер МР-114у контролирует влажность утфеля и позволяет автоматизировать процесс его уваривания.

Установка влагомера МР-114ст после центрифугирования позволяет управлять работой центрифуг и подавать сахар на сушку известной начальной влажности.

Применение МР-114ск после сушиллки дает возможность непрерывного контроля автоматизации процесса сушки [5].

На рис. 4.4б показаны варианты датчика для использования на конвейерной ленте (МР-114ск) и при свободном падении сухого сахара в трубопроводе (МР-114ст), а также внешний вид вторичного преобразователя и блока индикации.

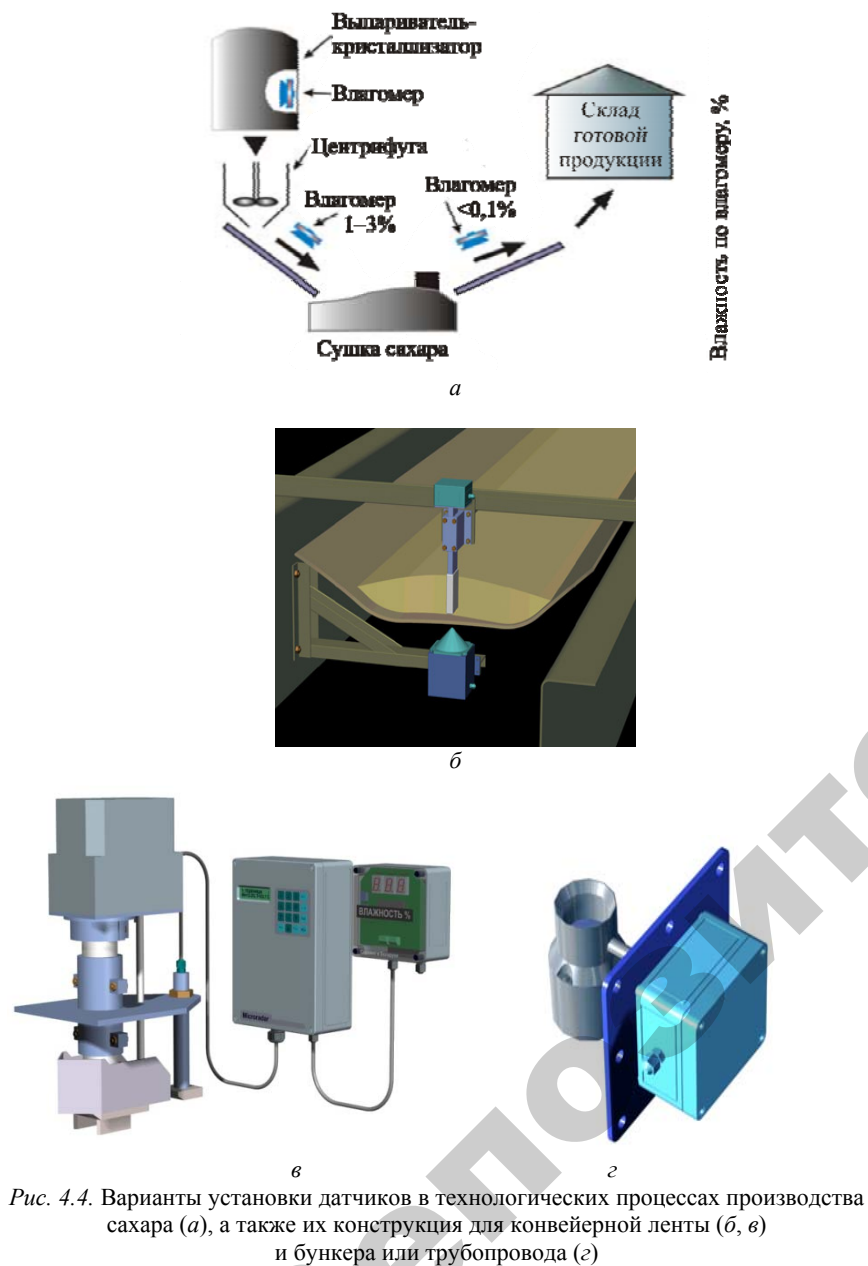


Рис. 4.4. Варианты установки датчиков в технологических процессах производства сахара (а), а также их конструкция для конвейерной ленты (б, в) и бункера или трубопровода (г)

Серийный выпуск первых резонаторных СВЧ-влагомеров для свеклосахарного производства начат еще в начале 90-х гг. в Кишиневе по разработкам и при технической помощи сотрудников лаборатории СВЧ-влагометрии БГАТУ (БИМСХ) [5].

В СВЧ-влагомерах серии МР-114с применен новый, инвариантный к влиянию основных мешающих факторов метод измерения A -параметра в закрытых и открытых резонаторных системах (рис. 4.5).

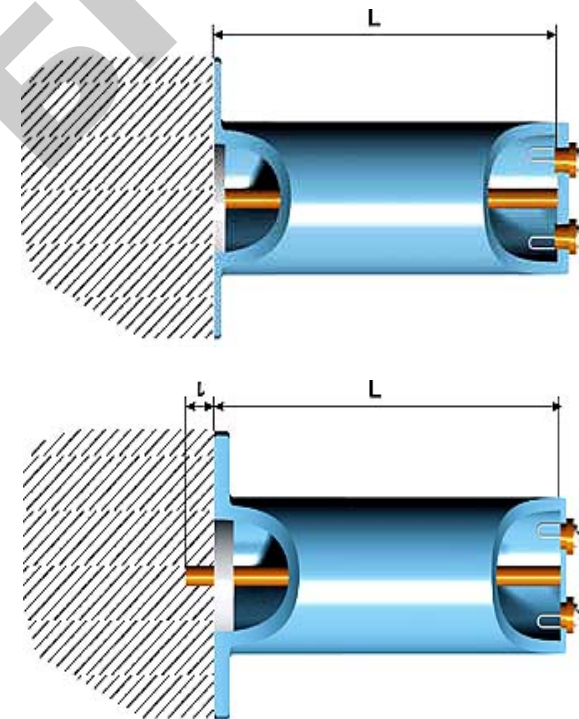


Рис. 4.5. Варианты конструкции закрытых и открытых резонаторов

Влагомеры МР-114 серийно выпускаются в НПП «Микрорадар» с 2000 г. В конструкции приборов используются современные достижения электронной СВЧ и микропроцессорной техники, что позволяет добиться высокой точности измерения влажности продукта. Абсолютная погрешность измерения содержания влаги в готовом сахаре в диапазоне 0–3 % не более $\pm 0,03$ % [5].

4.1.4. Резонаторный поточный СВЧ- влагомер сухого молока «Микрорадар-114м»

В настоящее время основное количество сухого молока получают методом сушки в распылительных сушилках. Влажность в этих процессах является фактором, определяющим качество готового продукта. Исходя из требований технологии производства по диапазону контролируемой влажности, в приборе применен резонаторный метод измерения по A -параметру, инвариантному к влиянию коэффициента заполнения Φ и температуре t .

Применение поточных резонаторных влагомеров в производстве сухого молока после распылительных сушилок возможно в нескольких точках технологического процесса (рис. 4.6):

- на выходе продукта из конвекционного агрегата;
- после вибросита и перед подачей продукта на расфасовку.

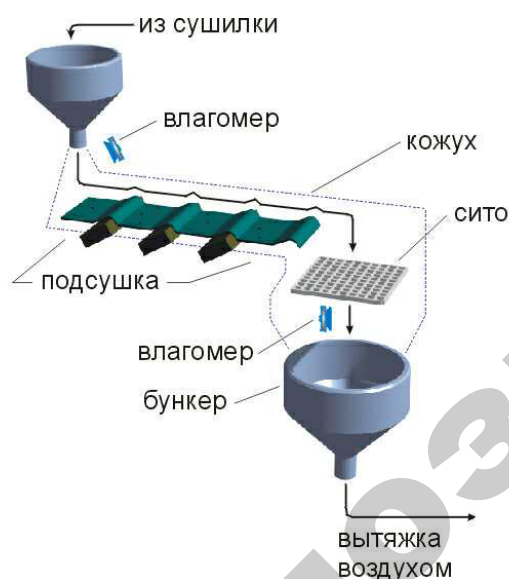


Рис. 4.6. Варианты установки влагомеров в различных точках технологического процесса производства сухого молока (а) и градуировочная характеристика МР-114м (б)

Применение влагомеров «Микрорадар-114м» в АСУТП сушки молока позволяет непрерывно контролировать его влажность и автоматически управлять работой конвекционных сушилок. Поддержание влажности в необходимых пределах позволяет избегать как пересушивания продукта и распада белков, так и недосушивания, ведущего к уменьшению срока хранения сухого молока и его порче.

В приборе применен резонаторный просыпной первичный преобразователь влажности, позволяющий удобно монтировать его в указанных точках технологического процесса. Внешний вид МР-114с и конструкция вторичного преобразователя и блока индикации аналогична влагомеру сахара «Микрорадар-114с» [5].

Основные технические характеристики МР-114м следующие:

- диапазон измерения влажности – 2–7 %;
- основная абсолютная погрешность измерения – 0,3 %;
- режим работы – непрерывный;
- питание – 220 В, 50 Гц;
- потребляемая мощность – не более 20 ВА;
- исполнение – пылевлагозащитное.

Прибор обеспечивает возможность:

- работы по 9 разным градуировочным зависимостям;
- усреднение результата измерения влажности;
- связи с компьютером в стандарте RS-485;
- самодиагностики;
- стандартного токового выхода;
- простоты обслуживания;
- управления с клавиатуры компьютера.

Влагомер МР-114м серийно выпускается НПО «Микрорадар» с 2000 г.

4.1.5. Лабораторный резонаторный влагомер сыпучих сельскохозяйственных продуктов «Микрорадар-101.2» (МР-101.2)

В данной конструкции реализуется параметр преобразования Δf в соответствии с (3.92). С учетом возможности точного измерения влажности как можно большего числа сыпучих сельскохозяйственных материалов и расширения диапазона измерения (в сторону

средних и относительно больших влажностей) выбрана такая конструкция резонаторного первичного преобразователя, который с помощью большого набора различных измерительных кювет обеспечивает поставленную задачу. Внешний вид прибора и варианты датчиков для различных материалов и диапазонов измерения приведены на рис. 4.7.

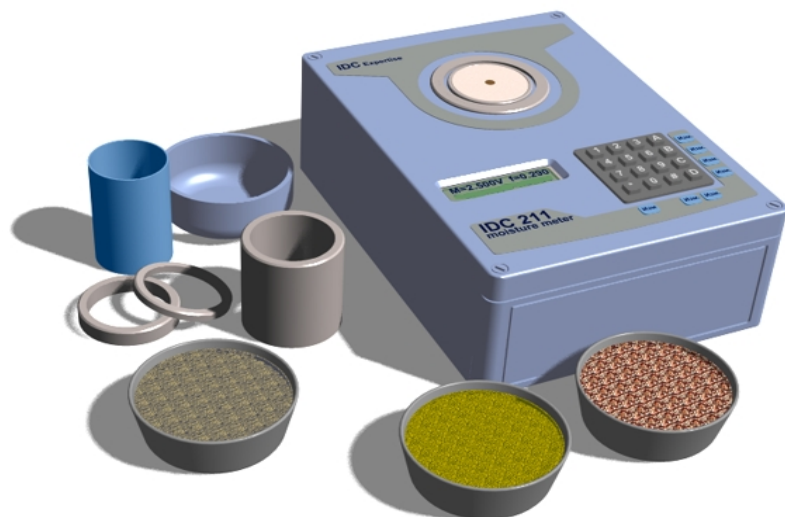


Рис. 4.7. Внешний вид лабораторного резонаторного СВЧ-влажмера «Микрорадар-101.2» и варианты кювет для различных материалов

МР-101.2 имеет следующие характеристики:

- максимальный диапазон измерения влажности (в зависимости от типа материала и размеров кюветы) – от 0,01 до 16 %;
- разрешающая способность измерения влажности в основном диапазоне – 0,01 %;
- точность измерения влажности – $0,03 \div 0,25$ % абс. (в зависимости от материала и диапазона измерений);
- память 10 калибровочных зависимостей для различных типов материалов (число контролируемых материалов может быть увеличено при подключении МР-101.2 к ПЭВМ);
- объем контролируемой пробы – от 40 до 50 см³;

- высокая стабильность калибровки с автоматическим самоконтролем;
- влагостойкое исполнение, морозостойкий ЖКИ;
- стандартный интерфейс для связи с компьютером.

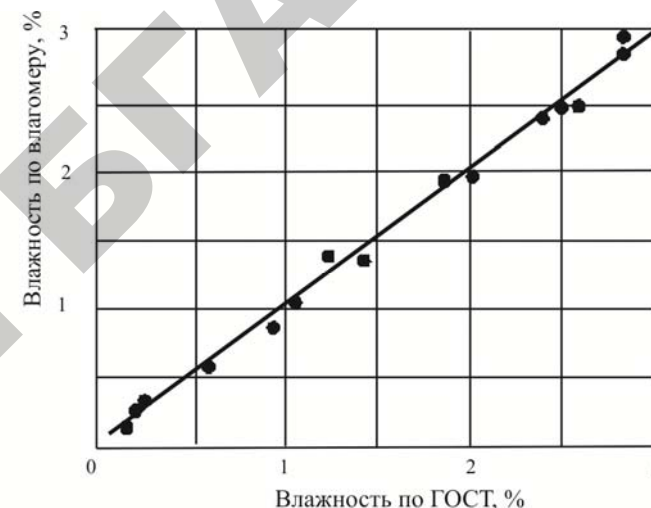


Рис. 4.8. Пример градуировочной характеристики «Микрорадар-101.2» для сахара

Одна из возможных градуировочных характеристик (сахар), хранящихся в памяти процессора, приведена на рис. 4.8.

Основные технические характеристики МР-101.2 [5]:

- вес прибора – не более 3 кг;
- габаритные размеры – $35 \times 12 \times 12$ см³;
- максимальный объем образца – 50 см³;
- диаметр образца (макс.) – 4 см;
- питание прибора – 220 В / 50 Гц / 40 Вт;
- время измерения – не более 1 мин;
- аналоговый выход – 4–20 мА;
- стандарт интерфейса – RS-485;
- рабочий диапазон температур – $+5 \div +45$ °С;
- допустимая относительная влажность воздуха от 40 до 98 %;
- точность измерения различных культур приведена в паспорте прибора.

4.2. Влагомеры ООО «Аквар-систем»

4.2.1. Многопараметрический микроволновой влагомер зерна в потоке «А-315»

Как указывалось ранее, измерение влажности зерна в технологических потоках при его производстве, хранении и переработке в реальном масштабе времени с высокими метрологическими характеристиками является актуальной и достаточно сложной задачей. При этом требования к влагомерам зерна в значительной степени отличаются в зависимости от их назначения.

Наиболее высокие требования, как правило, предъявляются к влагомерам зерна, предназначенным для использования в составе зерносушилок. Они должны обладать высокой точностью измерения для всех производимых зерновых, зернобобовых и масличных культур в достаточно широком диапазоне влажностей (6–40 %) и их температур (0–60 °С). Желательно, чтобы погрешность измерения была не хуже $\pm 0,5$ %. Это позволяет оптимизировать процесс сушки зерна посредством минимизации пересушивания зерна и позволяет поддерживать влажность зерна на выходе зерносушилки в пределах одного процента. Многочисленные исследования, проведенные авторами на разных мукомольных предприятиях, показали, что влажность зерна в одной помольной партии, поступающей с зернохранилищ, колеблется, как правило, в пределах 3–4 %. Очевидно, это связано с низкими метрологическими характеристиками применяемых для контроля выходной влажности зерна однопараметрических влагомеров, имеющих реальную погрешность измерения в пределах $\pm 1,5$ –2,0 %. В основном такая сравнительно низкая точность измерения однопараметрических влагомеров связана с невозможностью учитывать текущие колебания плотности (натуры) зерна. По этой причине особо актуальной задачей является разработка влагомеров зерна, реализующих технологию многопараметрических измерений, позволяющую устранить негативное влияние плотности на точность измерения.

Другим важным требованием к влагомерам зерна, предназначенным для использования в технологических потоках, является необходимость разработки таких их конструкций, в которых градуи-

ровка по всем культурам производится лишь один раз в заводских (лабораторных) условиях и сохраняется на весь срок службы.

Для влагомеров зерна, предназначенных для использования в технологических потоках мукомольных производств, определяющим является требование к точности измерений, которая должна быть максимально возможной.

Микроволновой многопараметрический резонаторный влагомер зерна «А-315» первоначально разрабатывался для использования в составе автоматизированных систем увлажнения зерна, предназначенных для встраивания в технологические потоки мукомольных производств. По этой причине основное внимание при его разработке уделялось точности измерений в диапазоне влажностей 8–18 %, а количество зерновых культур ограничивалось первоначально пшеницей и рожью. В дальнейшем он был доработан с учетом многолетнего опыта применения на мукомольных предприятиях для работы в составе зерносушильных комплексов (рис. 4.9).



Рис. 4.9. Многопараметрический микроволновой влагомер зерна в потоке «А-315»

Принцип действия микроволнового многопараметрического влагомера зерна в потоке «А-315» основан на существенном различии диэлектрической проницаемости большинства сухих веществ и воды в диапазоне сверхвысоких частот.

В качестве чувствительного элемента в устройстве используется кольцевой резонатор, в центральной части которого имеется измерительный канал в виде диэлектрической трубки, по которому протекает зерно, частично отведенное из общего потока. При взаимодействии электромагнитной волны с зерном различной влажности происходит изменение параметров резонатора.

