

**ИСМАТУЛЛАЕВ П.,  
УСМАНОВА Х., ТУРГУНБАЕВ А.**

**ВЛАГОМЕТРИЯ ХЛОПКА И  
ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**



**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени ИСЛАМА КАРИМОВА**

**ИСМАТУЛЛАЕВ П.Р., УСМАНОВА Х.А., ТУРГУНБАЕВ А.**

# **ВЛАГОМЕТРИЯ ХЛОПКА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**ТАШКЕНТ – 2017**

УДК: 677.21\*812.210

ББК 37.231

И-87

**И-87** Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А., Тургунбаев А.  
**Влагометрия хлопка и хлопковых материалов.**  
–Т.: «Fan va texnologiya», 2017, 288 с.

ISBN 978–9943–11–598–9

В монографии освещены вопросы измерения влажности хлопка и хлопковых материалов. Рассмотрены механизмы взаимодействия воды с хлопковыми материалами, методы измерения влажности применительно к хлопку - сырца и продуктов его переработки. Приводятся влажностные характеристики и оптимальные схемы разработанных средств измерения влажности и их метрологическое обеспечение.

Монография представляет интерес для инженерно-технических работников агропромышленного комплекса, а также может быть полезна для студентов технических вузов, докторантов и научных работников.

***Ответственный редактор:***  
**Хакимов О.Ш.** – д.т.н., проф.

***Рецензенты:***  
**Шяпуллин Ю.Г.** – д.т.н., профессор;  
**Махмудов Х.М.** – к.ф.-м.н., доц.

***Рекомендовано к изданию решением Совета Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова.***

ISBN 978–9943–11–598–9

© Изд-во «Fan va texnologiya», 2017;  
© Ташкентский государственный технический университет, 2017;  
© П.Р.Исматуллаев, Х.А.Усманова, А.Тургунбаев, 2017.

## ВВЕДЕНИЕ

Узбекистан сегодня является стабильным и надежным поставщиком хлопка на международный рынок. Это достигается за счет совершенствования системы организации заготовки и переработки хлопка, внедрения современных достижений техники и технологии в отраслях хлопкоперерабатывающей промышленности. Мощным импульсом в этой работе стала реализация программы модернизации и реконструкции предприятий хлопкоочистительной промышленности на 2007—2011 годы, принятой соответствующим постановлением Кабинета Министров.

Республика Узбекистан на сегодняшний день является шестым крупнейшим производителем волокна с объемом производства порядка 1 млн. тонн.

Предприятия хлопкоочистительной отрасли объединены ассоциацией «Узпахтасаноат», в которую сегодня входят 13 территориальных акционерных обществ, объединяющих 98 хлопкоочистительных заводов по всей республике, 34 специализированных цеха по подготовке посевных семян, сеть снабжения и другие вспомогательные подразделения. При ассоциации действует и собственный отраслевой научно-исследовательский центр «Пахтасаноат илмий маркази». Вся эта система играет важную роль в обеспечении конкурентоспособности хлопка Узбекистана.

В 2014-2015 годах предприятиями хлопковой отрасли Узбекистана переработано свыше 3,4 млн. тонн хлопка-сырца и получено более 1 млн. тонн хлопка-волокна, 80,0 тыс. тонн линта, 1,6 млн. тонн - семян хлопчатника.

Сегодня холдинговая компания «Узпахтасаноат» ставит перед собой новые ориентиры и задачи по развитию хлопковой отрасли, вытекающие из Стратегии действий по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан в 2017–2021 годах. Конкретные действия по реализации основных направлений указанной Стратегии осуществляются в рамках разработанной «Концепции развития хлопковой отрасли Республики Узбекистан».

Одним из важных решений технического прогресса в хлопководстве и хлопкоочистительной промышленности является создание и внедрение средств измерения влажности хлопка-сырца и других

хлопковых материалов, прежде всего, потому, что показатель влажности влияет на физические, механические и технологические свойства материала.

Во время сева хлопчатника от влажности посевных семян зависят их качество и всхожесть. В период уборки и заготовок необходимо определять влажность хлопка-сырца для взаиморасчетов с поставщиками, а также для правильного складирования, хранения и, в случае необходимости - предварительной обработки. Контроль влажности в процессе хранения хлопка-сырца имеет большое значение и для хлопковой промышленности. В технологических процессах первичной обработки хлопка его повышенная влажность вызывает увеличение расхода энергии, снижение эффективности очистки и джинирования, при этом возрастает выход волокна пониженного качества. В производстве хлопкового масла от влажности хлопковых семян, а также других продуктов зависят эффективность использования сырья, качество и выход конечной продукции.

Можно привести данные, характеризующие технико-экономическое значение контроля влажности хлопка-сырца и хлопковых материалов. Так, по результатам исследований проведенных отраслевым научно-исследовательским центром «Пахтасаноат илмий маркази» погрешность при определении массового отношения влаги, равная 1%, вызывает неточность в определении его годовой стоимости на сумму свыше 1 млрд. сумов.

Субъективность оценки этого параметра, например, в период заготовок приводит к неверным взаиморасчетам с поставщиком, а также к неправильному складированию сырья, влияющему на качество волокна, семян и приводящему иногда к пагубным последствиям - пересортице и самовозгоранию. Ожидаемый экономический эффект от внедрения одного влагомера для хранения и переработки хлопка составляет 50-60 млн. сумов в год. Годовой эффект от внедрения влагомеров на всех заготовительных пунктах и заводах первичной обработки выражается суммой более 5 млрд. сумм.

Отсюда следует, что своевременное получение и использование достаточно точной информации о влажности на всех стадиях производства и переработки хлопка-сырца в сельском хозяйстве, заготовительной системе и промышленности - представляет важную народнохозяйственную задачу. Для ее решения должны быть созданы и внедрены средства измерения - начиная с полевых влагоме-

ров, вплоть до элементов автоматизированных систем, соответствующие требованиям потребителей и современной измерительной техники.

Координационным планом развития и освоения подобных приборов в хлопкоочистительной промышленности предусматривается создание информационно-измерительных систем, способных быстро и эффективно оценивать качество хлопка-сырца и продуктов его переработки.

В настоящее время практически принятыми измерительными средствами влажности являются:

- термовлагомеры УСХ-1;
- шкафы сушильные Уз-7м и Уз-8;
- термовлагомеры ВХС-1М.

Этими средствами оснащены все заготовительные пункты и заводские лаборатории. Время измерения на УСХ-1 или ВХС-1 составляет 5 мин, точность 0,5%, масса анализируемой пробы - 40г. Недостатки термовлагомера - длительное время анализа и малая представительность анализируемой пробы, что при пересчете по массе, от которой отобрана проба, приводит к погрешности более 10 % (отн).

Сушильные шкафы Уз-7м и Уз-8 являются эталонными. Масса анализируемой пробы в них от 100 до 210 г размещается в бюксах по 10 г каждая. Время сушки 4 часа.

Перечисленные технические средства не в состоянии обеспечить оперативное получение информации о влажности и удовлетворить современные темпы и объемы производства и переработки хлопка. Для решения поставленных задач были привлечены косвенные (физические) экспрессные методы измерения влажности, в первую очередь - электрические, основанные на преобразовании влажности в те или иные электрические величины, т.е. на взаимодействии влажного материала с электромагнитными колебаниями различной частоты.

За последние два-три десятилетия были разработаны электрические влагомеры различных типов для хлопка-сырца и хлопковых материалов. К ним относятся высокочастотный влагомер "Узбекистан-2", основанный на измерении диэлектрических параметров, коррелирующих с влажностью, кондуктометрические электровлагомеры ВП-4, ВП-6 и др. Однако эти влагомеры не нашли широкого применения в хлопкоочистительной промышленности.

В 1969 г. в ЦНИИХпроме (Пахтасаноат илмий маркази) был опробован макет влагомера, основанный на затухании электромагнитной волны сверхвысокой частоты под действием изменяющегося содержания влаги в хлопке-сырце.

Лишь в 1981 г. в Ташкентском НПО "Сигнал" был впервые создан влагомер сверхвысокой частоты (СВЧ) ВХС-2, показывающий удовлетворительную работу в диапазоне измерения массового отношения влаги от 5 до 30% с погрешностью 10% (отн.). Этот влагомер прошел государственные испытания, но в дальнейшем не нашел применение. В последние 15-20 лет интенсивные исследования и разработка влагомеров (в первую очередь СВЧ) для хлопковых семян, хлопка-сырца и других хлопковых материалов проводились в Ташкентском государственном техническом университете под руководством проф. Исмагуллаева П.Р. и при участии авторов [В.1-В.5].

Опыт исследования разработки и применения влагомеров для хлопковых материалов и системный подход к решению поставленных выше задач привели к выводу о необходимости создания единого унифицированного комплекса средств измерения влажности, содержащего базовую модель влагомера. Такой комплекс был первоначально предложен авторами [В.6-В.8] для хлопко-масложировой промышленности. Идея унифицированного комплекса средств измерения влажности, являющегося, по мнению авторов и ряда специалистов в области влагометрии, оптимальным решением проблемы на современном уровне, осуществлена применительно к задачам, стоящим перед хлопководством, заготовительной системой и промышленностью по переработке хлопка-сырца.

## ГЛАВА I. ХЛОПОК И ХЛОПКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### *1.1. Общие сведения о хлопке-сырце, его компонентах и продуктах переработки*

Важнейшими хлопковыми материалами являются хлопок-сырец и его компоненты - хлопковое волокно и семена хлопчатника [1.1]. К хлопковым материалам относятся также линт, продукты и полупродукты переработки хлопковых семян (хлопковое масло, мятка, мезга, жмых, шрот, шелуха, пух).

Хлопковое волокно служит основным видом сырья для текстильной промышленности. Из него изготавливаются самые разнообразные ткани – полотно, кисея, ситец, батист, нитки для шитья, трикотаж, а также всевозможные технические изделия электроизоляции, корд автомобильных шин, фильтры, приводные ремни, искусственная кожа, рыболовные сети, гигроскопическая вата и многое другое.

Пух, покрывающий хлопковые семена, идет на приготовление целлюлозы, искусственного стекла, целлофана, киноленок, лаков, бумаги, линолеума, искусственного шелка, эбонита и др.

Ценным пищевым продуктом является хлопковое масло, получаемое из семян хлопчатника. Содержание растительного жира в них составляет 20-25%. Хлопковое масло используется также для получения мыла, глицерина, технических масел и пр.

Шелуха и жмых, образующиеся после переработки семян хлопчатника на масло, является ценным кормом для скота. Шелуха используется также для получения дубителей, из нее делают картон, грубые сорта бумаги, лаки, изоляционные материалы. В гидролизной промышленности из одной тонны шелухи вырабатывается примерно 150кг фурфурола и значительное количество этилового спирта. Фурфурол используется для получения высококачественных смол и пластмасс, синтетических волокон типа капрон, искусственных олиф, лекарственных препаратов. Этиловый спирт служит сырьем для производства синтетического каучука.

Из одной тонны хлопка-сырца производят в среднем 3000 м ткани, 100-110 кг высокоценного пищевого масла, 200-250 кг жмыха.

Из листьев коробочек и стеблей хлопчатника добывают лимонную и уксусную кислоты, спирт, дубители, изготавливают веревки, лаки и т.д. По содержанию лимонной кислоты листья хлопчатника и отходы хлопкоочистительной промышленности не уступают лимонам.

По оценкам специалистов потребление хлопкового волокна в мире к 2020 г. возрастет до 85 млн. кип, т.е. намного увеличится по сравнению с нынешним уровнем.

## ***1.2. Строение и химический состав компонента хлопка-сырца***

Основными компонентами хлопка-сырца, как указано выше, являются хлопковое волокно и хлопковые семена.

Хлопковое волокно составляет примерно треть хлопка - сырца. Качества хлопкового волокна определяется суммой его признаков и свойств - длиной, тонкостью, зрелостью, прочностью, растяжимостью, эластичностью и блеском, которые зависят от количества и структурных особенностей накопленной в волокне целлюлозы [1.2].

У большинства сортов хлопчатника процесс интенсивного удлинения волокна заканчивается на 20-25-й день, а увеличение поперечного диаметра волоконца в возрасте около 12-15 дней. Затем происходит только отложение целлюлозы внутри волокна в виде ежедневных колец роста. Кутикула, первичный наружный слой оболочка, имеющий толщину около 0,5 мкм, не придает волокну характерной для него прочности. Прочность достигается в результате отложения многочисленных слоев целлюлозы.

По мере утолщения стенок волокна его внутренний канал постепенно суживается, и форма его на поперечном сечении изменяется: из округлой к 45 дням она становится овальной, а позднее - плоскоовальной. К концу периода созревания толщина стенок составляет 12-40 мкм.

Помимо количества отложений целлюлозы, на качество волокна оказывает влияние также степень полимеризации целлюлозы, которая нарастает с возрастом волокна, особенно быстро в возрасте 50-60 дней. Хлопковое волокно содержит следующие вещества (в пересчете на сухое вещество в %):

Целлюлоза - 97,0-98,5

Пектиновые вещества и пентозаны - 0,8-1,0

Жир и воск - 0,3-1,0

Азот и белковые вещества – 0,2-0,3

Зольные вещества – 0,1-0,2.

Вторым важнейшим компонентом хлопка-сырца являются семена. Они состоят из зародыша ядра и кожуры. Семенная кожура защищает зародыш семени от механических повреждений, потери влаги и проникновения внутрь семени различных паразитов. Толщина кожуры находится в пределах 0,23 - 0,35 мм.

Процентное соотношение ядра и кожуры резко меняется при переходе от одного промышленного сорта к другому.

Основную часть зрелого семени хлопчатника составляет зародыш. Последний состоит из семядольных листьев и осевых органов - подсемядольной части стебля.

В семядолях зародыша сосредоточен запас питательных веществ, необходимых для прорастания семени и развития проростка. Среди этих веществ преобладают жиры и белки, в значительно меньшей степени - углеводы (12-15 %).

В зародыше семени содержатся в незначительном количестве различные органические кислоты, фосфатиды, фитин, стеролы, госсипол и некоторые пигменты. Обнаружены зольные элементы: фосфор, калий, магний, кальций, сера, в небольшом количестве медь, цинк, марганец, бор, кобальт и т.д.

Белки семени в основном представлены альбуминами (около 55 %) и глобулинами (около 29 %). Сложных белков в семени содержится не более 7-10 %. Для семян хлопчатника характерно небольшое содержание углеводов. Наибольшее количество их в ядре семени хлопчатника приходится на долю сахаров. Зародыш семени хлопчатника содержит много веществ, относящихся к группе липидов, из них свыше 40 % составляют жиры.

Хлопковое масло представляет собой смесь различных глицеридов, являющихся сложными эфирами трехатомного спирта глицерина, и различных высокомолекулярных жирных кислот. В составе хлопкового масла преобладают непредельные жирные кислоты - свыше 72%- от общего количества кислот, входящих в состав глицеридов масла. Среди ненасыщенных кислот линолевая кислота преобладает по количеству над всеми другими жирными кислотами.

Значительное количество (29,9%) приходится в хлопковом масле на долю олеиновой кислоты. Остальные ненасыщенные кис-

лоты - (пальмитолевая и миристолевая) представлены в составе глицеридов масла небольшим количеством их суммарное содержание достигает лишь 2,1 %.

Из насыщенных кислот в хлопковом масле пальмитиновая кислота составляет около 23 %. Все остальные кислоты этой группы, в числе которых стеариновая, аракиновая и миристиновая, не превышают в общей сложности 3,8 %.

Исследования состава зольных веществ в семенах хлопчатника показали, что фосфора и калия в золе содержится около 70 %. Относительно много в золе магния, кальция, натрия и кремния. Значительно меньше серы, железа и хлора. Фосфора в составе золы ядра в пересчете на  $P_2 O_5$  -до 46 %.

На долю калия приходится около 40 % от общего количества материальных веществ, содержащихся в оболочке, фосфора не более 10 %.

Следует отметить, значительное колебание химического состава семян разных видов хлопчатника и районов его произрастания.

В сухой хлопковой кожуре содержится в среднем 40-45 % целлюлозы, 28-30 % пентозанов, 20-25 % лигнина, около 3 % белков. Линт представляет собой недоразвитое хлопковое волокно и его строение схоже с последним. Зольность линта 1,5-1,9 %. Химический элементный состав хлопкового волокна, семян, стебля, створок коробочек приведен в табл. 1.1[1.3].

Таблица 1.1. Химический элементный состав составляющих молока-сырца

Элемент	Хлопковое волокно промышленных сортов				Хлопковые семена промышленных сортов				Сорные примеси				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	Стебе ль	Листья	Ядро семян	Створ Короб	Огол. семян
	а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м	н
Водород	6,27	6,30	6,33	6,36	7,56	7,51	7,43	7,26	6,19	6,20	8,22	6,06	6,32
Углерод	44,10	44,10	44,00	49,96	51,90	51,60	51,20	50,20	48,12	58,02	56,04	48,16	54,56
Азот	0,31	0,40	0,49	0,53	4,59	4,06	3,83	3,66	1,98	4,47	6,73	1,44	1,20
Кислород	48,25	47,95	47,55	47,25	33,40	33,80	34,40	35,80	40,19	30,97	24,87	39,26	46,07
Натрий	0,015	0,018	0,023	0,027	0,17	0,20	0,21	0,21	0,39	0,59	0,20	0,10	0,017
Магний	0,047	0,055	0,071	0,082	0,35	0,42	0,43	0,43	0,30	0,61	0,54	0,32	0,19
Алюминий	0,034	0,04	0,052	0,061	0,015	0,01	0,018	0,018	0,035	0,013	0,019	0,045	0,021
Кремний	0,027	0,031	0,041	0,047	0,011	0,013	0,014	0,014	0,15	0,19	0,19	0,05	0,01
Фосфор	0,10	0,12	0,16	0,18	0,46	0,55	0,56	0,55	0,21	0,51	1,18	0,17	0,15
Сера	0,16	0,19	0,25	0,29	0,39	0,46	0,48	0,47	0,13	0,42	0,29	0,24	0,36
Хлор	0,013	0,016	0,02	0,024	0,041	0,049	0,051	0,050	0,16	1,52	0,01	0,01	0,09
Кальций	0,51	0,6	0,78	0,91	0,92	1,10	1,14	1,12	0,95	1,48	1,38	3,03	1,03
Кальций	0,12	0,14	0,19	0,22	0,12	0,14	0,15	0,14	1,01	3,78	0,29	1,05	0,16
Марганец	0,064	0,075	0,097	0,111	0,060	0,00	0,00	0,00	0,003	0,0033	0,019	0,005	0,016
Железо	0,022	0,026	0,033	0,039	0,044	0,052	0,054	0,053	0,18	0,32	0,057	0,057	0,024

### 1.3. Основные свойства хлопка-сырца и продуктов его переработки

Для влагометрии хлопковых материалов их структура, химический состав, физические, механические и другие свойства имеют существенное значение по следующим причинам:

1. Перечисленные факторы определяют гидрофильные свойства хлопковых материалов и характер тепло - и массообменных процессов, происходящих в них.

2. При измерениях влажности различными физическими (косвенными) методами определенные свойства материалов играют роль неинформативных параметров, влияющих на результаты измерения влажности.

3. Некоторые физические свойства (электрические, оптические и др.) можно использовать для создания методов измерения влажности.

Из сказанного вытекает необходимость анализа наряду со строением и составом хлопка-сырца и хлопковых материалов их основных свойств.

*А. Физико-механические свойства.* Упругие силы волокна препятствуют самоуплотнению хлопка-сырца, подтверждая его пористую структуру. Степень пористости зависит от сорта, селекционной разновидности, влажности хлопка-сырца, условий хранения и уплотнения. Она характеризуется пористостью

$$K = \frac{\gamma_c - \delta_c}{\gamma_c} 100\%$$

и коэффициентом пористости

$$E = \frac{\gamma_c - \delta_c}{\gamma_c}$$

где  $\gamma_c$  - плотность хлопка-сырца,

(для расчетов принимают  $\gamma_c = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>);

$\delta_c$  - объемная масса в данном состоянии, кг/м .

В насыпном состоянии коэффициент пористости хлопка-сырца  $E=20-23$  для средневолокнистых и  $E=13-14$  для тонковолокнистых сортов.

Насыпная масса хлопка-сырца зависит от влажности, сорта, разновидности, вида сбора и воздействия уплотняющих нагрузок. Для хлопка-сырца 1 сорта средневолокнистых разновидностей средняя насыпная масса определяется по формулам:

для хлопка-сырца машинного сбора [1.1]

$$\delta_{\text{с}} = 26,3 + 0,05h + 0,93W \quad (1.1)$$

для хлопка-сырца ручного сбора

$$\delta_{\text{с}} = 40 + 0,05h + W \quad (1.2)$$

где  $W$  - влажность хлопка-сырца, %;

$h$  - высота слоя, мм.

Зависимость между  $\delta_{\text{с}}$  и уплотняющей нагрузкой в диапазоне изменения последней  $(1 \div 30) \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$  выражается формулой

$$\delta_{\text{с}} = mp^n \quad (1.3)$$

где  $p$  - удельное давление,  $\text{Н/м}^2$ ,

$m, n$  - постоянные коэффициенты, характеризующие сорт, разновидность и влажность хлопка-сырца.

Для первых сортов средневолокнистого хлопка при влажности 7,8 и 9%,  $m$  соответственно равно 11,4 и 11,54, а  $n=0,3$ . Для первых сортов тонковолокнистого хлопка влажности 8%  $m = 23,3$  и  $n = 0,25$ .

Сила трения хлопка о стальные поверхности, что имеет место при его первичной переработке, растет с увеличением его влажности и снижается с повышением температуры. Последнее объясняется плавлением воскового вещества хлопкового волокна. Силы трения хлопка для стальных образцов (Ст.3, нержавеющая сталь X18H10T) при нагреве до 333 К (до зоны перехода восковых веществ в жидкое состояние) снижаются в 1,6 раза.

Прочность хлопкового волокна на растяжение характеризуется разрывной нагрузкой [1.4]. Прочность зрелых волокон хлопка составляет 4-6 сН, а незрелых до 1,8 - 2 сН.

Другой характеристикой прочности волокна является разрывная длина. Для хлопка-сырца средневолокнистых сортов разрывная длина составляет 22-30 мм, а для тонковолокнистых сортов - 30-36 мм.

Сжатие хлопкового волокна максимальным давлением 900 - 1000  $\text{кг/см}^2$  не повлияет вредно на его качества.

После сжатия массы хлопкового волокна в нем происходят релаксационные процессы, описываемые формулой [1.5]

$$P = P_k \left[ \left( \frac{97,9 - 4,3W}{246,5 - 12,4W} \right) + \left( \frac{148,6 - 8,1W}{246,5 - 12,4W} \right) \left( \frac{t}{127} \right)^{0,27} \right] \quad (1.4)$$

где  $P_k$  - конечное усилие сжатия волокна;

$W$  - влажность волокна;

$t$  - время релаксации.

Усилия сжатия массы волокна зависят от его влажности, начальной и конечной плотности [1.6]:

$$P = K_{wc} \left( \frac{\rho - \rho_0}{10^3} \right)^n,$$

где  $P$  - удельное давление сжатия массы волокна, кгс/см<sup>2</sup>;

$K_{wc}$  - коэффициент, зависящий от влажности волокна;

$\rho, \rho_0$  - плотность массы волокна после и до сжатия, кг/м<sup>3</sup>;

$n$  - показатель степени, зависящий от значения плотности сжатия  $\rho$ :

$$n = 3 - 0,7e^{-\frac{\rho - \rho_0}{75}}$$

Насыпная масса хлопковых семян зависит от их опушенности. Посевные опушенные семена имеют насыпную массу 350 - 400 кг/м<sup>3</sup>, а полностью оголенные - 500-600 кг/м<sup>3</sup>. Плотность оголенных семян колеблется в пределах единицы (1,06 ± 0,06) [1.7].

Коэффициент трения покоя семян снижается с повышением нормального давления и возрастает с повышением шероховатости, контактирующей с семенами поверхности. При нормальном давлении 0,001 кгс/см<sup>2</sup> коэффициент трения покоя семян по стали лежит в пределах от 0,59 до 0,66, а при давлении 0,5 кгс/см<sup>2</sup> - от 0,18 до 0,22.

При нормальном давлении 0,001 кгс/см<sup>2</sup> коэффициент трения с повышением опушенности семян достигает 10 %. При повышении опушенности до 14 % эти закономерности сохраняются лишь при трении о более шероховатую поверхность (бетон, асфальт).

Коэффициент трения растет с повышением влажности семян до 15%, а затем снижается. Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения семян описывается формулой:

$$\mu = (A + BU)e^{CU} + D \quad (1.5)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения;

$U$  - скорость скольжения, м/с;

$A, B, C, D$  - коэффициенты, зависящие от материала поверхности скольжения, опушенности, влажности, нормального давления. Для

случая: сталь, опушенность семян 9,6 %, кондиционная влажность, нормальное давление 0,3 кгс/см<sup>2</sup> формула имеет вид:

$$\mu = (0,75U - 0,084)e^{-3,62U} + 0,282 \quad (1.6)$$

*Б. Оптические свойства хлопка.* Оптические свойства хлопковых материалов планомерно не изучались. Отдельные исследования проводились в связи с решением практических задач: определения сорта хлопка [1.8], улучшения изделий из хлопка-волокна [1.9-1.10], определения оптическим путем засоренности хлопка-сырца, измерения длины хлопковых волокон, определения кислотного числа и дефектности хлопковых семян.

В работе [1.8] на спектрофотометре со светомерным шаром изучались спектральные характеристики отражения света поверхностью хлопка-сырца селекционной разновидности Ташкент-1 и Ташкент-2, 1-4 промсортов в диапазоне длин волн от 425 до 750 нм.

Для селекции Ташкент-1 среднее значение коэффициента отражения падает от 0,7538 (для первого сорта) до 0,4665 (для четвертого сорта). Тангенс угла наклона зависимости коэффициента отражения от длины волны для тех же условий растет от 0,107 до 0,132. Аналогичные значения коэффициентов отражения для Ташкент-3 равны 0,8319 и 0,5696, а тангенсов угла наклона - 0,113 и 0,129.

Значение белизны К, т.е. коэффициента яркости волокна, измеренного в спектральном диапазоне  $\lambda = 520-560$  нм и коэффициента подцветки R, т.е. отношения двух монохроматических коэффициентов яркости при длинах волн соответственно 411 нм и 540 нм различных сортов хлопкового волокна 108-Ф приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Коэффициент	Сорт волокна					
	1	2	3	4	5	6
Белизна К	65,8	61,8	65,4	58,7	59,0	52,8
Подцветка R	0,777	0,779	0,755	0,744	0,670	0,692

Одной из оптических характеристик хлопкового волокна, имеющей коммерческое значение, является его блеск. Он зависит от разновидности хлопка, структуры волокна, его длины, прочности и формы. Блеск волокна тем выше, чем больше ориентация молекулярных цепей, окружность волокна, его зрелость. Снижает блеск

наличие микротрещин в волокне, образующихся под влиянием солнечной радиации.

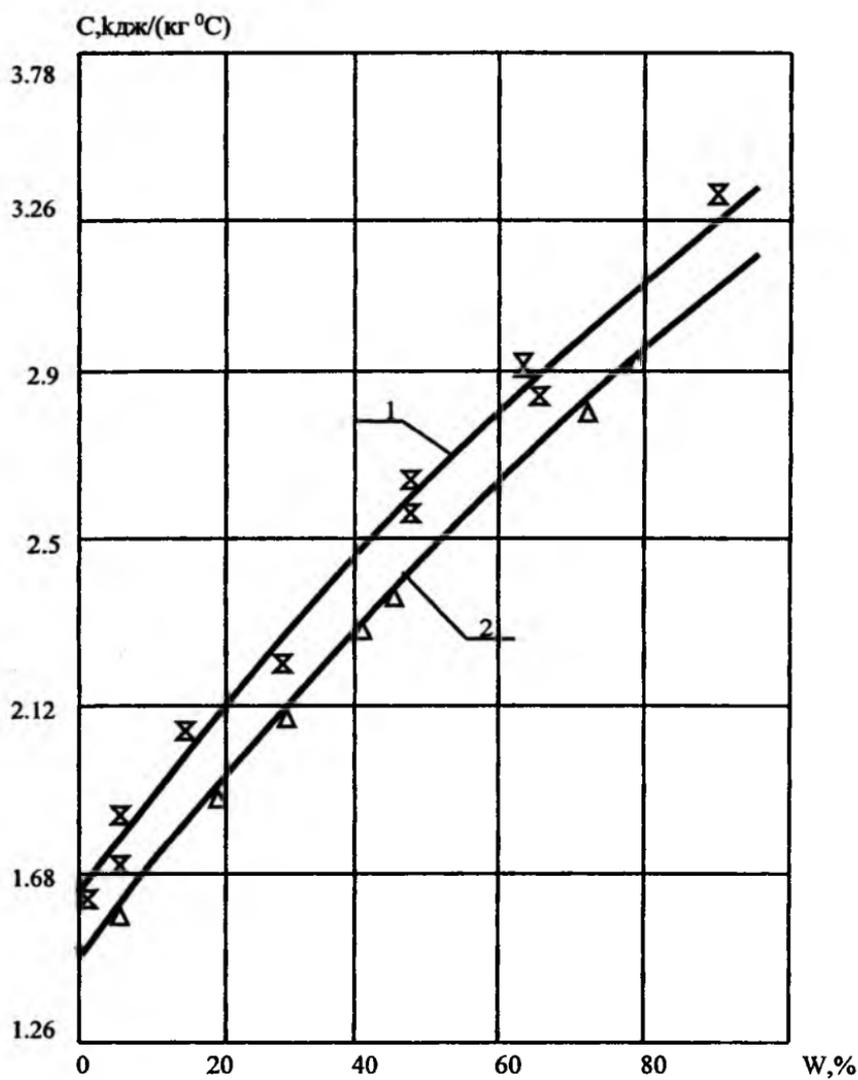


Рис. 1.1. Зависимость теплоемкости хлопка-сырца от его влажности.

Зависимость коэффициента светопропускания  $\tau$  от среднего числа слоев волокон  $R$  в сечении образца хлопка, и его дисперсии получены в работе [1.9].

$$\tau = e^{-\alpha R}; D = e^{-\alpha R} (e^{-\alpha^2 R} - 1) \quad (1.7)$$

где  $\alpha$  - средняя доля света, теряемая на волокне на поглощение и рассеяние.

В. *Теплофизические свойства хлопка.* Хлопок-сырец относится к гигроскопическим капиллярно-пористым коллоидным телам, обладающим низкой тепло и теплопроводностью. Он состоит из компонентов, имеющих неравномерную скорость нагрева и обезвоживания вследствие различных термических и влагообменных характеристик.

Наиболее полно теплофизические свойства хлопка были изучены М.И. Щеголкиным, а также А.И. Ульдяковым [1.10]. В последнем случае исследования носили прикладной характер и выполнялись в связи с поиском оптимальных методов сушки хлопка-сырца.

На рис. 1.1 приведены зависимости теплоемкости хлопка-сырца от его влажности, полученные М.И. Щеголкиным (кривая 1) и А.И. Ульдяковым (кривая 2). Для такого неоднородного по своим свойствам материала, как хлопок-сырец, совпадение результатов можно считать вполне удовлетворительным.

## ГЛАВА II. ВОДА И ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ХЛОПКОМ И ХЛОПКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

### 2.1. Физические свойства воды

Вода наиболее распространенное вещество на нашей планете уникальна не только по своей роли в жизни человека и окружающей среды, но и по своим свойствам. Структуре и свойствам воды посвящена обширная литература [2.1, 2.2].

Для влагометрии свойства воды имеют существенное значение по следующим причинам:

- в значительной степени они влияют на процессы взаимодействия влаги с гидрофильными материалами (в нашем случае - с хлопком и хлопковыми материалами) и на качественный и количественный характер их влажности;

- ряд свойств воды (в первую очередь - электрические свойства) служат основой физических методов измерения влажности твердых, жидких и газообразных веществ;

- в электрических и других методах измерения влажности с содержанием воды и ее свойствами связаны характеристики вещества ("неинформативные параметры"), оказывающие влияние на результаты измерения влажности.

Ниже рассматриваются важнейшие свойства воды, представляющие интерес с точки зрения указанных аспектов.

В первую очередь, приведем перечень важнейших физических констант воды, основанный на данных [2.10] и других источниках (табл.2.1).

Известно, в твердой и жидкой фазе они существенно различны. Поведение диэлектриков в переменном электромагнитном поле зависит от их электромагнитных свойств, которые характеризуются комплексными диэлектрической  $\epsilon^*$  и магнитной  $\mu^*$  проницаемостями, а так как у воды (пара - и диамагнитного вещества)  $\mu^* = \mu_0$  (магнитная проницаемость вакуума) - величиной  $\epsilon^*$  или разными парами электрических параметров, связанных с  $\epsilon^*$  и комплексной удельной проводимостью  $\delta^*$ :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''; \quad \delta = \delta' + j\delta''; \quad \varepsilon' = \frac{\delta}{j\omega\varepsilon_0}$$

Здесь  $\varepsilon = \varepsilon'$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика, равная вещественной составляющей комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon^*$ ;

$\varepsilon''$  - мнимая составляющая  $\varepsilon^*$  (коэффициент диэлектрических потерь);

$\varepsilon_0 = 0.0886 \text{ пФ/см}$ ,  $\varepsilon = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$  - диэлектрическая проницаемость свободного пространства (вакуума);

$\delta = \delta'$  и  $\delta''$  - вещественная и мнимая составляющие комплексной удельной проводимости;

$\text{tg} \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь;

$\omega = 2\pi f$  - круговая частота. Соотношения между электрическими параметрами даны в таблице 2.2

Таблица 2.1

**Основные физические константы обычной воды**

<b>Физические константы обычной воды</b>	<b>Значения</b>	
Молекулярная масса,	г/моль	18,05
Плотность при температуре $\tau=20^\circ\text{C}$ ,	кг/м <sup>3</sup>	0,998
Плотность при температуре $\tau=4^\circ\text{C}$ ,	кг/м <sup>3</sup>	1,0
Плотность в твердой фазе,	кг/м <sup>3</sup>	0,92
Точка затвердения,	К	273,15
Точка тройная,	К	273,16
Точка кипения,	К	373,15
Теплоемкость $C_p$ при $\tau=20^\circ\text{C}$ и давлении 760 мм рт. ст.	Дж/(моль.град д)	4,1816
Коэффициент теплопроводности при $\tau=0^\circ\text{C}$ ,	кал/(см.с.град )	$1350 \times 10^{-6}$
при $\tau=100^\circ\text{C}$ ,	кал/(см.с.град )	$1631 \times 10^{-6}$
Скорость распространения звука при $\tau=25^\circ\text{C}$ ,	м/с	1496,5
Показатель преломления при $\tau=20^\circ\text{C}$ ,		1,333

Температурный коэффициент объемного расширения при $t=20^{\circ}\text{C}$ и давлении 760м.рт.ст., Коэффициент поверхностного натяжения при $t=20^{\circ}\text{C}$ ,	град <sup>-1</sup>	$0,182 \times 10^{-3}$
	Дж/см <sup>2</sup>	$72,58 \times 10^{-7}$

Таблица 2.2

	Пара- метры	$\epsilon$	$\epsilon''$	$\delta$	$\delta''$	$\text{tg } \delta$
Выраже- ние	$\epsilon \epsilon''$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\omega \epsilon_0 \epsilon''$	$\omega \epsilon_0 \epsilon$	$\epsilon''/\epsilon$
через	$\delta \delta''$	$\frac{\delta}{\epsilon \omega}$	$\frac{\delta}{\epsilon \omega}$	$\delta$	$\delta''$	$\delta/\delta''$

Иногда вводя из оптики комплексный коэффициент преломления вещества  $n^* = n - jk$  ( $n$  - показатель преломления,  $k$  - коэффициент поглощения), используя соотношение Максвелла  $\epsilon^* = (n^*)^2$ , можно выразить электрические параметры через составляющие  $n^*$ :

$$\epsilon = n^2 - k^2 \quad \text{и} \quad \epsilon'' = 2nk,$$

Для описания свойств диэлектрика применяют обычно одну пар величин:  $\epsilon'$   $\epsilon''$ ;  $\epsilon \sigma$ ;  $\text{tg } \delta$ . Зная одну из этих пар, можно по соотношениям табл. 2.2 вычислить любую другую пару.

Проводимость воды обусловлена слабой диссоциацией ее молекул и, прежде всего, солями и другими электролитами, растворенными в воде.

Абсолютно чистая вода имеет удельную проводимость  $\delta = 0,04 \times 10^{-6} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$  при  $18^{\circ}\text{C}$ , при очистке, соответствующей "равновесной" воде, значение  $\delta$  достигает  $0,75 \cdot 10^{-6} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ .

В то же время удельная проводимость морской воды близка к  $\text{см}^{-1}$ . С точки зрения диэлектрических свойств, вещества принято разделять на полярные и неполярные, в зависимости от наличия или отсутствия у их молекулы постоянного дипольного момента. Для воды, водных растворов и льда, как и для других полярных диэлектриков, характерно явление диэлектрической релаксации. При наложении переменного электрического поля установление равновесия в диэлектрике происходит в течение некоторого времени и электрические параметры диэлектрика зависят от частоты поля.

При возрастании частоты  $\omega$  диэлектрическая проницаемость изменяется от значения  $\epsilon_s$ , при нулевой частоте  $\omega \rightarrow 0$  (статическая

относительная диэлектрическая проницаемость), до  $\epsilon_\infty$  при бесконечно большой частоте  $\omega \rightarrow \infty$  (оптическая диэлектрическая проницаемость), проходя через область аномальной диэлектрической дисперсии. Величины  $\epsilon_s$  и  $\epsilon_\infty$  являются вещественными.

В области дисперсии зависимость  $\epsilon''(\omega)$  имеет максимум при частоте  $\omega_\tau$ , соответствующей времени релаксации  $\tau$  (рис.2.1). Величина  $\omega_\tau$  характеризует уменьшение во времени макроскопической поляризации вещества при мгновенном снятии внешнего поля.

При наличии одного времени релаксации его значение равно  $\tau = 1/\omega_\tau$ . Для жидкой воды при комнатной температуре значение  $\omega_\tau$  близко к 17 ГГц.

Для диэлектриков с одним временем релаксации частотную зависимость  $\epsilon^*(\omega)$  аналитически описывает уравнение Дебая:

$$\epsilon^* = n^2 + \frac{\epsilon_s - n^2}{1 + j\omega\tau} = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.1)$$

откуда

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} = \epsilon_s + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \omega^2\tau^2$$

$$\epsilon'' = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

и максимальное значение  $\epsilon''$  при  $\omega\tau = 1$ ;

$$\epsilon''_{\max} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2}$$

Аналогично, (2.1) для проводимости  $\delta$  по Дебаю:

$$\delta^* = \delta_\infty - \frac{\delta_\infty - \delta_s}{1 + j\omega\tau}$$

откуда

$$\delta = \delta_\infty - \frac{\delta_\infty - \delta_s}{1 + \omega^2\tau^2} = \delta_s - \frac{\delta_\infty - \delta_s}{1 + j\omega\tau} \omega^2\tau^2$$

С учетом проводимости частотные зависимости неидеального диэлектрика приобретают вид:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\delta_s - \delta_\infty}{1 + j\omega\tau} + \frac{\delta_s}{j\omega\tau} \quad (2.2)$$

$$\delta^* = \delta_\infty - \frac{\delta_\infty - \delta_s}{1 + j\omega\tau} + j\omega\epsilon_0\epsilon_\infty \quad (2.3)$$

Физически это означает, что вещество может рассматриваться как диэлектрик со сквозной проводимостью  $\delta$  (2.2) или как проводник с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_\infty$  (2.3).

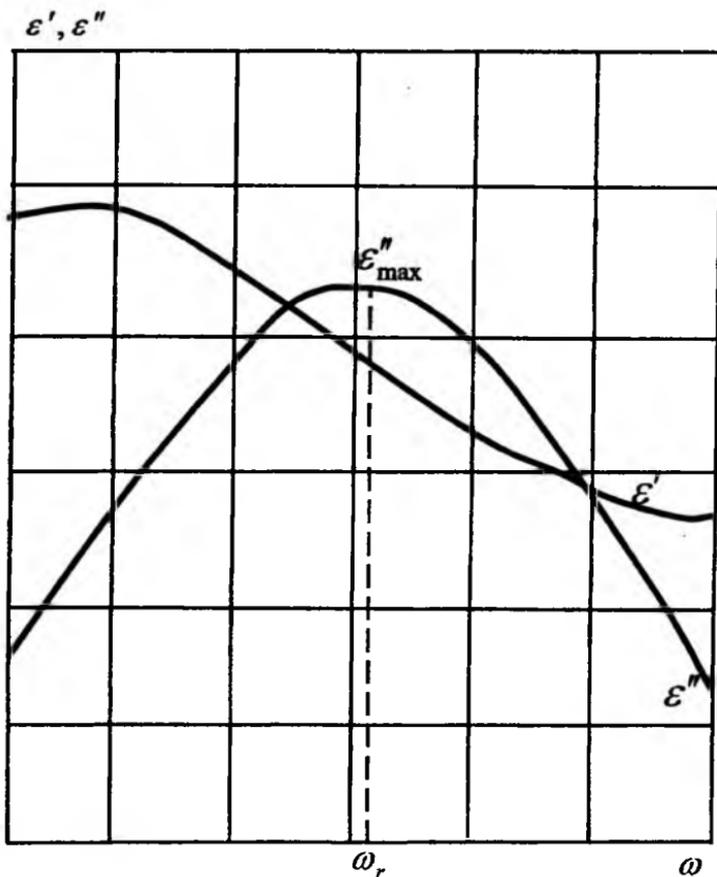


Рис.2.1. Частотные зависимости  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  по Дебаю.

Уравнение Дебая можно представить графически (рис.2.2) в плоскости комплексной диэлектрической проницаемости в виде полуокружности, пересекающей ось абсцисс в точках  $\epsilon' = \epsilon_1$ ,  $\epsilon'' = 0$  - область низких частот и  $\epsilon' = \epsilon_\infty$ ,  $\epsilon'' = 0$  - область высоких частот.

Уравнение этой окружности:

$$\left( \epsilon - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{2} \right)^2 + (\epsilon'')^2 = \left( \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{2} \right)^2$$

По круговой диаграмме легко определить частоту,  $\omega_8$  соответствующую максимуму тангенса угла потерь:

$$\operatorname{tg} \delta_{\max} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2\sqrt{\varepsilon_s \varepsilon_\infty}}$$

при

$$\omega_8 = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\infty}} = \omega_r \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_\infty}}$$

Рассмотренная круговая диаграмма по Дебаю соответствует простейшей теории дисперсии и для реальных твердых и жидких систем была установлена рядом исследователей. В частности, была предложена диаграмма Коул-Коула, соответствующая симметричному распределению времени релаксации с шириной  $\alpha$  и описываемая уравнением:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2.4)$$

Здесь  $\alpha$ -эмпирический параметр, принимающий значение от 0 до 1. При  $\alpha = 0$  соотношение (2.4) переходит в уравнение Дебая, приближение  $\alpha$  к верхнему пределу  $\alpha = 1$  соответствует увеличению размытости функции распределения  $\tau$ .

Из (2.4) получаем выражения для  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$ :

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) [1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2)]}{1 + 2(j\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (j\omega\tau)^{2(1-\alpha)}}$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) (j\omega\tau)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + 2(j\omega\tau)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (j\omega\tau)^{2(1-\alpha)}}$$

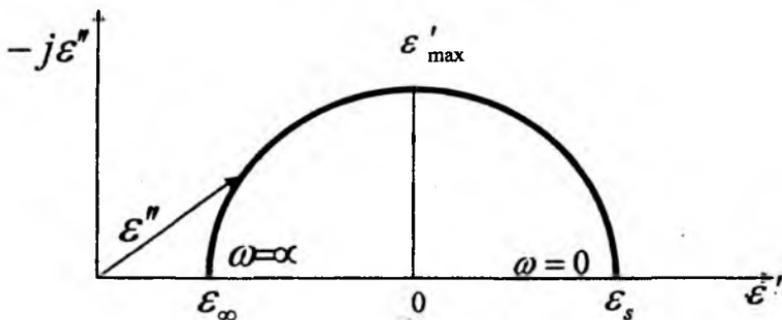


Рис.2.2. Круговая диаграмма  $\varepsilon^*$  ( $\varepsilon'$ ) по Дебаю.

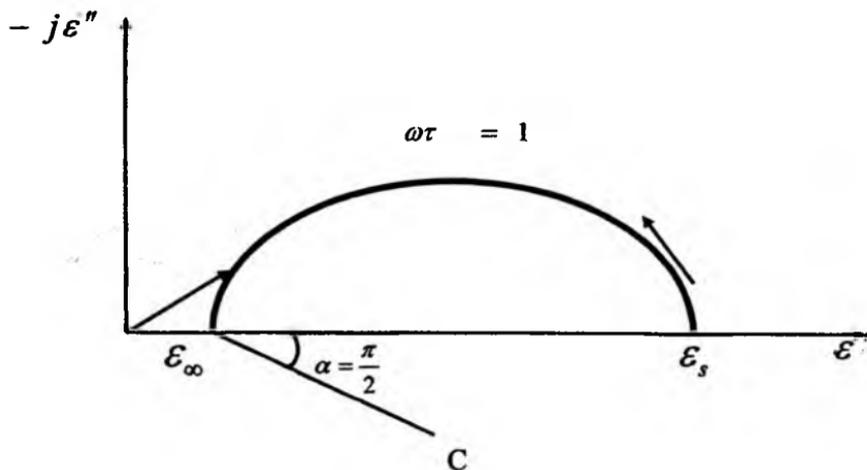


Рис.2.3. Круговая диаграмма  $\epsilon'$  ( $\epsilon''$ ) по Коул-Коулу.

Графическое изображение функции  $\epsilon''(\epsilon')$  по Коул-Коулу даны на рис.2.3, дуга окружности, пересекающая ось абсцисс в точках  $\epsilon' = \epsilon_\infty$  и  $\epsilon' = \epsilon_s$ . Центр окружности расположен ниже горизонтальной оси, а радиусы, ограничивающие центральный угол, образуют с горизонтальной осью угол  $\alpha\pi/2$ .

Из уравнения Коул - Коула получаем значение максимума  $\epsilon''$  при  $\omega\tau = 1$ :

$$\epsilon''_{\max} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2} \operatorname{tg}(-\alpha)\pi/4$$

Это значение всегда меньше, чем максимум по Дебаю, и тем меньше, чем ближе  $\alpha$  к единице.

Дальнейшим развитием уравнений Дебая и Коул-Коула является уравнение, соответствующее одностороннему (не симметричному) распределению времени релаксации между 0 и  $\tau$ , которое приводит к искажению круговой диаграммы - ее вытягиванию в высокочастотной области вдоль оси  $\epsilon'$ .

Это искажение учитывается коэффициентом  $\beta$  и уравнением диаграммы (скошенного полукруга):

$$\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau)^{-\alpha}]^\beta}$$

Для влагометрии наибольший интерес представляют широкие экспериментальные исследования диэлектрических свойств воды, выполненные в последние десятилетия в диапазоне  $\lambda \leq 20$  см.

Экспериментальные данные, характеризующие зависимость диэлектрических свойств воды от частоты и температуры, полученные разными исследователями с применением различных методов и аппаратуры, различаются между собой; полный обзор и критический анализ этих данных приведен в [2.3] и [2.11].

Графики зависимостей  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  и  $\text{tg } \delta$  жидкой воды от частоты приведены на рис.2.4, зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  от температуры при частоте 10 ГГц - на рис. 2.5.

По измерениям, выполненным в Национальном Бюро эталонов (NBS) США для диапазона температур  $0 < t < 100$  °С и диапазона частот от 3 до 96 кГц, статическая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_s$  жидкой воды при нормальном атмосферном давлении выражается уравнением [2.3]:

$$\epsilon_s = 87,74 - 0,40008 t + 9,398 \cdot 10^{-4} t^2 - 1,41 \cdot 10^{-26} t^3 \quad (2.5)$$

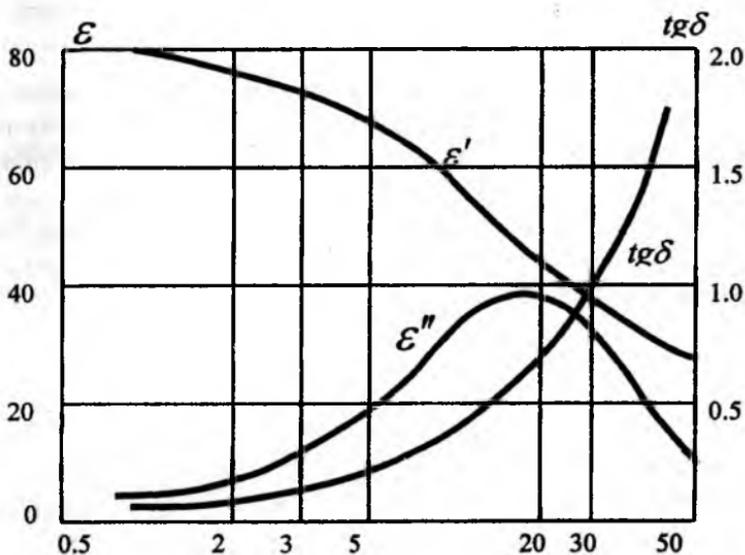


Рис.2.4. Зависимость диэлектрических свойств жидкой воды от частоты при  $t=20$ °С.

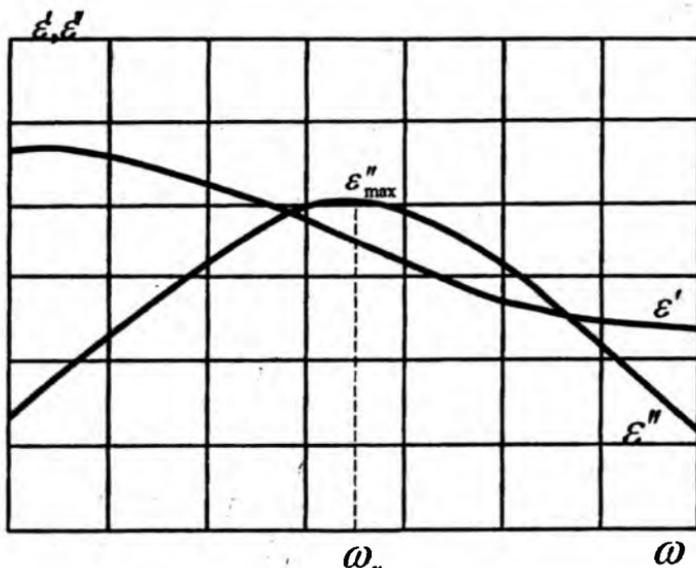


Рис. 2.5. Зависимость диэлектрических свойств жидкой воды от температуры при частоте 10 ГГц.

В указанном диапазоне температур температурный коэффициент:

$$d \ln \varepsilon_r / dt = 4,55(\pm 0,03) \cdot 10^3 \text{ град}^{-1}$$

В диапазоне частот от 0 (постоянный ток) до  $\sim 100$  МГц диэлектрическая проницаемость чистой воды практически не зависит от частоты. Обычно считают, что при комнатной температуре она близка к 80.

Измерения диэлектрической проницаемости жидкой воды, выполненные на СВЧ в полосах S ( $\lambda \sim 10,0$  см); X ( $\lambda \sim 3,2$  см); K ( $\lambda = 1,25$  см) дали следующие результаты:

Таблица 2.3.

Зависимость диэлектрической проницаемости воды от частоты и температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$f=23,62 \text{ ГГц}$		$f=9,346 \text{ ГГц}$		$f=3,0 \text{ ГГц}$	
	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$	$\varepsilon'$	$\varepsilon''$
0	16,22	28,26	44,82	41,64	79,66	42,74
10	22,33	32,30	53,85	37,57	78,07	16,46
20	30,88	37,75	61,41	31,83	77,42	13,05
30	38,43	36,05	63,31	25,47	76,78	9,8

Продолжение таблицы 2.3

40	43,24	33,6	65,58	21,16	72,57	7,54
50	48,26	30,64	65,32	17,12	68,44	5,8
60	49,79	27,3	63,09	13,82	65,37	4,55
75	51,71	22,34	60,7	10,51	60,48	3,3

Значения  $\epsilon_{\infty}$  жидкой воды известны с меньшей точностью, чем значение  $\epsilon_s$ , так как при более коротких волнах имеет место вторая область дисперсии  $\epsilon^*$ ; во всяком случае, имеет место соотношение

$$\epsilon_{\infty} \gg n^2 = 1,8$$

В диапазоне СВЧ ( $0,08 \leq \lambda \leq 20$  см) общепринятым является значение  $\epsilon = 5,5$ , которому соответствует наилучшее согласование теоретических и экспериментальных данных [2.11].

Во многих случаях представляют интерес релаксационные параметры воды — значение  $\alpha$  и  $\tau$  по Коул-Коулу. Обычно принимают  $\alpha = 0,015$  при  $\tau = 20$  °C.

С использованием уравнений Дебая и Коул-Коула и нелинейного регрессионного анализа имеющихся экспериментальных данных с варьированием значений  $\alpha$  при минимизации среднеквадратичных отклонений были получены данные [2.3]:

Таблица 2.4.

Связь между релаксационными параметрами воды при различных значениях температуры

$t^{\circ}, \text{C}$	$\epsilon_{\infty}$	$\tau, 10^{-11} \text{e}$	$\alpha$
0	$4,46 \pm 0,17$	1,79	0,014
10	$4,1 \pm 0,15$	1,26	0,014
20	$4,23 \pm 0,16$	0,93	0,013
30	$4,2 \pm 0,16$	0,72	0,012
40	$4,16 \pm 0,16$	0,58	0,009
50	$4,13 \pm 0,15$	0,48	0,013
60	$4,21 \pm 0,16$	0,39	0,011
75	$4,49 \pm 0,17$	0,32	—

Данные табл.2.4 показывают, что коэффициент  $\alpha$  сравнительно мало зависит от температуры  $t$ .

В работе [2.11] приведены подробные таблицы значений  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ , показателя преломления  $n$  и коэффициента поглощения  $K$  воды при

различных сочетаниях длин волн от 0,08 до 20 см и температур от 0 до 40 °С, а также переохлажденной воды при длинах волн 0,08 – 17 см и температурах от - 2 до 40 °С.

Для практики диэлектрических измерений влажности хлопка определенным интерес представляют диэлектрические параметры воды в твердой фазе, так как свежееубранный хлопок-сырец, хлопок при бестарных перевозках и в процессе хранения может содержать лед и (или) снег.

Диэлектрические параметры льда зависят от ряда факторов - его кристаллической структуры, давления и температуры. Кроме того, в отдельном кристалле льда наблюдается анизотропия: значения  $\epsilon_{s11}$ , измеренные параллельно оси кристалла, примерно на 10 % выше значений  $\epsilon_{\perp}$ , измеренных перпендикулярно этой оси.

При частоте 10 ГГц лед имеет диэлектрическую проницаемость, значительно меньшую, чем вода:  $\epsilon_{\text{льда}} = 3,2$ .

По другим данным, при  $\lambda = 1,25$  см и  $t = -15$  °С параметры льда  $\epsilon' = 3,3$ ;  $\epsilon'' = 0,0011$ . Данные о проводимости льда характеризуются значительным разбросом. Так, например, при частоте 10 ГГц чистый лед имеет  $\text{tg } \delta = 0,17 \cdot 10^{-4}$ , однако по некоторым экспериментальным данным значение тангенса угла диэлектрических потерь льда при 10 ГГц может достигать  $0,45 \cdot 10^{-3}$ .

Диэлектрические свойства естественного снега [2.3] сильно зависят от его плотности -  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  увеличиваются с ее ростом. Снег можно рассматривать, как лед с плотностью  $10^{-2} - 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>, но при этом  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  снежного покрова будут в основном определяться содержанием воды в нем. Кроме того, диэлектрические потери повышаются с ростом ионной проводимости, при наличии солей. Время релаксации снега  $\tau \approx 4 \div 8 \cdot 10^{-3}$  с, т.е. значительно меньше, чем у льда ( $\tau \sim 10^{-5}$  с).

## **2.2. Влага в хлопке-сырце и его компонентах**

Как было показано в главе 1, хлопок-сырец представляет сложную, многокомпонентную и весьма неоднородную систему; структура и химический состав ее компонентов (волокно, кожура семени, ядро и сор) существенно различны. Это распространяется и на влагосорбционные свойства компонентов хлопка-сырца и их отдельных

частей, определяемых, прежде всего, пористой структурой и химическим составом.

Хлопковое волокно содержит, в основном, одно вещество целлюлозу, а семя, состоящее из шелухи с кожицей и ядра - целый ряд веществ с различными свойствами.

Хлопковое волокно имеет большое количество пор (общий объем пор достигает 50 % объема волокна) различной геометрии и большой эффективной поверхности. Пористость естественного хлопкового волокна можно разделить на макроscopicкую (зазоры между отдельными волокнами), микроscopicкую (зазоры между пучками фибрилл, внутренние каналы) и субмикроscopicкую (между микрофибриллами и макромолекулами). В целом, большой общий объем пор определяет высокую гигроскопичность волокна, а разный размер пор и неоднородность поверхности фибрилл вызывают удержание адсорбированной влаги и как следствие, сорбционный гистерезис.