Важным преимуществом и особенностью данного влагомера является то, что благодаря одновременному измерению двух параметров резонатора (резонансной частоты и амплитуды резонанса) и специальному алгоритму обработки показания влажности зерна не зависят от его плотности (натуры), что обеспечивает высокую достоверность измерения влажности в потоке. Встроенный в измерительный канал датчик температуры обеспечивает автоматическую коррекцию показаний влажности в зависимости от температуры зерна.

Влагомер устанавливается в месте контроля таким образом, чтобы основной поток зерна попадал в область отверстия измерительного канала. Подпор зерна в измерительном канале осуществляется встроенной в датчик конической вставкой. Зерно, не прошедшее через измерительный канал, ссыпается мимо датчика.

В отличие от всех известных в мире влагомеров зерна, влагомер зерна в потоке «А-315» обладает существенными преимуществами:

- показания влажности зерна не зависят от его плотности, что обеспечивает высокую достоверность измерения влажности в потоке;

- не требуется проведение дополнительных калибровок на месте монтажа в течение всего срока эксплуатации влагомера по всем культурам;

- все характеристики влагомера подтверждены сертификатами и внесением в государственный Реестр средств измерений именно как влагомер зерна в потоке (Сертификат № 7343 от 30.08.2011 г.).

Измеряемые культуры:

зерновые – пшеница, ячмень, тритикале, рожь, овес, кукуруза, просо, гречиха;

зернобобовые – люпин;

масляничные – рапс, подсолнечник.

Число культур может быть увеличено до 25 видов.

Влагомер предназначен для работы с другими устройствами автоматики, машинами централизованного контроля и системами управления, обмен информацией с которыми осуществляется по интерфейсу RS-232, RS-485 или токовому выходу.

Технические характеристики:

- диапазон показаний влажности зерна в потоке – $(5 \div 25) \%$;
 - предел допускаемой абсолютной погрешности измерения влажности от 5% до 18% – $\pm 0,5 \%$;
 - влагомер обеспечивает индикацию измерений влажности зерновых культур в диапазоне от 18% до 25% (без предъявления требований по точности измерений);
 - требуемая температура зерна в потоке – $+5 \div 55 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 - режим работы – непрерывный;
 - время установления рабочего режима – не более 10 мин;
 - напряжение питания – 24 В;
 - потребляемая мощность – не более 5 Вт;
 - степень защиты – IP-54;
 - масса датчика – не более 6,0 кг.
- Требования по надежности эксплуатации:
- средняя наработка на отказ – не менее 10 000 ч;
 - среднее время восстановления – не более 6 ч;
 - полный средний срок службы – не менее 8 лет (при соблюдении условий хранения в зимний период).

В 2011–2013 гг. более 450 влагомеров зерна в потоке «А-315» были поставлены и успешно эксплуатируются на зерносушильных комплексах производства ООО «Амкодор-Можга», ОАО «Лидсельмаш», ОАО «Брестсельмаш». Влагомер используется для измерения влажности зерна в потоке при сушке различных сельскохозяйственных культур и получил высокую оценку специалистов. Большинство мукомольных предприятий Беларуси и целый ряд предприятий России оснащены автоматизированными системами увлажнения зерна, в которых на протяжении длительного времени успешно эксплуатируются встроенные в них датчики «А-315».

4.2.2. Микроволновой датчик влажности листовых материалов А 313 CAN

Микроволновой датчик влажности листовых материалов А 313 CAN (рис. 4.10) предназначен для работы с широким классом листовых диэлектрических материалов, таких как бумага, картон, ДВП, текстильные и различные пленочные материалы и т. д. и может использоваться как автономно, так и в составе автоматизированных систем контроля профилей и трендов параметров в технологических потоках при производстве указанных материалов (рис. 4.11).



Рис. 4.10. Микроволновой датчик влажности листовых материалов А 313 CAN

В частности, микроволновой датчик влажности А 313 CAN применяется для контроля влажности бумажного и картонного полотна, масса метра квадратного которого находится в пределах 250–1000 г/м².



Рис. 4.11. Автоматизированная система контроля профилей и трендов параметров в технологических потоках

Работа микроволнового датчика влажности основана на существенном различии в диапазоне СВЧ комплексной диэлектрической проницаемости воды и сухих компонентов, входящих в состав картонного полотна. Поэтому диэлектрическая проницаемость реального полотна довольно сильно изменяется даже при низком влагосодержании. Конструктивно датчик влажности выполнен в виде двухмодового микроволнового резонатора с поперечной щелью и состоит из двух частей, крепящихся на верхней и нижней платформах сканирующего устройства. В резонаторе возбуждаются два типа колебаний, одно из которых взаимодействует с бумажным (картонным) полотном, второе – нет. Использование такого технического решения обеспечивает стабильность показаний при изменении зазора резонатора и температуры окружающей среды.

При помещении в зазор резонатора исследуемого материала происходит изменение его электродинамических характеристик, которые зависят от влажности и массы метра квадратного. Вычисление влажности бумажного (картонного) полотна производится с использованием информации с радиоизотопного плотномера.

Управление измерительным процессом и выполнение расчетов осуществляется встроенным микропроцессорным устройством, которое дополнительно реализует операции обмена с операторской станцией по интерфейсу CAN.

Технические характеристики:

- диапазон измерения влажности – 1–12 %;
- погрешность измерения – $\pm 0,2$ % абс.;
- температура полотна – до $+50$ °C;
- рабочий диапазон температур окружающей среды – $+5 \dots +50$ °C.

4.2.3. Микроволновые датчики концентрации «А-343», «А-344»

Наиболее широко на практике распространены датчики влажности материалов, предназначенные для работы в диапазоне относительно низких значений влажности. Тем не менее, для ряда случаев требуется решать задачу определения количества нерастворимого вещества в воде, т. е. работать в диапазоне влажностей от 90 % и выше. Фактически требуется определять количество сухого вещества в воде. Датчики, предназначенные для этих целей, называются датчиками концентрации или концентратомерами.

В микроволновом диапазоне решение таких задач связано со значительными трудностями, одной из которых является возбуждение электромагнитных волн в исследуемой среде.

Микроволновой датчик концентрации **проходного** типа «А-344» предназначен для высокоточного измерения концентрации бумажной массы на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), для применения на водоочистных сооружениях для измерения содержания иловых масс в сточных водах, а также для эксплуатации в других отраслях промышленности, где требуется контролировать содержание нерастворимого вещества в водных суспензиях.

Датчик конструктивно выполнен в виде отрезка трубопровода Ду150 (рис. 4.12) и встраивается в технологические трубопроводы диаметром 150 мм непосредственно и 200 мм (с помощью конусных переходов) в виде безфланцевой вставки.

Микроволновой датчик концентрации «А-344», разработанный и выпускаемый ООО «Аквар-Систем», вобрал в себя все лучшие достижения в области измерения концентрации для предприятий ЦБП. Его принцип действия основан на прецизионном измерении диэлектрической проницаемости бумажной массы (водной суспензии) в СВЧ-диапазоне электромагнитных волн, а также специаль-

ных алгоритмов обработки. Использование микроволновой техники позволило измерять концентрацию на таком уровне, который недоступен для традиционных методов измерений, основанных на изменении вязкости бумажной массы в зависимости от ее концентрации.



Рис. 4.12. Датчик концентрации «А-344»

Микроволновой датчик «А-344» определяет объемную концентрацию всех веществ, входящих в состав бумажной массы (водной суспензии), нечувствителен к типу волокон, их длине, составу, степени помола, цвету, скорости потока. Он имеет отличную повторяемость, линейность и высокую чувствительность. Датчик адаптирован ко всем типам волокнистого полуфабриката, нечувствителен к изменению проводимости воды и по этой причине незаменим при измерении концентрации макулатурных потоков бумажной массы, в процессе производства целлюлозы, на предприятиях с замкнутым циклом водооборота, на водоочистных сооружениях для измерения содержания иловых масс в сточных водах, а также для эксплуатации в других отраслях промышленности, где требуется контролировать содержание нерастворимого вещества в водных суспензиях.

Микроволновые датчики являются универсальным средством измерения концентрации практически во всех технологических зонах машин по производству всех типов бумаг и картонов и могут эксплуатироваться в самых сложных производственных условиях. Благодаря отсутствию механических подвижных частей датчики просты и надежны в обслуживании. Для их калибровки требуется лишь одно значение концентрации. Блок индикации, выполненный на основе панели MT8070iH2WK 7 TFT LCD, позволяет в удобном для оператора виде наблюдать текущие значения концентрации, температуры

и проводимости массы, а также их тренды в течение прошедших суток. Датчики легко адаптируются в системы АСУ ТП.

В настоящее время более 300 датчиков концентрации производства ООО «Аквар-Систем» успешно эксплуатируются на крупнейших предприятиях целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности Беларуси, России, Украины, Польши и Казахстана.

Датчики концентрации «А-343» и «А-344», имея одинаковый принцип действия, конструктивно отличаются между собой принципом установки в трубопровод.

Технические характеристики «А-344»:

- диапазон измерения концентрации – 0–6 %;
- погрешность – $\pm 0,02$ % (абс.);
- температура процесса +10...+50 °С;
- температура окружающей среды – +10...+50 °С;
- диаметр трубопровода Ду – 150 мм;
- выход – 4–20 мА;
- коммуникация – RS-232, RS-485;
- давление мин. – 1,5 Бар;
- давление макс. – 10,0 Бар;
- проводимость среды макс. – 10,0 мСм/см;
- степень защиты – IP-54;
- питание – 100–260 В, 25 Вт.

Датчик концентрации вставного типа «А-343» (рис. 4.13) предназначен для использования в трубопроводах более высоких диаметров (от 250 мм и выше).



Рис. 4.13. Датчик концентрации «А-343»

4.2.4. Инфракрасный влагомер сыпучих и листовых материалов А1108

Задачи измерения влажности достаточно разнообразны. Большинство создаваемых для этих целей устройств являются влагомерами контактного типа. Однако во многих случаях требуется производить измерение влажности дистанционно, когда приемно-передающие устройства влагомера удалены от объекта измерения на какое-то расстояние. Применение микроволновых влагомеров в некоторых случаях весьма затруднительно. Для решения таких задач идеально подходит инфракрасный метод измерения влажности.

Работа влагомера сыпучих материалов А1108 (рис. 4.14) основана на инфракрасном спектральном методе измерения влажности. Рассеяние и отражение на рабочих длинах волн (линии поглощения воды) сравнивают с пропусканием на опорных длинах волн. По полученным соотношениям, которые являются расчетными оптическими параметрами, вычисляется влажность материала с помощью специализированного алгоритма. Блок-схема влагомера приведена на рис. 4.15.

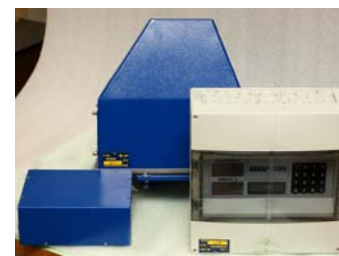


Рис. 4.14. Инфракрасный влагомер сыпучих материалов А1108

Фокусированный луч ИК-излучения из модуля излучения направляется на контролируемый продукт, располагаемый перед излучателем. Отраженное от исследуемого продукта ИК-излучение после прохождения интерференционных светофильтров модулятора, вращающихся с частотой 50 Гц, собирается оптическим блоком на фоторезисторе, расположенном на модуле фотоусилителя, где импульсы ИК-излучения, пропорциональные коэффициенту отражения на рабочих и на опорной длинах волн, преобразуются в электрические сигналы и усиливаются. Выходной сигнал формиру-

ется по отношению сигналов рабочих и опорной длин волн. Для определения соответствия положения этих сигналов интерференционным светофильтром с помощью датчика положения получают синхронный и синфазный с измеряемыми сигналами управляющий импульс (строб), который определяет начало отсчета при каждом обороте модулятора светового потока. Аналоговые сигналы от фотоприемника соответствуют массовой доле воды (влажности), содержащейся в исследуемом продукте. На практике зависимость между влажностью и выходными сигналами фотоприемника не является точно экспоненциальной, а аппроксимируется в соответствии с алгоритмом работы полиномом второй или более высокой степени.

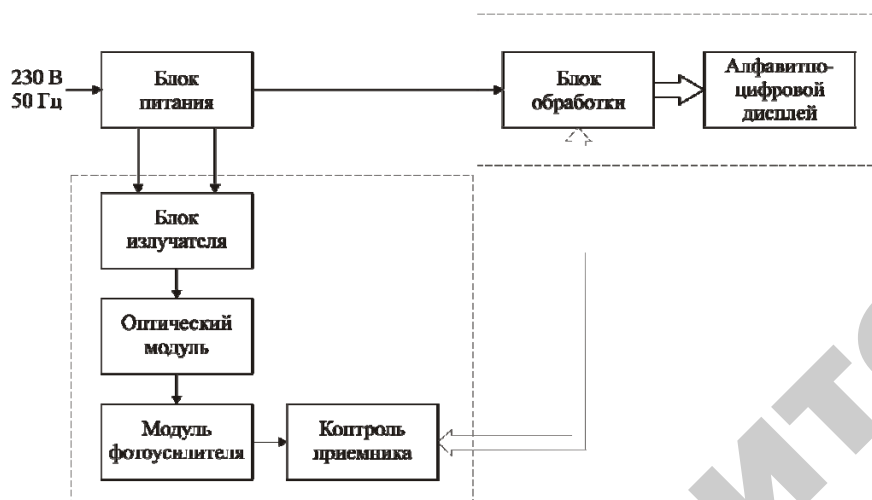


Рис. 4.15. Блок-схема инфракрасного влагомера А1108

Определение (градуировка) полиномиальных коэффициентов производится на стадии наладки влагомера и корректируется по месту установки. Все вычисленные параметры периодически по запросу блока обработки пересылаются последнему по цифровому интерфейсу RS-232. В блоке обработки на основании полученных значений сигналов на различных длинах волн вычисляется влажность контролируемого продукта.

Влагомер имеет элемент настройки на влажность, устанавливаемую по образцу исследуемого материала, влажность которого известна.

Вычисленные значения влажности отображаются на алфавитно-цифровом дисплее блока обработки, а также устанавливаются на токовом выходе и цифровых интерфейсах RS-232/RS-485/CAN, откуда они могут быть переданы в вышестоящую ПЭВМ по запросу последней.

Для оперативного управления работой влагомера можно использовать встроенную в блок обработки клавиатуру.

Основные технические характеристики:

- диапазон измерения влажности – 0,1–12,0 %;
- пределы абсолютной погрешности по функции измерения влажности в диапазоне от 0,10 % до 1,00 % включительно – $\pm 0,05$ %, в диапазоне от 3,0 % до 12,0 % включительно – $\pm 0,5$ %;
- цифровой интерфейс – RS-232/RS-485/CAN;
- потребляемая мощность – не более 50 ВА;
- рабочий режим – непрерывный.

Влагомер А1108 внесен в реестр средств измерений Республики Беларусь (Сертификат № 5899 от 30.06.2009 г.) и нашел достаточно широкое применение на различных предприятиях Беларуси и России в технологических потоках для бесконтактного контроля влажности различных сыпучих и листовых материалов.

4.3. Зарубежные микроволновые влагомеры

Наметившаяся в предыдущем десятилетии тенденция разработки двух и более параметрических измерительных преобразователей контроля влажности на основе микроволновых методов продолжается и в настоящее время, что подтверждается материалами недавно прошедшей в Веймаре 10-й международной конференции «Взаимодействие микроволнового электромагнитного поля с влагонесодержащими субстанциями» [120]. Это относительное усложнение и удорожание конструкции приборов контроля влажности позволяет существенно повысить их метрологические характеристики за счет учета влияния плотности и температуры, а также некоторых других «мешающих факторов», влияющих на точность измерений. В связи с

этим следует отметить, что данные устройства можно рекомендовать в тех случаях, когда экономический эффект от их использования значительно превосходит стоимость приборов. Соотношение «цена – качество» по-прежнему является определяющим критерием. Подтверждением тому является широкий ассортимент микроволновых однопараметровых влагомеров, предлагаемых на рынке ведущими мировыми производителями.

Большое развитие в последнее время получили методы и приборы временной диэлектрической спектроскопии (ВДС). Если ранее их применяли практически только в научных исследованиях, то сейчас появилось большое число сообщений о разработанных влагомерах на основе этих методов. Данное обстоятельство говорит о большом прогрессе в этой области [120], так как до недавнего времени стоимость ВДС-спектрометров составляла несколько десятков тысяч долларов.

Перспективность этого направления очевидна. При воздействии короткого (пикосекундного) импульса на влагосодержащий материал и измерении параметров прошедшего сигнала можно получить информацию не только о влажности, плотности, температуре, но и о многих других параметрах (например, о содержании белка, протеина, аминокислот и пр.). Это стало возможным потому, что современные микропроцессорные системы достаточно просто позволяют сделать Фурье-анализ функции диэлектрического отклика, т. е. фактически позволяют реализовать многочастотный метод на новой элементной базе.

Ниже рассмотрим основные конструкции и технические характеристики современных микроволновых влагомеров ведущих зарубежных фирм-производителей.

Влагомеры фирмы GreCon (США) в измерительной системе MWF 5000 используют резонансный принцип контроля, основанный на измерении ухода резонансной частоты и изменении переходного ослабления в зависимости от содержания воды и плотности материала, что позволяет производить их отдельную оценку с помощью электронного блока на основе микропроцессора (рис. 4.16). В зависимости от типа датчика глубина проникновения электромагнитного поля в контролируемый материал составляет от 1,5 до 4 дюймов. Датчик в виде открытого резонатора имеет плоскую контактную поверхность (рис. 4.17, 4.18).



Рис. 4.16. Микропроцессорный блок управления системой MWF 5000



Рис. 4.17. Контактная поверхность



Рис. 4.18. Вариант установки датчика

Основные технические характеристики системы следующие:

- диапазон измерений – 0,1–85 % (с поддиапазонами);
- повторяемость – 0,05 % (стандартное отклонение для десятикратного измерения);
- точность измерений – $\pm 0,35$ %;
- время измерений – < 1 с;
- объем памяти градуировочных характеристик – 20 видов (до 40);
- температурный диапазон – от 0 °C до +70 °C (автоматическая температурная компенсация), от 0 °C до +110 °C (с охлаждением);
- интерфейс – RS-422 и RS-232;
- аналоговый выход – 0,4–20 мА;
- сохранение параметров – CMOS-память при отключении источника питания;
- отсутствие влияния цвета или текстуры материала;
- отсутствие влияния плотности материала;
- мгновенное представление результатов измерения.

На рис. 4.19 приведен внешний вид лабораторного резонаторного влагомера фирмы GreCon, а на рис. 4.20 – пример его применения для измерения влажности листовых материалов в потоке.



Рис. 4.19. Лабораторный вариант резонаторного влагомера фирмы GreCon



Рис. 4.20. Поточный вариант резонаторного влагомера фирмы GreCon

Влагомеры фирмы MoistScan, входящей в Realtime Group (США), предназначены для точного измерения влажности в широком диапазоне (до 100 %) на основе микроволновых технологий сельскохозяйственных продуктов, биотоплива, продуктов питания, строительных материалов, объектов горнорудной промышленности и др.

Влагомеры MoistScan имеют несколько основных модификаций. Так, на рис. 4.21 представлена одна из моделей поточного влагомера. Универсальный блок обработки информации имеет вид, представленный на рис. 4.22, а типовой измерительный модуль для конвейерной ленты представлен на рис. 4.23.



Рис. 4.21. Измерение влажности движущихся образцов влагомером MoistScan



Рис. 4.22. Блок обработки информации



Рис. 4.23. Измерительный модуль

Влагомеры серии MoistScan MA 500 стандарт (рис. 4.24) идеально подходят для контроля движущихся по конвейерной ленте непроводящих материалов средней и низкой влажности при относительно небольшой толщине слоя, например, на горнообогажительных фабриках (влагомеры угля, оксида алюминия). Обычно микроволновый передатчик устанавливают под стандартным лен-

точным конвейером, а детектор располагают над движущимся материалом. Анализаторы MA 500 могут оснащаться различными вариантами связи для передачи и приема данных, имеют функцию удаленного доступа для диагностических целей и периодической проверки калибровки.

Влагомеры серии MoistScan MA 500 HD, как правило, применяются для контроля металлосодержащих минералов и тяжелых органических материалов с высоким содержанием влаги и большой глубиной слоя, например, оксид алюминия, бокситы, никель, цинк, свинец и медь в руде и концентрате, сахарный жом и т. п. В остальном имеют схожие характеристики с базовой моделью.

Влагомеры серии MoistScan MA 500 HDi – анализаторы влажности, специально разработанные для железорудной промышленности. Они подходят для контроля железной руды и концентратов железных руд, железорудных окатышей и агломерата смесей.

Влагомеры MoistScan имеют и другие модификации датчиков, например, со шнековым питателем, для установки на трубе или бункере, датчик в виде хоппер-желоба (рис. 4.24) и др.



Рис. 4.24 Датчик для вертикального трубопровода (а), в виде хоппер-желоба (б)

TEWS Elektronik – немецкая приборостроительная компания, производитель лабораторных, портативных и промышленных микроволновых приборов для измерения влажности (микроволновые

влагомеры) для быстрого (измерение влажности выполняется за секунду), неразрушающего, точного и селективного определения содержания воды в пищевых продуктах, кондитерских изделиях, фармацевтической продукции, табачных изделиях, другой промышленной и сельскохозяйственной продукции. Микроволновые анализаторы влажности надежны, компактны и поставляются как в лабораторном, так и в промышленном исполнении для установки непосредственно на технологической линии.

Компания производит широкий спектр микроволновых анализаторов влажности – от портативных (ручной микроволновой анализатор влажности) до лабораторных поточных. Портативный микроволновой анализатор влажности удобен для измерения влажности древесины, целлюлозы или бумаги, измерения влажности кормов для животных или другой продукции сельского хозяйства. Выпускаются также специализированные микроволновые анализаторы влажности для табачной, пищевой и целлюлозно-бумажной промышленности. Компания TEWS Elektronik производит специальный влагомер для измерения влажности сигар.

Выпускаются микроволновые анализаторы для измерения содержания как поверхностной влаги, так и внутри контролируемого объекта. Микроволновые влагомеры не чувствительны к изменениям окружающих условий. Цвет, консистенция, характер поверхности объекта не влияют на точность измерения влажности с помощью микроволнового излучения. Приборы имеют либо встроенный дисплей, либо выход на компьютер. Программное обеспечение для измерения влажности поставляется вместе с приборами в зависимости от требований заказчика.

Рассмотрим основную номенклатуру продукции TEWS Elektronik. MW 1000 – мобильный СВЧ-прибор измерения влажности – предназначен для использования в лабораториях и на производстве для быстрого определения влажности материалов в области сельскохозяйственного производства (в т. ч. производство кормов для животных), пищевой, химической, деревообрабатывающей, бумажной промышленности и фармацевтике (рис. 4.25). Прибор MW 1000 находит применение также в производстве строительных материалов и на строительстве (например для быстрого определения влажности покрытия полов). Запатентованный метод измерения прибором MW 1000 дает возможность провести быстрое и точное

измерение влажности простым наложением планарного датчика на материал. При этом прибор MW 1000 определяет общую влажность независимо от цвета и плотности материала.



Рис. 4.25 MW 1000 – прибор измерения влажности продуктов и материалов

Основные технические и метрологические характеристики прибора (общие с моделью MW 1000S (рис. 4.26):

- короткое время измерения (около 3 с);
- определение абсолютной влажности с погрешностью не более 1 % абс. (в зависимости от диапазона и вида материала);
- среднее время работы – 5 ч, автовыключение;
- температура исследуемого материала – 5–60 °С (автоматическая компенсация температуры), температура окружающей среды – 0–45 °С.



Рис. 4.26 Влагомер MW 1000S

Влагомер MW 1000S представляет собой модификацию, предназначенную для измерения влажности на различной глубине в объеме материала. Расположенный на конце сенсор позволяет производить измерение влажности на глубине до 0,5 м внутри продукта (в тюках табака, хлопка и т. д.).

Измерительный прибор E 177/26 exz (рис. 4.27 – это специальный аппликатор, разработанный для лабораторных измерений влажности сигар. Его особенностью является асимметричное расположение измерительной ячейки в измерительном поле. Тем самым можно проводить измерение также и сигар с высокой степенью влажности посредством изменения позиции аппликатора.



Рис. 4.27 Влагомер сигар E 177/26 exz

Следующими разновидностями микроволновых влагомеров являются приборы для мобильного применения FL-MIKRO-LAB-KOMPAKT (рис. 4.28 и FL-MIKRO-LAB (рис. 4.29

Рис. 4.28. Влагомер микроволновый FL-MIKRO-LAB-KOMPAKT для мобильного применения	Рис. 4.29 датчик влагомера FL-MIKRO-LAB

Их параметры следующие.

Размеры:

FL-МИКРО-LAB-КОМПАКТ:

- длина – 170 мм, ф 110 мм;
- объем 180 см³;
- вес 2,8 кг;

FL-МИКРО-LAB:

- высота 660 мм, ø 90 мм, объем 680 см³;
- измерительный принцип – микроволновый / 433 МГц;
- напряжение/мощность – 5 В, через USB-интерфейс – 3 Вт;
- температурный диапазон – 0...80 °С;
- интерфейс USB A (длина кабеля подключения – 3 м);
- точность – зависит от диапазона измерений и среды (ок. ± 0,3 %);
- корпус – высокопрочный алюминий;
- вес – 11 кг.

Данные влагомеры обеспечивают точное измерение влажности благодаря обеспечению постоянного давления на материал в период измерений. Они имеют высокую воспроизводимость выборки благодаря достаточному количеству пробы. Их отличительная особенность – неразрушающий метод контроля, кратчайшее время измерений (около 5 с), гибкая возможность использования на различных этапах производственного цикла, простота применения и быстрая очистка датчика, автоматический выбор кривых с неограниченным количеством градуировок, архив с предварительно откалиброванными зависимостями, простая инсталляция Software на компьютере и применение EXCEL-данных для удаленного компьютера. Системные предпосылки – рабочая система WINDOWS 2000, XP SP2, VISTA 3.

Кроме описанных выше компания TEWS предлагает компактный микроволновой прибор для измерения влажности MW 3150 (рис. 4.30), сконструированный для мобильного применения в лаборатории и на производстве. Запатентованный микроволновой метод измерения дает возможность точного измерения влажности независимо от плотности, структуры поверхности и цвета измеряемых материалов. Приборы серии MW 3000 предназначены для измерения влажности материалов в химической, кондитерской, строительной, пищевой промышленности и в фармацевтике. Близкими характеристиками обладают и другие мик-

роволновые влагомеры этой серии, внешний вид которых показан на рис. 4.31, 4.32.



Рис. 4.30. Влагомер MW 3150 для лабораторного анализа в химическом производстве



Рис. 4.31. Микроволновой прибор измерения влажности MW 3011 для лабораторий и технологического контроля в табачном производстве



Рис. 4.32. Микроволновой прибор измерения влажности MW 3310 для лабораторий

Влагомеры MW 4420 (рис. 4.33) и другие этой же серии, в основном, предназначены для работы в табачном производстве. С их помощью измеряют как среднюю влажность и плотность сигарет и сигар, так и распределение этих параметров по объему контролируемой продукции.



Рис. 4.33. Система для измерения влажности и плотности MW 4420

Еще одной разновидностью микроволновых влагомеров фирмы TEWS, являются приборы и системы контроля движущихся материалов (тюков, коробок и пр.) серии MW-T (рис. 4.34). В отличие от описанных выше влагомеров этой фирмы, имеющих односторонний планарный датчик, данная система предполагает наличие двух – передающего и приемного СВЧ-блоков, расположенных оппозиционно либо под углом к объекту контроля. Система работает со скоростью примерно 30 измерений в секунду, что позволяет получать как среднюю влажность и плотность, так и их профили по объему.



Рис. 4.34. Система для поточных измерений влажности и плотности MW 4420

Кроме дальнейшего развития и совершенствования, ставших уже традиционными, микроволновых методов, ряд зарубежных компаний освоили серийный выпуск влагомеров на основе метода временной диэлектрической спектроскопии. Так, американская фирма Spectrum Technology Inc. в течение последних лет широко представлена влагомерами почв TDR-100 и TDR-200. Последняя ее разработка – полевой влагомер TDR-300 (рис. 4.35), позволяющий с высокой точностью (относительная погрешность – не хуже 3 %) измерять влажность различных типов почв. Прибор снабжен системой GPS, что

позволяет составлять карты увлажненности конкретной местности. Приборы данной серии могут найти широкое применение в тепличном производстве.



Рис. 4.35. Влагомер почв TDR-300

4.4. Микроволновые влагомеры в системах непрерывного контроля и регулирования влажности

4.4.1. Автоматический контроль и регулирование влажности в мукомольном производстве влагомерами «Микрорадар»

В процессе кондиционирования зерна при условии стабилизации плотности и автоматической температурной коррекции можно применять однопараметровый метод, регистрирующий затухание электромагнитной энергии во влажном материале. Однако, без учета потерь энергии на рассеяние погрешность измерения может составить 30 % и более.

Технологический процесс сушки зерна позволяет достаточно просто стабилизировать поток контролируемого материала. В данном случае достаточно измерять только один параметр, например, результирующий коэффициент затухания электромагнитной волны во влагосодержащем материале α_H (при условии автоматической температурной коррекции). Таким образом, зависимость между затуханием N в образце толщиной d и влажностью W будет иметь вид [1]

$$N = 8,686 \cdot \alpha_H \cdot W \cdot \rho \cdot d. \quad (4.1)$$

Коэффициент затухания α_H в рамках линейной модели будет определяться выражением

$$\alpha_H = \alpha_{HC} \cdot q_{HC} + \alpha_{HP} \cdot q_{HP} + \alpha_{H0} \cdot q_{H0}, \quad (4.2)$$

где $\alpha_{HC}, \alpha_{HP}, \alpha_{H0}$ – коэффициенты затухания электромагнитной волны в воде связанной, полисорбции и свободной соответственно;

q_{HC}, q_{HP}, q_{H0} – объемные концентрации воды связанной, полисорбции и свободной соответственно.

Из (4.2) имеем:

$$\alpha_H = \Phi \frac{\rho_d}{\rho_H} \times \left[\frac{W}{(1-W)} \alpha_{H0} + \frac{\mu S_s}{N_A \sigma} a_{\max} f_1(w, s_s, a_m) (\alpha_{Hm} - \alpha_{H0}) + \frac{W_{cr}}{1-W_{cr}} (\alpha_{Hc} - \alpha_{H0}) \right], \quad (4.3)$$

где Φ – коэффициент заполнения;

ρ_d, ρ_H – плотность сухого материала и воды;

μ – грамм молекулярный вес воды;

S_s – удельная поверхность зерна (пшеницы);

$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$;

$\sigma = 3 \cdot 10^{-8}$ – посадочное место одной молекулы воды на поверхности твердой фазы;

$a_{\max} = 100$, максимальное количество монослоев воды, занимаемых влагой полисорбции в данном материале;

$W_{cr} = 10\%$, критическая влажность, соответствующая переходу от связанной воды в зерне к воде полисорбции;

$f_1(w, s_s, a_m)$ – функция, характеризующая соотношение между свободной и связанной водой.

Функция $f_1(w, s_s, a_m)$ – в соответствии с моделью Ивенса-Бускера [2], в которой предполагается, что скорость изменения данной формы влаги по мере увлажнения прямо пропорциональна

части сорбционного объема, не занятого этой влагой. Следовательно, можно записать:

$$\frac{dq_{HP}}{dQ} = 1 - \frac{q_{HP}}{q_{HP\max}}, \quad (4.4)$$

где q_{HP} – объемная концентрация влаги полисорбции;

$Q = \frac{P_H}{\rho_H \cdot V}$ – относительная объемная влажность материала, т.е. относительное количество воды (P_H) в единице объема ($V = q_{HC} + q_{HP} + q_{H0}$).

Интегрируя (4.4), с учетом, что при $Q = Q_{HP}$ $q_{HP} = 0$, получаем:

$$q_{HP} = q_{HP\max} \left(1 - e^{\frac{Q_{cr} - Q}{q_{HP\max}}} \right). \quad (4.5)$$

Выражением (4.5) в таком виде пользоваться неудобно, так как все входящие в него объемные концентрации воды зависят от коэффициента заполнения Φ . Зная удельную поверхность материала S_s и максимальное количество монослоев воды полисорбции $\alpha_{\max}$, $q_{HP\max}$ можно найти следующим образом:

$$q_{HP\max} = \frac{\mu \rho_d S_s}{N_A \rho_H \sigma} \cdot \alpha_{\max} \Phi,$$

тогда

$$q_{HP\max} = \Phi \cdot \frac{\rho_0 \mu S_s}{\rho_H N_A \sigma} \cdot \alpha_{\max} \left[1 - \exp \frac{(W_{cr} - W) \sigma N_A}{(1 - W_{cr})(1 - W) \mu S_s \alpha_{\max}} \right]. \quad (4.6)$$

Следовательно, функция $f_1(w, s_s, a_{\max})$ будет определяться выражением

$$f_1(w, s_s, a_{\max}) = 1 - \exp \frac{(W_{cr} - W) \sigma N_A}{(1 - W_{cr})(1 - W) \mu S_s a_{\max}}. \quad (4.7)$$

Расчет диэлектрических характеристик модели пшеницы произведем, исходя из наличия в зерне трех видов воды с различными диэлектрическими характеристиками, что подтверждается тремя пиками диэлектрической релаксации воды в зерне, принимая следующие значения [5, 8]:

$$\begin{aligned} \rho_0 &= 1,2 \text{ г/см}^3; \quad S_s = 220 \text{ м}^2/\text{г}; \quad a_m = 100; \quad W_{cr} = 0,1; \\ \epsilon_{H0\infty} &= \epsilon_{HP\infty} = \epsilon_{HC\infty} = 5,1; \quad \epsilon_{HBS} = 60; \quad \epsilon_{HPS} = \epsilon_{H0S} = 80,4; \quad t = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \\ \lambda_{H0m} &= 1,79 \text{ см}; \quad \lambda_{Hcm} = 377 \text{ см}; \quad \lambda_{HPm} = 9,5 \text{ см}; \\ \Delta H_{HB} &= 15 \text{ Kcal/mol}; \quad \Delta H_{HP} = 1 \text{ Kcal/mol}; \quad \Delta H_{H0} = 4,6 \text{ Kcal/mol}. \end{aligned}$$

Результаты расчета с учетом того, что коэффициент заполнения Φ является функцией влажности (табл. 4.1), приводят к зависимости, отличающейся от градуировочной для «Микрорадар 113-2» не более чем на 4–5 % (в диапазоне 10–18 % W) и менее 10 % (при $W > 18$ %).

Таблица 4.1

Зависимость коэффициента заполнения Φ от влажности пшеницы

$W, \%$	8	12	16	20	24	28	32	34
Φ	0,60	0,54	0,50	0,44	0,43	0,41	0,39	0,37

Однако в мукомольном производстве в связи с необходимостью доувлажнения зерна с 12–14 % до 15,5–16 % необходимо учитывать влияние свободной и связанной воды, т.е. переходить на другой алгоритм расчета. Для этой цели была разработана новая модификация влагомера с двумя микроволновыми сенсорами (на входе и выходе увлажняющей машины) и одним вычислительным блоком, работающим по двум алгоритмам.