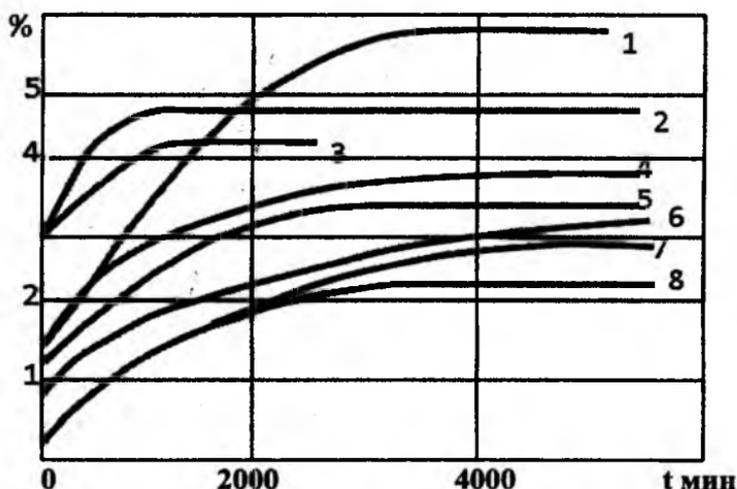
Первичная стенка (кутикула) волокна содержит гидрофобное вещество - воск и эта жировосковая оболочка препятствует смачиванию водой и ее сорбции. По мнению В.К.Королева [2.4], при отсутствии местных повреждений первичной стенки, влага может поступать в гидрофильную составляющую волокна - его вторичную, целлюлозную стенку, только через кожуру семян, а затем по внутреннему каналу в стенки волокна.

Гидрофильные свойства семян хлопчатника определяются соотношением гидрофильных и гидрофобных составляющих. Клетки ядра содержат значительное количество белков (зародыш), целлюлозу и гемицеллюлозу с большим количеством микрокапилляров, что и определяет их высокие влагосорбционные качества. Значительное количество масла (до 23 %), заполняющее микрокапилляры, снижает влагопоглощательную способность ядра.

Кожура семян содержит много лигнина и значительно менее гидрофильная, чем ядро. Влага проникает внутрь семени главным образом через неприкрытые оболочкой микропилльные и халазийные каналы, а также через кожуру семени и волокна при повреждениях поверхности. Соотношения отдельных компонентов ядра и шелухи и развитие хлопковых волокон изменяются с возрастом хлопксырца, который влияет на сорбционную способность, зависящую также от методов очистки хлопка, его зрелости, селекционного сорта и т.д. Так, исследования влагосорбционной способности хлопкового

волокна показали, что по мере созревания она уменьшается до определенного минимума, достигаемого примерно через 40 дней, а затем возрастает. По данным «Пахтасаноат илмий маркази», поверхность испарения волокна равна приблизительно  $25 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а семян -  $1 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Динамика процессов сорбции различна для хлопка-сырца и его отдельных компонентов. Кривые скорости влагосорбции, полученные при относительной влажности воздуха, равной 40 %, и его температуре  $27^\circ\text{C}$  (рис.2.6), показывают, что наиболее быстро достигает равновесия волокно, для семян и их компонентов процесс протекает более медленно; существенно отличаются также установившиеся (равновесные) влагосодержание.



**Рис.2.6.** Кривые влагосорбции хлопка – сырца и его компонентов при относительной влажности воздуха 40% и температуры  $27^\circ\text{C}$  (1-шелуха, 2-пух, 3-волокно, 4-хлопок-сырец, 5-мятка, 6-семена с подушком, 7-семена, 8-ядро семян)

Сказанное выше, имеет важное значение для влагометрии хлопка-сырца. Его "интегральная" влажность определяется влажностью всех компонентов, между которыми влага распределяется неравномерно [2.6].

В качестве иллюстрации неравномерности влажности приведем данные [1.1] о распределении влаги между компонентами хлопка-сырца, хранящегося в бунте:

Таблица 2.5

Влажность, %			
Хлопок-сырец	Волокно	Ядро	Кожура
10	6,9	8,1	17,1
15	10,4	14,1	23,2
20	13,8	20,5	28,9
30	20,5	34,7	38,3

Данные табл.2.5 относятся к равновесному состоянию перечисленных в ней материалов. Равновесное состояние хлопка-сырца можно описать упрощенной аддитивной формулой:

$$W_x = AW_B + (1-A)W_C$$

где  $W_x$ ,  $W_B$ ,  $W_C$  - влажность, соответственно хлопка-сырца, волокна и семян;

$A$  - массовая доля волокна в сухом хлопке-сырце (можно принять в среднем  $A \approx 0,4$ ).

Эмпирические уравнения, определяющие зависимости влажности ядра-  $W_я$ , волокна  $W_B$ , кожуры  $W_K$  от влажности хлопка-сырца  $W$  в следующем виде:

$$W_B = 0,7W, \%$$

$$W_x = \frac{W - P_B W_B - P_K W_K}{1 - \delta_B - \delta_K};$$

$$W_я = 0,46W, \%$$

где  $P_B$ ,  $P_я$  - содержание соответственно волокна и ядра в абсолютно сухой массе хлопка-сырца.

В процессах увлажнения и сушки происходит перераспределение влаги между компонентами хлопка-сырца и соотношение между их влагосодержанием может изменяться в более широких пределах, чем в состоянии равновесия.

Неравномерность распределения влаги в хлопке-сырце является одним из основных источников погрешностей при применении большинства методов измерения влажности. Оценка этих погрешностей и способов их минимизации рассматривается ниже в главе 3.

Хлопок-сырец и его компоненты по сорбционным и водоудерживающим свойствам можно отнести к капиллярно-пористым коллоидным материалам. Такие материалы обладают свойствами капил-

лярно-пористых и коллоидных тел - стенки их капилляров эластичны и при поглощении влаги происходит набухание эластичных гелей и изменение объема тела.

Основным фактором, определяющим, связывание воды поверхностью твердого тела является процесс адсорбции. Вначале поверхность адсорбента покрывает первый слой толщиной в одну молекулу. После образования этого мономолекулярного слоя начинается адсорбция и при приближении равновесного давления к давлению насыщенного пара основную роль начинает играть капиллярная конденсация.

Механизм движения влаги в капиллярах зависит от их размеров. Условно можно считать границей между микро и макрокапиллярами радиус капилляра, равный 1 мкм. Все компоненты хлопка-сырца, особенно хлопковое волокно, имеют капилляры и поры с широким непрерывным спектром капилляров, и хлопок-сырец следует отнести к материалам с поликапиллярной структурой.

Для влагометрии большое значение имеют формы связи влаги с "твердым скелетом" материала и состояние гидротермического равновесия материала.

В первом приближении всю влагу материала можно разделить по форме связи на свободную и связанную. Свободная влага слабо удерживается твердым веществом и сохраняет все свои свойства. Связанная влага прочно адсорбирована, с трудом удаляется тепловыми и механическими воздействиями и по своим свойствам приближается к твердому веществу.

Недостаточность такой классификации очевидна. В ее рамках можно дать многочисленные определения "связанной воде", например, влага первого адсорбированного монослоя; влага, удерживаемая после определенного процесса сушки; не замерзающая в точке плавления; не пригодная для растворения некоторых веществ; растворимых в жидкой воде и т.д.

Наиболее полную классификацию видов и форм связи влаги, основанную на энергии связи  $E$ , предложил П.А. Ребиндер. По этой классификации всю влагу коллоидного капиллярно-пористого тела можно разделить на следующие виды (в порядке нарастания величины  $E$ ):

1. Свободная вода.

2. Влага капиллярно связанная (физико-механическая связь):

а) влага капиллярного состояния в микропорах;

- б) стыковая влага макропор;
- в) капиллярная влага микропор.
- 3. Влага адсорбционно-связанная (физико-химическая связь):
  - а) влага полимолекулярной адсорбции;
  - б) влага мономолекулярной адсорбции.
- 4. Вода химически связанная (химическая связь).

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

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

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

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

В хлопке и хлопковых материалах имеют место все рассмотренные выше формы связи влаги в различных соотношениях. Так, по некоторым данным, количество связанной влаги в целлюлозе хлопка составляет около 13 %. Следует учесть, что в ходе различных процессов - физических, естественных и искусственных (сушка, увлаж-

нение), биохимических и т.д. - на всех этапах существования и использования материала одна форма связи может постепенно переходить в другую.

Существует ряд экспериментальных методов анализа форм связи влаги, из которых наибольший интерес представляют адсорбционно-структурные, теплоты смачивания, термографические, в частности, кинетический метод термограмм изотермической сушки и его сочетание с энергограммами сушки. Достоинством последних методов является возможность определения по результатам одного опыта водоудерживающей способности материала по отношению ко всем возможным формам и видам связи влаги, причем затрата времени составляет несколько часов. Общие недостатки аналитических методов - громоздкая методика и значительная длительность анализа, необходимость отбора образцов, а иногда и их разрушение. Определенный интерес представляет привлечение для такого анализа электрических и других физических методов измерения влажности, свободных от указанных недостатков.

Термогравиметрический метод анализа, применяемый для определения форм связи влаги с материалами, основан на изучении тепловых эффектов, сопровождающихся выделением или поглощением тепла в результате физико-химических приращений вещества [2.12]. Мы провели термографические исследования хлопковых семян на пирометре типа Курникова (скорость нагрева 8-10 °С /мин) и на дериватографе системы Паули и Эрдей [2.13]. Для снятия термограмм использовали пробы хлопковых семян различной влажности: высушенные при 105 °С до постоянного веса, воздушно-сухие и предварительно увлажненные до определенного влагосодержания. На дифференциально-термических кривых нагревания семян (рис.2.7, кривые 1 и 3) наблюдались эффекты, характеризующие состояние влаги в исследуемых образцах: для увлажненных образцов был отмечен эндоэффект при 100 - 120 °С и два экзотермических эффекта при 280 и 360 °С. Для образцов, высушенных при 105 °С (кривая 3) эндоэффект при 100 - 120 °С не выявлено.

Следовательно, эффект при 100 - 120 °С относится, в первую очередь, к удалению свободной влаги. Связанная влага удаляется при более высоких температурах, что подтверждается эффектами

при 280-360 °С. Поскольку в практике семена высушивают при 100 - 105°С до постоянной массы, свободной

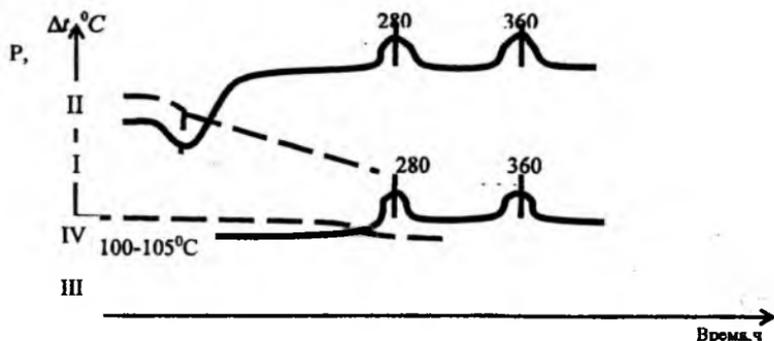


Рис.2.7. Термограммы нагревания (I, III) хлопковых семян и потери их веса (II, IV).

влаги, определение влажности сводится, в основном, к нахождению свободной влаги, так как связанная влага полностью сухой при данной температуре не удаляется. Таким образом, количество связанной влаги в практике термогравиметрического метода не определяется.

На кривых 2 и 4, снятых на дериватографе для семян высушенных при 105 °С (кривая 4) изменений веса до 100 - 120 °С не наблюдалось; для воздушно-сухих образцов потеря веса составляла 3,3%, для увлажненных-7%. Общая потеря в весе при 300 °С для увлажненного образца (кривая 2), равнялась 34,12 %.

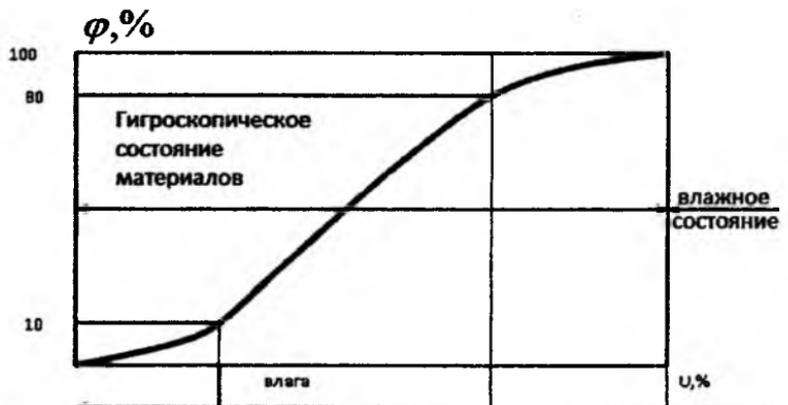
Гигротермическое равновесие капиллярно-пористых тел описывают сорбционные изотермы, т.е. графики зависимости равновесного влагосодержания данного вещества от влажности окружающего воздуха. Под равновесным влагосодержанием понимают его установившееся значение, приобретенное в результате взаимодействия с окружающей воздушной средой. Таким образом, сорбционные изотермы - это статические характеристики, определяемые при постоянной температуре и зависящие, главным образом, от парциальных давлений водяного пара у поверхности (исследуемого материала  $p_m$  и в воздухе  $p_v$ ).

Если  $p_m > p_v$ , имеет место испарение влаги из материала (десорбция), при  $p_m < p_v$  происходит поглощение влаги материалом (сорб-

ция); равенство  $p_m > p_v$  соответствует гигротермическому равновесию, т.е. достижению равновесного влагосодержания при данной температуре.

Для капиллярно-пористых материалов характерно явление сорбционного гистерезиса - изотермы сорбции и десорбции не совпадают. Если по оси ординат отложить равновесное влагосодержание твердого материала  $U$ , а по оси абсцисс - относительную влажность воздуха  $\varphi$ , то при постоянной температуре изотерма десорбции располагается выше изотермы сорбции, т.е. одному и тому же значению  $U$  при десорбции соответствует более низкая влажность  $\varphi$  воздуха. Общими для обеих сорбционных изотерм являются лишь точки, соответствующие  $\varphi=0$  и  $\varphi=100\%$ , последней точке соответствует максимальное гигроскопическое влагосодержание  $U_m$

У большинства материалов изотермы сорбции перемещаются с изменением температуры, причем с повышением температуры то же значение равновесной влажности достигается при более высокой влажности воздуха. Для одного и того же материала зависимость равновесного влагосодержания от температуры нелинейно, наибольшее влияние температура оказывает при высокой влажности материала.



Химически связанная мономолекул. адсорбции	Полимолекулярные абсорбции	Капиллярно связанная	Макрокапиллярови набухание
--	----------------------------	----------------------	----------------------------

**Рис. 2.8. Сорбционная изотерма коллоидного капиллярнопористого тела**

Форма изотермы сорбции связана с характером пористости тела. Для коллоидных капиллярнопористых тел сорбционные изотермы имеют характерную S - образную форму. При низкой относительной влажности воздуха равновесная влажность материала растет быстро, затем замедляется, а на последнем участке - вновь увеличивается.

Форма изотермы, точнее расположение ее точек перегиба, несет определенную информацию о формах связи воды с данным веществом, как это показано на рис.2.8, где изотерма построена в координатах U-равновесное влагосодержание,  $\varphi$ -относительная влажность воздуха. Измерение наклона изотермы по мере увеличения влажности можно объяснить следующими процессами. Начальный участок, ( $0 \leq \varphi \leq 10\%$ ) соответствует мономолекулярной адсорбции, сопровождающейся значительным выделением тепла. На участке  $10 \leq \varphi \leq 80\%$  имеет место полимолекулярная адсорбция со значительным уменьшением выделения тепла. Последний участок ( $80 \leq \varphi \leq 100\%$ ) характеризуется поглощением влаги без выделения тепла. Увлажнение материала выше максимального гигроскопического влагосодержания происходит уже не поглощением влаги из воздуха, а непосредственным (контактным) добавлением воды.

Изотермы сорбции и десорбции, как правило, определяют эмпирически для каждого материала в отдельности. Ввиду рассмотренного выше различия влагосорбционных и влагоудерживающих свойств хлопка-сырца и его компонентов, сорбционные изотермы этих материалов также различны. На рис.2.9 приведены сорбционные изотермы для хлопка-сырца (3) и его компонентов: шелухи (1), семян (2), ядра семян (4) и волокна (5). Эти изотермы были получены тензометрическим методом при температуре  $27^\circ\text{C}$  [2.7]. Сравнение кривых показывает, что вплоть до  $\varphi=90\%$  наибольшую равновесную влажность имеет шелуха, а минимальную - волокно. Изотермы сорбции хлопка-сырца 1 и 5 сортов, волокна 1 и 5 сортов, а также семян 1 и 5 сортов почти не различаются (для каждого из этих материалов) между собой, т.е. сортность хлопка-сырца и его компонентов мало влияет на процессы сорбции и десорбции.

Аналитическое описание изотермы сорбции для одной группы материалов представляет определенные трудности. В связи с этим исследователями предлагались различные эмпирические уравнения, основанные на обработке экспериментальных данных.

Сорбционную изотерму целлюлозы при низком влагосодержании ( $U <= 1,5\%$ ) можно описать уравнением [2.9].

$$-\ln(1 - \varphi) = a_1 U + a_2 U^2$$

где  $\varphi$ ,  $U$  - относительная влажность и равновесное влагосодержание (в

долях единицы);  $a_1, a_2$  - постоянные.

По другим данным [2.5], изотерма сорбции целлюлозы описывается выражением

$$\varphi = 1 - (1 - KC_\alpha) e^{-BC_\beta}$$

где  $C_\alpha$  и  $C_\beta$  - коэффициенты, соответствующие количеству поглощенной влаги, химической и физико-химической связи с целлюлозой;

$K$  и  $b$  - постоянные.

Лыков А.В. предложил для хлопка формулу

$$U = \frac{17,2\varphi}{182 - \varphi}$$

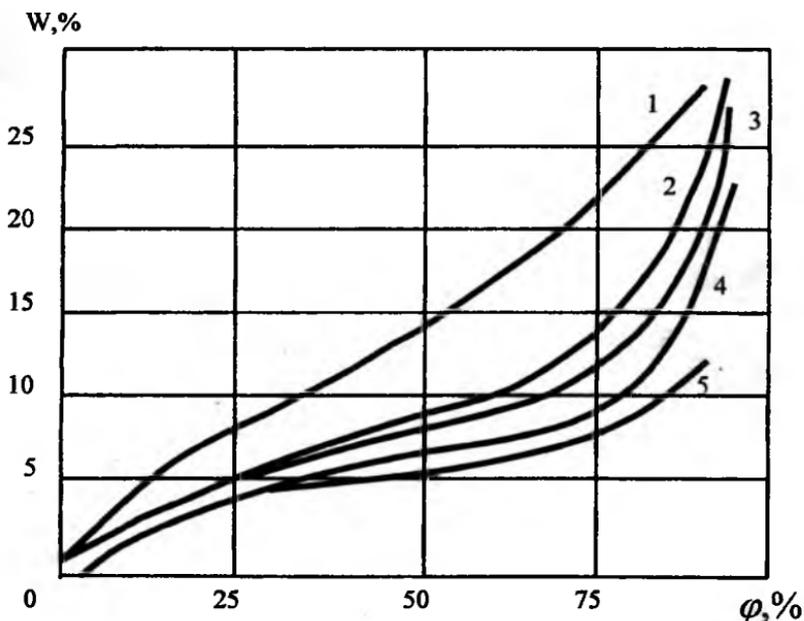


Рис. 2.9. Зависимость равновесной влажности хлопка-сырца, волокна и семян от относительной влажности при  $t=20^\circ\text{C}$ .

1-шелуха, 2-семена, 3-хлопок-сырец, 4-ядро семян, 5-волокно.

По усредненным экспериментальным данным, В.В. Казанский [2.5] получил следующее уравнение изотерм сорбции хлопкового волокна для температур 25-27 °С:

$$U = 0,55 \sqrt{\varphi} e^{\varphi/100}$$

Эта формула дала совпадение с экспериментальными данными с относительной погрешностью, не превышающей 10%, в диапазоне  $0 \leq \varphi \leq 90\%$ .

Расхождения в математических моделях сорбционных изотерм хлопка и хлопкового волокна, предложенных различными авторами, отражают различие и непостоянство сорбционных свойств этих материалов, и различный характер и количественные соотношения форм связи влаги с ними. Указанные факторы имеют большое значение и для метрологических характеристик различных методов измерения влажности хлопка. В этих методах, особенно физических, велика роль влияния влажности на физические, биологические и технологические свойства хлопка-сырца и хлопковых материалов. Эта роль имеет два аспекта, во первых, зависимость метрологических свойств средств измерения влажности от свойств исследуемого материала, во-вторых, возможность использования ряда физических свойств материала в качестве основы косвенных методов измерения влажности [2.7].

Влажность оказывает существенное влияние почти на все физические свойства хлопка-сырца и его компонентов, включая их оптические и акустические характеристики. Теплофизические и обменные параметры хлопка (удельная теплоемкость, коэффициенты теплопроводности, термовлагопроводности, температуропроводности и др.), определяющие скорость протекания термических и термовлажностных процессов, являются функциями влажности. Влияние влажности на электрические свойства хлопка-сырца и его компонентов рассматриваются в главах 4 и 6.

Хлопок-сырец и его компоненты – это биологические объекты, у которых влажность оказывает сильное влияние на происходящие в них биологические и биохимические процессы. В качестве убедительного примера можно указать на семена хлопчатника, хранение которых возможно только при определенных параметрах (температура и влажность) окружающего воздуха. Если при температуре 15-20 °С влажность семян превысит 12-13 %, начинаются набухание и дыхание семян, окисление органических веществ (белков, жиров, уг-

леводов). Эти процессы экзотермичны, т.е. сопровождаются выделением значительного количества тепла. Интенсификация биохимических процессов вызывает самосогревание семян, и если затруднен отвод теплоты - их порчу.

Повышенная активность биохимических процессов в волокне вызывает развитие микроорганизмов и плесени. Таким образом, влажность хлопка-сырца влияет на качество волокна и семян, длительное хранение которых при очень высокой влажности вообще невозможно. С другой стороны, чрезмерное понижение влажности воздуха при хранении семян хлопчатника может вызвать необратимые коллоидно-химические процессы в протоплазме зародыша и потерю всхожести посевных семян.

Влияние на физические и другие свойства хлопка-сырца и его компонентов определяет роль влажности как важнейшего технологического фактора в процессах переработки хлопковых материалов. Так, в процессах джинирования и очистки хлопка-сырца, при его низкой влажности, легче отделяются примеси. Превышение оптимальных значений влажности влечет за собой увеличение пороков и засоренности волокна, а также понижение производительности очистителей и джинов. В производстве хлопкового масла от влажности семян зависят выход и качество конечного продукта - готового масла. Повышенная влажность увеличивает кислотное число масла и ухудшает его рафинируемость.

Влажность измельченного и пропаренного ядра (мятки) также определяет степень маслоотдачи. Не менее важное значение имеет влажность вторичных продуктов переработки. Так, повышенная влажность обезжиренного материала (шрота) приводит к его самосогреванию, вплоть до возгорания, а также к снижению содержания протеина. Снижение влажности хлопковых семян с 11 до 7 % увеличивает масличность шелухи в два раза, повышенная влажность мезги ухудшает цветность хлопкового масла и его рафинируемость.

Таким образом, влажность хлопка-сырца и хлопковых материалов оказывает существенное влияние на большинство технико-экономических показателей производственных процессов в хлопководстве и перерабатывающих его отраслях промышленности.

# ГЛАВА III. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА-СЫРЦА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

## 3.1. Общие сведения. Задачи и особенности измерения влажности хлопка и хлопковых материалов

Наиболее распространенными в науке и технике величинами, количественно характеризующими содержание влаги в твердых и жидких веществах, являются две относительные величины, выраженные в безразмерных единицах:

1) влагосодержание (массовое)  $U$ , под которым понимают отношение массы влаги  $M_B$ , содержащейся в веществе, к массе сухого вещества  $M_0$

$$U = \frac{M_B}{M_0} \quad \text{или} \quad U = \frac{M_B}{M_0} 100\%;$$

2) влажность (массовая  $W$ ), под которой понимают отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к массе  $M$  влажного вещества:

$$W = \frac{M_B}{M} = \frac{M_B}{M_0 + M_B} \quad \text{или} \quad W = \frac{M_B}{M_0 + M_B} 100\%$$

Указанные величины связаны между собой соотношениями:

$$W = \frac{U}{1+U} \qquad U = \frac{W}{1+W}$$

Обе величины  $W$  и  $U$  являются характеристиками содержания влаги, но в зависимости от установившейся традиции в разных отраслях науки и народного хозяйства отдают предпочтение одной из них. В хлопкоочистительной промышленности чаще применяют термин массовое отношение влаги  $U$ , однако исчисление содержания влаги по массовой доле влаги  $W$  обладает некоторыми преимуществами [3.1]. Шкала влажности для  $W$  является ограниченной и линейной (0-100)%, вместо неограниченной (0-∞) и нелинейной для  $U$ . Кроме того, в системе  $W$  размер единицы содержания влаги (0,01 массы пробы) не зависит от полноты разделения влаги и сухого вещества, что позволяет в прямых методах вводить постоянную поправку на остаточную влажность вещества. Логичнее выражать содержание влаги в процентах по отношению ко всей массе материала и не оценивать, например, 50 % влаги как 100 % ное влагосодержание.

Значительно реже, например, в некоторых теоретических расчетах используют объемную влажность, т.е. отношение объема влаги к общему объему влажного вещества:

$$W_{об} = \frac{V_B}{V} = \frac{V_B}{V_0 + V_B}$$

Объемное влагосодержание выражается в виде отношения объема влаги к общему объему сухой части вещества:

$$W_{об} = \frac{V_B}{V_0}$$

где  $V$ ,  $V_0$ ,  $V_B$  - объем влажного, сухого вещества и воды.

Необходимость получения и использования информации о влажности хлопка-сырца, его компонентов и продуктов переработки возникает на всех стадиях производства и переработки хлопка [3.2].

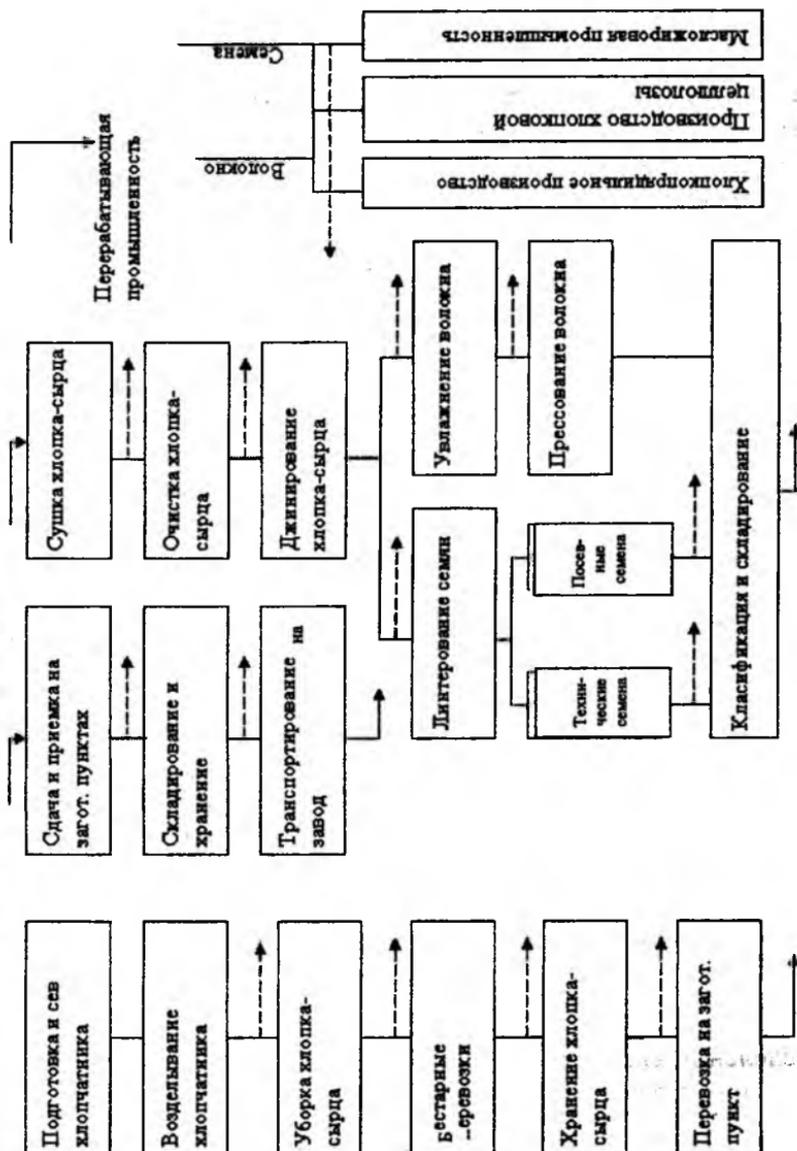
На рис.3.1. представлена обобщенная схема хлопководства, заготовок хлопка-сырца, его первичной обработки и потребления перерабатывающей промышленностью - как единой системы. Каждому звену (подсистеме) этой системы присущи свои задачи измерения влажности, отличающиеся объектом измерения (хлопок-сырец, хлопковое волокно, хлопковые семена или их компоненты и продукты переработки), целью и условиями измерений, способом использования измерительной информации.