Второй сенсор контроля устанавливается на выходе увлажняющей машины и использует следующий алгоритм:

$$N = N_0 + \alpha_H k(W - W_0), \quad (4.8)$$

где $\alpha_H = \alpha(W)$ – коэффициент затухания, рассчитанный по известным характеристикам для свободной воды [3], что приводит к расчетному результату определения влажности, отличающемуся более чем на 30 % от эксперимента.

Этот факт можно объяснить только с двух позиций: либо диэлектрическая проницаемость воды в поверхностном слое увлажненного зерна превосходит по значению аналогичные характеристики для свободной воды, что маловероятно, либо необходимо внесение корректив в расчет $\alpha_s = \alpha(W)$, вызванных значительным рассеянием энергии электромагнитной волны в поверхностно увлажненном слое.

Влияние такого рассеяния на результат измерения влажности давно отмечено в радиометеорологии. Расчет коэффициента рассеяния k_p произведен по формуле [3]

$$k_p = \frac{12\pi^4 a^4}{\lambda^4} \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)}, \quad (4.9)$$

где a – средний радиус сферы с эквивалентной поверхностью, равной поверхности зерновки;

$m = n - j\chi = \sqrt{\varepsilon' - j\varepsilon''}$ – показатель преломления.

По известным диэлектрическим характеристикам свободной воды [3], принимая во внимание, что $\varepsilon' = n^2 - \chi^2$, $\varepsilon'' = 2n\chi$, рассчитаем параметр k_d , который для $\lambda = 3,2$ см составляет 4,367.

С учетом корректирующего коэффициента $k' = 1,287$ получаем зависимость, связывающую затухание СВЧ-энергии в увлажненном зерне N с весовой влажностью W :

$$N = N_0 + 3,56(W - W_0). \quad (4.10)$$

Результаты расчета по линейной модели зерна (пшеницы) для температуры $t = 20$ °С и длины волны генератора СВЧ $\lambda = 3,2$ см приведены на рис. 4.36. Здесь сенсор № 1 определяет значение N_0 для сенсора № 2, который обеспечивает измерение влажности на выходе увлажняющей машины с высокой точностью.

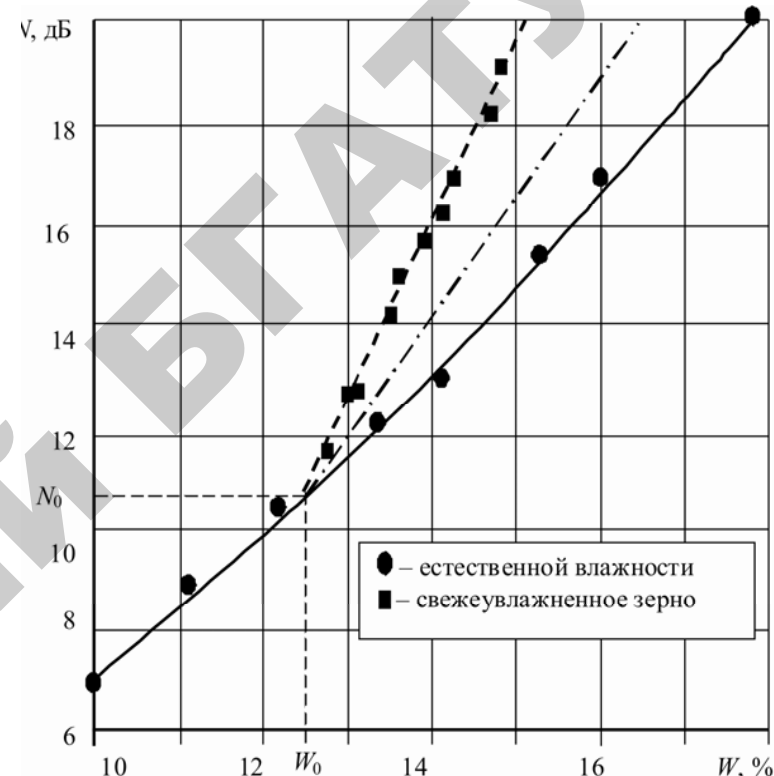


Рис. 4.36. Расчетные и экспериментальные зависимости $N(W)$ для двух СВЧ-датчиков на входе (1) и выходе (2) увлажняющей машины

Штрихпунктирная линия 3 построена на основании расчета по известным диэлектрическим характеристикам свободной воды без учета эффекта рассеяния на поверхностно увлажненном слое зерна.

Без учета эффекта рассеяния расчетная зависимость затухания электромагнитной волны от влажности представлена штрихпунктирной линией (---).

Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими и в производственных условиях автоматизированной увлажняющей системой на основе «Микрорадар 113-2» (рис. 4.37–4.40) обеспечивают высокую точность поддержания конечной влажности зерна (менее, чем $\pm 0,2$ %) [6].

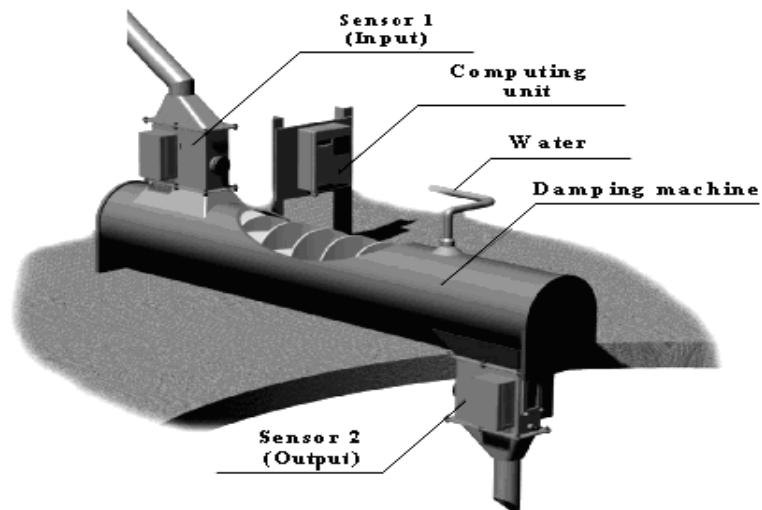


Рис. 4.37. Схема установки оборудования на увлажняющей машине

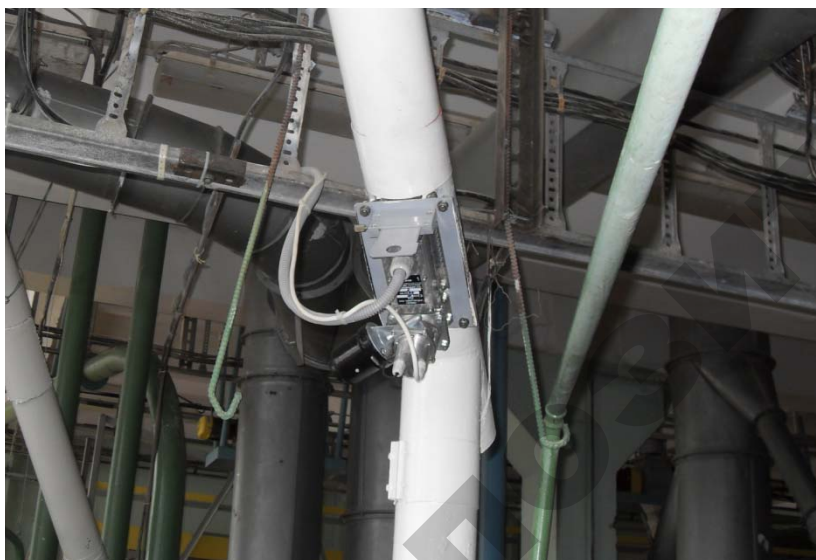


Рис. 4.38. Первый датчик влажности «Микрорадар 113-2» на подающем трубопроводе сухого зерна



Рис. 4.39. Внешний вид второго сенсора влагомера «Микрорадар 113-2»



Рис. 4.40. Блок контроля подачи воды на увлажняющую машину

Применение одного вычислительного устройства с двумя сенсорами на входе и выходе увлажняющей машины, использующего различные алгоритмы обработки, позволяет оптимизировать работу мельничного оборудования, что резко увеличивает выход высоко-сортной муки и значительно уменьшить потери готовой продукции.

4.4.2. Результаты испытаний системы автоматического контроля и регулирования влажности в мукомольном производстве на основе влагомера «Микрорадар 113-2»

1. Проверка соответствия состава, комплектности и качества изготовления элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом (по результатам первичной технической экспертизы).

Элементы автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м» были приняты для проведения оценки в лабораторных условиях в виде отдельных блоков регистрации влажности и температуры зерна с комплектом соединительных проводов и микропроцессорным регулятором. Гидропанель системы оставалась в месте монтажа на линии увлажнения зерна в ОАО «Лидахлебопродукт».

Разработчиком-изготовителем была представлена следующая документация: проект технических условий ТУ ВУ 100185315.007-2010, руководство по эксплуатации системы РЭ 200-01.000-03, руководство по монтажу, эксплуатации и калибровке влагомера «Микрорадар 113м» РЭ 113.00-03.

Состав представленного комплекта элементов системы контроля и регулирования, их конструктивное исполнение соответствуют требованиям проекта технических условий и имеющейся технической документации разработчика.

Качество изготовления элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом хорошее.

При этом следует отметить, что полный комплект элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м» с двумя первичными преобразователями на входе и на выходе увлажняющей машины оценивался с апреля 2010 г. в условиях реальной эксплуатации в составе технологической линии увлажнения зерна перед помолом мукомольного цеха ОАО «Лидахлебопродукт».

2. Идентификация представленного на оценку образца (по результатам первичной технической экспертизы).

Элементы автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием микроволнового влагомера зерна «Микро-

радар 113м» с двумя первичными преобразователями на входе и на выходе увлажняющей машины были приняты на оценку 17.11.2010 г. в виде отдельных блоков регистрации влажности и температуры зерна с комплектом соединительных проводов и микропроцессорным регулятором и идентифицированы как продукция, заявленная к проведению оценки.

Остальные элементы комплекта (сенсор № 2 и панель гидравлическая в составе клапана регулируемого с электроприводом, счетчика воды и фильтра) в совокупности с указанными выше оценивались 20–21.12.2010 г. в условиях реальной эксплуатации в составе четвертой линии увлажнения зерна перед помолом мукомольного цеха ОАО «Лидахлебопродукт».

3. Результаты оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом.

3.1. Условия проведения оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом.

Оценка функционирования элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом (сенсор БС1, блок управления и контроля влажности и температуры зерна) проводилась в лабораторных условиях в соответствии с разработанной программой-методикой по оценке погрешности измерения влажности зерна пшеницы и ржи. При этом оценка показателей проводилась при различной влажности и температуре указанного зерна.

Оценка функционирования элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом в условиях реальной эксплуатации в составе четвертой линии увлажнения зерна перед помолом мукомольного цеха ОАО «Лидахлебопродукт». Элементы контроля влажности и температуры (сенсоры БС1 и БС2) были установлены на входе и выходе увлажняющей машины АБШУ-1.

3.2. Функциональные показатели элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом.

Оценка элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м» осуществлялась в лабораторных условиях по следующей методике. Предварительно были подготовлены образцы зерна с различной влажностью в рабочем диапазоне величин для каждой из культур: пшеница, рожь. Микроволновый влагомер зерна «Микрорадар 113м» был предварительно откалиброван в лаборатории

ООО «Микрорадар-Сервис» с окончательной калибровкой в лаборатории ГУ «БелМИС» по результатам, полученным с помощью сушильного шкафа СЭШ-3м по стандартной методике. В процессе выполнения оценок, для каждой из культур с различной влажностью производилось десять измерений влажности зерна испытываемым влагомером «Микрорадар 113м». Параллельно брались пробы для измерения влажности стандартным методом по ГОСТ 13586.5–93 и анализатором влажности МА 45.

Полученные данные свидетельствуют, что для зерна пшеницы и ржи имеется заявленное в ТУ на влагомер «Микрорадар 113м» совпадение (с допускаемой погрешностью) между показаниями испытываемого влагомера и результатами измерения по стандартному методу, который являлся эталонным при калибровке микроволнового влагомера «Микрорадар 113м». По анализатору МА 45 получены несколько большие значения погрешностей измерений влажности зерна, по сравнению с определяемой влагомером «Микрорадар 113м» и полученными по стандартному методу (ГОСТ 13586.5–93).

В результате проведенных работ установлено, что для обеспечения воспроизводимости результатов измерений влажности зерна, определяемой влагомером «Микрорадар 113м» и стандартным методом по ГОСТ 13586.5–93 с минимальной погрешностью измерений, регламентированной в технических условиях, требуется предварительная калибровка влагомера только с использованием сушильного шкафа по стандартному методу.

При оценке элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м» в условиях реальной эксплуатации в составе четвертой линии увлажнения зерна перед помолом мукомольного цеха ОАО «Лидахлебопродукт», установлено следующее:

- микроволновый влагомер зерна «Микрорадар 113м» достоверно отображает как наличие зерна различной влажности в сенсорах БС1 и БС2 при его движении по подводящему и отводящему трубопроводам, так и его влажность и температуру;
- микроволновый влагомер зерна в потоке «Микрорадар 113м» достоверно отображает процесс динамики увлажнения от сухого до увлажненного зерна;

- микроволновый влагомер зерна в потоке «Микрорадар 113м» обеспечивает своевременную подачу сигнала рассогласования на микропроцессорную систему управления работой панели гидравлической с целью регулирования расхода воды;

- микропроцессорный регулятор (контроллер) обеспечивает необходимое качество управления работой панели гидравлической блока управления и контроля (БУК) автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с учетом транспортного запаздывания;

- элементы контроля влажности зерна с использованием микроволнового влагомера зерна в потоке «Микрорадар 113м» обеспечивают визуализацию протекающих процессов в отношении влажности и температуры зерна и регистрацию указанных показателей.

При оценке элементов контроля влажности зерна в потоке в условиях реальной эксплуатации в составе четвертой линии увлажнения зерна перед помолом мукомольного цеха ОАО «Лидахлебопродукт» установлено отсутствие значительных отклонений результатов измерений в моменты взятия проб, что обусловлено в первую очередь тем, что места взятия организованы в местах установки блоков сенсоров БС1 и БС2 модернизированного микроволнового влагомера «Микрорадар 113м». Различия в показаниях влагомера «Микрорадар 113м» на выходе увлажняющей машины и влажностью, определяемой стандартным методом по ГОСТ 13586.5–93 в диапазоне 10...20 %, составляет менее $\pm 0,5$ %.

При проведении оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом были выявлены следующие проблемы по их использованию и сформированы предложения по возможному их решению:

- калибровка поточных влагомеров зерна «Микрорадар 113м» должна производиться отдельно по каждому блоку сенсоров и только с использованием стандартных методов (с сушкой материала) по данным лабораторных измерений в месте установки системы увлажнения;
- реальное введение элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом в эксплуатацию на конкретном комбинате хлебопродуктов возможно только после проведения пусконаладочных работ, отдельной калибровки сенсоров влагомера,

установления должного программного обеспечения и подготовки (обучения) операторов мукомольного цеха;

- установка блоков сенсоров микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м» на увлажняющей машине должна обеспечивать возможность одновременного отбора пробы и фиксации показаний прибора, что является необходимым условием успешной калибровки прибора;

- отбор проб для лабораторного анализа при калибровке влагомера должен производиться в специальные сосуды с притертой пробкой, в противном случае возможны большие погрешности измерений ввиду быстрого испарения влаги в свежееувлажненном зерне.

3.3. Заключение о результатах оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием модернизированного влагомера «Микрорадар 113м».

В результате проведения оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием модернизированного влагомера «Микрорадар 113м», разработанной и изготовленной БГАТУ при содействии ООО «Микрорадар-Сервис» (в части изготовления модернизированного влагомера «Микрорадар 113м») по собственной документации и при наличии проекта технических условий ТУ ВУ 100185315.007-2010), установлено следующее:

- конструктивное исполнение представленных на оценку элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом соответствует документации разработчика-изготовителя и проекту технических условий;

- при проведении оценки в лабораторных условиях элементов автоматизированной системы увлажнения зерна (выполненных по оценке влажности зерна пшеницы и ржи в диапазоне 10...20 %) установлено, что абсолютная погрешность измерения влажности зерна микроволновым влагомером зерна «Микрорадар 113м» не превышает 0,5 % по отношению к значениям влажности зерна, определяемым по стандартному методу (ГОСТ 13586.5–93), что соответствует требованиям действующих ТНПА и проекта технических условий ТУ ВУ 100185315.007-2010;

- абсолютная погрешность измерения температуры зерна с использованием блоков сенсоров контроля и регистрации влажности и температуры зерна на входе и выходе увлажняющей машины

соответствует требованиям проекта технических условий (± 1 °С, не более) и действующим требованиям ТНПА.

При проведении оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом с использованием модернизированного влагомера «Микрорадар 113м» в условиях реальной эксплуатации в составе четвертой линии увлажнения зерна перед помолом мукомольного цеха ОАО «Лидахлебопродукт» установлено:

- в целом система автоматизированного увлажнения зерна перед помолом, включая оцениваемые и стандартные элементы, обеспечивает выполнение основной задачи – поддержание влажности на выходе увлажняющей машины в диапазоне 14–18 % с отклонением от заданной не более 0,5 %;

- элементы системы увлажнения зерна, предназначенные для контроля влажности сухого и влажного зерна, установлены на подводящем трубопроводе, непосредственно примыкающем к увлажняющей машине АБШУ-1 (БС1) и БС2 непосредственно после шнекового транспортера. Если конструктивные элементы технологической линии увлажнения позволяют установить БС2 непосредственно после увлажняющей машины, то такой вариант является более предпочтительным;

- элементы контроля влажности зерна обеспечивают непрерывный автоматический контроль и регистрацию на жидкокристаллических индикаторах (ЖКИ) как влагомера «Микрорадар 113м», так и ЖКИ микропроцессорного регулятора (контроллера). Значения показателей сохраняются в контроллере в виде цифровой информации;

- значения влажности, определяемые двумя блоками сенсоров БС1 и БС2 микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м», установленными на входе и выходе увлажняющей машины, могут отличаться от значений влажности, полученных с пробоотборника в другом месте до и после увлажняющей машины. Конструктивно пробоотборник должен располагаться в непосредственной близости от каждого блока сенсоров.

При проведении оценки элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом были выявлены следующие проблемы по их использованию и сформулированы предложения по возможному их решению:

- калибровка поточных влагомеров зерна «Микрорадар 113м» должна производиться раздельно по каждому блоку сенсоров и только с использованием стандартных методов (с сушкой материала) по данным лабораторных измерений в месте установки системы увлажнения;

- реальное введение элементов автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом в эксплуатацию на конкретном комбинате хлебопродуктов возможно только после проведения пуско-наладочных работ, раздельной калибровки сенсоров влагомера, установления должного программного обеспечения и подготовки (обучения) операторов мукомольного цеха;

- установка блоков сенсоров микроволнового влагомера зерна «Микрорадар 113м» на увлажняющей машине должна обеспечивать возможность одновременного отбора пробы и фиксации показаний прибора, что является необходимым условием успешной калибровки прибора;

- отбор проб для лабораторного анализа при калибровке влагомера должен производиться в специальные сосуды с притертой пробкой, в противном случае возможны большие погрешности измерений ввиду быстрого испарения влаги в свежувлажненном зерне.

Результаты оценки распространяются на конкретные оцениваемые элементы автоматизированной системы увлажнения зерна перед помолом.

4.5. Автоматизированная система контроля влажности и доувлажнения зерна на основе резонаторного датчика влагосодержания зерновых материалов

Другим возможным путем решения проблемы кондиционирования зерна в мукомольном производстве является разработка автоматизированной системы контроля и регулирования влажности на основе резонаторных датчиков. Современный уровень развития производства диктует необходимость все более достоверного и всеобъемлющего контроля производственных процессов, охватывая весь технологический процесс в целом. То есть на нынешнем этапе развития актуальны не столько локальные датчики контроля, просто дающие информацию о состоянии дел на некоторых отдельных участках

производства, сколько объединенные системы контроля и управления всем технологическим процессом в целом, которые не только информируют сразу обо всех этапах производства, но и активно влияют на весь технологический процесс, автоматически поддерживая его оптимальные параметры. Сказанное справедливо не только для новейших отраслей промышленности, но и для таких традиционных областей человеческой деятельности, как сельское хозяйство и пищевая промышленность.

Так, например, в мукомольном производстве требуется обязательное увлажнение зерна с последующим отволаживанием, т. е. постепенным перераспределением влаги в объеме зернового материала до получения однородного насыщения. Дело в том, что для хранения зерна оптимальными являются сравнительно низкие значения влагосодержания, до 14 %, однако для технологических процессов его переработки и размола необходимо повышать его влагосодержание до 15–16 %. Только тогда происходит полное удаление эпидермиса (оболочки зерен) и после размола получается мука более высокого качества. Основная трудность процесса увлажнения – получение влажности зерна на определенном уровне с точностью не хуже $\pm 0,2... \pm 0,3$ %. Именно при таком разбросе выходной влажности обеспечиваются наилучшие потребительские свойства муки. В процессе увлажнения могут случайным образом изменяться входная влажность зерна, его расход, давление воды в трубопроводе, что приводит к отклонению выходной влажности в гораздо больших пределах от требуемого значения. На мукомольных предприятиях, не оборудованных автоматизированными системами увлажнения, задачу повышения точности выходной влажности зерна решают путем применения нескольких этапов увлажнения и последующего отволаживания, что приводит к необоснованным энергетическим затратам на транспортировку зерна между бункерами и увеличивает время подготовки зерна к помолу. Рассмотрим автоматизированную систему увлажнения, которая позволяет подготовить зерно к помолу за один цикл увлажнения с обеспечением оптимального значения выходной влажности.

В результате многолетних исследований специалистами Института прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета и ООО «АКВАР-СИСТЕМ» (Респуб-

лика Беларусь) была создана высокоэффективная автоматизированная система увлажнения зерна в потоке «А-3120», превосходящая по своим характеристикам все аналогичные системы, имеющиеся в странах СНГ, и не уступающая разработкам лучших фирм мира [147, 148]. Эта система предназначена для автоматической стабилизации процесса увлажнения с целью обеспечения необходимых физико-структурных свойств зерна перед помолом. Стабилизация достигается за счет автоматического управления подачей воды в зависимости от расхода и влажности зерна, расхода и давления воды в водопроводе и заданной конечной влажности.

Данная система обладает следующими преимуществами:

- влажность зерна измеряется непрерывно микроволновым датчиком влажности проходного типа с высокой точностью;
- точность измерения влажности предельно высокая (выше, чем у всех аналогичных систем), не зависит от плотности, сорта, качества, температуры зерна и других возмущающих факторов;
- имеется специальный режим работы датчика влажности зерна, при котором периодически компенсируются аппаратные составляющие погрешности измерений;
- постоянно контролируется и регулируется расход зерна;
- дозирование воды осуществляется электрически управляемым регулирующим клапаном. За счет постоянного контроля расхода воды дозирование не зависит от возможных перепадов давления в водопроводной сети;
- при прерывании потока зерна при помощи отсечного клапана мгновенно прекращается подача воды в систему увлажнения;
- измерение входной влажности зерна и его расхода с высокой точностью обеспечивает оптимизацию процесса увлажнения и, как следствие, минимизирует разброс значений влажности зерна перед помолом;
- управление режимами работы системы осуществляется с операторской панели, что обеспечивает высокую гибкость и оперативность управления;
- за счёт использования высокопроизводительного программируемого логического контроллера Mitsubishi семейства FX2N в качестве базового модуля системы управления достигается требуемое быстродействие при обработке данных от информационных измерителей, обеспечивается высокая гибкость системы при возможной

дальнейшей модернизации, реализуется возможность интеграции данной системы в единую промышленную сеть предприятия.

Система состоит из двух основных блоков (рис. 4.41). Блок измерения потока и влажности зерна содержит датчик расхода зерна «А-352» и датчик влажности зерна в потоке «А-315», состоящий из генераторного блока с датчиком и блока управления.

Блок контроля и управления расходом воды включает расходомер воды, автоматический регулирующий клапан подачи воды и управляющий контроллер.

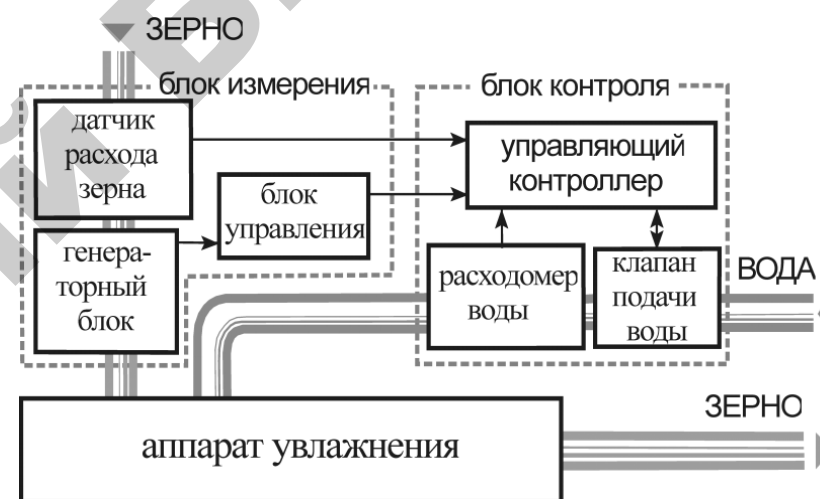


Рис. 4.41. Схема автоматизированной системы контроля влажности и доувлажнения зерна в потоке

В автоматизированной системе увлажнения зерна наиболее важным звеном является датчик влажности, позволяющий контролировать влажность зерна в потоке перед устройством увлажнения с высокой достоверностью (не хуже $\pm 0,25$ % по абсолютному значению). При работе в промышленных условиях его показания не должны зависеть от температуры окружающей среды, а также температуры, плотности и помольного состава зерна. Для обеспечения всех этих требований с использованием современного теоретического моделирования [129–134] был разработан микроволновый резонансно-торный датчик влажности зерна «А-312»,

более современной версией которого является датчик «А-315». Принцип действия этого датчика, как и датчиков влажности многих других материалов, основан на существенном различии диэлектрической проницаемости большинства сухих веществ и воды в микроволновом диапазоне длин волн [121–125]. В качестве чувствительного элемента в устройстве используется кольцевой резонатор, в центральной части которого имеется измерительный канал в виде диэлектрической трубки из тефлона, по которому протекает зерно (рис. 4.42).

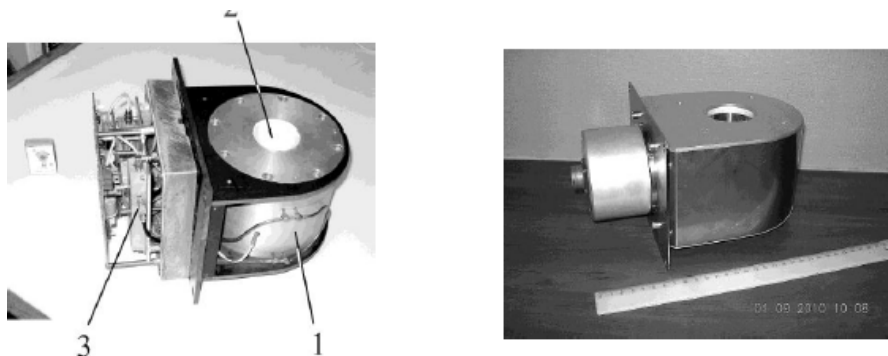


Рис. 4.42. Общий вид датчика влажности зерна в потоке:
слева – модель «А-312» без кожуха; справа – модель «А-315»;
1 – коаксиальный резонатор; 2 – канал подачи зерна; 3 – электронный блок

При контакте резонансного электромагнитного поля с зерном различной влажности происходит изменение параметров резонатора: смещение резонансной частоты и уменьшение добротности (амплитуды резонанса). Однако изменения этих величин могут вызываться также изменением плотности (натуры) зерна, что приводит к значительной погрешности в определении влажности, особенно при измерениях в потоке движущегося зерна (до $\pm 1,0\%$ и более). Отличительная особенность данного датчика от других состоит в том, что благодаря одновременному измерению двух параметров резонатора (резонансной частоты и амплитуды резонанса) и специальному алгоритму обработки, показания влажности зерна практически не зависят от изменения его плотности (натуры), что обеспечивает высокую достоверность измерения влажности в потоке.

Практика показывает, что разработанный микроволновый датчик обеспечивает погрешность измерения не хуже $\pm 0,25\%$ в диапазоне изменения влажности от 5 до 18 %.

Встроенный в измерительный канал датчик температуры обеспечивает автоматическую коррекцию показаний влажности в зависимости от температуры зерна. Стабильность характеристик резонатора обеспечивается встроенным в его корпус дополнительным датчиком температуры. Кроме этого, датчик снабжен пневматическим механическим устройством, позволяющим периодически на короткое время перекрывать поток зерна для самодиагностики и дополнительной коррекции исходных параметров.

Датчик может быть использован для работы и с другими устройствами автоматики и системами управления, обмен информацией с которыми осуществляется по интерфейсам RS-232, RS-485 или токовому выходу.

Собственной разработкой фирмы является также микропроцессорный тензометрический датчик расхода зерна, принцип действия которого основан на измерении усилия, создаваемого движущимся потоком зерна, на элемент тензодатчика. Датчик расхода зерна отличается простотой и надежностью. В нем, как и в датчике влажности, используется режим автоматической калибровки, что обеспечивает необходимую точность и стабильность показаний.

От датчиков влажности и расхода зерна в потоке информация о физических параметрах материала поступает в управляющий контроллер, который подает команды на увеличение или уменьшение количества подаваемой воды в зерно через клапан в соответствии с установленным режимом работы. Задание этих режимов для автоматизированной системы осуществляется через пульт дистанционного управления. Действия оператора сводятся только к вводу с пульта необходимого значения выходной влажности.

На панели индикатора, входящего в состав контроллера, отображаются текущие значения входной и заданной выходной влажности зерна, его температура, расход зерна и расход воды в единицу времени, а также появляются сообщения в случае аварийной ситуации в системе. Внешний вид автоматизированной системы увлажнения зерна в реальных производственных условиях показан на рис. 4.43.

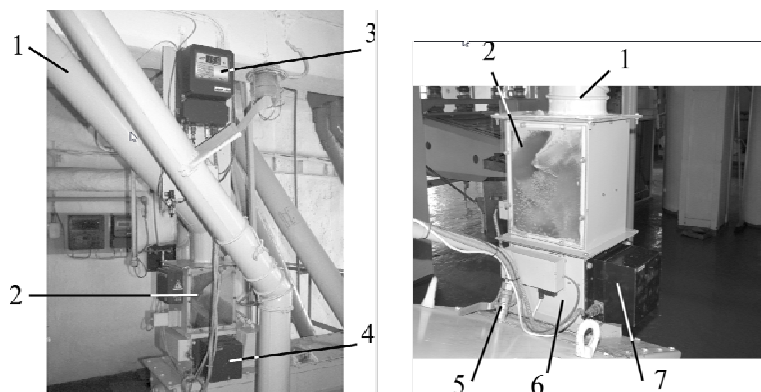


Рис. 4.43. Автоматизированная система доувлажнения зерна в потоке, установленная на Минском комбинате хлебопродуктов:

- 1 – трубопровод подачи зерна; 2 – деформационный измеритель расхода зерна; 3 – индикатор входной влажности; 4 – устройство обработки данных от датчика расхода зерна; 5 – канал подачи воды; 6 – датчик влажности зерна; 7 – электронный блок датчика влажности

Таким образом, применение высокоточного микроволнового датчика влажности зерна, работающего в непрерывном режиме, позволило создать автоматизированную систему контроля влажности и доувлажнения зерновых материалов в потоке. С его помощью удалось достигнуть высоких метрологических характеристик вследствие независимости измеряемых данных от плотности материала, что обеспечило высокую стабильность поддержания необходимого уровня влагосодержания зерна перед помолом. Такие системы доувлажнения и контроля сейчас работают более чем на 30 мукомольных предприятиях Беларуси и России, где за время эксплуатации показали свою высокую эффективность.

5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ

Разработка средств экспрессного измерения влажности высокого класса точности немыслима без решения задач метрологического обеспечения процесса определения количественных характеристик влажностного состояния вещества. Одной из основных характеристик этого состояния является влажность.

Теоретически, влажность твердого вещества – это количественная характеристика, определяемая массовой долей воды в пробе исследуемого материала. На практике ее вычисляют как

$$W = \frac{m_{\text{вл}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{вл}}} \cdot 100 \%,$$

где $m_{\text{вл}}$ – масса влажного образца;

$m_{\text{сух}}$ – масса обезвоженного (абсолютно сухого) образца.

Измерение $m_{\text{вл}}$ с требуемой точностью особой проблемы не составляет, тогда как определение границы между абсолютно сухим веществом и веществом, содержащим некоторое количество адсорбционно связанной воды, представляет собой сложную задачу.

Существуют различные методы измерения влажности, которые можно разделить на две большие группы – прямые и косвенные. На практике прямые методы используются для особо точных и контрольно-поверочных измерений, когда требуемая точность не обеспечивается существующими косвенными методами. В то же время прямые методы обладают рядом существенных недостатков, таких как длительность процесса, разрушение образцов и др. Так, по Гильбо [4] достижение абсолютно сухого состояния для зерна при условии сохранения летучих соединений возможно при вакуумной сушке (50 °C) в течение более 160 часов, что совершенно не-

приемлемо для технических измерений. Что касается методов ускоренной сушки зерна по ГОСТ 13586.5-93, то при более чем сорока минутном анализе они дают относительную погрешность измерения влажности до 3 %, т. е. на уровне современных лабораторных СВЧ-влажномеров.

Для решения большинства практических задач определения влажностного состояния веществ в настоящее время применяют экспресс-влажномеры, основанные на зависимости различных физико-химических свойств материалов от влажности.

Влагомер – это прибор, предназначенный для измерения, контроля и регулирования влажности вещества в различных технологических процессах.

Поверка влагомера – это установление метрологическим органом его реальной погрешности и выдача заключения о пригодности данного прибора к применению.

Влагомер как средство измерения имеет ряд особенностей. Поскольку большинство влагомеров основаны на косвенных методах измерения, то важнейшей задачей является его качественная градуировка, т. е. установление функциональной зависимости между некоторой физической величиной и влажностью данного материала. Обычно эта зависимость является статистической и при градуировке устанавливается среднее значение параметра для данной влажности вещества. В результате получают усредненную номинальную градуировочную характеристику влагомера, которая может не соответствовать ни одной из разновидностей контролируемого вещества (например, во влагометрии зерна может быть свыше 100 разновидностей только пшеницы).

На рис. 5.1 приведена градуировочная характеристика высокочастотного влагомера зерна, взятая из [4], откуда видно, что ни одна из зависимостей емкости от влажности конкретного типа полностью не совпадает с усредненной (номинальной) характеристикой влагомера. Т. е. погрешность измерения влажности для данного прибора не является величиной постоянной. Она может быть нормирована не конкретным значением, а возможным ее пределом при заданной доверительной вероятности.