Для постановки анализа и оптимального решения задачи разработки и внедрения методов и технических средств измерения влажности хлопка и хлопковых материалов целесообразно применить системный подход, т.е. рассматривать эту задачу как единую систему взаимосвязанных частей, взаимодействующих между собой и с внешней средой. В нашем случае основные части (подсистемы) задачи - это разработка средств измерения (задачи приборостроения), их эксплуатация (измерительная техника) и метрологическое обеспечение (метрология).

Переход в рассматриваемой области от индивидуальных решений частных задач к единому, унифицированному комплексу технических средств безусловно обеспечит технико-экономический эффект, значение которого в масштабах народного хозяйства в целом трудно переоценить.

Задачи, которые должен решать комплекс средств измерения влажности, весьма разнообразны (рис.3.1). Объектами измерения

### ХЛОПЧИСТАТЕЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



**Рис. 3.1. Обобщенная схема контроля влажности хлопка и хлопковых материалов, полученные при использовании информации о влажности.**

являются не только хлопок-сырец, хлопковое волокно и семена хлопчатника, но и такие продукты переработки как, например, линт, шрот, мятка, жмых, мезга, хлопковое масло, ракушка и т.д.

Измерения должны производиться в различных условиях - в поле, в лабораториях заводов или приемных пунктов, в цехах предприятий хлопкоочистительных или перерабатывающих хлопок и т.д., причем один и тот же материал может находиться в статическом состоянии или в движении. В очень широких пределах может изменяться масса материала, подлежащая анализу - этот вопрос рассматривается ниже. Различны и требования, предъявляемые к метрологическим характеристикам (диапазон измерения влажности, суммарная погрешность, динамические характеристики) средств измерения и способу выдачи измерительной информации.

Анализ совокупности задач измерения влажности хлопка-сырца и получение и использование информации о влажности хлопковых материалов приводит к необходимости создания средств измерений (влагомеров) трех типов, описанных ниже. При этом принимались во внимание также требования к внедрению в хлопкоочистительную и хлопкоперерабатывающую отрасли информационно-измерительных систем и АСУ ТП.

Основные типы влагомеров унифицированного комплекса для хлопководства, заготовительной системы и промышленности следующие:

1. Полевые переносные влагомеры для дискретных измерений в полевых условиях, бунтах, кузовах прицепов с выдачей информации человеку - оператору или на регистрирующее устройство.

2. Лабораторные влагомеры дискретного действия, переносные или стационарные, для экспрессных измерений в условиях лаборатории, цеха с выдачей информации человеку - оператору и на печатающее устройство.

3. Автоматические влагомеры дискретного или непрерывного действия, стационарные для сопряжения с микропроцессором или преобразователями унифицированного выходного сигнала и выдачи информации в локальную систему автоматического управления, информационно-измерительную систему, АСУТП или АСУП.

Рассмотрим теперь некоторые специфические особенности определений влажности хлопка-сырца и его компонентов. Важнейшей из них является неравномерность распределения влаги в хлопке-

сырце. Значение этого фактора в последние годы существенно возросло, в связи с преобладающим внедрением машинного сбора и сокращением сроков уборки хлопка-сырца, вызвавшим также повышение средней влажности хлопка-сырца, поступающего на заготовительные пункты.

С другой стороны, в процессе сдачи-приемки, хранения и переработки хлопка-сырца и хлопковых материалов возникает необходимость определения средней влажности больших масс хлопка-сырца при поступлении на заготпункты, в бунтах, а хлопкового волокна - в кипах и тюках и т.п.

В лабораторных термогравиметрических методах определения влажности хлопка-сырца (сушка в сушильном шкафу и ускоренная сушка в термовлагомере при повышенной температуре) взятые пробы материала не представляют всей партии материала, масса которой может достигать нескольких десятков тонн.

Таким образом, неизбежно расхождение значения средней (интегральной) влажности для всей большой массы хлопка и влажности анализируемого образца. Эта "погрешность выборки" зависит от степени неравномерности, метода отбора проб, их массы и других факторов. Скрытую погрешность выборки можно уменьшить, увеличивая массу анализируемой пробы. Другая возможность уменьшения погрешности от неравномерности влажности - это применение современных физических методов измерения влажности, в частности метода сверхвысоких частот (СВЧ) (см. главу 6). Эти методы позволяют получать информацию об интегральной влажности больших масс материала.

Влагомеры СВЧ дают возможность значительно увеличить массу исследуемого материала. Причем наиболее перспективны те методы измерения, которые позволяют оценить интегральную влажность большой массы материала без отбора пробы. Такое решение возможно, например, при просвечивании массы хлопка-сырца радиоволнами СВЧ (влагомеры по методу "свободного пространства" - см. гл. 6). Другим примером может служить измерение интегральной влажности кипы хлопкового волокна, помещенной в полость СВЧ первичного преобразователя влажности, работающего по принципу объемного резонатора.

### *3.2. Классификация методов измерения влажности*

Методы измерения влажности, как и других физических величин, можно классифицировать, исходя из разных признаков. Общепринятым является деление этих методов на два основных класса:

- прямые методы;
- косвенные методы.

Прямые методы характеризуются тем, что искомое значение измеряемой величины находят непосредственно сравнением с образцовой мерой этой величины образца. В косвенных методах используется известная зависимость между измеряемой величиной и другими физическими величинами, подвергаемыми прямым измерением.

Применительно к измерениям влажности прямыми методами называют те, в которых исследуемый материал разделяют непосредственно на сухое вещество и влагу. К этому классу относятся следующие методы (преимущественно методы лабораторного анализа) термогравиметрические, химические, дистилляционные, экстракционные и некоторые другие менее распространенные методы разделения.

Косвенные методы измерения влажности удобно разделить на электрические, в которых производится прямое измерение электрических параметров материала и неэлектрические, в основу которых положено измерение физических свойств материала, не принадлежащих к группе электрических свойств.

Из методов первой группы наибольшее значение имеют кондуктометрический и диэлькометрические, к последним относится также метод СВЧ измерения диэлектрических свойств в диапазоне сверхвысоких частот.

Из неэлектрических методов измерения влажности для хлопка представляют интерес механические, теплофизические, ядерно - физические (нейтронный и ядерного магнитного резонанса - ЯМР), оптические [3.3].

При применении многопараметрических методов измеряют две или несколько величин с помощью одного метода (например, двух и многочастотные диэлькометрические измерения) или методов, относящихся к различным классам.

Общими преимуществами большинства физических косвенных методов по сравнению прямыми аналитическими является высокое

быстродействие (возможность экспрессных измерений), неразрушающий характер измерения и возможность автоматизации процессов измерения.

Из прямых методов наибольшее значение имеет термогравиметрический. Он основан на определении уменьшения массы образца исследуемого материала в результате его тепловой сушки, выполняемой различными способами, чаще всего при атмосферном давлении и реже - при пониженном давлении (сушка в вакууме). Подвод тепла к сушиму материалу чаще всего осуществляется конвекцией, но применяются также и другие способы сушки: контактный, термогравитационный, токами высокой и сверхвысокой частоты.

На практике применяют высушивание до постоянной массы, или так называемые ускоренные методы сушки. В первом случае сушку прекращают, если два последовательных взвешивания образца дают результаты одинаковые или отличающиеся на величину, не больше заданного допуска. При ускоренных методах сушку проводят в течение интервала времени, установленного эмпирически для данного материала и дающего результаты, хорошо согласующиеся с высушиванием до постоянной массы. Следует сразу отметить, что надежность этого согласования недостаточно высока при ускоренных методах, применяемых на практике.

Термогравиметрический метод является наиболее изученным и распространенным при определении влажности большинства твердых материалов - естественных и промышленных, в том числе и хлопка-сырца и продуктов его переработки. Этот метод узаконен в ГОСТах и других регламентирующих документах, относящихся к хлопку и хлопковым материалам, широко применяется на практике, в том числе для градуировки и поверки влагомеров, основанных на других методах. В связи с этим в разделе п. 7.4, посвященном метрологическому обеспечению влагометрии хлопка, приводятся описание регламентированных термогравиметрических установок и детальный анализ факторов, определяющих точность этого метода.

Химические методы – это методы аналитической химии, основанные на взаимодействии различных реагентов с влагой твердого вещества. Количество воды в исследуемом образце определяют по количеству газообразного или, реже, жидкого продукта, выделившегося в результате химической реакции. Количество газообразного

продукта определяют измерением его массы (гравиметрический способ), объема (волюмометрический способ) или в замкнутом объеме сосуда (манометрический способ). Более ограниченное применение нашло титрование продукта реакции ацидиметрическим, электрометрическим, калориметрическим или газохроматографическим методами или определением теплоты реакции, если она является экзотермической.

Наиболее распространенными являются определения влажности с применением следующих реагентов:

1. Карбида кальция с выделением ацетилена (карбидный метод), согласно реакции



На практике указанная реакция редко протекает качественно и карбидные влагомеры, как и другие газометрические приборы для определения влажности, приходится градуировать эмпирически.

2. Гидрида кальция с выделением водорода (водородный метод):



Выделившийся водород имеет большой объем, благодаря чему метод отличается высокой чувствительностью и пригоден для определения очень малых влагосодержаний. Однако гидрид кальция не является реагентом, специфическим по отношению к воде; он реагирует и с другими соединениями, содержащими активный водород - спиртами, ацетоном, аммиаком, жирами, неорганическими гидроксидами.

3. Бензойного ангидрида с получением бензойной кислоты:



Количество образовавшейся бензойной кислоты определяют титрованием щелочью. Аналогичным является способ определения влагосодержания с применением уксусного ангидрида. Метод был применен для определения влажности хлопка, причем основная трудность - это необходимость точного соблюдения условий опыта для предотвращения ацетилирования целлюлозы.

4. Из химических методов наиболее широко используется в аналитической практике определение воды с помощью реактива Карла Фишера (метод К. Фишера). Реактив Фишера представляет собой раствор йода, пиридина и сернистого ангидрида в метаноле. Ввиду высокой чувствительности реактива к влаге, при его приго-

товлении все исходные материалы должны быть тщательно дегидратированы теми или иными методами, аналогичные требования предъявляются и к хранению реактива. Реакция сернистого ангидрида и йода с водой с образованием серной и йодистоводородной кислоты, для нейтрализации которых служит пиридин ( $C_5H_5N$ ), имеет вид



По методу Фишера реактив добавляют к исследуемому образцу до появления коричневой окраски йода, обычно конец титрования определяют визуально или электрическим способом.

Метод Фишера (при условии тщательного выполнения анализа) имеет ряд достоинств. Он отличается универсальностью (применимость для газообразных, а также твердых и жидких органических и неорганических веществ), высокой чувствительностью и точностью (особенно для тонко измельченных материалов), позволяющими без снижения точности определять и микровлагосодержания.

По технике метода Фишера и его применению к многочисленным объектам измерения (в том числе и к сельскохозяйственным и пищевым продуктам) имеется обширная литература [3.4]. Метод К. Фишера применялся также для определения влажности хлопковых семян и продуктов их переработки и хлопкового лinta.

Методу Фишера присущи и определенные недостатки, большинство которых являются общими и для других химических методов. Это необходимость соблюдения условий работы с вредными, горючими и ядовитыми веществами и периодического контроля качества химических реактивов, разрушение исследуемого образца, трудоемкость и длительность анализа.

По указанным причинам (и в частности из-за трудностей качественного измельчения образцов хлопка-сырца), метод Фишера и другие химические методы непригодны для оперативного контроля влажности хлопка-сырца в производственных условиях. Однако этот метод представляет определенный интерес для метрологического обеспечения влагометрии хлопковых семян, продуктов их переработки и некоторых других материалов (см. п. 7.4).

5. Дистилляционные методы используют образец, диспергированный в переносчике влаги - жидкости, не смешивающийся с водой. Эту жидкость (бензин, бензол, толуол, ксилол, минеральное масло и т.д.) нагревают до начала кипения, конденсируют образующийся пар и измеряют объем или массу фазы.

В качестве переносчика воды используются преимущественно органические растворители - углеводороды, плотность которых меньше, чем у воды. Дистилляционные методы с различными методиками определения были разработаны для многих материалов и нашли практическое применение, главным образом, для жидкостей (например, стандартный метод Дина и Старка для нефтей и нефтепродуктов).

Основными элементами аппаратуры для отгонки являются сосуд для анализируемой пробы и переносчика агента, нагреватель, конденсатор (холодильник) и приемник. Эта аппаратура была разработана в ряде модификаций, из которых наиболее известны приборы Дина и Старка, а также Брауна - Дювела для определения влажности зерновых продуктов.

Аппаратура обычно достаточно громоздка и хрупка из-за наличия стеклянных частей. Длительность определения зависит от размера поверхности образца (степени его дисперсности), коэффициента диффузии, градиента концентрации влаги и других факторов, а для твердых материалов, не подвергнутых измельчению, достаточно велика. Методу свойственны некоторые ошибки, источником которых, в частности, являются конденсация влаги на стенах соединительных трубок и ловушек, неправильное определение объема жидкости в приемнике из-за нечеткого разделения органической и водной фаз и т.д. Точность метода особенно низка в диапазоне малых влагосодержаний.

По данным приведенным в [2.9], отгонка воды с четыреххлористым углеродом считается надежным методом определения влажности хлопка в отсутствии таких летучих компонентов, как ацетон, сложные эфиры и сульфоновые кислоты. Дистилляционные методы могут также найти некоторое ограниченное применение в хлопкомаслоэкстракционном производстве для лабораторных анализов влажности хлопкового масла, растворителей и других жидких материалов.

Их применение для хлопка-сырца и хлопковых семян существенно ограничивают трудности, связанные с надежным измельчением образцов.

6. Экстракционные методы. Основаны на извлечении воды из образца исследуемого материала с помощью водопоглощающей жидкости (диоксан, метиловый или этиловый спирт и их смеси с аце-

тиленом, этиленгликолом и т.п.) и определении характеристик экстрактафизических (плотность, температура кипения), оптических (коэффициент преломления), электрических (проводимость, диэлектрические параметры).

Экстрагирующий агент должен полностью извлекать влагу из твердого вещества, не поглощая других компонентов. Время экстракции может изменяться от нескольких минут до нескольких часов; процесс экстракции протекает быстрее у тонко измельченных материалов. Обычно выбор экстрагента и градуировка экстракционного влагомера выполняются эмпирически. Разновидностью экстракционных методов являются методы растворения, в которых измеряются характеристики растворителя после полного растворения в нем образца твердого материала. Такой метод был применен для измерения влажности нитроцеллюлозы (в диапазоне 20-30 %) [2.9]. Проба материала растворилась в безводном ацетоне с последующим определением его влагосодержания спектрофотометрическим методом по полосе поглощения 1,92 мкм.

Экстракционные методы свободны от погрешностей, присущих ряду других, в том числе физических методов; например, от погрешностей, связанных с распределением влаги в исследуемом образце, его гранулометрическим составом, плотностью и т.д.

Вместе с тем их недостатком является необходимость использования экстрагентов, от чистоты и правильности дозировки которых зависит точность измерения влажности. Им свойственны такие недостатки, как разрушение образца, большая длительность измерения, необходимость измельчения исследуемого материала и т.д. Отмеченные выше недостатки, общие для всех прямых методов определения влажности, привели не только к ограничению области этих методов, но и к тому, что они повсеместно (в производственных и лабораторных условиях, в научных исследованиях) вытесняются современными инструментальными методами. Ввиду непригодности для оперативного контроля влажности хлопка и хлопковых материалов прямые методы не могут служить базой предложенной нами унифицированной системы контроля влажности.

### ***3.3. Косвенные незлектрические методы измерения влажности***

Механические методы. Основаны на зависимости от влажности некоторых механических характеристик твердых материалов:

упругости, сопротивления деформирующему усилию, сопротивления вдавливанию металлической детали в форме иглы, конуса или ножа и т.п.

Для определения влажности хлопка - сырца был предложен ряд механических методов [2.5]. Один из них - измерение давления, необходимое для уплотнения образца массы в фиксированном объеме. Влажность  $W$  хлопка определяют при этом по эмпирической формуле

$$W = 1 / P^n$$

где  $P$  - удельное давление,

$n$  - постоянная ( $n < 1$ ).

Этот способ применялся также для определения влажности листовой целлюлозы в кипе. Сходным является способ, основанный на определении степени сжатия образца постоянной массы (10 кг), помещенного в цилиндрический сосуд, под воздействием постоянного груза (15 кг).

Механические методы отличаются своей простотой, однако их точность весьма низка. Применительно к хлопку-сырцу основной причиной низкой точности является то обстоятельство, что механические характеристики определяются, главным образом, влажностью волокна и мало зависят от влажности семян. Кроме того, эти характеристики зависят от сорта хлопка (промышленного и селекционного), его температуры, засоренности. По указанным причинам механические методы не нашли широкого применения.

Теплофизические методы основаны на зависимости теплофизических параметров капиллярно-пористых и коллоидных материалов от их влагосодержания. Такими параметрами являются коэффициент теплопроводности -  $\lambda$ , коэффициент температуропроводности -  $a$ , удельная теплоемкость -  $C$ . Иногда измеряют более сложные величины, например  $\lambda_{cp}$  (плотность материала -  $\rho$ ) или объемную теплоемкость -  $C_p$ .

Зависимость теплофизических параметров от влажности изучена экспериментальным путем для многих материалов [3.5]. Эти зависимости имеют нелинейный, а иногда (в частности для коэффициента температуропроводности -  $a$ ) и экстремальный характер. На характер зависимости влияет также форма связи влаги с дисперсным материалом и зависимости  $\lambda$  и  $C$  от влагосодержания специфичны для определенного материала или группы материалов.

Применительно к хлопку-сырцу теплофизический метод был впервые использован в работе А. Ф. Свиридова. Первичный преобразователь в виде зонда (стержня) помещался в хлопок-сырец. Измерялось время прогрева датчика в определенном интервале температур. Существенные погрешности этого способа обусловлены влиянием распределения влаги между волокнами и семенами, погрешностями измерения интервалов времени, а также влиянием температуры.

Большинство известных теплофизических влагомеров - это приборы дискретного действия. Их принцип действия основан на исследовании внутреннего температурного поля в материале, возникающего при действии источников тепла различных типов, применяемых в сочетании с преобразователями различных конструкций. Источник мгновенного типа реализуется часто в виде нагреваемой пластины, используемой для создания теплового импульса фиксированной энергии. При введении этого источника в исследуемую среду (закладной датчик) измерение повышения температуры на некотором расстоянии от нагревателя позволяет определить коэффициент  $C_p$  и  $a$  среды.

В датчиках с импульсным источником применяются проволочные нагреватели большой длины и малого диаметра. Измеряемой величиной служат максимальная температура в точке установки термочувствительного зонда или время, необходимое для достижения максимума температуры.

Теплофизические влагомеры отличаются простотой конструкции и возможностью автоматизации процесса измерения. Они позволяют измерять очень низкие влагосодержания (ниже 1%). Некоторые параметры исследуемого материала, например, их химический состав оказывают в теплофизических методах меньшее влияние на результаты измерения влажности, чем в других физических методах.

В то же время для выполнения измерения необходим контакт чувствительного элемента с исследуемым материалом. При этом непостоянство теплового контакта, плотности материала и его гранулометрического состава приобретают роль факторов, существенно влияющих на точность измерения. Таким фактором является и неравномерность распределения влаги в материале.

Теплофизические характеристики волокна, ядро семени и его опущенной оболочки резко различны и соотношение между этими

компонентами будет влиять на показания теплофизического влагомера. Также, по быстрдействию приборы этого типа уступают тем влагомерам, которые позволяют реализовать бесконтактное и практически без инерционное измерение влажности больших образцов материала.

Радиометрические методы основаны на взаимодействии с влажным материалом ядерных излучений: гамма-лучей, бетачастиц и быстрых нейтронов. Основным является нейтронный метод.

В методах ослабления гамма и бета - излучения используется поглощение и рассеяние этих видов излучения при прохождении через исследуемый материал, причем, ввиду малой проникающей способности бета частиц их применение ограничено тонкими материалами, главным образом, листовыми.

Если пренебречь изменением размеров исследуемого слоя материала вследствие усадки или набухания, ослабление интенсивности проходящего гамма-излучения можно выразить следующим образом [3.6]:

$$\ln \frac{J_c}{J} = PWd(\mu_{H_2O} - \mu_c) + \mu_c d(P - P_c) \quad (3.1)$$

где  $J_c$ ,  $J$  интенсивности излучения, прошедшего соответственно через сухой материал (при влажности  $W=0$ ) и исследуемый влажный материал;

$P$ ,  $P_c$  - плотности влажного и сухого материала;

$d$  - толщина материала;

$\mu_{H_2O}$ ,  $\mu_c$  - массовые коэффициенты ослабления воды и сухого материала.

В уравнении (3.1) первая составляющая правой части характеризует ослабление, вызванное влажностью материала, вторая - ослабление, связанное с его плотностью.

Из (3.1) можно вычислить влагосодержание  $U$  исследуемого материала:

$$U = \frac{\ln \frac{J_c}{J}}{P_c d \mu_{H_2O}} \quad (3.2)$$

Из уравнения (3.2) следует, что для определения абсолютного значения влагосодержания необходимо найти значения  $J$  и  $P_c$ , относящиеся к материалу в сухом состоянии.

Основные свойства гамма и бета методов, это резко выраженная зависимость результатов измерения от плотности исследуемого

материала. В связи с этим указанные методы были вытеснены избирательным по отношению к воде нейтронным методом и используются во влагометрии в качестве вспомогательного метода для получения информации о плотности исследуемого материала.

Нейтронный метод основан на замедлении ядрами водорода, содержащегося в исследуемом влажном материале, быстрых нейтронов, испускаемых источником. Результатом взаимодействия нейтронов с веществом являются их рассеяние и замедление с превращением в тепловые нейтроны, имеющие очень низкую энергию в среднем 0,025 эВ. Водород имеет наибольшее по величине эффективное сечение рассеяния медленных нейтронов и является наиболее эффективным замедлителем быстрых нейтронов. Замедляющая способность воды во много раз больше, чем у других наиболее распространенных элементов и влагосодержание материала можно определять по плотности потока медленных нейтронов.

Математические модели нейтронных влагомеров, описывающие зависимость потока нейтронов от влажности среды и параметров измерительной аппаратуры, были предложены рядом исследователей [3.7]. Однако они недостаточно точны, так как не учитывают существенных влияющих факторов, соответствующих реальным условиям измерений. Ввиду этого градуировка нейтронных влагомеров выполняется эмпирически.

Рассмотрим основные особенности нейтронного метода. Этот метод можно считать абсолютным, так как он дает информацию о числе атомов водорода, содержащихся в единице объема исследуемого материала. Вследствие этого нейтронный влагомер дает информацию о значении объемной влажности  $W_{об}$ . Для определения общепринятой величины массовой влажности необходимо значение плотности  $P$  исследуемого материала -  $W = W_{об}/P$ .

В связи с этим были разработаны и достаточно широко применяются комбинированные влагомеры - плотномеры, в которых используется нейтронный метод измерения влажности и гаммаскопический метод измерения плотности. Известны полевые приборы этого типа для почв, а также промышленные влагомеры на принципе просвечивания, имеющие общий источник или общий детектор (сцинтилляционного типа) для обоих каналов измерения. Следствием измерения нейтронным влагомером общего содержания водорода является влияние на результат измерения не только влагосодержания, но и содержания водорода в сухой части материала. Если

последняя величина значительна и переменна, то колебания содержания водорода влекут за собой неустранимую погрешность измерения.

Нейтронный метод измерения имеет ряд достоинств, обеспечивших его широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. К ним относятся избирательность метода, широкий диапазон измерения, возможность неразрушающих измерений в условиях естественного залегания без отбора пробы, оценка интегральной влажности сравнительно большого объема материала.

Для влагометрии хлопка и хлопковых материалов существенное значение имеют погрешности нейтронных влагомеров, обусловленные неоднородностью материала по составу, плотности и влажности. Еще важнее то, что целлюлоза содержит значительное количество атомов водорода. Для хлопкового волокна, состоящего в основном из целлюлозы, массовое содержание водорода в единице объема составляет:

$$M_H = 0,058 \rho_c (1 + 0,019W), \text{ г см}^{-3},$$

где  $\rho_c$  - плотность сухого волокна;

W - влажность, %.

Водород волокна больше влияет на показание влагомера в диапазоне низких влагосодержаний. В хлопковом масле аналогичные погрешности обусловлены атомами водорода, входящими в состав глицеридов. В состав семян хлопчатника и твердых продуктов их переработки также входят вещества, содержащие водород (целлюлоза, особенно в кожуре и линте), лигнин, белки, углеводы, жиры и т.д. Содержание этих компонентов сильно колеблется и зависит от факторов, не поддающихся учету и вызывающих неустранимые погрешности измерения. Например, содержание целлюлозы зависит от сорта, степени зрелости и т.д. Дополнительным серьезным недостатком радиационных методов является необходимость специальных устройств и мер предосторожности для защиты от биологических воздействий источника излучения.

По указанным причинам радиометрические методы влагометрии не нашли применение в хлопководстве, хлопкоочистительной и хлопкоперерабатывающей промышленности.

Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) в своей физической основе связан с резонансным поглощением энергии высокочастотного электромагнитного поля атомами водорода (протонами) вещества, находящегося в постоянном магнитном поле. Этот метод

применим к твердым материалам и жидкостям. Явление ЯМР, широко используемое в радиоспектроскопии, вызвано квантовыми переходами между зеемановскими энергетическими уровнями атомных ядер, возникающими в результате взаимодействия ядерного магнитного момента с внешним магнитным полем.

При помещении ядра в постоянное магнитное поле с напряженностью имеется два разрешенных энергетических уровня, переход между которыми достигается наложением дополнительного высокочастотного поля, перпендикулярного полю  $H_0$ . Состояние резонанса возникает при условии

$$\Delta E = hf_0 = \frac{h\gamma H_0}{2\pi}$$

где  $\Delta E$  - разность энергетических уровней;

$h$  - постоянная Планка;

$f_0$  - резонансная частота;

$\gamma$  - гиромагнитное отношение, характерное для ядра и равное отношению его магнитного момента к моменту количества движения.

Условие возникновения резонанса можно написать также в виде

$$\omega_0 = 2\pi f \approx \gamma H_0$$

где  $\omega$  - круговая резонансная частота.

Протон имеет  $\gamma = 336,166$  м/(АС) и при напряженности поля  $H_0 = 4 \times 10^4$  А/м резонансная частота будет  $f = 2,16$  МГц.

Энергия, поглощенная образцом исследуемого вещества при резонансе, зависит от числа протонов в образце. Если протоны входят только в состав молекул воды, по поглощению энергии можно определить влагосодержание вещества.

Состояние резонанса достигают либо изменением частоты электромагнитного поля  $f_0$  при постоянстве напряженности либо изменением  $H_0$  в узком диапазоне при  $f = \text{const}$ . В реальной аппаратуре, как правило, применяют второй способ, а поглощение энергии определяют по изменению параметров колебательного контура, содержащего катушку индуктивности с поля исследуемым образцом, ось которой перпендикулярна направлению  $H_0$ . Принцип устройства ЯМР влагомера поясняет схема простейшего ЯМР спектрометра, приведенная на рис.3.2. Здесь 6 - магнит, в воздушном зазоре которого находится катушка индуктивности 4 с образцом материала, питаемая генератором высокой частоты 1.

Магнитное поле модулирует генератор низкой частоты 7 с помощью модулирующих катушек (катушек развертки поля) 5, надетых на полюса магнита 6. Катушка индуктивности 4 вместе с измерительной схемой 2 образует спин-детектор, т.е. первичный преобразователь энергии, поглощенной катушкой с образцом, в выходной сигнал - напряжение. Это напряжение подается на вертикальные отклоняющие пластины электронно-лучевого осциллоскопа 3, развертка которого синхронизирована с частотой модуляции. Линия поглощения высокочастотной (ВЧ) энергии, наблюдаемая на экране осциллоскопа, используется для оценки влагосодержания исследуемого материала.

Аппаратурная реализация ЯМР-влагомеров [3.8] значительно сложнее описанной схемы. В частности, кроме однокатушечных детекторов поглощения, у которых катушка служит одновременно для создания ВЧ поля и выявления резонанса, использовались и двухкатушечные (индукционные). В измерительном устройстве применяют узкополосные усилители и синхронные детекторы с выходом на показывающие и регистрирующие приборы. В ряде случаев для измерения сигнала ЯМР используется уравнивающее преобразование.

Известны ЯМР влагомеры не только для дискретных измерений, но и для непрерывного (или периодического) контроля влажности материалов в потоке, снабженные устройствами для формирования образца и его подачи в датчик влагомера. В этих влагомерах приняты также специальные меры для автоматической стабилизации параметров измерительного устройства, от которых зависит точность измерения, с целью устранения необходимости в операциях настройки вручную.

Основная особенность ЯМР влагомеров заключается в том, что этот метод реагирует на протоны, содержащиеся не только в воде, но и в твердом веществе, а также в твердых и жидких химических соединениях, входящих в состав материала. Линия поглощения менее подвижных протонов твердого вещества более широка и полого, чем узкая и острая линия поглощения протонов жидкости.

Таким образом, в ЯМР влагомерах возникают задачи разделения "полезного", т.е. информативного сигнала, и сигнала, характеризующего мешающие факторы, в частности, содержание протонов в сухом веществе. Для этого применяется ряд способов, начиная с вы-

бора оптимальной амплитуды модуляции магнитного поля и использования дифференциального прохождения, т.е. использования двойной амплитуды (размаха) первой производной сигнала поглощения. Из других параметров ЯМР-сигнала предпочтительным является его интегральная интенсивность, пропорциональная площади, ограниченной линией поглощения и осью абсцисс.

Чувствительность первичного преобразователя ЯМР влагомера зависит от электромагнитных полей, воздействующих на исследуемый образец материала. Чувствительность увеличивается с ростом индукции постоянного магнитного поля и существенно уменьшается с ухудшением однородности этого поля, являющейся основным влияющим фактором. Зависимости выходного сигнала первичного преобразователя от амплитуд ВЧ и модулирующего низкочастотного (НЧ) полей имеют экстремальный характер, причем значения амплитуд, которым соответствуют максимумы чувствительности, зависят от вида исследуемого материала, а не от его влажности.

Вышесказанное относится, главным образом, к так называемому "стационарному методу ЯМР", при котором внешние магнитные поля неизменны или изменяются медленно и в небольших пределах.

В последнее время во влагометрии нашел применение и "импульсный метод ЯМР", (метод "спинового эха"), в котором исследуется переходный процесс, возникающий при импульсном возбуждении ВЧ-поля. В частности, используется воздействие на исследуемое вещество двух коротких интенсивных импульсов и наблюдается сигнал спинового эха, возникающий в приемной катушке через интервал времени, равный удвоенному периоду следования возбуждающих импульсов. В качестве информативного параметра используется начальное значение сигнала свободной индукции. При надлежащем выборе времени запаздывания этот сигнал свободен от влияния протонов твердой фазы исследуемого вещества.

Главное преимущество импульсного метода по сравнению со стационарным – устранение влияния неоднородности магнитного поля, благодаря чему возможно применение магнитов, значительно меньших, чем в стационарном методе. В то же время аппаратная реализация и техника измерения импульсных ЯМР влагомеров сложнее, чем у стационарных.

Переходя к оценке ЯМР метода в целом, следует отметить ряд его достоинств. К ним относится то, что метод позволяет измерять

непосредственно количество атомов водорода, как и нейтронный метод, но свободен от вредного биологического действия последнего. Кроме того, это высокая точность, широкий диапазон измерения влажности (до 100)%, слабое влияние химического и гранулометри-

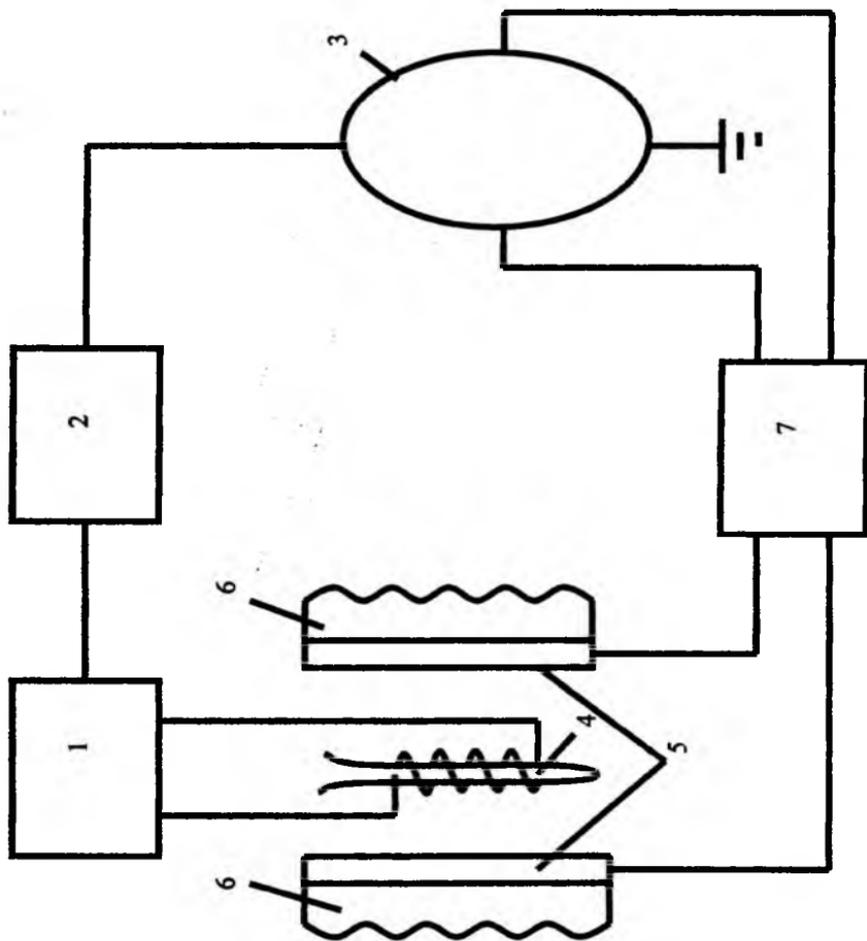


Рис.3.2.Схема простейшего ЯМР спектрометра.

ческого состава исследуемого материала, возможность автоматизации процесса измерения. Для научных исследований значительный интерес представляет возможность использования метода для оценки форм связи влаги с сухим веществом. Наконец, на базе ЯМР

метода были реализованы анализаторы двух параметров семян масличных культур -влажности и масличности.

Влагомеры ЯМР, как и другие влагомеры, основанные на современных физических методах, градуируют эмпирически. Однако в последнее время были разработаны и аттестованы стандартные образцы влажности для ЯМР анализаторов [3.9]. Эти образцы изготовлены на базе кварцевого песка и дистиллированной воды, причем ширина линии ЯМР протонов их влаги должна быть соизмерима с шириной линии натуральных образцов. Применение стандартных образцов может существенно упростить операции градуирования и поверки ЯМР влагомеров.

К недостаткам ЯМР влагомеров следует отнести, в первую очередь, сложность, громоздкость и высокую стоимость этих приборов, требующих также достаточно квалифицированного обслуживания. Определенным недостатком является малый объем (не больше нескольких см) исследуемого образца, что имеет особенно отрицательное значение для таких неоднородных материалов, как хлопковые.

Имеются некоторые данные о применении ЯМР метода для определения влажности целлюлозы хлопка-сырца в диапазоне 10-17 %, хлопкового волокна, хлопкового пуха. При этом следует отметить малую чувствительность измерения в области низких влагосодержаний при увеличении связи водорода с сухим веществом.

В целом, внедрению ЯМР влагомеров в хлопководство и в промышленность препятствуют, в первую очередь, сложность и высокая стоимость этих приборов.

Равновесные методы. Основаны на измерении влагосодержания чувствительного элемента, находящегося в гигро или гидротермическом равновесии с исследуемым веществом. Влагосодержание первичного преобразователя, содержащего влагочувствительный элемент, измеряют одним из известных электрических или неэлектрических физических методов.

В методе гигротермического равновесия между объектом измерения и чувствительным элементом осуществляется перенос влаги в виде водяного пара в газовую фазу (обычно через воздушную прослойку), статистическую характеристику гигротермического влагомера определяют сорбционные изотермы исследуемого материала и статические характеристики применяемого средства измерения воздуха (гигрометра). Динамическая характеристика влагомера зависит

от инерционности процесса массопереноса и инерционности гигрометра.

Важнейшим преимуществом этих приборов является замена прямого измерения параметров влажного материала измерением свойств вспомогательного вещества чувствительного элемента. Это позволяет освободиться от целого ряда погрешностей, связанных с составом (химическим и гранулометрическим) исследуемого материала, распределением влаги в нем, его плотностью и другими физическими свойствами. Измерение является бесконтактным и дает информацию об интегральной влажности материала.

К недостаткам метода следует отнести ограниченность диапазона измерения влажности. Как вытекает из самого принципа измерения, верхний предел этого диапазона соответствует максимальному гигроскопическому влагосодержанию материала (т.е. равновесной относительной влажности  $\varphi = 100\%$ ) по мере приближения к этому пределу чувствительность и точность влагомера ухудшаются. Сказанное выше о независимости результата измерения влажности от физических и химических параметров материала не распространяется на те параметры, которые влияют на сорбционные изотермы материала.

В частности, даже при применении безгистерезисного гигрометра, остается в силе составляющая суммарной погрешности, обусловленная сорбционным гистерезисом самого исследуемого материала, если не принимать особых мер (например, автоматической коррекции) неустранимой является также температурная погрешность. Наконец, даже при применении малоинерционного гигрометра время установления показаний гигрометрического влагомера остается достаточно большим из-за инерционности процессов влагопереноса.

В гидротермическом равновесном методе переноса воды из исследуемого материала в непосредственно контактирующий с ним чувствительный элемент происходит изменение агрегатного состояния влаги. Условием равновесия является равенство потенциалов массопереноса обоих соприкасающихся тел, кинетика переноса влаги определяется градиентом потенциалов.

Этот метод, как и гидротермический, устраняет влияние некоторых источников погрешностей, связанных с физическими и химическими свойствами исследуемого материала, при этом диапазон из-

мерения не ограничен максимальным гигроскопическим влагосодержанием. Оптимальным материалом чувствительного элемента является сам материал. Основным недостатком метода является значительная инерционность измерения, неустранима также погрешность от сорбционного гистерезиса.

Подведем теперь итоги по обзору неэлектрических прямых и косвенных методов измерения влажности. Критический анализ этих методов показывает, что ни один не удовлетворяет сумме требований, сформулированных в п.3.1. Традиционные прямые методы, обладающие достаточной точностью, непригодны для оперативного контроля в производственных условиях и для автоматизации измерений. Приборы, основанные на этих методах, совершенно неудовлетворительны с точки зрения быстродействия и их нельзя использовать в автоматизированных системах контроля и управления.

От последних недостатков свободны влагомеры, в основу действия, которых положены современные физические методы, однако эти приборы в применении к хлопку-сырцу и хлопковым материалам либо не обладают необходимыми метрологическими и эксплуатационными характеристиками, либо их сложность и высокая стоимость являются серьезными препятствиями к широкому применению.

Таким образом, ни один из рассмотренных методов не может служить базой для унифицированной системы средств контроля влажности в хлопководстве, хлопкоочистительной и хлопкоперерабатывающей промышленности.

Инфракрасные методы (ИК) являются одной из разновидностей спектроскопических методов, применяемых для измерения влажности веществ во всех агрегатных состояниях - газообразных, жидких и твердых. Физическая основа этих методов - избирательное поглощение ИК-излучения определенной длины волны при прохождении через влагосодержащее вещество; для твердых материалов используется также принцип отражения ИК-лучей. ИК-влагометрию можно рассматривать как раздел спектроскопии, изучающей колебательные и вращательные спектры молекул.

Влагометрия использует ближнюю ИК-область спектра, содержащую интенсивные полосы поглощения воды с центрами при длинах волн, близких к 0,94; 1,18; 1,45; 1,93; 2,97; 3,2; и 6,3 мкм. В ИК-влагомерах для твердых материалов и жидкостей предпочтение отдают коротковолновой части этого диапазона с длинами волн  $0,8 \leq \lambda \leq 0,3$  мкм; чаще всего используется достаточно интенсивные

полосы 2,97; 1,93; 1,45 мкм. Выбор этих полос обусловлен возможностью применения стеклянных кювет, простых источников ИК-лучей (лампы накаливания) и простых чувствительных детекторов излучения (фоторезисторы, фотодиоды).

Поглощение отдельной линии (монохроматического излучения) с длиной волны  $\lambda$  многокомпонентной средой описывается законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$J_{\lambda} = J_{0\lambda} \exp \left\{ - \left( \sum_{i=1}^n K_{\lambda_i} + K_p \right) l \right\} \quad (3.3)$$

где  $J_{0\lambda}$ ,  $J_{\lambda}$  - интенсивности падающего на среду и прошедшего через нее излучения;

$K_{\lambda_i}$  - коэффициент поглощения  $i$ -го компонента среды при длине волны  $\lambda_i$ ;

$C_i$  - массовая концентрация  $i$ -го компонента;

$K_p$  - коэффициент рассеяния при длине волны  $\lambda$ ;

$l$  - массовая толщина (произведение толщины на плотность исследуемой среды).

Выходным сигналом влагомера абсорбционного типа может служить оптическая плотность  $D = Lg(J_0/J)$  исследуемой среды.

По ряду причин, связанных с одной стороны со свойствами молекул воды, с другой стороны - с применяемой аппаратурой, уравнение (3.3) не выполняется строго при анализе реальных водосодержащих систем и ИК-влагомеры приходится градуировать эмпирически.

ИК-метод реализуется в одно и двухволновых влагомерах. В приборах первого типа (преимущественно лабораторных) определяют оптические плотности исследуемого материала и внутреннего эталона (незаполненная кювета, обезвоженный материал) на одной длине волны, соответствующей выбранной полосе поглощения жидкой воды.

Более распространенные двухволновые влагомеры имеют двухканальную измерительную схему, в которой сравнивается ослабление (или отражательная способность) объекта измерения при двух длинах волн - аналитической  $\lambda_{ан}$  и эталонной  $\lambda_{эт}$ . При этом  $\lambda_{ан}$  соответствует характеристическому поглощению волн, а  $\lambda_{эт}$  - должна быть близкой к  $\lambda_{ан}$ , но находиться в области минимального поглощения воды. Такой выбор  $\lambda_{ан}$  и  $\lambda_{эт}$  обеспечивает независимость результата измерения, например, от мутности или рассеяния жидкости, состояния кюветы, окраски материала (при работе по диффузному отражению).

Для достижения инвариантности результатов измерения влажности по отношению к другим влияющим параметрам исследуемого материала в последние годы были разработаны трехволновые ИК-влажномеры [3.10], в которых используется дополнительная, "корректирующая" длина волны (например,  $\lambda_{ан} = 1,93$  мкм,  $\lambda_{эт} = 1,76$  мкм и  $\lambda_{кор} = 1,6$  мкм).

Такой принцип измерения позволяет компенсировать погрешности, связанные с химическим составом материала, его массовой толщиной.

Наиболее существенным недостатком рассматриваемого метода является то, что анализируется влажность только тонкого приповерхностного слоя материала, которая плохо характеризует интегральную влажность материала, особенно хлопка-сырца и других хлопковых материалов, неоднородных по влажности. Кроме того, и состояние контролируемой поверхности сильно зависит от неоднородности структуры хлопка-сырца, например, содержания в нем семян.

В термовакуумном методе измерения влажности [3.9] контролируемый образец материала в виде тонкого слоя помещают в камеру, из которой затем откачивают воздух. В результате поглощения энергии на десорбцию (испарению) влаги, температура образца начинает понижаться. Одновременно возникает конвективный поток тепла от стенок камеры к поверхности материала. По мере испарения влаги скорость испарения уменьшается и энергия, получаемая образцом в результате конвективного теплообмена, станет больше, идущей на десорбцию. Изменение температуры пробы будет:

$$\Theta = T_c - T_m$$

где  $T_c$  - температура окружающей среды;

$T_m$  - температура контролируемого материала.

Зависимость  $\Theta$  от времени  $t$  будет обладать экстремумом, значение которого однозначно (а в случае малых влажностей и линейно) зависит от влажности. В качестве примера на рис. 3.3 приведены полученные нами экспериментальные характеристики  $\Theta(t)$  для хлопковых семян.

Сказанное выше справедливо при условии, что температура стенок камеры постоянна и равна температуре образца, а влажность не превышает критической, при которой поверхность образца ведет себя подобно свободной поверхности воды, у которой скорость испарения зависит от влажности.

Основными источниками методических погрешностей являются влияние температурного напора, т.е. разности температур стенки камеры и образца в момент начала вакуумирования, толщины слоя и плотность образца, степени его измельчения (дисперсности образца).

Начальная разность температур образца и стенок камеры может быть вызвана нагревом материала, например, в процессе сушки или повышением температуры при его измельчении. Для минимизации погрешности, связанной с этим фактором, необходимо поддерживать температуру стенок камеры равной температуре материала.

Кроме того, всем теплофизическим влагомерам присущи большая инерционность и (у влагомеров дискретного действия) невозможность контроля достаточно больших образцов материала.

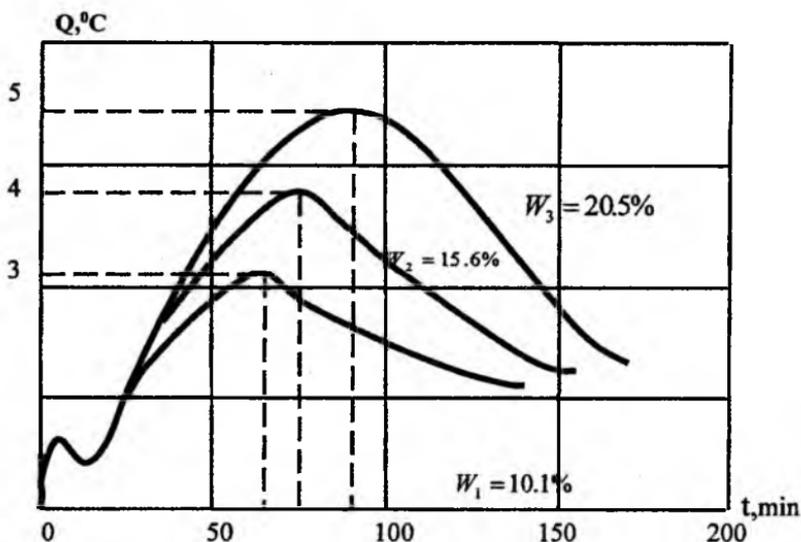


Рис.3.3. Характеристика  $\Theta(t)$  для хлопковых семян.  
 $W_1, W_2, W_3$ —значение влажности хлопковых семян.

В целом тепловые и инфракрасные влагомеры не могут рассчитываться на широкое применение в процессах выращивания, заготовки и переработки хлопка-сырца. Как и другие неэлектрические косвенные методы измерения влажности, описанные в п.3.3, эти методы не могут служить базой унифицированной системы контроля влажности.

## ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

### *4.1. Основные положения. Кондуктометрические методы измерения влажности хлопка*

Электрические методы влагометрии основаны на зависимости электрических свойств веществ и материалов от их влажности. Начиная с 30-х годов, эти методы получили широкое распространение во многих отраслях народного хозяйства и научных исследованиях благодаря своим достоинствам. Важнейшим из них является реализация этих методов с помощью относительно простотой аппаратуры, высокое быстродействие и оперативный контроль производственных процессов, удобные для дальнейших преобразований выходные сигналы, несложность эксплуатации.

Существуют два метода измерения влажности - кондуктометрический и диэлькометрический. В первом используется принцип преобразования влажности твердых и жидких веществ в электрическое сопротивление [проводимость]. Диэлькометрический метод основан на зависимости от влажности диэлектрических свойств вещества: комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*$ , ее составляющих - вещественной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$ , тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = \epsilon'' / \epsilon'$ .

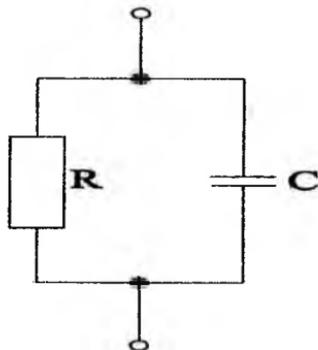
В кондуктометрических влагомерах измерение проводимости осуществляется в цепи постоянного тока, на промышленной или низкой звуковой частоте. Диэлькометрические влагомеры работают в диапазоне высоких частот -  $5 \times 10^3$  до  $5 \times 10^7$  Гц. Разновидностью диэлькометрических приборов являются влагомеры СВЧ, работающие в диапазоне сантиметровых (реже - дециметровых или миллиметровых) радио- волн.

Физические свойства влагосодержащих материалов, на которых основаны электрические методы измерения влажности, находятся в тесной связи друг с другом. Измерения проводимости на постоянном токе бесспорно относятся к кондуктометрическим, но при измерениях в переменном электрическом поле вопрос усложняется.

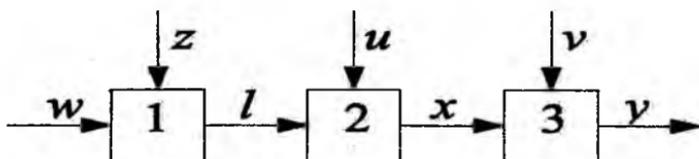
Если принять для первичного преобразователя с влажным материалом простейшую двухэлементную схему (рис. 4.1), состоящую из параллельно включенных идеальных емкости  $C$  и активного сопротивления  $K$ , то в цепи переменного тока с круговой частотой -  $\omega$

- полное сопротивление преобразователя будет (где  $T=RC$  - постоянная времени):

$$Z = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega C}$$



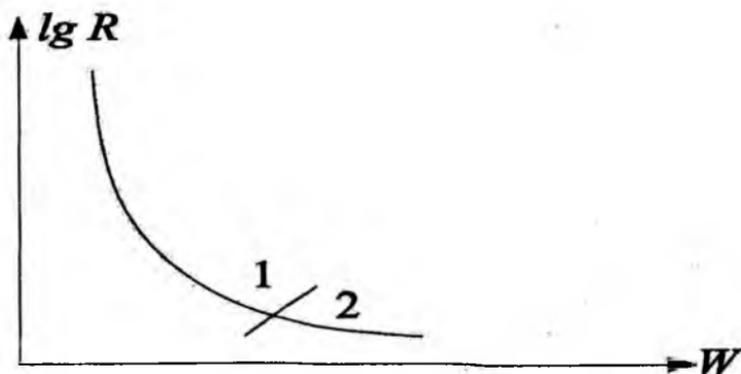
**Рис. 4.1. Схема замещения первичного преобразователя в цепи переменного тока**



**Рис. 4.2. Обобщённая структурная схема электровлагомера**

Активная проводимость преобладает над емкостной, если  $\omega T \ll 1$ , т.е.  $RC \ll 1/\omega$ ; условием превалирования реактивной (емкостной) проводимости является  $\omega T \gg 1$ , а переходу из первой области во вторую соответствует условие  $\omega T = 1$ , т.е.  $RC = 1/\omega$ .

Так как для рассматриваемой цепи  $\text{tg} \delta = 1/\omega RC = 1/\omega T$  и его значение изменяется (увеличивается) в широких пределах при увлажнении материала, то в зависимости от угловой частоты  $\omega$  и удельных электрических характеристик материала, в выходном сигнале первичного преобразователя может превалировать одна или другая составляющая проводимости.



**Рис. 4.3. Зависимость сопротивления капиллярно-пористого материала от влажности**

Важнейшая задача теории электрических методов измерения влажности – это построение адекватной модели электровлажмера, позволяющей получить достаточно точное математическое описание его функции преобразования и функций влияния основных мешающих величин. Для этой цели удобно использовать предложенную структурную схему влагомера, основанного на физическом методе измерения (рис.4.2). Влагометрическая система описывается последовательным соединением трех звеньев.

Звено 1 соответствует преобразованию измеряемой величины – влажности  $W$  в физическую (в нашем случае электрическую) величину  $l$ , т.е. описывает зависимость используемых в данном методе электрических свойств материала от его влажности. Звено 2 – это первичный измерительный преобразователь (датчик) влагомера, преобразующий величину  $u$  в выходной сигнал  $X$  (сопротивление, емкость, комплексное сопротивление или одна из составляющих), удобный для дальнейшей обработки. Последнее звено 3 описывает измерительный преобразователь (измерительное устройство), на выходе которого получают аналоговый или цифровой выходной сигнал влагомера.

Зная функции преобразования (статические и динамические) всех трех звеньев, можно получить функцию преобразования всего влагомера. Для описания функций влияния неинформативных параметров необходимо рассмотреть помехи, воздействующие на звенья

1-3. На звено 1 могут воздействовать температура, плотность, химический состав и другие величины, характеризующие состояние и свойства исследуемого вещества (величина Z) на звено 2 - форма, масса материала, частота электрического тока и т.д. (величина U); на звено 3 - внешние величины V, влияющие на характеристики измерительного устройства. В общем случае следует рассматривать отклонения, Z, U, V от номинальных значений как векторные величины, имеющие несколько координат.

Зависимость сопротивления материала от его влажности, характеризующая звено 1 схемы, представленной на рис. 4.2, была исследована многими авторами. Она имеет наиболее простой характер при преобладании омической проводимости, т.е. на постоянном токе и при частотах до низких звуковых включительно.

Для большинства капиллярно-пористых материалов ее можно в общем виде описать степенной функцией:

$$R = A W^{-n} \quad (4.1)$$

где A, n - постоянные, характерные для данного материала, но зависящие также от его параметров (сорт, температура, распределение влаги и т.д.) и условий измерения.

Типичный график зависимости (4.1), построенный в полулогарифмических координатах, показан на рис. 4.3. На этом графике можно выделить два характерных участка. Начальный участок 1 аппроксимируется прямой

$$\text{Ln}R = a - bW,$$

где a, b - постоянные, зависящие от исследуемого материала и условий измерения.

Для области низкой и средней влажности характерна весьма высокая чувствительность к изменениям влажности, превалирующей на рядом влияющих величин, например, формой и размерами электродов первичного преобразователя.

На участке 2, соответствующем повышенной влажности, зависимость  $\lg R(W)$  асимптотически приближается к прямой, параллельной оси W. Чувствительность  $dR/dW$  существенно уменьшается с ростом W, и на результат измерения оказывают большее влияние уже не влажность, а такие факторы, как температура материала, его химический состав и т.д.

Сказанное выше в полной мере относится и к хлопку, и к хлопковым материалам. Так, для хлопка-сырца при его плотности 0,2

г/см<sup>3</sup> и температуре 20 °С в диапазоне влажности  $6 \leq W \leq 25\%$  зависимость удельного сопротивления от влажности описывается уравнением [2.4]

$$\lg \rho = 2,1 + 2,1/\sqrt{W}$$

К достоинствам кондуктометрического метода следует отнести высокую чувствительность в области низких влагосодержаний, к его недостаткам - уменьшение чувствительности с ростом влажности. Однако для полной оценки кондуктометрического метода необходимо рассмотреть функции влияния, слагающих вектора  $Z$  (рис.4.2).

При кондуктометрических измерениях влажности хлопка и хлопковых материалов важнейшими влияющими величинами являются: температура, плотность материала, неравномерность распределения влаги между компонентами хлопка по его объему, поляризация на границе электрод - материал и концентрация электролитов.

Повышение температуры вызывает понижение сопротивления, обусловленное увеличением подвижности носителей тока. Уменьшение удельного сопротивления  $\Delta \rho$  при повышении температуры на  $\Delta t$  равно:

$$\Delta \rho = -\alpha \rho \Delta t$$

где  $\alpha$ -температурный коэффициент сопротивления данного материала.

Значение  $\alpha$  зависит от влажности, в частности, при возрастании влажности и замедлении роста проводимости повышается величина температурной поправки  $\Delta W$ , которую необходимо вводить в результат измерения влажности.

В [2.4] величина этой поправки выражена следующим образом:

$$\Delta W = 0,018(t_0 - t)W^{0,89}$$

где  $t_0$  - температура градуировки.