Таким образом, при поверке влагомеров необходимо проверить погрешность воспроизведения номинальной градуировочной характеристики влагомера и тем самым установить пригодность при-

бора к эксплуатации. В случае превышения допустимого отклонения провести его переградуировку.

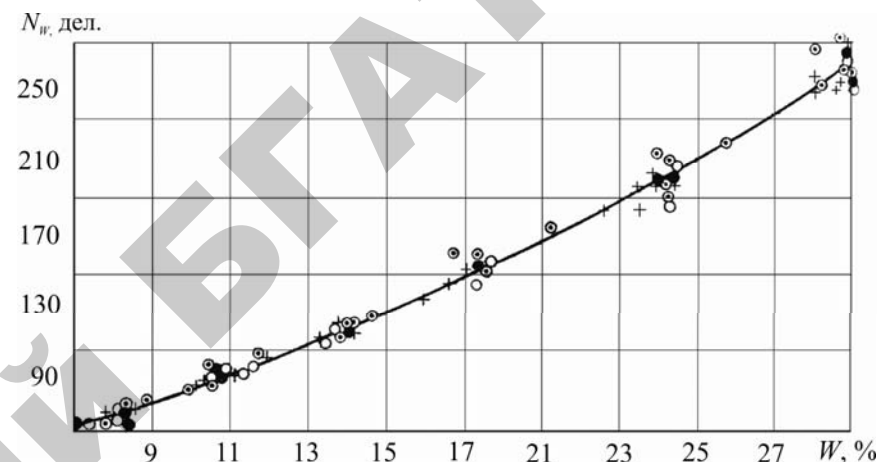


Рис. 5.1. Градуировочная характеристика высокочастотного влагомера зерна

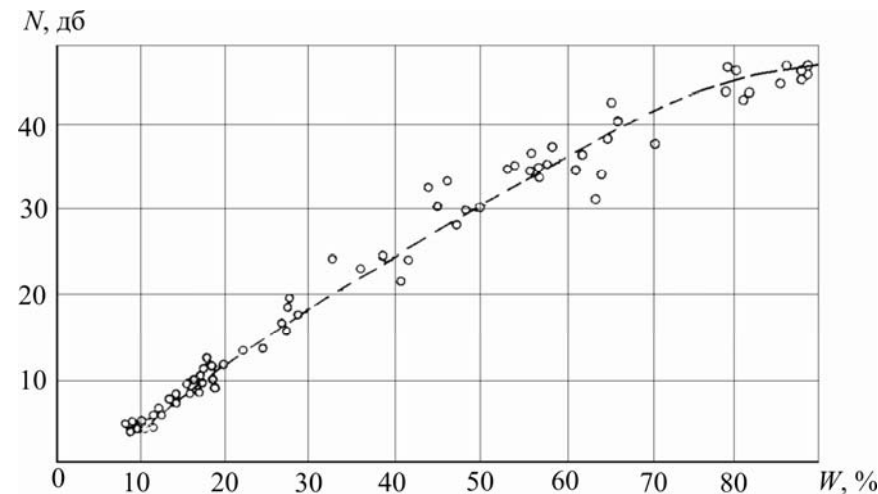


Рис. 5.2. Зависимость затухания СВЧ-энергии N от влажности W березовой древесины

Таким образом, влагомеры твердых веществ, в отличие от других средств измерения, необходимо поверять как приборы для измерения физических величин, функционально связанных с влажностью, а также непосредственно как прибор для измерения влажности. Кроме того, необходимо учитывать, что практически все влагомеры обладают мультипликативной погрешностью, которая обычно увеличивается с ростом влажности (рис. 5.2) [4].

Методики градуирования влагомеров, основанных на различных физических принципах, имеют значительные различия. Ниже, в качестве примера, приведем методику градуировки лабораторного СВЧ-влагомера «Микрорадар-101», приведенную в техническом описании и инструкции по эксплуатации.

5.1. Методика градуировки «Микрорадар-101»

1. Условия градуировки. Температура образцов и окружающей среды составляет 20 ± 2 °С.

2. Приготовить образцы материала, влажность которого необходимо измерять: первую пробу с влажностью, близкой к минимальной, десятую – с влажностью, близкой к максимальной.

Остальные восемь проб по влажности должны располагаться равномерно между первой и десятой. Тщательно перемешать пробы и поместить их в хорошо закрывающиеся емкости или завязывающиеся полиэтиленовые пакеты. Пронумеровать их. Выдержать при комнатной температуре не менее 8 часов. По ГОСТ 13586.5-93 измерить влажность приготовленных проб, по три раза каждую, результаты усреднить и записать как $W_1 \dots W_{10}$ соответственно.

3. Включить прибор и прогреть его в течение 60 мин. В соответствии с ТО измерить по прибору влажность десяти проб по три раза каждую, усреднить и записать как $M_1 \dots M_{10}$ соответственно.

4. Построить график зависимости $M(W)$, см. рис. 5.3. Определить точку пересечения графика с осью M и обозначить эту точку M_0 . Вставить в установочное отверстие имитатор. Не нажимая кнопку «0» измерить показания имитатора по прибору. Отложить на оси M значение имитатора по прибору и определить имитационную влажность имитатора $W_{им}$, как показано на рис. 5.3.

Нажать кнопку «К» (на боковой панели справа). Записать показания прибора при нажатой кнопке «К» – M_K . Отложить его на оси M графика. Определить по графику имитационную влажность W_K .

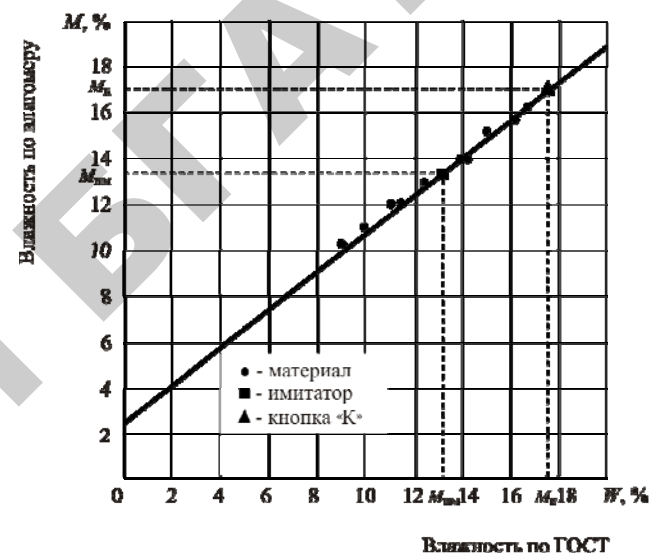


Рис. 5.3. Градуировочная зависимость «Микрорадар-101»

5. Потенциометром «К» (на нижней панели справа) установить на приборе при нажатой кнопке «К» значение W_K (при вставленном в прибор имитаторе).

6. Не нажимая кнопку «0», при вставленном в прибор имитаторе, потенциометром «0» установить на приборе значение $W_{им}$.

7. Повторить п.п. 5 и 6 несколько раз до получения на приборе W_K при нажатой кнопке «К» и $W_{им}$ при вставленной ячейке и ненажатой кнопке «0».

8. Градуировка закончена.

9. На отградуированном приборе нажать кнопку «К». Записать показания прибора в таблицу п. 7 ТО как $K_{им}$. Вставить имитатор и нажать кнопку «0». Записать показания прибора в таблицу п. 7 ТО как $M_{им}$. Для данного материала эти значения $K_{им}$ и $M_{им}$ однозначно определяют градуировочную характеристику прибора и используются для его поверки и подстройки при работе. Прибор к работе готов.

5.2. Методика поверки влагомера лабораторного «Микрорадар-101»

1. Методика поверки МП-365МН-98.

Настоящая методика распространяется на влагомер лабораторный «Микрорадар-101».

Влагомер лабораторный «Микрорадар-101» (далее влагомер) предназначен для экспрессного измерения влажности муки и макаронных изделий стандартных составов в лабораторных и цеховых условиях методами микроволновой влагометрии с погрешностью не хуже 0,35 %. Принцип действия влагомера основан на изменении величины поглощения СВЧ-энергии влажным материалом в волноводном тракте влагомера и преобразовании этой величины в цифровой код, соответствующий влажности материала. Влагомер обеспечивает автоматическую коррекцию результатов измерения от изменения температуры влажности муки и макаронных изделий.

Периодичность поверки влагомера – 12 месяцев.

2. Операции поверки.

При проведении поверки должны быть выполнены операции и применены средства поверки с характеристиками, указанными в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Порядок проведения операций поверки

Наименование операции	Номер пункта НД по поверке
1. Внешний осмотр	8.1
2. Опробование	8.2
3. Определение сопротивления изоляции	8.3
4. Определении метрологических характеристик	8.4
4.1. Определение абсолютной погрешности и диапазона измерения влажности	8.4.1
5. Обработка результатов измерений	9

Примечание:

а) допускается применять другие средства поверки, прошедшие метрологическую аттестацию или поверку в органах государствен-

ных метрологических служб и удовлетворяющих по точности требованиям настоящего стандарта;

б) все средства измерений, применяемые при поверке, должны иметь действующие поверительные клейма или свидетельства о госповерке.

3. Средства поверки.

При проведении поверки должны применяться средства, указанные в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Перечень технических средств для поверки влагомера

Наименование операции	Номер пункта НД по поверке	Наименование образцового средства измерения, номер документа, регламентирующего технические требования к нему: разряд, класс точности, ГОСТ
Определение сопротивления изоляции	9.3	Мегомметр М4100/03, погрешность ± 1 %
Определение абсолютной погрешности и диапазона измерения влажности	9.4	Образцовая вакуумно-тепловая установка типа УВТО с комплектом вспомогательного оборудования по ГОСТ 8.432-81 Диапазон измерения влажности – 5...45 % Предел допускаемого значения абсолютной погрешности – $\pm 0,1$ % Диапазон регулируемой температуры в сушильной камере – 100...140 °С Пробы муки по ГОСТ 27668-88 Пробы макарон по ГОСТ 14849-89

4. Требования к квалификации поверителей.

К проведение измерений при поверке и обработке результатов измерений допускают лиц, аттестованных в качестве поверителей в порядке, установленном Госстандартом Беларуси.

5. Требования безопасности.

5.1. При проведении поверки должны быть соблюдены требования ГОСТ 12.2.007.0-75 «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденные Госэнергонадзором.

5.2. Лица проводящие поверку, должны быть ознакомлены с правилами (условиями) безопасной работы влагомера и средств поверки, приведенными в их эксплуатационной документации.

6. Условия поверки.

При проведении поверки должны быть соблюдены следующие условия:

температура окружающего воздуха – 20 ± 5 °С;

относительная влажность окружающего воздуха – от 30 до 80 %;

атмосферное давление – от 84 до 106 кПа;

напряжении питания сети – 220_{-33}^{+22} В;

частота питающей сети – 50 ± 1 Гц;

механические воздействия, вибрация, внешние электрические и магнитные поля, кроме земного, отсутствуют;

перед проведением поверки влагомеры должны быть выдержаны в помещении, в котором будет осуществляться поверка, не менее 24 часов.

7. Подготовка к поверке.

Перед проведением поверки должны быть выполнены следующие подготовительные работы:

1) подготовить образцовые средства измерений к работе в соответствии с их техническим описанием или инструкцией по эксплуатации;

2) подготовить влагомер к работе, для чего необходимо:

- подключить влагомер к сети переменного тока;

- включить влагомер, время установления рабочего режима – не менее 15 мин;

- в соответствии с разделом 7 инструкции по эксплуатации подготовить влагомер к работе.

8. Проведение поверки.

1. Внешний осмотр.

При проведении внешнего осмотра должно быть установлено соответствие влагомера следующим требованиям:

- отсутствие механических повреждений на поверхности влагомера, влияющих на точность измерений;

- наличие маркировки и необходимых надписей на наружных панелях влагомера;

- соответствие комплектности требованиям НД на влагомер.

2. Опробование:

- при опробовании проводят проверку работоспособности и операции, предусмотренные эксплуатационной документацией наверяемый влагомер;

- при проверке работоспособности влагомера проверяют исправность индикатора, возможность установки калибровочного значения, указанного в эксплуатационной документации;

- для проверки работоспособности схемы автоматической коррекции температуры исследуемого материала следует нажать кнопку «0» (на левой боковой панели прибора). Показания цифрового индикатора должны возрасти на величину, указанную в Инструкции по эксплуатации на влагомер с точностью 0,2 %.

Если не выполняется хотя бы одно требование п. 2, влагомер бракуется и направляется в ремонт.

3. Проверка сопротивления изоляции.

Проверка сопротивления изоляции между контактом сетевой вилки и корпусом влагомера осуществляется при помощи мегомметра. Напряжение постоянного тока при измерении выбирают равным (500 ± 10) В. Сопротивление изоляции должно быть не менее 20 Мом.

4. Определение метрологических характеристик.

1. Определение абсолютной погрешности и диапазона измерения влажности проводят на муке или макаронах (или на обоих материалах в зависимости от применения) при помощи вакуумно-тепловой установки типа УВТО с диапазоном измерения влажности 5–45 %; пределом допускаемого значения абсолютной погрешности $\pm 0,10$ %; диапазоном регулируемой температуры в сушильной камере 100–140 °С. В состав образцовой вакуумно-тепловой установки входят: сушильная камера с терморегулятором и вакуумным насосом; бункеры для зерна и макаронных изделий с измельчающим устройством; бункеры для отбора навесок; лабораторные равноплечие весы 2-го класса с предельной нагрузкой 200 г; эксикаторы 2–250 по ГОСТ 6371-73; сита из проволоочной сетки с отверстиями диаметрами 0,8 мм и 1 мм.

2. Измерения на образцовой вакуумно-тепловой установке осуществляются в соответствии с методикой выполнения измерений по ГОСТ 8.432-81. Пробы отбираются в соответствии с требованиями:

для муки и отрубей – ГОСТ 14849-89;

для макаронных изделий – ГОСТ 14849-89.

Масса отобранных проб должна быть от 0,9 до 1,1 кг каждая и значение влажности их должно составлять (0–20) %, (40–60) %, (80–100) % диапазона измерения.

3. От пробы, влажность которой составляет от 0 до 20 % диапазона измерения, отбирается по шесть навесок массой по $(10 \pm 0,1)$ г каждая для измерений на образцовой вакуумно-тепловой установке и шесть навесок массой по $(100 \pm 0,1)$ г каждая для измерений влажности влагомером.

4. Значение влажности каждой навески W_{Hi} , определенное на образцовой вакуумно-тепловой установке, в процентах рассчитывается по формуле

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_b} \cdot 100 - K, \quad (5.1)$$

где m_b – масса навески до подсушивания, г;

m_c – масса навески после обезвоживания, г;

K – коэффициент коррекции, принимаемый в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.432-81.

За результат измерения на образцовой вакуумно-тепловой установке принимают среднее арифметическое значение влажности шести навесок исследуемого материала, высушенных одновременно, если максимальное расхождение между ними не превышает 0,10 %, по формуле

$$\bar{W}_H = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n W_{Hi}. \quad (5.2)$$

В случае, если максимальное расхождение между ними превышает 0,10 %, необходимо повторить операции, изложенные в пунктах 2–4.

5. С помощью влагомера измеряют влажность поочередно каждой из шести навесок, которые были отобраны для измерения влагомером, помещая в измерительную кювету прибора необходимую массу материала в соответствии с Инструкцией по эксплуатации (за результат измерения влажности принимается среднее арифметическое значение двух измерений одной и той же пробы, если расхождение между ними не превышает 0,2 %). Вычисляют среднее значение

$$\bar{W}_{изм} = \frac{1}{6} \sum_{j=1}^6 W_{изм j}, \quad (5.3)$$

где $W_{изм j}$ – значение влажности j -ой навески, полученное при измерении влагомером;

j – номер навески, $j = 1, 2, \dots, 6$.

6. Поочередно повторяют операции п.п. 3–5 для оставшихся проб, влажность которых составляет 40–60 % и 80–100 % диапазона измерений.

9. *Обработка результатов измерений.*

Абсолютная погрешность измерения влажности определяется как разность между показаниями влагомера и значением влажности, полученного на образцовой вакуумно-тепловой установке, и подсчитывают по формуле

$$\Delta = \bar{W}_{изм} - \bar{W}_H. \quad (5.4)$$

Абсолютная погрешность измерения влажности влагомером не должна превышать $\pm 0,35$ %.

10. *Оформление результатов поверки.*

1. Все результаты поверки заносят в протокол.

2. Результаты поверки считают положительными и влагомеры признают годными к применению, если они отвечают требованиям настоящей методики. Положительные результаты поверки оформляют путем выдачи свидетельства о Государственной поверке по форме, установленной СТБ 8003-93.

3. При отрицательных результатах поверки выдается извещение о непригодности по форме, установленной СТБ 8003-93, с указанием причин несоответствия. Влагомеры, не прошедшие поверку, к применению не допускаются. Предыдущее свидетельство аннулируется.

5.3. Поверочные схемы влагомеров твердых веществ и материалов

Наиболее отработанная и опробованная на практике в настоящее время поверочная схема влагомеров зерна (ГОСТ 8.480–92).

На рис. 5.4 приведена модифицированная поверочная схема влагомеров зерна и продуктов его переработки с учетом новых разработок устройств контроля влажности высокого класса точности, появившихся в последнее десятилетие.

В поле эталонов данной поверочной схемы размещена образцовая установка высшей точности. Она является групповым средством измерений и состоит из трех образцовых вакуумно-тепловых установок типа УВТО, подробно описанных в [4]. Диапазон измерения влажности данного группового средства составляет 5...45 %, среднее квадратичное отклонение результата измерения влажности молотого зерна не превышает $\pm 0,03$ %.