Если известны значения поправок  $\Delta W$  для исследуемого материала, то при наличии датчика температуры материала компенсация температурной погрешности представляет собой сравнительно простую задачу.

Это же можно сказать о влиянии степени уплотнения хлопко-сырца и хлопковых материалов. Приведенные на рис.4.4 зависимости сопротивления  $R$  хлопко-сырца при различных значениях влажности от его плотности показывают, что при малых уплотнениях имеется линейная зависимость проводимости от  $d$ :

$$1/R = A + Bd$$

где  $A, B$  - постоянные, зависящие для данного материала от его влажности.

С ростом влажности возникает область насыщения, где дальнейшее увеличение ее уже не оказывает влияния на проводимость. Если обозначить значение плотности, соответствующее началу этой области, через  $v$ , то для устранения погрешности от влияния плотности достаточно обеспечить в процессе измерения выполнение условия  $d > d_0$ .

При измерениях влажности хлопка-сырца любым методом отрицательное влияние оказывает неоднородность его состава структуры и неравномерность распределения влаги в объеме материала. Как отмечалось выше, хлопок представляет собой гетерогенную систему из четырех компонентов (волокно, семена, воздух, влага), которые существенно различны по своим физическим и электрическим свойствам. Семена в хлопке-сырце не контактируют между собой даже при значительном уплотнении, и проводимость хлопка-сырца зависит, главным образом от проводимости волокна. Наличие у хлопкового волокна поверхностного жировоскового защитного слоя, плохо проводящего электрический ток, повышает роль поверхностной проводимости волокна. Таким образом, даже в статическом состоянии влажности имеет место неравномерность распределения влаги между волокном, а также между поверхностной и объемной (внутренней) влагой этих компонентов.

На первый фактор оказывает влияние соотношение масс волокна и семян, зависящее от селекционной разновидности хлопка-сырца и его сорта. Распределение влаги между поверхностью и объемом определяется динамикой процессов сорбции и десорбции при сушке или увлажнении хлопка.

В этих процессах достижение установившегося распределения влаги требует значительного времени (18-24 ч и больше), и измерение проводимости на постоянном токе может повлечь за собой абсолютную погрешность (от "перераспределения влаги") определения влажности, исчисляемую одним или даже несколькими процентами, в зависимости от интервала времени, истекшего от завершения сушки или увлажнения.

Указанные факторы представляют собой при кондуктометрических измерениях неустраняемые помехи; оценка погрешностей, вызванных этими помехами, и их компенсация в процессе измерения невозможны. В несколько меньшей степени это распространяется и

на кондуктометрические измерения влажности отдельных компонентов хлопка-сырца - волокна и хлопковых семян, а также продуктов переработки семян мятки, мезги, шрота, жмыха и т.д. Так, например, у семян хлопчатника распределение влаги между оболочкой и ядром зависит от времени между увлажнением (или сушкой) и измерением, а на поверхностную проводимость семян сильно влияет их опушенность.

Из других влияющих факторов отметим содержание электролитов, от чего сильно зависит проводимость влажного хлопка, особенно при измерениях на постоянном токе. Обычная вода содержит растворимые соли натрия, кальция, магния и других элементов, а также углекислый газ. Вода в хлопковом волокне имеет большую электропроводимость, вследствие диссоциации электролитов и органических кислот, содержащихся в волокне. При промывке хлопка дистиллированной водой или увлажнении дождевой водой его проводимость существенно уменьшается. В реальных условиях приходится считаться с переменным содержанием электролитов в хлопке и хлопковых материалах, вызывающим неустранимую погрешность кондуктометрических влагомеров. В несколько меньшей степени влияют и другие изменения химического состава хлопка и хлопковых материалов.

Наконец, определенную роль играют процессы на границе электрод - материал. Образование на этой границе двойного электрического слоя влечет за собой поляризацию - возникновение разности потенциалов между электродом и материалом, направленную навстречу приложенному напряжению и вызывающую убывание силы тока электрической цепи во времени. Абсорбционный ток через кондуктометрический первичный преобразователь спадает во времени, асимптотически приближаясь к току сквозной проводимости. Процесс установления силы тока имеет длительность в несколько минут, а иногда и десятков минут, и результат измерения влажности зависит от момента отсчета.

Электрохимические процессы на границе электрод - материал зависят также от величины, формы и частоты приложенного напряжения, от влажности и химического состава материала. В практике приходится считаться и с возможностью загрязнения рабочей поверхности электродов, в частности, из-за налипания на электроды таких продуктов переработки хлопка, как шрот и мятка.

Рассмотрим схему замещения кондуктометрического первичного преобразователя постоянного тока (рис.4.5), на которой приняты следующие обозначения:  $r_n$ -переходное сопротивление электрод - материал;  $-r_{vi}$ ,  $r_{si}$  -объемное и поверхностное сопротивление  $i$ -го компонента (на схеме условно показаны два компонента - волокно и семена);  $-r_k$  контактное сопротивление между волокнами и семенами;  $C$  - емкость, обусловленная электрохимическими процессами. Суммируя сказанное выше, можно заметить, что один из элементов этой схемы не является однозначной функцией влажности материала; все элементы в большей или меньшей степени зависят от влияющих величин, информация о которых в процессе измерения отсутствует. Отсюда очевиден вывод о невозможности достижения удовлетворительной точности измерения влажности хлопка и хлопковых материалов кондуктометрическим методом.

Влияние ряда мешающих величин можно ослабить, измеряя сопротивление первичного преобразователя с хлопком на переменном токе. В первую очередь, это относится к поляризации электродов. С увеличением частоты тока уменьшается величина заряда на границах раздела электродов и материала и минимизируется погрешность, обусловленная электрохимическими процессами, возникающими в системе электрод - материал при протекании через нее постоянного тока. При промышленной частоте поляризации электродов сохраняется, хотя и в значительно меньшей степени, чем на постоянном токе, но при переходе к частотам 0,1 - 30 МГц погрешностью от поляризации можно пренебречь.

В. М. Казанским [2.5] было доказано экспериментальным путем, что для хлопка-сырца переход к диапазону высоких частот, особенно к частотам до 1000 МГц, позволяет уменьшить, (по сравнению с измерениями на постоянном токе) и другие погрешности: от неравномерного распределения влаги после увлажнения, подсушки и от концентрации электролитов.

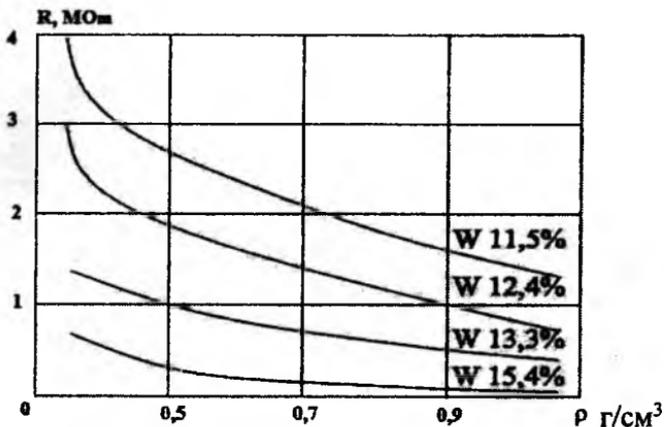


Рис. 4.4. Зависимость сопротивления хлопка-сырца от его плотности

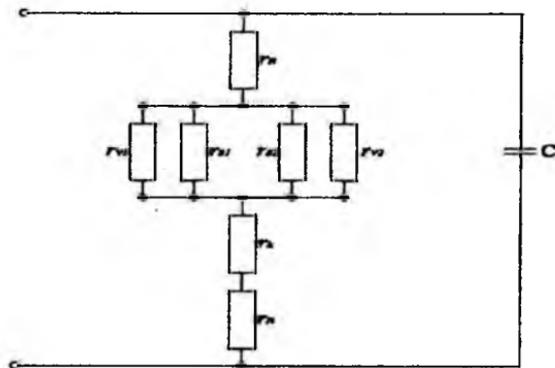


Рис. 4.5. Схема замещения кондуктометрического датчика постоянного тока

Однако сохраняется общий характер зависимости полного сопротивления  $Z$  первичного преобразователя от влажности  $W$ :

$$Z = Z_0 + KW^{-n}$$

где  $Z_0$  - начальное сопротивление для сухого материала;  
 $K, n$  - постоянные.

С этим связано, в частности, существенное ухудшение метрологических характеристик кондуктометрического влагомера в диапазоне высокой влажности, сохраняющееся и при измерениях на переменном токе. Необходимо помнить, что с повышением частоты

тока все больше превалирует реактивная (емкостная) составляющая полного сопротивления датчика.

Первые попытки применения кондуктометрических влагомеров к хлопку-сырцу были предприняты в "Пахта саноат илмий маркази" (бывшем ЦНИИХПроме) еще в конце тридцатых годов. Испытаниям подвергались влагомеры для зерна Г.Б. Пузрина (типов ВП-4, ВП-6 и ВЭ-2), в которых постоянная навеска (масса 7-8 г) материала подвергается сжатию с помощью ручного пресса в постоянном объеме и ее сопротивление измеряется при постоянном токе. Испытания дали отрицательные результаты, но в последующие годы в "ЦНИИХПроме" и ФТИ АН РУз разрабатывались модификации кондуктометрических влагомеров для хлопка, в которых был предусмотрен ряд усовершенствований: увеличение массы исследуемого образца (во влагомере ФТИ - до 1кг), измерение температуры хлопка с целью ведения температурной поправки в результат измерения влажности, градуировка шкалы в единицах влажности и т.д. Однако эти усовершенствования не способствовали повышению точности измерения.

В зарубежных странах также были разработаны и выпускались кондуктометрические влагомеры для хлопка-сырца, хлопкового волокна и семени. В качестве примера можно назвать венгерский прибор типа 4-02-16 и влагомер типа АМ-1000 (США). Последний прибор рассчитан на массу хлопка-сырца 100г; образец уплотняется в первичном преобразователе до фиксированного значения давления. Испытания этих приборов, проведенные в ЦНИИХПроме, показали наличие больших погрешностей измерения. Так, у влагомера АМ-1000, наряду с погрешностью градуировки шкалы, были выявлены абсолютные погрешности (около + 2%) относительно исправленной градуировки.

В последние годы были разработаны кондуктометрические влагомеры с усовершенствованными первичными и вторичными измерительными преобразователями. Например, для непрерывного контроля влажности сыпучих материалов в потоке был предложен датчик со щечковым питателем, подающим материал в цилиндрическую измерительную камеру, внутренняя поверхность которой несет кольцевые электроды. Вторым, внутренним электродом служит металлический стержень, закрепленный в торце щека. Благодаря коаксиальному расположению электродов, ток между ними протекает в радиальном направлении, что позволяет получать информацию об интегральной влажности материала.

Рассмотренные выше недостатки кондуктометрических влагомеров, в первую очередь - большие неустранимые погрешности, привели к тому, что влагомеры этого типа практически не применяются для хлопка и хлопковых материалов. В последние два десятилетия их место заняли влагомеры, основанные на других физических методах, главным образом диэлькометрические.

#### ***4.2. Теоретические основы диэлькометрического метода измерения влажности***

Диэлькометрический метод измерения влажности основан на зависимости диэлектрических параметров материала и связанных с ними электрических величин от его влажности. Для измерений чаще всего используют средневолновый и коротковолновый диапазоны ( $f = 0,3 \div 0,5$  до 30 - 50 МГц) высоких частот. В указанном диапазоне первичные емкостные преобразователи диэлькометрических влагомеров можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами.

Диэлектрические свойства любого влажного материала описываются теми же величинами, что и диэлектрические свойства воды (см.2.1): комплексной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ ; ее вещественной и мнимой составляющими  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ , тангенсом угла потерь  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ ; комплексной проводимостью  $\sigma^* = \sigma' + j\sigma''$ . Если придерживаться методики, рассмотренной в 4.1, теория диэлькометрической влагометрии должна дать аналитическое описание функций преобразования и основных функций влияния трех звеньев обобщенной схемы влагомера (рис.4.2).

Описание первого звена, т.е. преобразования влажности в диэлектрические свойства, особенно сложно применительно к естественным влагосодержащим материалам, в частности к материалам растительного происхождения, к которым принадлежат хлопок-сырец и хлопковые материалы.

Такие сложные многокомпонентные и неоднородные материалы относятся к классу гетерогенных систем и при описании их электрических свойств, наряду с методами современной физики диэлектриков, приходится учитывать и особенности гетерогенных смесей [4.1, 4.2,4.3].

В переменном электрическом поле основным процессом, определяющим свойства реального диэлектрика, является поляризация.

В хлопке и хлопковых материалах наблюдаются почти все известные виды поляризации [4.4]:

а) электронная поляризация атомов - упругое смещение электронных орбит относительно ядер атомов со временем установления  $\tau = 10^{-15} \div 10^{-14}$  с;

б) ионная поляризация, определяемая смещением упруго связанных ионов с  $\tau = 10^{-13} \div 10^{-12}$  с;

в) дипольно-релаксационная поляризация, вызываемая ориентацией дипольных молекул под действием поля. Повороты молекул требуют преодоления сопротивления, и данный вид поляризации сопровождается рассеянием энергии. В целлюлозе в указанном процессе участвуют, как вся ее молекула, так и ее отдельные части, причем наибольший вклад вносят гидроксильные ОН-группы и комбинированные диполи, состоящие из групп ОН и  $H_2O$ . Время установления дипольной поляризации -  $10^{-13} \div 10^{-7}$  с;

г) электрическая поляризация, т.е. перемещение диссоциированных ионов под воздействием электрического поля, наблюдаемое с постоянной времени  $10^{-4} \div 10^{-2}$  с на постоянном токе и при звуковых частотах.

д) структурная, внутрислойная или высоковольтная поляризация, характерная для материалов с неоднородной структурой, проводящими (или полупроводящими) фазами или включениями. Этот вид поляризации, связанный с перемещениями носителей зарядов в проводящих водных включениях, вызывает значительное рассеяние электрической энергии.

Результирующая поляризация определяется суммой всех имеющих в данном материале видов поляризации, причем в зависимости от особенностей материала различные виды поляризации имеют больший или меньший вес. У хлопка и хлопковых материалов доминирующее значение имеют инерционные виды поляризации: дипольно-релаксационная и структурная. Наличие в реальном диэлектрике нескольких времен релаксации соответствует различным релаксаторам - атомам, молекулам, включениям, неоднородностям и т.д. В общем виде сложный диэлектрик в электрическом поле можно описать схемой замещения (рис.4.6), которая содержит емкость между электродами в вакууме и сумму емкостей, соответствующих видам поляризации.

Последние (кроме емкости электронной поляризации) имеют в схеме замещения последовательные сопротивления, учитывающие

потери энергии за счет видов поляризации. Кроме того, в схеме предусмотрено активное сопротивление, характеризующее сквозной ток проводимости между электродами.

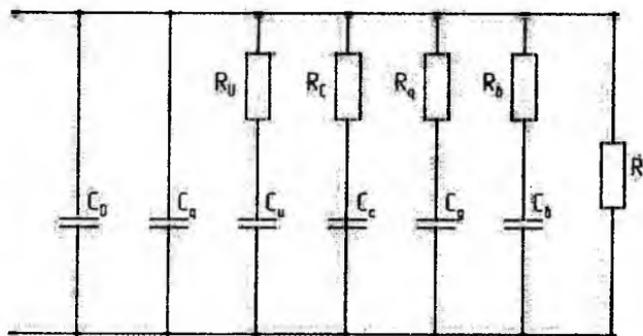


Рис. 4.6. Схема замещения сложного поляризованного диэлектрика.  $C_0$  - емкость в вакууме,  $C_q$  - емкость электронной поляризации,  $C_u$  - емкость ионной поляризации,  $C_c$  - емкость структурной поляризации,  $C_g$  - емкость дипольной поляризации,  $R_u, R_c, R_q, R_d$  - эквивалентные сопротивления потерь при видах поляризации,  $R$  - сопротивления сквозному току.

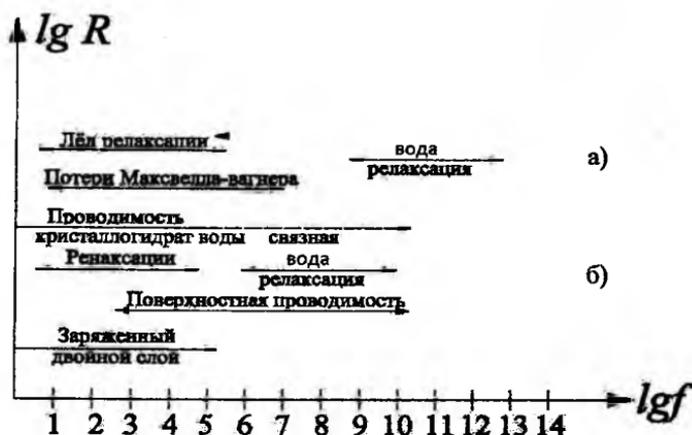


Рис. 4.7. Диаграмма диэлектрических потерь в гетерогенных системах, содержащих влагу.

а - отсутствие поверхностных эффектов, б - потери, вызванные поверхностными эффектами, -- - продолжение для воды, содержащей ионы

Из схемы замещения, показанной на рис. 4.7, вытекают две важнейшие особенности преобразования влажности в выходной сигнал диэлькометрического первичного преобразователя влажности:

а) этот сигнал всегда имеет комплексный характер, или, другими словами, полное сопротивление первичного измерительного преобразователя с материалом является комплексной величиной. Реактивная (емкостная) составляющая этого сопротивления связана с диэлектрической проницаемостью, активная составляющая - с диэлектрическими потерями;

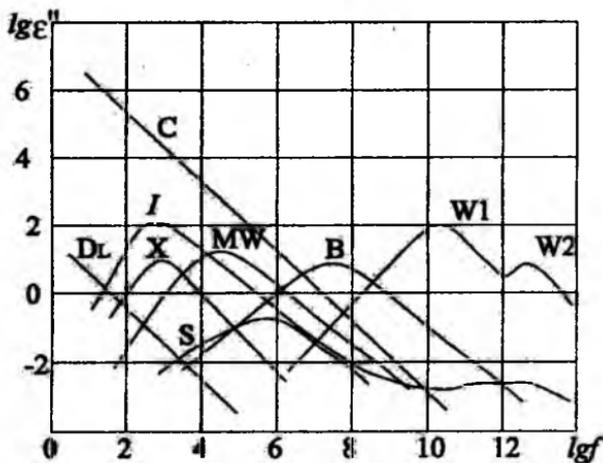
б) диэлектрические параметры влажного материала должны зависеть от частоты поля. Это объясняется зависимостью различных видов поляризации от частоты  $\omega$ . Так, структурная (внутрислоевая) поляризация проявляется, в основном, на низких частотах, однако при наличии микронеоднородностей в компонентах может возникать и на более высоких частотах. Увеличение поляризуемости материала влечет за собой увеличение его диэлектрической проницаемости. С ростом частоты можно ожидать уменьшения суммарной поляризации вследствие инерционности и других эффектов. Этому будет соответствовать уменьшение  $\epsilon'$  при одновременном увеличении  $\epsilon''$  из-за усиления хаотического теплового движения, существующего в любом веществе.

У гетерогенных влагосодержащих систем влияние частоты на диэлектрические характеристики усугубляется рядом факторов. Частотные характеристики диэлектрических свойств гетерогенной смеси (как и их температурные характеристики) сильно отличаются от характеристик отдельных компонентов. Вследствие взаимодействия между дисперсионной средой и дисперсной фазой область дисперсии расширяется, и явление релаксации может иметь место не при одной частоте, а в широком участке спектра частот; иногда наблюдается несколько максимумов  $\epsilon''$ . Важное значение приобретает влияние двойного поляризованного слоя частиц на поверхности раздела компонентов системы, приводящее к тому, что гетерогенная смесь (особенно в области низких частот) может иметь диэлектрическую проницаемость, превышающую любого компонента, в том числе и воды. Вторым фактором является влияние проводящих частиц или включений, причем определенную роль играет и форма частиц. Наконец, в рассматриваемых системах существенное значение имеет форма и вид связи с сухим веществом.

В работе [4.2] подытожены различные механизмы, вызывающие потери в гетерогенных системах в широком спектре частот (рис.4.7). Здесь можно выделить две существенно различающиеся друг от друга области. В области низких частот потери обусловлены наложением ряда эффектов, разделение которых весьма затруднительно. В диапазоне СВЧ картина упрощается: основным видом потерь становятся релаксационные, обусловленные медленно устанавливающимися видами поляризации. Это, в частности, объясняет минимизацию при измерениях на СВЧ погрешностей, связанных с наличием электролитов (солей, кислот) в воде, по сравнению с измерениями при более низких частотах, в том числе в ВЧ диапазоне.

Более детальная расшифровка суммы вкладов различных эффектов в диэлектрические потери ( $\epsilon''$ ) гетерогенной влагосодержащей системы дана на рис. 4.8 [2.3]. Релаксации (два времени релаксации) свободной воды являются доминирующими факторами в диапазоне СВЧ, в то время, как ионная проводимость (при наиболее низких частотах, усиленная эффектом двойного электрического слоя) - играет такую же роль в диапазоне более низких частот. Релаксация льда и кристаллогидратной воды, а также потери Максвелла-Вагнера имеют значение в диапазоне килогерцев, а поверхностная проводимость и релаксация связанной воды вносят свой вклад в широком диапазоне частот.

Хлопок-сырец представляет собой гетерогенную систему, отличающуюся высокой степенью неоднородности строения. Суммарная поляризация в хлопке имеет весьма широкий, практически непрерывный спектр времени установления различных видов поляризаций. Если даже исходить из упрощенной модели хлопка-сырца, как трехфазная система, состоящая из клетчатки, влаги и воздуха, то диэлектрические свойства этих компонентов существенно различны. Воду можно рассматривать как включение в непроводящую и нерелаксирующую среду (сухая целлюлоза и воздух). При этом влага образует как крупные включения (планки на поверхности волокон, жидкая вода в крупных порах и в местах контакта между волокнами), так и мелкие (влага в мелких порах волокон и семян, в пространствах между фибриллами и мисцеллами).



**Рис. 4.8.** Схема различных вкладов в виде диэлектрических потерь ( $\epsilon''$ ) гетерогенных систем. С - проводимость (ионная), DL - заряженные двойные слои, X - релаксация кристаллогидратной воды, J - релаксация льда, MW - эффект Максвелла-Вагнера, S - поверхностная проводимость, B - релаксация свободной воды, W1 - основная релаксация свободной воды, W2 - 2-я релаксация свободной воды.

С повышением влажности влага распределяется не в виде отдельных разрозненных включений, а в форме сплошных пленок, мостиков и т.п. Это обуславливает широкий, практически непрерывный спектр времен релаксации, охватывающий диапазон от  $10^{-8}$  до  $10^{-3}$  с [2.5]. Структурная анизотропия проявляется также во влиянии расположения волокон и хлопка. Волокна, уплотненные в относительно большом объеме, можно рассматривать как систему с хаотическим распределением волокон между положениями - параллельно и перпендикулярно направлению поля.

Аналогичными гетерогенными системами являются и отдельные компоненты хлопка-сырца, в частности - хлопковые семена. Особенности этих систем - неоднородности состава и структуры, а также различные формы связи влаги были описаны в гл. 1 и 2, а также в работе [4.5].

Рассмотренные выше особенности гетерогенных водосодержащих систем необходимо принимать во внимание при построении и

оценке математических моделей диэлектрических свойств этих систем: эти особенности делают задачу построения адекватных моделей весьма сложной.

Физика диэлектриков описывает процесс поляризации, линейно связанный с напряженностью приложенного электрического поля, выражениями [4.4]:

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{F(\tau) d\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4.2)$$

$$\epsilon'' = (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \int_0^{\infty} \frac{F(\tau) \omega \tau d\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4.3)$$

где  $\tau$  - время релаксации данного процесса;

$F(\tau)$  - функция распределения  $\tau$ ;

$\tau$  - минимальная постоянная времени для данной системы.

Закон распределения  $\tau$  может быть весьма сложным: сравнительно простые результаты получают, принимая нормальное распределение. Если принять  $F(\tau) = 1$ , выражения (4.2) и (4.3) переходят в уравнение Дебая.

Влияние температуры на  $\tau$  описывается экспоненциальной зависимостью

$$\tau = \tau_0 e^{Q/RT} \quad (4.4)$$

где  $Q$  - энергия активации;

$R$  - газовая постоянная;

$T$  - термодинамическая температура.

Статическая и оптическая диэлектрические проницаемости  $\epsilon_s$  и  $\epsilon_{\infty}$  также являются функциями температуры, которые в совокупности с (4.4) определяют зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  от температуры.

На основании (4.2) и (4.3) можно сделать некоторые выводы о значении времени релаксации  $\tau$ , а также обратной величины - частоты релаксации ( $\omega = 1/\tau$ ) для влагометрии.

Первый вывод сводится к тому, что частота релаксации при измерениях влажности может служить информативным параметром, непосредственно характеризующим значение влажности. Второй - связанный с наличием максимума диэлектрических потерь при частоте релаксации - это целесообразность измерения именно вблизи этой частоты, т.е. вблизи максимума чувствительности  $d\epsilon''/dW$ .

В качестве базы математических моделей  $\epsilon$  влагосодержащих материалов можно рассматривать "диэлектрические формулы смесей", т.е. формулы для определения диэлектрической проницаемости бинарной (или  $n$ -фазной) смеси по объемному содержанию и

значениями  $\epsilon$  ее компонентов. Некоторые из этих формул были разработаны и предложены еще в XIX в. Ограничимся рассмотрением тех формул смесей, которые в той или иной мере использовались во влагометрии.

В приведенных ниже формулах приняты следующие обозначения:

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость смеси;

$\epsilon_0, \epsilon_B$  - диэлектрические проницаемости дисперсионной и дисперсной среды (при измерениях влажности  $\epsilon_B$ - соответствует воде);

$\alpha$  - объемное содержание дисперсной среды (воды);

$$\alpha = V_B/V,$$

$V_B, V$  - объемы дисперсной среды и смеси.

Индексы  $i, n$  относятся к  $i$ -му и  $n$ -му компонентам  $n$ -фазной смеси.

Простейшая линейная аддитивная формула (Ньютона, Зильберштейна):

$$\epsilon = \epsilon_0(1-\alpha) + \alpha\epsilon_B$$

Для влагосодержащего твердого сыпучего материала эта модель соответствует его представлению в виде трех плоских слоев воды, сухого вещества и воздуха. Хотя такая модель и принимается некоторыми авторами, например в [2.4], для суспензий и в [4.6] для сыпучего материала, совершенно очевидно, что он является весьма грубой, не соответствующей реальным свойствам гетерогенной водосодержащей системы (твердого влажного материала).

Логарифмическая формула Лихтенекера:

$$\lg \epsilon = \alpha \lg \epsilon_B + (1-\alpha) \lg \epsilon_0,$$

Формула Бира:

$$\sqrt{\epsilon} = \alpha \sqrt{\epsilon_B} + (1-\alpha) \sqrt{\epsilon_0}$$

Формула Лоренца:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0(\epsilon_B + 2) + 2d(\epsilon_B - \epsilon_0)}{\epsilon_B + 2 - \alpha(\epsilon_B - \epsilon_0)}$$

Формула Оделевского для обобщенной проводимости  $\Lambda$  многофазной статистической системы:

$$\sum_i \frac{\Lambda_i - \Lambda}{\Lambda_i + 2\Lambda} \alpha_i = 0$$

Ряд исследователей предложили формулы, учитывающие форму частиц дисперсной среды и их расположение относительно направления электрического поля.

Формула Винера:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{3\alpha}{\frac{\varepsilon_B + 2\varepsilon_0}{\varepsilon_B - \varepsilon_0} - \alpha} \right)$$

Для учета расположения частиц относительно поля Винер ввел "коэффициент смеси"  $K$ , с учетом которого формула смеси принимает вид:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + K} = \alpha \frac{\varepsilon_B - 1}{\varepsilon_B + K} + (1 - \alpha) \frac{\varepsilon_0 - 1}{\varepsilon_0 + K}$$

Максимальному значению коэффициента смеси  $K = \infty$  соответствует расположение дисперсных частиц (цилиндрических, плоских, эллипсоидальных) с большой осью, параллельной направлению поля, при минимальном значении  $K = 0$ , большая ось частиц перпендикулярна направлению поля. Любому другому расположению частиц соответствуют промежуточные значения  $K$  между указанными предельными.

Формула Бруггемана учитывает форму дисперсных частиц при их произвольном расположении относительно направления поля.

Предельное значение  $\varepsilon$  получают:

для сферических частиц

$$\frac{\varepsilon_B - \varepsilon}{\varepsilon_B + \varepsilon} = (1 - \alpha) \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_0}$$

и для частиц в форме плоских дисков

$$\frac{\varepsilon_B - \varepsilon}{\varepsilon_B - \varepsilon_0} = (1 - \alpha) \frac{2\varepsilon_B + \varepsilon}{2\varepsilon_B + \varepsilon_0}$$

Рейнольдс и Хью предложили обобщенную формулу:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_0 \alpha (\varepsilon_B - \varepsilon_0) \left[ \varepsilon_0 - A (\varepsilon_B - \varepsilon_0) \right]^{-1} \quad (4.5)$$

где  $A$  - коэффициент, зависящий от отношения осей эллипсоидальной частицы и ее ориентации относительно поля. Так, для сферических частиц  $A = 1/3$  и из (4.5) получаем известную формулу Максвелла.

Перечисленный выше и ряд других формул диэлектрических смесей представляет собой идеализированные модели, непригодные для предварительного вычисления зависимостей диэлектрических проницаемостей от влагосодержания гетерогенных систем, так как формулы смесей не учитывают ряда свойств этих систем, и в частности влияния видов и форм связи влаги на электрические свойства системы. Исключением являются лишь некоторые системы "жид-

кость - вода". В работе [4.7] доказана применимость формулы Винера для некоторых обратных эмульсий типа В/М (вода в масле). В частности, при измерении объемных концентраций воды до 0,1-0,15 диэлектрическую проницаемость эмульсии можно определить по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{3\alpha}{1-\alpha} \right)$$

Есть все основания полагать, что указанное распространяется и на диэлектрические измерения влажности черного и светлого хлопкового масла.

Известны попытки усовершенствования диэлектрических формул смесей с целью лучшего их согласования с экспериментальными данными. В [3.6] описаны работы исследователей, предложивших эмпирические формулы для глины с введением коэффициента, зависящего от сорта материала, а также для песка и гипса. Для последних материалов применялась формула Винера, в которой с целью учета влияние степени связи воды с сухим веществом коэффициенту смеси придавали различные значения, в зависимости от влагосодержания материала.

Для влагометрии хлопка и других растительных материалов большой интерес представляют модели диэлектрических свойств зерна, исследованные в работе [4.8]. В этом случае также была предложена формула, в которой эмпирически подбирают для каждой зерновой культуры значение "коэффициента формы"  $A$ , связанного с коэффициентами деполяризации по трем взаимно перпендикулярным координатным осям  $A_1$  соотношениями  $A = A_1 = A_2$  и  $A_3 = 1 - 2A$ .

Таким образом, все известные усовершенствованные формулы смесей следует рассматривать как аппроксимацию экспериментальных данных с помощью эмпирических коэффициентов, характеризующих те или иные свойства реального влагосодержащего материала. Существенным недостатком формул смесей с точки зрения влагометрии является и то, что они не описывают зависимостей диэлектрической проницаемости от частоты поля. Это не позволяет применить данные, полученные с помощью указанных формул, для выбора оптимальной частоты на стадии проектирования диэлькометрического влагомера, для оценки погрешностей, связанных с изменением частоты и ряда других задач. Данный недостаток присущ и эмпирическим формулам, применимым лишь для одной фиксированной частоты, или, в лучшем случае, очень узкого диапазона частот. Так,

например, формулы для зерна, рассматриваемые в [4.8], относятся только к частоте 9,4 ГГц.

Для описания частотных зависимостей диэлектрических проницаемостей  $\epsilon^*$ ,  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  влагосодержащих материалов, можно в принципе применять способы, используемые для описания частотных характеристик  $\epsilon$  воды и рассмотренные в 2.1. Однако теория Дебая и основанные на ней круговые диаграммы дают в случае гетерогенных систем результаты, весьма далекие от получаемых для реальных материалов. Более близкие к реальным характеристикам результаты можно получить с помощью диаграмм Коул-Коула, в частности, в диапазоне СВЧ как это было показано для ряда материалов в работах [2.3, 4.9].

Наконец, как отмечалось выше, частотные свойства влагосодержащих веществ характеризуют значения их частот релаксации при различных влагосодержаниях.

Однако наиболее полную и достоверную информацию о частотно-влажностных свойствах влагосодержащих материалов дают их экспериментальные характеристики, рассматриваемые в следующем разделе.

### ***4.3. Экспериментальные характеристики диэлектрических свойств хлопка и хлопковых материалов***

В диэлькометрической влагометрии обычно пользуются следующими экспериментальными характеристиками, выражающими зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  (или  $\epsilon$  и  $\text{tg}\sigma$ ) влагосодержащего материала от информативного параметра - влажности  $W$  и неинформативных параметров, связанных с составом и свойствами материала:

1) влажностные характеристики  $\epsilon'(W)$  и  $\epsilon''(W)$  или  $\epsilon(W)$  и  $\text{tg}\sigma(W)$  при стабилизации частоты поля  $f$  (или  $\omega$ ), температуры материала  $t$ , его плотности  $\rho$  и других параметров, влияющих на  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ .

2) частотно-влажностные характеристики - семейство графиков функций  $\epsilon'(f)$  и  $\epsilon''(f)$  (или  $\epsilon(f)$  и  $\text{tg}\sigma(f)$ ) с  $W$  в качестве параметра, определяемых при  $t=\text{const}$ ,  $\rho=\text{const}$  и стабилизации других величин, влияющих на  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ .

Располагая частотно-влажностными характеристиками, можно построить влажностные характеристики для различных фиксированных значений частоты  $f = \text{const}$ .

Влажностные и частотно-влажностные характеристики дают возможность определить функцию преобразования первого звена обобщенной схемы влагомера, т.е. преобразования влажность диэлектрические свойства определенного материала в исследуемом диапазоне частот электрического поля.

3) Зависимость  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  от температуры, плотности, химического и гранулометрического состава, распределения влаги и других факторов и величин, существенно влияющих на  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  влажного материала. Эти зависимости, которые иногда называют температурными, плотностными, гранулометрическими и т.п., характеризуют функции влияния соответствующих величин на первое звено влагомера. Обычно эти характеристики определяют при фиксированном значении частоты  $f = \text{const}$ . В случае необходимости исследования функций влияния в определенных диапазонах частот такие характеристики можно строить для ряда значений  $f$  в заданном диапазоне частот с фиксированными значениями влияющей величины в качестве параметра и получать семейства характеристик, которые можно назвать (по аналогии с частотно-влажностными) частотно-температурными, частотно-гранулометрическими и т.п.

Диэлектрические свойства хлопка-сырца и их зависимость от влажности и других величин были исследованы В.В. Казанским [2.5], а также авторами данной работы. Измерения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  проводились в диапазоне частот 0,2-20,0 МГц, на резонансной установке методом замещения емкости плоскопараллельного конденсаторного датчика с хлопком-сырцом емкостью эталонного переменного конденсатора. Полученные влажностные характеристики  $\epsilon(W)$ , для частот 0,2; 3,0; и 20 МГц при плотности хлопка  $250 \text{ кг/м}^3$  показывают, что как и у других растительных материалов  $\epsilon$  монотонно растет с увеличением влажности, абсолютные значения  $\epsilon$  уменьшаются (при  $W = \text{const}$ ) с ростом частоты. Крутизна характеристик  $\epsilon(W)$  увеличивается с уменьшением частоты, что объясняется преобладанием в хлопке-сырце медленных видов поляризации. В исследованном интервале частот и диапазоне влажности 6 - 16 % частотная характеристика аппроксимируется зависимостью:

$$\lg \epsilon = a - b \lg f$$

где  $a$ ,  $b$  - постоянные, зависящие от значений влажности, температуры и плотности хлопка.

Параллельно исследовалось влияние неравномерности распределения влаги в хлопке к  $\epsilon$  и было установлено, что неравновесным

образцам после увлажнения соответствуют завышенные значения  $\epsilon$ , а после подсушки - заниженные.

Для частотно-влажностных характеристик хлопка-сырца в диапазонах влажности 0-20 % и частот  $10^5 - 10^8$  Гц была предложена аппроксимирующая формула:

$$\lg \epsilon = A + BW^2 10^{-Clgf}$$

где  $A, B, C$  - постоянные, зависящие от сорта хлопка, плотности, температуры и т.д.

$f, W$  - значение частоты и влажности.

С уменьшением влажности  $\epsilon$  хлопка-сырца стремится к некоторому постоянному значению от сорта хлопка, плотности и частоты и близкого к 1,4-1,5.

Исследования, проведенные авторами [4.10] позволили уточнить экспериментальные характеристики хлопка-сырца. Измерения проводились на очищенном хлопке 111-го сорта селекционного сорта Ташкент-1 с плотностью  $200 \text{ кг/м}^3$ . Образец готовили увлажнением водопроводной водой с последующей выдержкой до достижения равновесной влажности. Использовались плоскопараллельные конденсаторные датчики с фиксированным рабочим объемом и измерители добротности типа Е9-4, Е9-5 и измеритель проводимости типа Е10-2.

На рис. 4.9 приведены полученные влажностные характеристики  $\epsilon(W)$  и  $\text{tg}\delta(W)$  для частот 0,1; 3,0; и 30 МГц.

Эти характеристики подтверждают уменьшение  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta(W)$  с ростом частоты. Влажностную характеристику  $\epsilon(W)$  можно разделить на три участка. Начальный участок, соответствующий низкой влажности (примерно до 5%) характеризуется низкой чувствительностью  $\partial(\epsilon)/\partial W$ . В этой области имеет место мономолекулярная адсорбция влаги при большой энергии связи с сухим веществом. Переход к полимолекулярной адсорбции при более высокой влажности вызывает существенные увеличения крутизны кривой  $\epsilon(W)$  и наконец, при влажности, превышающей 12-14% вновь наблюдается некоторое уменьшение чувствительности. Аналогичный характер имеет и зависимость  $\text{tg}\delta(W)$  (рис. 4.9).

Для всех частот  $\text{tg}\delta$  монотонно увеличивается с ростом влажности; повышение частоты влечет за собой уменьшение  $\text{tg}\delta$  при  $W=\text{const}$ . Монотонное уменьшение  $\text{tg}\delta$  при отсутствии экстремумов можно объяснить наличием практически непрерывного спектра времени релаксации и влиянием проводимости хлопка.

Для образцов с равновесной влажностью в исследованном диапазоне частот и влажности  $6 \leq W \leq 18\%$  зависимость  $\text{tg}\delta$  от  $W$  имеет вид:

$$\text{tg}\delta = C_1 W^n + C_2$$

где  $C_1, C_2$ -постоянные, зависящие от свойств хлопка и значения частоты.

Основными процессами, определяющими значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  хлопка-сырца, являются его проводимость и инерционные виды поляризации. По данным [2.5], в ВЧ диапазоне между этими величинами имеется зависимость следующего вида:

$$\lg\epsilon = K_1 + K_2 \text{tg}\delta,$$

где  $K_1, K_2$  - постоянные коэффициенты.

На величину  $\epsilon$  наибольшее влияние оказывают плотность и температура хлопка-сырца. В [4.10] рекомендуется в качестве номинальной плотности  $D \geq 200 \text{ кг/м}^3$  и указывается, что отклонение от номинального значения  $\Delta D$  вызывает в дизелькометрических влагомерах, при всех значениях частоты и влажности, равное относительное изменение влажности  $\Delta W, \% \approx \Delta D\%$ . Что касается  $\text{tg}\delta$ , то при частотах  $f \geq 3 \text{ МГц}$  и влажности  $W 19\%$  изменения плотности хлопка-сырца в диапазоне  $150 \leq D \leq 250 \text{ кг/см}^3$  практически не влияют на значение  $\text{tg}\delta$ .

С ростом температуры хлопка-сырца, вследствие роста проводимости и уменьшения времени релаксации, увеличиваются величины  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ , причем влияние температуры тем больше, чем выше влажность и ниже частота.

Экспериментальные характеристики для хлопкового волокна были получены с применением той же методики и аппаратуры, что и для хлопка-сырца. Увлажнение образцов проводилось выдержкой в атмосфере насыщенного водяного пара с последующей выдержкой в закрытом сосуде в течение суток.

На рис. 4.10 и 4.11 представлены полученные влажностные характеристики  $\epsilon(W)$  и  $\text{tg}\delta(W)$  хлопкового волокна на частотах 0,1; 1,0; 10 и 100 МГц. Эти характеристики хлопкового волокна аналогичны соответствующим характеристикам хлопка-сырца -  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  возрастают плавно с повышением влажности. Эти же факторы определяют основные функции влияния. Влияние температуры и плотности волокна на  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  растут с увеличением влажности и понижением частоты.

Рассмотрим теперь полученные авторами экспериментальные характеристики для семян хлопчатника. Электрические характеристики хлопковых семян определяли с помощью измерителя добротности типа Б9-4 на фиксированных частотах 0,2; 0,4; 1,1; 4,0 и 30 МГц. Диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta$  устанавливали после внесения в датчик образца хлопковых семян расчетным путем по изменению емкости образцового конденсатора и добротности колебательного контура прибора. Массу образца семян выбирали равной 25г, что соответствовало плотности  $\rho = 0,494$  г/см<sup>3</sup>.

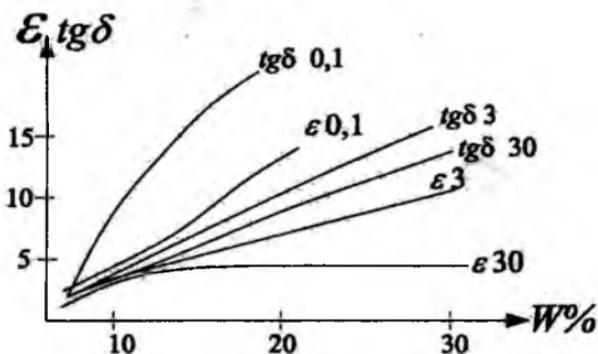


Рис.4.9. Зависимость  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  хлопка-сырца от влажности.

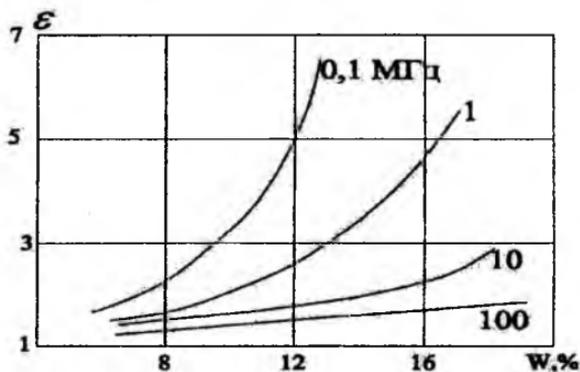


Рис.4.10. Зависимость  $\epsilon$  хлопкового волокна от влажности -  $W$  при различных частотах.

При такой плотности семена хорошо соприкасаются друг с другом, обеспечивая воспроизводимость результата измерений при их переукладке в датчик. Датчиком служил плоский конденсатор с пластинками 65x75 мм и расстоянием между ними 25мм. Рабочий объем составлял 45x45x25 мм<sup>3</sup>. Датчик подключали к прибору с помощью контактных штырей, входящих в клеммы прибора, что обеспечивало минимальную индуктивность цепи соединения.

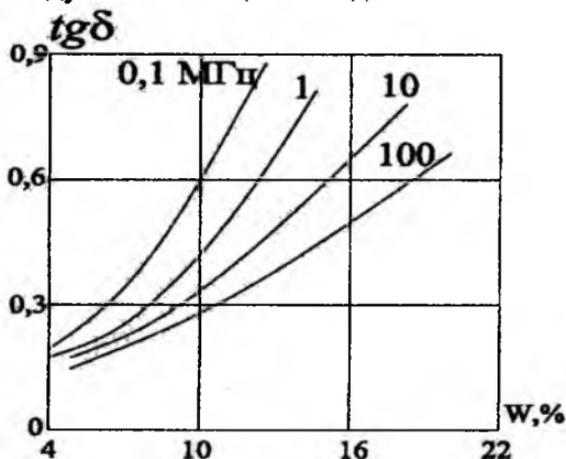


Рис.4.11. Зависимость  $\text{tg}\delta$  хлопкового волокна от влажности  $W$ .

Для обеспечения постоянства рабочего объема датчика его закрывали уплотняющей крышкой с фиксацией ее положения. Крышка, как и стенки датчика, были изготовлены из оргстекла. Общая емкость датчика составляла  $C_d=7,8$  пф, геометрическая емкость рабочей части датчика  $C_r=0,71$  пф. Вычисление  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  проводили по формуле

$$\epsilon = \frac{\Delta C + C_1}{C_1}$$

где  $\Delta C$  - изменение емкости, вызванное введением в датчик семян. В нашем случае:

$$\epsilon = 1,42\Delta C + 1,$$

$$\text{tg}\delta = \frac{C_0(Q_0 - Q_c)}{\Delta C_{\infty} Q_c}$$

где  $C_0$  - начальная емкость по шкале прибора;

$Q_0, Q_c$  - добротности при подключении незагруженного датчика и после введения образца семян.

Образцы семян увлажняли путем опрыскивания их водопроводной водой с последующей выдержкой в закрытых банках в течение нескольких суток при механическом перемешивании семян. Влажность определяли методом сушки при температуре  $105 \pm 2$  °С до постоянного веса. При подготовке образца его влажность  $W$  вычисляли расчетным путем по прибавке в весе после увлажнения

$$W_1 \% = \left[ \frac{P(W_0 + 1)}{P_0} - 1 \right] \cdot 100$$

где  $P$  - вес после увлажнения;

$W_0$  - начальная влажность, определяемая как среднее значение влажности выборки;

$P_0$  - начальный вес образца.

Сложный физико-химический состав семян, наличие макро и микропор, разнообразных по форме и размерам, присутствие электролита определяют широкий, практически непрерывный спектр времени релаксации - от нескольких секунд до  $10^{-8}$ с. Инерционная составляющая  $\epsilon$  семян зависит от времени релаксации  $\tau$ , частоты  $f$  и электропроводности  $\sigma$ . В рассматриваемом случае релаксационная составляющая  $\epsilon_0$  будет:

$$\epsilon_r = 4\pi \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i \delta}{1 + (\omega \tau_i)^2}$$

По мере повышения влажности происходит последовательное заполнение пор всех больших размеров, образуются пленки и протяженные замкнутые водные включения, определяющие возрастающий дипольный момент и значение  $\epsilon$ . При дальнейшем повышении влажности (более 15-16%) рост  $\epsilon$  зависит в основном от увеличения содержания компонентов (вода) с большим значением  $\epsilon$ .

С ростом частоты постепенно и плавно прекращается реализация механизмов относительно низкочастотных видов поляризации, что сопровождается понижением  $\epsilon$ . Частотно-влажностные характеристики хлопковых семян получены при стабильной температуре ( $20 \pm 2$  °С) и плотности (рис.4.12а).

Увеличение подвижности ионов и электропроводности, а также температуры (рис.4.12б) приводит к росту  $\epsilon$ , причем чем выше влажность и ниже частота, тем заметнее этот рост. С повышением частоты значение относительного температурного коэффициента диэлектрической проницаемости снижается, что свидетельствует о меньшей температурной погрешности при измерении на более высоких частотах.

Зависимость  $\epsilon$  от плотности при  $f=\text{const}$  близка к линейной (рис.4.12в). Для температурного влияния, отмечена меньшая чувствительность к изменению плотности с повышением частоты и понижению влажности.

Один из наиболее существенных факторов, определяющих погрешность диэлькометрических измерений - несоответствие между поверхностной влажностью и объемной. Для выяснения этого фактора проводили последовательные измерения  $\epsilon$  семян через наибольшие интервалы времени после увлажнения опрыскиванием. При этом в течение первых нескольких часов влага находилась в волокнистом покрове, медленно проникая внутрь семени. Из-за большой проводимости, вызванной высокой влажностью поверхности семян, измерения в НЧ части исследованного диапазона частот ( $f=0,2$  МГц) невозможно было провести, хотя средняя влажность образца была невысокой.

Для стабилизации величины  $\epsilon$  выдержка семян после увлажнения должна быть не менее 10 часов, при этом влияние неравномерного распределения влаги особенно существенно при понижении частоты. Диэлектрические потери в хлопковых семенах определяются как поляризационными процессами, так и наличием сквозной проводимости  $S$ . Электропроводность воды, находящейся в семенах, обусловлена не только обычно растворенными в ней солями натрия, калия, магния, углекислого газа, но и содержащимися в волокне и семени электролитами и органическими кислотами, приводящими к повышению количества ионов водорода в результате процессов диссоциации при взаимодействии воды с материалом семени.

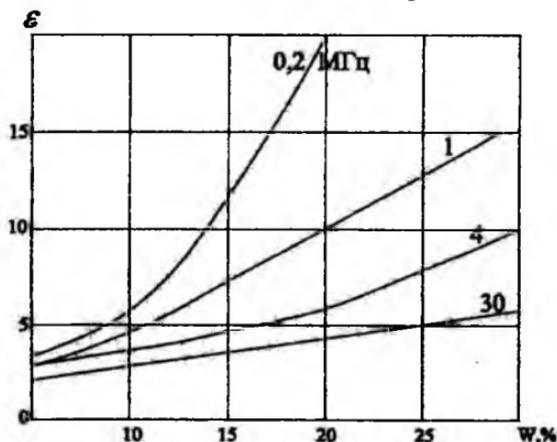
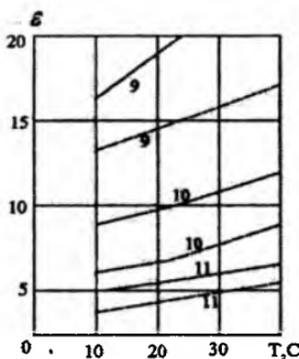
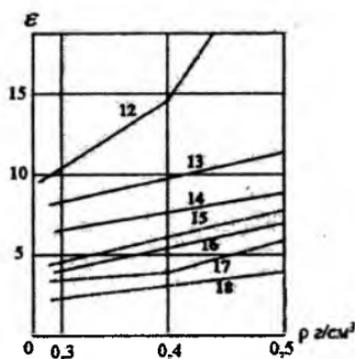


Рис. 4.12. а) зависимость  $\epsilon$  хлопковых семян от влажности:  
1 - 0,2 МГц, 2 - 1 МГц, 3 - 4 МГц, 4 - 30 МГц.



**Рис. 4.12.б) от температуры**  
**9-1 МГц, 10-4 МГц, 11-30**  
**МГц,**  
**—W=21,9%, —W=17,2%**



**Рис. 4.12.в) от плотности:**  
**12,16 – 0,2 МГц; 13,17 – 1 МГц;**  
**14 – 4 МГц; 15,18 – 30 МГц.**  
**—W=21,9%, —W=11,8%**

Мы исследовали также частотно-влажностные характеристики и температурные зависимости  $\text{tg}\delta$  (рис.4.13а) хлопковых семян. Плотность (рис.4.13б) слабее влияет на  $\text{tg}\delta$  (при меньшем из двух исследованных значений влажности), чем на  $\epsilon$ . Наблюдаемое уменьшение  $\text{tg}\delta$  с увеличением плотности от 0,3 до 0,4 г/см<sup>3</sup> обусловлено малым влиянием плотности при  $f = 30$  МГц; оно находится в пределах погрешности измерения.

При сравнении частотно-влажностных характеристик семян хлопчатника для  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  выявлено четко выраженная аналогия: с ростом влажности и уменьшением частоты поля они монотонно возрастают. В исследованном диапазоне частот (0,2-30 МГц)  $\text{tg}\delta$  с ростом частоты монотонно уменьшается. Отсутствие максимумов функции  $\text{tg}\delta(f)$  можно объяснить непрерывностью спектра времени релаксации и сглаживающим влиянием проводимости семян. Аналогия влажностных характеристик  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  свидетельствует о существенной роли в формировании этих характеристик одних и тех же процессов поляризации и проводимости. Эта близость распространяется на функции влияния исследованных величин - температуры и плотности семян.

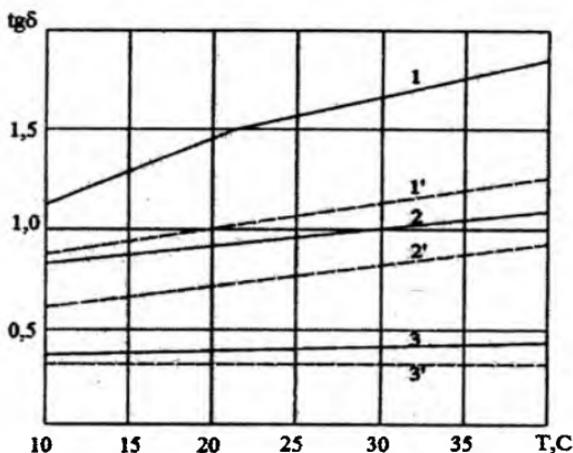


Рис.4.13.а) - зависимость  $\text{tg}\delta$  хлопковых семян от температуры. 1 -  $f=1$  МГц,  $W=14,1\%$ , 2 -  $f=30$  МГц,  $W=16,2\%$ , 3 -  $f=30$  МГц,  $W=14,1\%$ .

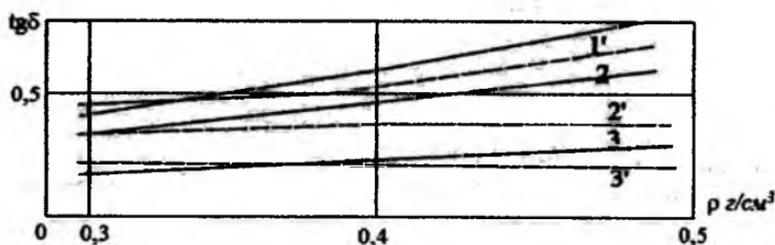


Рис.4.13.б) от плотности, 1,1' - 1 МГц; 2,2' - 4 МГц, 3,3' - 30 МГц, 4 - 30 МГц.  $\text{---} W=22,1\%$ ;  $\text{---} W=17,2\%$

С повышением частоты уменьшается влияние на  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  всех факторов (в том числе и неравномерности распределения влаги), обуславливающих неоднородность материала и нарушающих однозначность функциональных зависимостей электрических свойств от его влажности и других параметров. Для повышения точности измерения диэлектрических измерительных систем целесообразно увеличить рабочую частоту этих систем.

Анализ рассмотренных в этом разделе экспериментальных характеристик позволяет сделать выводы, имеющие важные значения

для реализации средств измерения влажности, основанных на ВЧ диэлектрическом методе:

1. Частотно-влажностные характеристики хлопковых материалов (хлопок-сырец, его компоненты, продукты переработки хлопковых семян) и функции влияния неинформативных параметров определяются одними и теми же процессами в электрическом поле ВЧ и имеют аналоговый характер у всех материалов.

2. Повышение частоты электрического поля уменьшает влияние проводимости и инерционных процессов поляризации и как следствие, ослабляет влияние неинформативных параметров - температуры и плотности материала, распределения влаги в нем и т.д. Влияние такого фактора, как засоренность хлопка-сырца минеральными и органическими примесями также уменьшается с ростом частоты тока.

3. Из обеих составляющих выходного сигнала первичного преобразователя (активной и емкостной), активная составляющая ( $\text{tg}\delta$ ) сильнее реагирует на неоднородность материала и неинформативные параметры - химический и гранулометрический состав, а также засоренность и сортовые особенности хлопка-сырца [4.11].

## ГЛАВА V. ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВЛАГОМЕРЫ ХЛОПКА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

### *5.1. Первичные измерительные преобразователи и измерительные устройства диэлькометрических влагомеров*

Основными элементами влагомеров являются первичный измерительный преобразователь (датчик) и измерительное устройство. Физическими основами построения этих элементов диэлькометрических влагомеров служат теоретические и экспериментальные зависимости, описывающие преобразование влажности  $W$  в диэлектрические свойства  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  данного материала.

Емкостный первичный измерительный преобразователь преобразует эти свойства в две величины - емкость  $C(\epsilon')$  и активную проводимость  $G(\epsilon'')$ , которые взаимосвязаны и соотношение между ними имеет существенное значение для работы измерительного устройства, преобразующего указанные величины в напряжение, силу тока, частоту тока или другой выходной (аналоговый или цифровой) сигнал влагомера. В качестве выходных величин емкостного датчика с влажным материалом можно использовать также его активное и реактивное сопротивление  $R=1/G$  и  $X=1/(\omega C)$ ; полное сопротивление  $Z$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  или добротность  $Q$ .