Образцовая установка позволяет методом непосредственных сличений результатов измерений влажности зерна проверить диапазон измерений и основную погрешность вакуумно-тепловых установок 1-го разряда, эксплуатируемых производителем лабораторных СВЧ-влагомеров научно-производственным предприятием «Микрорадар» (г. Минск), а также головными органами ведомственных метрологических служб Госстандартов Республики Беларусь и Российской Федерации. Погрешность измерения влажности УВТО не хуже $\pm(0,1-0,2)$ % при диапазоне 5–45 % влажности. В свою очередь, вакуумно-тепловая установка 1-го разряда позволяет также методом непосредственных сличений поверять влагометрические установки 2-го разряда, основанные на методе высушивания проб зерна при атмосферном давлении по ГОСТ 29027–91 (погрешность таких установок составляет 0,3...0,8 %), а также лабораторные СВЧ-влагомеры зерна серии «Микрорадар» (абсолютная погрешность измерения которых в диапазоне 8...35 % составляет $\pm 0,35$ %).

В качестве образцовых средств измерений, заимствованных из других поверочных схем, на рис. 5.4 показаны образцовые меры емкости по ГОСТ 8.371–90 и ГОСТ 8.267–87 (для проверки емкостных высокочастотных влагомеров), а также образцовые меры сопротивления (для проверки резистивных или кондуктометрических влагомеров) по ГОСТ 8.028–89 и другие средства (секундомеры, термометры и др.). Преде-

лы допускаемых значений относительной погрешности мер емкости не должны превышать 0,1 %, мер сопротивления – 0,01 %.

При построении поверочных схем влагомеров других материалов в них могут быть включены специально созданные для целей поверки и дополнительного контроля в межповерочный интервал имитаторы физических свойств влажного материала, как, например, в случае с измерителем влажности «Микрорадар 101». Такие имитаторы могут входить в комплект поставки прибора.

Изложенное в разделе показывает важность задачи разработки современных методов поверки влагомеров и их стандартизации. Без решения вопросов метрологического обеспечения процессов измерения влажности невозможно обеспечить единство измерений и достоверность получаемых результатов.

5.4. Стандартные образцы для градуировки и поверки микроволновых влагомеров

В измерительной технике и метрологии часто пользуются так называемыми стандартными образцами, или имитаторами влагосодержащих материалов заданной влажности. Основное требование к ним – высокая стабильность электрофизических характеристик в требуемом частотном и температурном диапазоне, а также минимизация случайной составляющей относительной погрешности в зависимости от способа засыпки образцов в первичный измерительный преобразователь. При поверке и первоначальной градуировке микроволновых влагомеров требуется установление параметров зависимости измеряемой величины от влажности – определение погрешности воспроизведения номинальной градуировочной характеристики данного экспресс-влагомера твердых сыпучих материалов, основанного на микроволновом методе.

Во влагометрии известны способы получения стандартных образцов для поверки диэлектрических и ЯМР-анализаторов влажности [1], однако все они основаны на смешении в определенных пропорциях исходных высокостабильных компонентов и эпоксидного компаунда с последующим формованием смеси в экструзионной установке. Технология изготовления таких образцов требует высокой чистоты исходных компонентов, независимости их диэлектрических характеристик от температуры и влажности, а также долговременной

стабильности, связанной с истиранием и старением образца, в результате чего они аттестуются на допустимую основную абсолютную погрешность измерения влажности, например, зерна – 0,15–0,35 %, и требуют ежегодную переаттестацию.

Как известно, современные микроволновые влагомеры имеют основную абсолютную погрешность измерения в тех же условиях 0,3–0,5 % и по условиям поверки не совместимы с данным типом имитаторов.

Для создания высокостабильных имитаторов диэлектрических свойств влагосодержащих материалов в сверхвысокочастотном диапазоне нами [156] предлагается на шарообразный диэлектрик диаметром, соизмеримым с размерами имитируемого объекта контроля, имеющим $\varepsilon = 2-3$ и $\varepsilon_2 = 0,01$, например, фторопласт, нанести последовательно методом вакуумного плазменного напыления слои диэлектрического покрытия с известными диэлектрическими свойствами. Первый слой титаната бария с большой диэлектрической проницаемостью (для имитаторов малой влажности – окись алюминия), затем слой графитового покрытия с большими диэлектрическими потерями, последним слоем должно быть углеродное алмазоподобное покрытие для снижения рассеяния и создания долговременной стабильности на истирание.

Требуемые диэлектрические свойства, имитирующие влажность материала в заданном диапазоне, получают за счет изменения толщины покрытия вариацией высоковольтного напряжения и времени нанесения.

Аттестуемая характеристика стандартного образца – имитируемая влажность, воспроизводимая данным образцом согласно номинальной градуировочной характеристике, утвержденной для данного типа образцового микроволнового влагомера. Сами стандартные образцы-имитаторы аттестуются по допустимому отклонению значения комплексной диэлектрической проницаемости, характеризующему свойства реального вещества при данной имитируемой влажности, а также долговременной стабильности их диэлектрических характеристик.

Как известно, современные микроволновые влагомеры имеют основную абсолютную погрешность измерения в соизмеримых условиях 0,3–0,5 % и по условиям поверки (0,1–0,15 %) несовместимы с данным типом имитаторов.

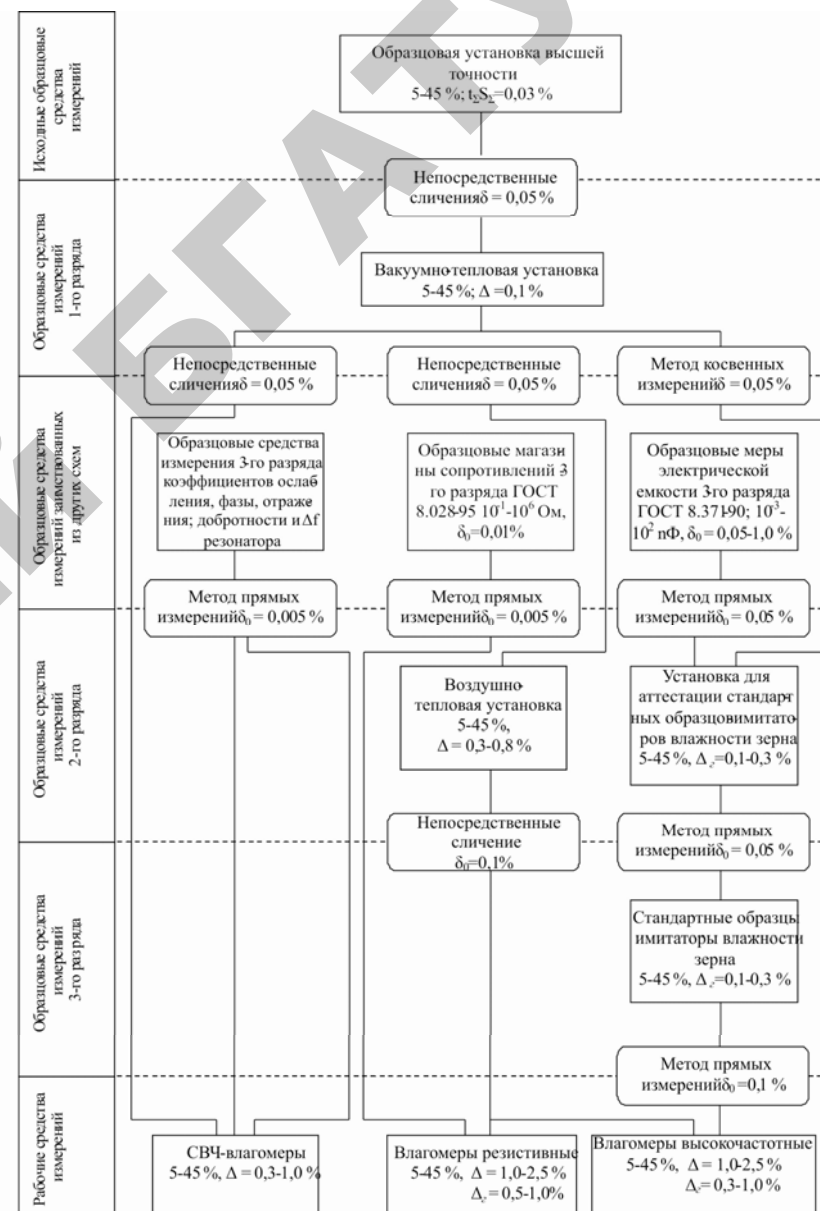


Рис. 5.4. Поверочная схема влагомеров зерна

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. Мн. : Вышэйшая школа, 1974.
2. Секанов Ю. П. Влажометрия сыпучих и волокнистых материалов. М. : ВИМ, 2001.
3. Секанов Ю. П. Влажометрия сельскохозяйственных материалов. М. : Агропромиздат, 1985.
4. Романов В. Г. Поверка влагомеров твердых веществ. М. : Изд-во стандартов, 1983.
5. Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысоочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск : БГАТУ, 2005.
6. Статистический ежегодник Республики Беларусь, 2012. Минстат Республики Беларусь. Мн., 2013.
7. Кухарчик П.Д., Сердюк В.М., Титовицкий И.А., Пуровский М.О. Теоретическое и экспериментальное исследование диэлектрических свойств зерна с помощью коаксиального СВЧ-резонатора / Доклады НАН Беларуси. 2003. Т. 47. № 5.
8. Lisovsky V. V. Automatic Control of Moisture in Agricultural Products by Methods of Microwave Aquametry. 6th International Conference on «Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Germany : Weimar, 2005.
9. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. Кричевский Е. С., Бензарь В. К., Венедиктов Н. В. и др.; под общ. ред. Е. С. Кричевского. М. : Энергия, 1980.
10. Митчел Дж., Смит Д. Акваметрия / перевод с английского под ред. Ф. Б. Шермана. М. : Химия, 1980.
11. Берлинер М. А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. М.-Л. : Энергия, 1965.
12. Лисовский В. В. Исследования и разработка первичных измерительных СВЧ-преобразователей влажности зерна. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. ИПФ АН БССР. Мн., 1983.
13. Розенберг В. Н. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. Л. : Гидрометеиздат, 1972.
14. Розенберг В. И. Диэлектрические свойства воды. Л. : Гидрометеиздат, 1979.
15. Жиленков В. Н. Диэлектрические свойства сорбционно-структурированной воды. В сб. : Основные проблемы теории физической адсорбции. М. : Наука, 1970.
16. Жиленков Н. В. Исследование диэлектрических свойств сорбированной воды. Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Воронеж, 1962.
17. Копылова В. М. и др. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери цеолита NaA, содержащего менее 5 % воды от предельного адсорбционного количества. // Известия АН СССР. Сер. хим. № 5. 1970 (977).
18. Федоров В. Н. и др. Исследование диэлектрических свойств адсорбированной цеолитами воды // АН СССР. Сер. хим. № 2. 1975 (269).
19. Гусев А. А. Диэлектрическая релаксация связанной воды в дисперсных системах : Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. КГУ : Казань, 1978.
20. Жиленков В. Н. Диэлектрические свойства сорбционно-структурированной воды. В сб.: Основные проблемы теории физической адсорбции. М. : Наука, 1970.
21. Курбатов Л. Н. Диэлектрическая постоянная паров, адсорбированных аэрогелем кремнезема. ЖФК, 28,2, 1954.
22. Дубинин М. М. Адсорбция в микропорах. Природные сорбенты. М. : Наука, 1967.
23. Бензарь В. К. Определение влажности некоторых строительных материалов по поглощению электромагнитных волн СВЧ. Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Мн.: БПИ, 1967.
24. Лещанский Ю. И., Апанских В. М., Лебедева Г. И. Электрические параметры песка и глины в диапазоне сантиметровых и дециметровых радиоволн / Труды МФТИ. 1962. Вып. 10.
25. Дайнеко В. А. Исследование электрофизических характеристик почв и грунтов в 3-х сантиметровом диапазоне волн // Автоматизация процессов сельскохозяйственного производства, приборов контроля и средства автоматизации. Горки, 1980.
26. Бензарь В. К., Дайнеко В. А., Ценципер Б. Л., Ярошевич Ю. Н. Определение влагосодержания некоторых почв и грунтов методом СВЧ-поглощения // ИФЖ. Т. 47. № 6. 1984.
27. Лещанский Ю. И., Лебедева Т. Н., Шумилин В. Д. Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // Известия ВУЗов. Т. 14. № 4. 1971.
28. Ценципер Б. Л. Исследование диэлектрических свойств твердых влагосодержащих гетерогенных диэлектриков на СВЧ и разработка методов и приборов контроля их влагосодержания. Автореф. дисс. канд. техн. наук / ИПФ АНБ БССР. Мн., 1986.
29. Лисовский В. В. Исследование и разработка первичных измерительных СВЧ-преобразователей влажности зерна. Автореф. дисс. канд. техн. наук.: 05.11.13./ ИПФ АН БССР. Мн., 1983.
30. Мамбиш С. Е. и др. Влияние температуры на электрические параметры (ϵ' , ϵ'' и $\tan \delta$) зерна пшеницы в диапазоне частот 0–2,65 ГГц // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ. : Влажометрия промышленных материалов и сельскохозяйственной продукции. М., 1978.
31. Болдырев В. М. Патрушев В. Л. Результаты исследования влажностной зависимости диэлектрических параметров зерна сильных пшениц на СВЧ // Исследования по математике, физике и химии. Саратов, 1978.
32. Бородин И. Ф. и др. Методика исследования электрических свойств зерновой массы в диапазоне частот 0-10 Гц // Сборник научных трудов МИИСП. М., 1976.
33. Хранение зерна и зерновых продуктов. Пер. с англ. В. Н. Дашевского, Г.А. Закладного; предисл. Л. А. Трисвятского. М. : Колос, 1978.
34. Лисовский В. В., Ценципер Б. Л., Карпеченко Н. Г. Диэлектрические свойства зерна в диапазоне СВЧ / Влажометрия сельскохозяйствен-

ных и промышленных материалов. Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конференции». Мн., 1987.

35. Рулев В. Ф. Применение сверхвысоких частот для измерения влажности зерна // Электронная техника. Сер. I. Вып. 2. 1970.

36. Кулешов А. П. Исследование электрических свойств зерновой массы и применение их в приборах технологического контроля при послеуборочной обработке зерна. Автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 1978.

37. Баталин М. Ю. Экспериментально-теоретическое обоснование основных параметров полевого влагомера зерна и семян сельскохозяйственных культур. Автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 1981.

38. Кормаков Б. С., Мамбиш О. Е., Птушкин А. Г. Исследование аномальной области частотной зависимости диэлектрической проницаемости зерна пшеницы // Тез.докл. Всесоюз. науч.-техн. совещ.: Влагометрия промышленных материалов и сельскохозяйственной продукции. М., 1978.

39. Лисовский В. В. К выводу аналитической зависимости между влажностью зерна и параметрами СВЧ-поля // Тез.докл.науч.-техн. конф.: Автоматизация процессов сельскохозяйственного производства, приборы контроля и средства автоматизации. Мн., 1982.

40. Лисовский В. В., Ценципер Б. Л. Расчет комплексной диэлектрической проницаемости связанной с зерном воды в диапазоне СВЧ // Тез.докл.науч.-техн. конф.: Автоматизация процессов сельскохозяйственного производства, приборы контроля и средства автоматизации. Мн., 1982.

41. Лисовский В. В., Бензарь В. К. Исследование метрологических характеристик двухканального СВЧ-влагомера зерна // Тезисы Всесоюзного научно-технического совещания: Влагометрия промышленных материалов и сельскохозяйственной продукции. М., 1978.

42. Бензарь В. К., Лисовский В. В., Ценципер Б. Л. Методы и приборы для измерения влажности зерна и других продуктов сельскохозяйственного производства. Мн. : БелНИИНТИ, 1981.

43. Лисовский В. В. Анализ слоистой модели влажного зерна в приближении геометрической оптики // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания: Влагометрия промышленных материалов и сельскохозяйственной продукции. М., 1978.

44. Бохан Н. И., Бензарь В. К., Лисовский В. В., Ценципер Б. Л. Сверхвысокочастотный автоматический влагомер зерна и других сельскохозяйственных материалов САВЗ-3м. Мн. : Экспресс-информ. БелНИИНТИ, 1979.

45. Космин Н. П. Исследование и разработка метода измерения на СВЧ влажности травяной муки, зеленой массы и растений : Дис. на соиск. учен. степени канд.техн. наук. ЛСХИ. Ленинград-Пушкин, 1975.

46. Nelson S. O. Dielectric properties of agricultural products — Measurements and applications. CEJDP Digest of Literature on Dielectrics, IEEE Trans. Elect. Insul., 1991, 26(5).

47. Bao J. Z., Lu S. T. Complex dielectric measurements and analysis brain tissues in radio and microwave frequencies. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 45 (1997).

48. Jakkula P., Tahkola E., Virkkala R., Niinmaki J., Kuopanportti. High water content measurement of slurries containing entrained air in p and paper industry, in: Proc. 3rd Int. Symposium on Humidity and Moisture; NPL, Teddington, UK. April 1998, Vol. 2.

49. Исмагуллаев П. Р., Дроздов В. Н., Матякубов К. Р. Влияние засоренности хлопка-сырца на погрешность измерения его влажности СВЧ-методом на длине 12 см // Хлопковая промышленность. № 5 (108), 1983.

50. Kohler W., Erfurt W., Terheiden K. Untersuchungen zum Stofftransport in Baustoffen mittels Gravimetrisch verifizierter Radarmessung. Wiss. Z. Bauhaus-Univ. Weimar. 2001.47. V. 5-6.

51. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. М. : Советское радио, 1965.

52. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М. : Физматгиз, 1963.

53. Бензарь В. К. Определение влажности капиллярно-пористых материалов по поглощению радиоволн СВЧ // Инженерно-физический журнал. 1970. Т. 18. № 6.

54. Ахмедов Б. Н., Гиреев А. О., Санова Л. А. Анализ работ в области влагометрии масложирового производства // Вестник ВНИИ жиров. 2001. № 1.

55. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М. : ВШ, 1972.

56. Rome A., Weis W., Kreutzer K., Matthies D., Hess U., Ansorgi B. Changes in soil structure caused by the installation of time-domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture. Water Resour. Res. 33 (1997).

57. Knight J. H., Ferre P. A., Rudolph D. L., Kachanoski R. G. A numerical analysis of the effects of coatings and gaps upon relative dielectric permittivity measurement with time domain reflectometry. We Resour. Res. 33 (1997).

58. Бензарь В. К., Ренгарт И. И., Ценципер Б. Л. Аналоговые анализаторы временной спектроскопии влагосодержащих диэлектриков // Автоматизация и средства технического контроля сельскохозяйственного производства. Вып. 88. Горки, 1982.

59. Naito S., Hoshi M., Mashimo S. In vivo dielectric analysis of free water content of biomaterials by time domain reflectometry. Anal. Biochem. 251 (1997).

60. Nissen H. H., Moldrup P., Henriksen K. High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. Soil! Soc. Am. J. 62 (1998).

61. Stacheder M., Fundinger R., Koehler K. On-site measurement of soil water content by a new time-domain reflectometry (TDR) technique in: Field Screening Europe, Gottlieb, J., et al. (eds.); Dordrecht : Kluwer, 1997.

62. Busker L. H. Instruments and control systems. N 12, 1968.

63. Фрелих Г. Теория диэлектриков. М. : Наука, 1960.

64. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах. М., 1963.

65. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М. : Наука, 1978.

66. Сканави Г. И. Физика диэлектриков. М.-Л. : ГИТТЛ, 1949.

67. Милованов О. С., Собенин Н. П. Техника сверхвысоких частот. М. : Атомиздат, 1980.

68. Глестон С., Лейдер К., Эйринг Г. Теория абсолютных скоростей реакций. Л. : НЛ, 1948.

69. Хиппель А. Р. Диэлектрики и их применение. М. : Госэнергоиздат, 1959.

70. Хиппель А. Р. Диэлектрики и волны. М. : Изд-во иностранной литературы, 1960.

71. Гусев А. А. Диэлектрическая релаксация связанной воды в дисперсных системах: Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук КГУ. Казань, 1978.

72. Зацепина Г. Н. Свойства и структура воды. М. : МГУ, 1974.

73. Рулев В. Ф. Исследование и разработка СВЧ-влажмера для зерна: Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. НИИ «Исток». М. : 1974.

74. Цицишвили Г. В., Багратишвили Г. Д. Инфракрасные спектры воды и тяжелой воды, адсорбированных на цеолитах / Синтетические цеолиты: получение, исследование и применение // Известия АН СССР. М., 1962.

75. Кителъ Ч. Статистическая термодинамика. М. : Наука, 1977.

76. Киселев В. Д. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. М. : Наука, 1970.

77. Бензарь В. К. Определение влажности капиллярно-пористых материалов по поглощению радиоволн СВЧ // Инженерно-физический журнал. 1970. Т. 18. № 6.

78. Страх В. Н. Исследование диэлектрических характеристик торфа на СВЧ для обоснования методов контроля его влагосодержания. Канд. дисс. Мн., 1978.

79. Горбутович В. Г. Разработка и исследование метода измерения влажности торфа на сверхвысоких частотах. Канд. дисс. Мн., 1974.

80. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. М. : Химия, 1980.

81. Kaatz U. Bound water: Evidence from and implications for the dielectric properties of aqueous solutions. – Journ. Mol. Liquids., 2011, V. 162, Issue 3.

82. Pissis P. Water in polymers and biopolymers studied by dielectric techniques. Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Ed. by K. Kupfer. Berlin : Springer, 2005.

83. Vandermeulen D., Ressler N. A near-infrared analysis of water-macromolecule interactions. Hydration and the spectra of aqueous solutions of intact proteins. Arch. Biochem. and Biophys., 1980, Vol. 199, No. 1.

84. Hühnerfuss H., Alpers W. Molecular aspects of the system water/monomolecular surface film and the occurrence of a new anomalous dispersion regime at 1.43 GHz. J. Phys. Chem. 1983, Vol. 83, No. 25.

85. Mashimo S., Kuwabara S., Yagihara S., Higasi K. Dielectric relaxation time and structure of bound water in biological materials. J. Phys. Chem., 1987, Vol. 91, No. 25.

86. Tao N. J., Lindsay S. M., Rupprecht A. Structure of DNA hydration shells studied by Raman spectroscopy. Biopolymers, 1989, Vol. 28, No. 5.

87. Brandelik A., Krafft G. Measurement of bound and free water in mixtures. Microwave Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials. Ed. by A. Kraszewski. New York, IEEE, 1996.

88. Yagihara S., Oyama M., Inoue A., Asano M., Sudo S., Shinyashiki N. Dielectric relaxation measurement and analysis of restricted water structure in rice kernels. – Measur. Sci. Technol., 2007, Vol. 18, No. 4.

89. Jones S. B., Or D. Thermal and geometrical effects on bulk permittivity of porous mixtures containing bound water. Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Ed. by K. Kupfer. Berlin, Springer, 2005.

90. Stacheder M., Huebner C., Schlaeger S., Brandelik A. Combined TDR and low-frequency permittivity measurements for continuous snow wetness and snow density determination. Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Ed. by K. Kupfer. Berlin : Springer, 2005.

91. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave dielectric properties of natural earth materials. Microwave Remote Sensing, vol III, From Theory to Applications. Ed. by F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. Norwood, Artech Hous, 1986.

92. Kuharchik P. D., Serdyuk V. M., Titovitsky I. A., Purovsky M. O. The theoretical model of the microwave complex permittivity of grain. Proceedings of the 6-th International Conference on «Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Weimar / Germany, May 29–June 1, 2005. Ed. by K. Kupfer. Weimar : MFPA, 2005.

93. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А., Пуровский М. О. Эффект непрерывного изменения диэлектрического упорядочения в многокомпонентных дисперсных системах // Доклады НАН Беларуси. 2006. Т. 50. № 3.

94. Kuharchik P. D., Serdyuk V. M., Titovitsky J. A., Purovsky M. O. Effect of continuous modification of dielectric order in grain. J. Phys. D : Appl. Phys., 2006. Vol. 39, No. 13.

95. Serdyuk V. M. Dielectric study of bound water in grain at radio and microwave frequencies. Progress In Electromagnetics Research, 2008. V. PIER 84.

96. Nelson S. O., Stetson L. Frequency and moisture dependence of the dielectric properties of hard red winter wheat. J. Agric. Eng. Res. 1976, Vol. 21.

97. Koledintseva M. Y., Chandra S. K. R., DuBroff R. E., Schwartz R. W. Modeling of dielectric mixtures containing conducting inclusions with statistically distributed aspect ratio. Progress In Electromagnetics Research, 2006, Vol. PIER 66.

98. Koledintseva M. Y., DuBroff R. E., Schwartz R. W., Drewniak J. L. Double statistical distribution of conductivity and aspect ratio of inclusions in dielectric mixtures at microwave frequencies. Progress In Electromagnetics Research, 2007, Vol. PIER 77.

99. Yang D. K., Hu X. Y., Zhang S. Y., Dai M. Numerical simulation for the effective conductivity of composite medium in high frequency. PIERS Online, 2007. Vol. 3, No. 4.

100. Wang H. G., Chan C. H., Tsang L., Chan K. F. Mixture effective permittivity simulation using IMLMQR method of preconditioned EFIE. Progress In Electromagnetics Research, 2006. Vol. PIER 57.

101. Sun X. M., Han Y. P., Wang H. H. Near-infrared light scattering by ice-water mixed clouds. Progress In Electromagnetics Research, 2006. Vol. PIER 61.

102. Li Y., Yang P. The permittivity based on electromagnetic wave attenuation for rain medium and its applications. J. of Electromagn. Waves and Appl., 2006. Vol. 20, No. 15.

103. Gong S. H., Huang J. Y. Accurate analytical model of equivalent dielectric constant for rain medium. J. of Electromagn. Waves and Appl., 2006. Vol. 20, No. 13.

104. Bahrami M., Rashed-Mohassel J., Mohammad-Taheri M. An exact solution of coherent wave propagation in rain medium with realistic raindrop shapes. Progress In Electromagnetics Research, 2008, Vol. PIER 79.

105. Van Beek L. K. H. Dielectric behavior of heterogeneous systems. Progress in Dielectrics, Vol. 17. Ed. by J. B. Birks. London : Heywood, 1967.

106. Электрические свойства полимеров. Под ред. Б. И. Сажина. Л. : Химия, 1977.

107. Sihvola A. Electromagnetic Mixing Formulas and Applications. London : IEE, 1999.

108. Tinga W. R. Mixture laws and microwave-material interactions. Dielectric Properties of Heterogeneous Materials. Ed. by J. B. Birks. London : Heywood, 1992.

109. Jylhä L., Sihvola A. Equation for the effective permittivity of particle-filled composites for material design applications. J. Phys. D: Appl. Phys., 2007. Vol. 40, No. 16.

110. Nelson S. O., Russell R. B. Granular and powdered material permittivity-density relationships. Proceedings of the 6th International Conference on «Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Weimar / Germany, May 29–June 1, 2005. Ed. by K. Kupfer. Weimar : MFPA, 2005.

111. Хандохов Т. Х., Паритов А. Ю., Шагилов Л. М. Систематика культурных растений : методические указания к практическим занятиям по большому практикуму. Нальчик : Кабардино-Балкарский ун-т, 2008.

112. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М. : Наука, 1982.

113. Егоров Г. Термодинамическое взаимодействие зерна с водой. // Хлебопродукты. 2004. № 2.

114. Kaatz U. Microwave dielectric properties of water. Microwave Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water-Containing Materials. Ed. by A. Kraszewski. New York, IEEE, 1996.

115. Kaatz U. Electromagnetic wave interaction with water and aqueous solutions. Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Ed. by K. Kupfer. Berlin : Springer, 2005.

116. Борисова М. Э., Койков С. Н. Физика диэлектриков. Л. : изд. ЛГУ, 1979.

117. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М. : Мир, 1969.

118. Беляев Б. А., Дрокин Н. А., Шабанов В. Ф., Шепов В. Н. Исследование высокочастотных диэлектрических спектров жидких кристаллов серий *nCB*, *nOCB* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 4.

119. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М. : Наука, 1966.

120. Каценеленбаум Б. З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М. : Наука, 1966.

121. Мериакри В.В. и др. Под ред. Б.З. Каценеленбаума. Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями. М. : Наука, 1972.

122. Квазиоптическая методика исследования диэлектриков / Апеталин В. И., Демьяненко А. А., Чигряй Е. Е. Препринт. Мн. : ИРЭ АНБ, 1971.

123. Ковалев Н. С. Теория и расчет полосковых волноводов. М. : Наука и техника, 1967.

124. Родионов В. М. Линии передачи и антенны СВЧ. М. : 1965.

125. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М. : ВШ, 1972.

126. Губкин Л. Н. Физика диэлектриков. Теория электрической поляризации в постоянном и переменном электрическом поле. М. : Высшая школа, 1971.

127. Абрамович И. Г., Левин В. Н. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1969.

128. Бензарь В. К. Установка для измерения диэлектрических констант воды и растворов электролитов в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн // Журнал физической химии. 1972. № 1.

129. Филиппов Р. Л. Исследование метода СВЧ для автоматического измерения влажности зерна в потоке : Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. ЧИМЭСХ, Челябинск, 1971.

130. Kraszewski A. W. Recent developments in electromagnetic aquametry // In: Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. / Ed. by K. Kupfer. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005.

131. Nelson S., Trabelsi S. Permittivity measurements and agricultural applications // In: Electromagnetic Aquametry. Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. / Ed. by K. Kupfer. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

133. Kraszewski A. W., Nelson S. O. Resonant cavity perturbation – Some new applications of an old measuring technique // Journ. Microwave Power Electrom. Energy. 1996. V. 31, No 3.

134. Trabelsi S., Kraszewski A.W., Nelson S.O. Universal calibration method for microwave moisture sensing in granular materials // Transactions of the Amer. Soc. Agric. Eng., 2001. V. 44, No 3.

135. Trabelsi S., Nelson S. Comparing near-field and far-field dielectric properties measurements for accuracy of bulk density and moisture content determination in grain // Proc. of the 6th Int. Conf. on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances. Weimar/Germany, May 29-June 1, 2005. Ed. by K. Kupfer. Weimar : MFPA, 2005.

136. Цыплаков А., Шорохов В., Макаров А. Анализаторы влажности зерна // Хлебопродукты. 2002. № 7.

137. Кондратьев Е. Ф., Ключев А. П., Слободяник В. М. Резонансный СВЧ-влажномер для больших влажностей // Дефектоскопия. 1984. № 9.

138. Keam R., Green A.D. Measurement of complex dielectric permittivity at microwave frequencies using a cylindrical cavity // *Electron. Lett.*, 1995. V. 31, No 3.

139. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А., Пуровский М. О. Теоретическое и экспериментальное исследование диэлектрических свойств зерна с помощью коаксиального СВЧ-резонатора // *Доклады НАН Беларуси*. 2003. Т. 47. № 5.

140. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А. Гибридные моды коаксиального резонатора с поперечной щелью и цилиндрическим диэлектриком // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49. № 5.

141. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А. Структура гибридных мод коаксиального резонатора с поперечной щелью и бесконечным цилиндрическим диэлектриком // *Вестник Белорус. ун-та. Сер. 1. Физика, математика, механика*. 2005. № 2.

142. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А. Применение объемных резонаторов со щелью в качестве приборов измерения влажности сыпучих материалов / *Антенны*. 2006. Вып. 7 (110).

143. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А. Расчет электромагнитных полей объемных резонаторов с учетом потока энергии через щели // *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. Вып. 4.

144. Кухарчик П. Д., Сердюк В. М., Титовицкий И. А. Дифракция гибридных мод коаксиального резонатора на поперечной щели и цилиндрическом диэлектрике // *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52. № 7.

145. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. М. : Радио и связь, 1988.

146. Вайнштейн Л. А. Теория дифракции и метод факторизации. М. : Сов. радио, 1966.

147. Каценеленбаум Б. З. Высокочастотная электродинамика. М. : Наука, 1966.

148. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн. М. : Наука, 1978.

149. Миттра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. М. : Мир, 1974.

150. Григорьев А. Д., Янкевич В. Б. Резонаторы и резонаторные замедляющие системы СВЧ. Численные методы расчета и проектирования. М. : Радио и связь, 1984.

151. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М. : Наука, 1979.

152. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1976.

153. Канторович Л. В., Крылов В. И. Приближенные методы высшего анализа. Л. : Физматгиз, 1962.

154. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1979.

155. Калиткин Н. Н. Численные методы. М. : Наука, 1978.

156. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. СПб. : Лань, 2002.

157. Titovitsky J. A., Belyachits A. Ch., Kourilo N. I., Purovsky M. O. Local automated system for moisture measurement and moistening in flow. «Aquametry 2010. Proceedings of the First European Conference on Moisture Measurement in Weimar, Germany, October 5-7, 2010». Edited by Klaus Kupfer. Weimar : MFPA, 2010.

158. Беляиц А. Ч., Курило Н. И., Сметанко А. Л., Титовицкий И. А., Пуровский М. О. Автоматизированная система увлажнения зерна в потоке / *Материалы 4-й Международной научно-технич. конф. «Приборостроение – 2011»*. Минск : БНТУ, 2011.

159. Ценципер, Б. Л. Инвариантные параметры в СВЧ-влажнометрии / Б. Л. Ценципер // *Методы и средства автоматического управления и контроля в сельскохозяйственном производстве*. Горки, 1995.

160. Igor Renhart, Boris Tsentsiper, Dielectric Properties of Bulk Materials and Restrictions to the Application of Two-Parameter Microwave Aquametry. 6Th International Conference on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Germany : Weimar, 2005.

161. Lisovsky V. V. Automatic Control of Moisture in Agricultural Products by Methods of Microwave Aquametry. 6Th International Conference on «Elektromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Germany : Weimar, 2005.

162. Байлук Н. Д., Гончарик В. В., Занкевич В. А., Лисовский В. В., Карташевич А. Н. Ультразвуковой измеритель влажности // *Инженерный вестник*. 2007. № 1 (23).

163. Байлук Н. Д., Басюк Е. И., Булко М. И., Занкевич В. А., Лисовский В. В., Сизов В. Д. Ультразвуковой метод измерения влажности зерна // *Инженерный вестник*. 2008. № 1 (25).

164. Способ измерения влажности материалов переменной плотности. Пат. на изобретение № 16009, РБ, 30.06.2012 г.

165. Proceeding of the 10Th International Conference on «Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances». Germany : Weimar, 2013.

166. Лисовский В. В. Заявка на изобретение № a20120342 «Способ получения имитаторов влагосодержащих материалов» (опубл. 30.10.13).

Научное издание

Лисовский Владислав Васильевич,
Титовицкий Иван Александрович

МИКРОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*
Редактор *В. М. Воронович*
Компьютерная верстка *А. О. Лабун*
Дизайн и оформление обложки *И. А. Усенко*

Подписано в печать 1.07.2013. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 13,48. Уч.-изд. л. 10,55. Тираж 100 экз. Заказ 410.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.