Если исходить из простейшей двухэлементной параллельной схемы замещения датчика (рис.4.1), то

$$Z = R / (1 + j\omega T) = R / (1 + j\omega RC) \quad \text{и} \quad \text{tg}\delta = 1/(\omega T) = 1/(\omega RC)$$

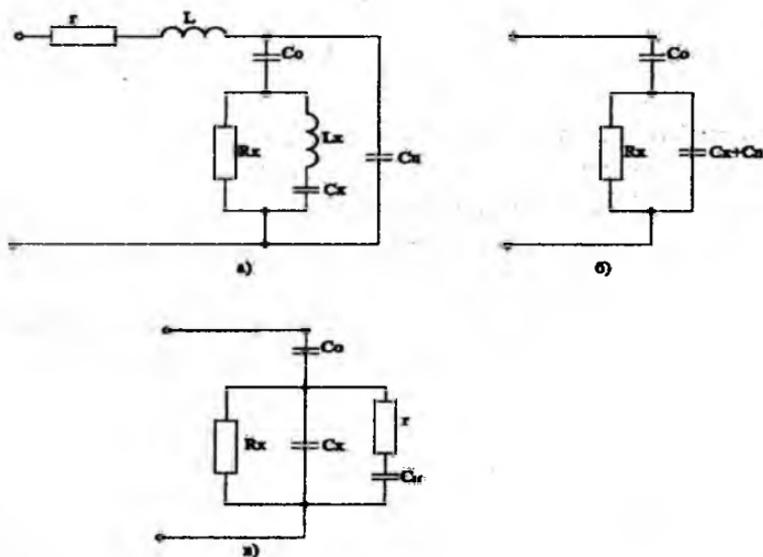
где  $T = RC$  - постоянная времени датчика.

Как уже отмечалось, условием преобладания реактивной составляющей (емкостной проводимости) полного сопротивления над активной, является  $\omega C > G$  или  $\text{tg}\delta < 1$ ; при  $\text{tg}\delta > 1$  ( $\omega C < G$ ) преобладает активная составляющая.

Соотношение между  $X$  и  $R$  для конкретного датчика с материалом можно описать его электрической схемой замещения. Для большинства влагосодержащих материалов емкостной датчик влажности при фиксированной частоте электрического поля можно описать простейшей двухэлементной  $R$ - $C$  схемой замещения (рис.4.1), справедливой для всех конденсаторов с преобладанием потерь в диэлектрике.

Однако эта схема не всегда дает адекватную модель поведения датчика в широком диапазоне частот. Для такого описания были предложены различные схемы замещения датчика.

Наиболее полная схема замещения (рис.5.1а) содержит сопротивление  $r$  и индуктивность  $L$  подводящих проводов, эффективную (рабочие) емкость  $C_x$ ,



**Рис.5.1. Схемы замещения датчика диэлькометрического высокочастотного влагомера.**

активное сопротивление датчика  $R_x$  с материалом и его собственную индуктивность  $L_x$ . Емкость  $C_n$  описывает паразитную емкость конденсатора, равную сумме емкости изоляционных деталей и емкости рассеяния поля конденсатора. Величина  $C_0$  соответствует емкости воздушного зазора между материалом и электродами датчика, емкости слоя диэлектрика на поверхности электродов, или емкости конденсатора, включенного последовательно с датчиком. В большинстве случаев эту схему можно существенно упростить, так как индуктивностями  $L$  и  $L_x$  и сопротивлением  $r$  можно пренебречь; объединив эффективную и паразитную емкость датчика, получим параллельную R-C схему с последовательной емкостью  $C_0$  (рис.5.1б).

Для хлопковых материалов была предложена схема замещения (рис.5.1в), состоящая из трех параллельных ветвей - активного сопротивления  $R$ , характеризующего сквозную проводимость, емкости  $C$ , определяемой процессами быстро устанавливающихся видов поляризации и последовательного соединения емкости  $C_M$ , описывающей процессы медленно устанавливающихся видов поляризации, и сопротивления  $g$ , ограничивающего соответствующий ток абсорбции.

Для такой схемы тангенс угла диэлектрических потерь равен:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1 + \omega^2 C_M r^2 (1 + R/r)}{\omega CR (1 + \omega^2 C_M r^2 + C_M / C)}$$

что согласуется с реальными частотно-влажностными характеристиками, у которых  $\operatorname{tg} \delta$  уменьшается с ростом частоты и снижением сквозной проводимости  $1/R$ .

Приведенные выше схемы замещения исходят из обобщенной схемы замещения поляризуемого диэлектрика (рис.4.6). Однако для построения модели первичного преобразователя, действительной в широком диапазоне частот, можно использовать и экспериментальные частотно-влажностные характеристики. В этом случае задача сводится к выбору или синтезу схемы замещения, представляющей собой наиболее адекватную модель, т.е. такой схемы замещения, для которой аппроксимированные частотно-влажностные характеристики наиболее близки к реальным характеристикам для данного материала.

Критерием близости аппроксимирующей функции и экспериментальной характеристики может служить минимизация среднего квадратического отклонения при условии минимума членов аппроксимирующего полинома:

$$\Delta_n = \int_{\omega_1}^{\omega_2} [F(\omega) - f(\omega)]^2 d\omega$$

при  $\Delta \Rightarrow \min$ ;  $n \Rightarrow \min$ ,

где  $F(\omega)$ ,  $f(\omega)$  - экспериментальная и аппроксимирующая частотновлажностные функции;

$n$  - степень аппроксимирующего полинома.

Методика определения аппроксимирующих функций и параметров схем замещения можно рассмотреть в следующем порядке.

Первый способ заключается в нахождении параметров, минимизирующих значение  $\Delta$  для частотно-влажностных функций  $\operatorname{tg} \delta(\omega)$ ,

если исходить из расчетной формулы  $\text{tg}\delta$  исследуемой схемы замещения. Определив минимизирующие значения параметров, можно найти постоянные времена, а следовательно и параметры элементов R-C схемы замещения. В этом случае часто практикуется перебор заранее выбранных типовых схем замещения.

Суммарная емкость реального первичного преобразователя влажности определяется не только диэлектрической проницаемостью исследуемого материала, так как

$$C = \epsilon C_x + C_n,$$

где  $C_x$ - эффективная (рабочая) емкость преобразователя;

$C_n$ - паразитная емкость, равная сумме емкостей изолирующих деталей и емкости рассеяния.

В большинстве реальных конструкций емкостных датчиков можно считать  $C = \text{const}$ , однако точное определение этой величины затруднительно. В связи с этим наиболее точным способом определения параметров емкостного датчика является его градуировка с помощью стандартных образцов, в качестве которых применяют следующие абсолютно чистые эталонные жидкости:

Таблица.5.1

Название эталонной жидкости	Рабочая емкость, фФ	$\epsilon = 20^\circ\text{C}$		
Бензол (очищенный)	$10^3 - 10^{10}$	2,2825	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
Циклогексан	до $10^{10}$	2,0228	$2 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
Хлорбензол	$10^6$	5,869	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$
Дихлорэтан	$10^3 - 10^4$	10,66	$3 \times 10^{-3}$	--
Нитробензол	$10^3 - 10^4$	35,7	$2 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-3}$
Вода		80,4	$10^{-2}$	--

Первичные преобразователи радиочастотного диапазона (до 30-50 МГц) для удобства рассмотрения целесообразно разделить на два класса: с внутренним (сосредоточенным и внешним или рассеянным) полем.

У преобразователей первого типа основная часть электрического поля направлена поперек материала, находящегося между

электродами. При конструировании таких датчиков особое внимание уделяют уменьшению или хотя бы стабилизации емкости рассеяния. У датчиков второго типа с контролируемым материалом взаимодействует поле рассеяния.

Ниже приводятся расчетные формулы рабочей емкости  $C_x$  преобразователей различных типов, основанные, главным образом, на работе [5.1]. Напомним, что при заданных геометрических параметрах преобразователя проводимость  $G_x$  преобразователя в стационарном электрическом поле пропорциональна емкости  $C_x$  и между этими двумя величинами существует соотношение:  $G = C_x (\gamma/\epsilon)$ , где  $\gamma$  - удельная электропроводность исследуемого материала;  $\epsilon$  - его диэлектрическая проницаемость. В связи с этим формулы для расчета проводимости при рассмотрении различных преобразователей не приводятся.

Основными модификациями датчиков с внутренним полем являются конденсатор с электродами в виде плоских параллельных пластин (рис.5.2а) и цилиндрический с коаксиальными электродами (рис.5.2б).

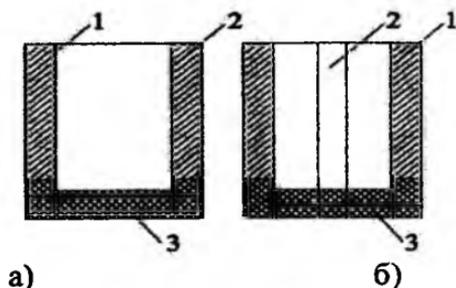


Рис.5.2. Емкостные датчики: плоскопараллельный, цилиндрический и коаксиальный. 1,2 - электроды, 3 - диэлектрик.

Для плоскопараллельного датчика с двумя одинаковыми пластинами емкость равна:

$$C = \epsilon_0 \epsilon S/d$$

где  $S$  - площадь пластин,  $d$  - расстояние между пластинами.

С целью увеличения рабочей емкости и чувствительности иногда (в частности - для жидкостей) применяют датчик, имеющий  $n$  параллельных пластин, соединенных через одну. У таких многопластинчатых датчиков:

$$C = \epsilon_0 \epsilon S(n - 1)/d$$

У коаксиальных цилиндрических датчиков внешний электрод обычно заземляется, емкость такого датчика:

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln(R/r)}$$

где  $l$  - высота электродов;

$R$  - внутренний радиус внешнего электрода;

$r$  - внешний радиус внутреннего электрода.

Цилиндрический преобразователь отличается равномерностью внутреннего поля и возможностью точного изготовления (взаимозаменяемости датчиков при серийном производстве). Однако при измерениях влажности хлопка сырца эта конструкция менее удобна, чем плоскопараллельная. Преобразователю коаксиального типа отдают предпочтение при измерениях влажности хлопковых семян и продуктов их переработки. Преобразователи этого типа с одним или несколькими внутренними электродами являются распространенными при измерениях влажности жидкостей. Так, во влагомерах, разработанных в ТашГТУ (ТашПИ) для хлопкового масла, был применен датчик (рис.5.3), состоящий из трех цилиндров, имеющих разные диаметры и общую ось вращения и вставленных один в другой. Наружный и внутренний цилиндры электрически соединены с корпусом влагомера. Промежуточный цилиндр является "сигнальным", но имеет меньшую высоту и изолирован от корпуса.

Из преобразователей с внешним полем наибольшее практическое значение имеют компланарные, т.е. с электродами, расположенными в одной плоскости. Компланарные электроды могут иметь форму прямоугольных пластин (рис.5.4а) или концентрических круговых колец (рис.5.4б).

Для пластин емкость вычисляется по формулам:  
при  $b/a \gg 1$

$$C = \varepsilon b K(K')/K(K),$$

где  $K = 1 / (1 + 2(a/b))$ ,

$$K' = \sqrt{1 - K^2}$$

Здесь  $K(K)$  и  $K(K')$  - эллиптический интеграл 1-го рода с модулем  $K$  и дополнительным модулем  $K'$

при  $b/a \gg 1$  и  $a/d \gg 1$ :

$$C = (2/\pi) \varepsilon b \ln[4(1 + 2/(a/d))];$$

при  $b/a \gg 1$  и  $d/a \ll 1$ ;

$$C = \pi \epsilon b / \ln[4(1 + d/a)];$$

при  $d/a \gg 1$  и произвольном значении отношения  $b/a$ ;

$$C = \frac{C_{01}}{(1 - C_{01}/4\pi \epsilon d)}$$

где емкость одиночной пластины

$$C_{01} \approx 2\pi \epsilon b / \ln 4b/a$$

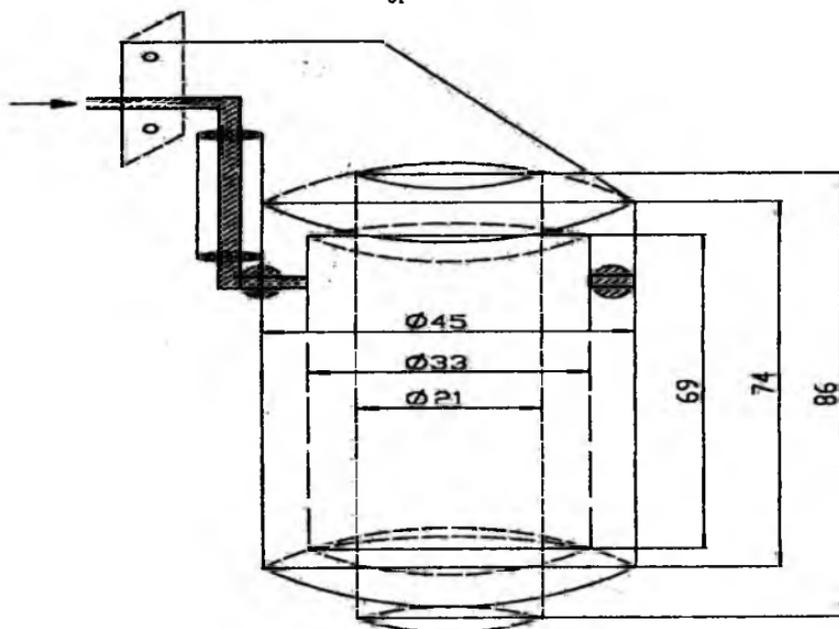


Рис.5.3. Датчик влагомера для хлопкового масла.

Важная особенность рассматриваемых датчиков - уменьшение электрического поля по мере удаления от поверхности электродов. Для плоских пластин уменьшение напряженности электрического поля  $E_{\Delta}$  в точке на оси  $y$  (рис.5.4а), удаленной от плоскости электродов на расстояние  $\Delta$ , равно:

$$\beta = E_{\Delta} r_2 / v = \frac{1}{2K \cdot K(K)} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1 + \Delta^2/r_2^2)}}$$

где  $v$  - напряжение между электродами;

$K = r_1/r_2$  (см. рис.5.4а) - модуль эллиптического интеграла 1-го рода.

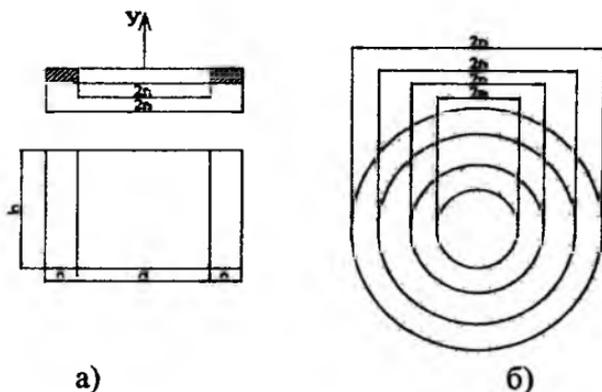


Рис.5.4.Компланарные электроды:

а) плоские пластины, б) концентрические кольца, а, в, d,  $r_1$  - геометрические размеры элементов.

На расстоянии  $\Delta \geq 2r_2$  напряженность поля  $E_d$  можно считать равной нулю, т.е. колебания толщины слоя материала сверх  $\Delta \geq 2r_2$  не оказывают влияния на результат измерения. Необходимо, однако подчеркнуть, что плотность контролируемого слоя, как и у датчиков других типов, является влияющей величиной и, следовательно, необходимо обеспечить уплотнение материала выше минимально допустимого.

Первичный преобразователь описанного типа применялся нами в лабораторных условиях для хлопковых семян и продуктов их переработки. Применению этих датчиков для хлопковых материалов и, особенно, для хлопка-сырца в потоке препятствуют их недостатки: существенная неоднородность и пространственная ограниченность электрического поля. Обычно величина  $2r_2$  (см. рис.5.4а) не превышает 25-30мм и, следовательно, датчик контролирует лишь такую толщину слоя материала.

Как уже отмечалось, хлопок-сырец отличается чрезвычайно неравномерным распределением влаги по объему и неоднородностью строения, и описанные компланарные датчики не дают возможности получить информацию об интегральной влажности материала, в то время как датчики с внутренним полем измеряют именно интегральную влажность.

К емкостным датчикам с внешним полем можно отнести также преобразователь в виде прямолинейного проводника конечной длины, расположенного в массе исследуемого материала. Практически такой преобразователь реализуется в виде заостренного металлического стержня и может использоваться в качестве зонда, вводимого в толщу хлопка-сырца в кипах, бунтах, в транспортной тележке и т.п.

Емкость такого прямолинейного цилиндрического стержня определяется по формуле:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{l}{a} - 0,3069 - \frac{0,1775}{\ln(l/a)} - \frac{0,5519}{\ln(l/a)^2}}$$

где  $l$ ,  $a$  - длина и радиус стержня.

Данная формула при  $l/a \geq 10$  дает относительную погрешность не больше 1%. Если допустима меньшая точность, можно применить приближенную формулу:

$$C = 2\pi\epsilon l / (\ln(2l/a) - 1)$$

Датчики данного типа могут быть выполнены с электродами в виде соосных колец, расположенных на цилиндрической поверхности зонда или с несколькими параллельными штыревыми электродами, расположенными по поверхности кругового цилиндра, причем один из электродов может быть расположен по оси цилиндра. У таких многоэлектродных датчиков используются принципы как внешнего, так и внутреннего поля, но их введение в массу хлопкового материала связано с большими затруднениями, чем в случае одиночного электрода.

По нашему мнению, наиболее целесообразна в этом отношении конструкция датчика-зонда, у которого каждый из двух электродов состоит из нескольких заостренных стержней (игл) одинаковой длины и ширины, расположенных на двух концентрических окружностях. Иглы внутреннего электрода закреплены по периферии металлического диска, иглы внешнего электрода - на металлическом кольце. Диск и внешнее кольцо, разделенные кольцом из твердого диэлектрика, образуют плоское основание круглой формы. На поверхности основания, противоположной электродам, можно смонтировать вторичный измерительный преобразователь, собранный из микромодулей и получить таким образом миниатюрный портативный влагомер полевого типа.

Известны также датчики для проточных влагомеров сыпучих и волокнистых материалов, совмещающие функции транспортирования и уплотнения контролируемого материала.

Применительно к хлопковым материалам оптимальным является конструкция, в которой шнековый питатель, установленный в отрезке трубы, соединен с конической расширяющейся измерительной камерой. Внутренняя или внешняя поверхность камеры несет электроды, образующие конденсатор с внешним полем рассеяния; на внутренней поверхности можно также смонтировать датчик температуры материала для компенсации температурной погрешности. Стабилизация плотности материала в измерительной камере достигается регулированием площади выходного отверстия (основания конуса) при помощи дросселирующих устройств - заслонка с перемещаемым противовесом или иглы с противодействующей пружиной.

Следует однако, отметить, что проточные влагомеры диэлькометрического типа нашли весьма ограниченное применение для хлопковых материалов.

Измерительные устройства диэлькометрических влагомеров преобразуют выходной сигнал первичного преобразователя в напряжение, силу тока, частоту тока или другой аналоговый или цифровой выходной сигнал влагомера. На построение измерительной схемы существенное влияние оказывает наличие у емкостного первичного преобразователя влажности двух выходных величин - емкости  $s$  и проводимости  $G = 1/R_0$ .

В диэлькометрической влагометрии принято в качестве информативного параметра сигнала датчика рассматривать емкость исходя из того, что вещественная составляющая диэлектрической проницаемости материала определяется его влажностью, в то время как на мнимую составляющую и связанную с ней проводимость оказывают влияние химический состав, биологические свойства материала и другие неинформативные параметры входного сигнала.

Измерительное устройство диэлькометрического влагомера можно представить в виде двухсвязанной системы с двумя входными  $R$  и  $C$  выходными величинами  $y_c(C,R)$ ,  $y_c(R,C)$  этих каналов (рис.5.5а), соответствующими реактивной (емкостной) и активной составляющим выходного сигнала  $y$ . Если звенья данной системы линейны, их можно описать комплексными коэффициентами передачи (рис.5.5б), имеющими смысл:

$K_{cc} = \partial y_c / \partial C$  - чувствительность канала передачи  $C$  к величине  $C$ ;

$K_{cr} = \partial y_r / \partial R$  - чувствительность канала передачи  $R$  к величине  $R$ ;

$K_{rc} = \partial y_c / \partial R$  - чувствительность  $C$ - канала к величине  $R$ ;

$K_{cr} = \partial y_r / \partial C$  - чувствительность  $R$ - канала к величине  $C$ .

Функцию преобразования системы можно представить матричным равенством:

$$\begin{pmatrix} y_c \\ y_r \end{pmatrix} = f \begin{pmatrix} K_{cc} & K_{cr} \\ K_{rc} & K_{rr} \end{pmatrix}$$

В общем случае выходной сигнал влагомера в операторной форме равен:

$$Y(p) = Y_c(p) + Y_r(p),$$

где  $Y(p)$ ,  $Y_c(p)$ ,  $Y_r(p)$  - преобразования Лапласа функций  $y(t)$ ,  $y_c(t)$  и  $y_r(t)$ .

Выходной сигнал  $y$  (рис.5.5б) может иметь комплексный характер и содержать информацию как о сигнале  $y_c$ , так и  $y_r$  без разделения этих сигналов. Примером могут служить измерительные цепи, определяющие значения полного сопротивления датчика. Существуют измерительные устройства, (например, мосты переменного тока с разделением составляющих полного сопротивления) у которых каналы измерения  $C$  и  $R$  автономны и выдают независимые друг от друга сигналы  $y_c$  и  $y_r$ , соответствующие емкостной и омической составляющим полного сопротивления датчика. Наконец, третья группа - это измерительные устройства, у которых влияние активной составляющей подавлено и выходной сигнал характеризует реактивное сопротивление первичного преобразователя.

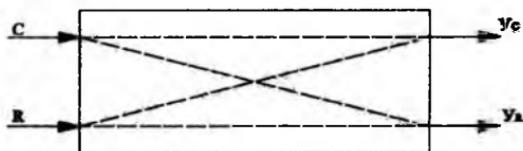
## ***5.2. Дизелькометрические высокочастотные влагомеры для хлопка-сырца, хлопковых семян и продуктов их переработки***

Из реализованных отечественных дизелькометрических влагомеров, работающих в диапазоне ВЧ, первые приборы для хлопка-сырца и хлопкового волокна были разработаны в ЦНИХБИ и ЦНИИХПроме еще во второй половине сороковых годов. Однако эти влагомеры по точности не удовлетворяли требованиям заготовительной системы и хлопковой промышленности.

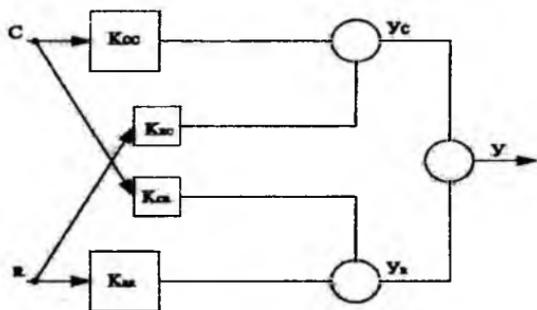
Из первых приборов для хлопка-сырца заслуживает внимания влагомер "Ташкент" (ИВХ-1), предназначенный для экспрессного

определения влажности хлопка перед отправкой на заготовительные пункты. По соображениям портативности измерительное устройство было собрано на полупроводниковых приборах с автономным источником питания.

Измерительное устройство состоит из генератора с рабочей частотой 30 МГц, измерительного колебательного контура с датчиком и индикатора напряжения на колебательном контуре (рис.5.6).



а)



б)

**Рис.5.5. Обобщенная схема измерительного устройства дизелькометрического высокочастотного влагомера.**

Генератор собран на транзисторе П-403 по схеме с емкостной обратной связью. Обратная связь осуществляется с помощью конденсатора С. Измерительный контур индуктивно связан с контуром генератора и состоит из катушки индуктивности L, регулирующего полупеременного конденсатора С<sub>4</sub> для настройки измерительного контура на частоту генератора, подстроечного конденсатора С<sub>5</sub> для установки прибора на нуль, измерительного конденсатора С<sub>6</sub> с отсчетной шкалой, проградуированной в единицах влажности, разделительного конденсатора С<sub>7</sub> и конденсатора - датчика С<sub>9</sub> для хлопка-сырца.

Датчик представляет собой систему из двух спаянных плоских конденсаторов, с общей высокопотенциальной пластиной. Процесс измерения влажности сводится к определению изменения емкости измерительного конденсатора с отсчетной шкалой до восстановления положения резонанса, нарушенного внесением в датчик хлопка.

Отсчет производится по максимуму силы тока, измеряемого микроамперметром. Влагомер позволяет измерять влажность хлопка-сырца в диапазоне 5-22 % при массе образца, равной 100г. Верхний предел измерения влажности можно увеличить до 30%, загружая в датчик образец массой в 50 г, для этого необходима соответствующая градуировка шкалы.

Первые образцы влагомеров были испытаны на заготовительном пункте "Кибрай" Ташкентской области. Испытания проводились на хлопке-сырце всех промышленных сортов ручного и машинного сбора, как с полевой, так и без полевой очистки. Результаты испытаний показали, что 100 анализов из 106 имели погрешность, не превышающую 1%. Наблюдалось некоторое снижение точности измерения при увеличении влажности.

Влагомеры были изготовлены опытными партиями в семидесятые годы. Существенным недостатком влагомера "Ташкент" является то, что сравнительно высокая точность достигается лишь при равновесном распределении влаги между компонентами хлопка-сырца. При нарушении этого условия погрешность заметно возрастает и доходит до 2% и больше.

Для устранения этого недостатка В.В. Казанский [2.5] предложил комбинированный способ измерения, в котором основным параметром, характеризующим влажность является емкость преобразователя, а параметром, корректирующим степень отклонения от равновесного распределения влаги -  $\text{tg}\delta$  преобразователя.

Таким образом, измеряемой величиной будет "эффективная емкость":

$$C_{\text{эф}} = A\varepsilon\text{g}\delta$$

где А и В - коэффициенты, зависящие от геометрических размеров датчика, условий измерения и параметров измерительной схемы.

Этот принцип был реализован в влагомерах "Узбекистан", разработанных в трех модификациях, отличающихся друг от друга особенностями измерительной схемы и диапазоном измерения влажности.

сти. Основным элементом измерительной схемы всех трех влагомеров является двухконтурный генератор ВЧ, у которого емкостной преобразователь включен в анодный колебательный контур. Для компенсации влияния затухания в анодном колебательном контуре, возрастающего с увеличением влажности, используется емкость контура сетка-катод.

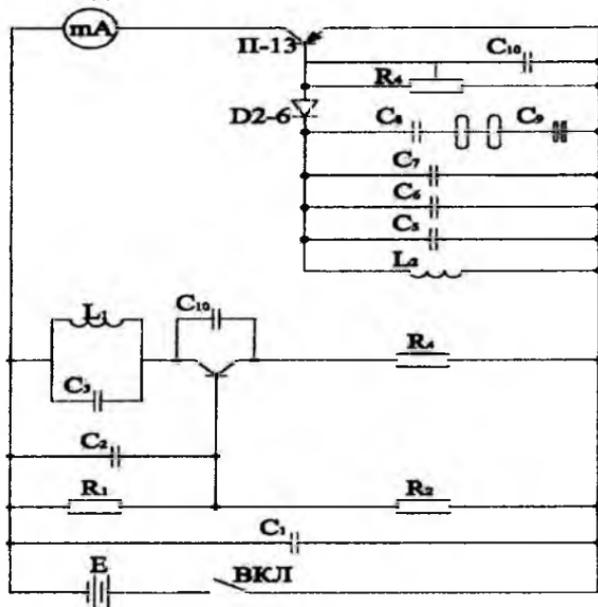


Рис. 5.6. Электрическая схема влагомера "Ташкент".

Приведем описание влагомера "Узбекистан-2", наиболее совершенного из рассматриваемой серии. Схема влагомера (рис.5.7) содержит кварцевый генератор, собранный на лампе 1К1П (с включением кварца между анодом и сеткой) и работающий на частоте 6 МГц. Колебательный контур генератора включает в себя индуктивность  $L$ , конденсаторы  $C_3$  и  $C_4$  для грубой подстройки частоты и установки генератора на срыв колебаний (установка нуля), измерительный конденсатор  $C_5$ , с осью которого связана шкала, проградуированная в % влажности, конденсатор  $C_7$  для ослабления связи датчика с колебательным контуром, датчик, связанный с контуром через разъемные контакты. В цепи сетка-катод находится сопротивление утечки  $R_1$  и конденсатор обратной связи  $C_1$ . Переменное сопро-

тивление  $R_2$  служит для регулировки тока канала, а переменное сопротивление  $R_5$  - для установки анодного напряжения. Сопротивления  $R_3$  и  $R_4$  - являются эквивалентной нагрузкой генератора. Кнопка  $КН_1$  включает генератор, а кнопка  $КН_2$  - цепь установки номинального анодного напряжения.

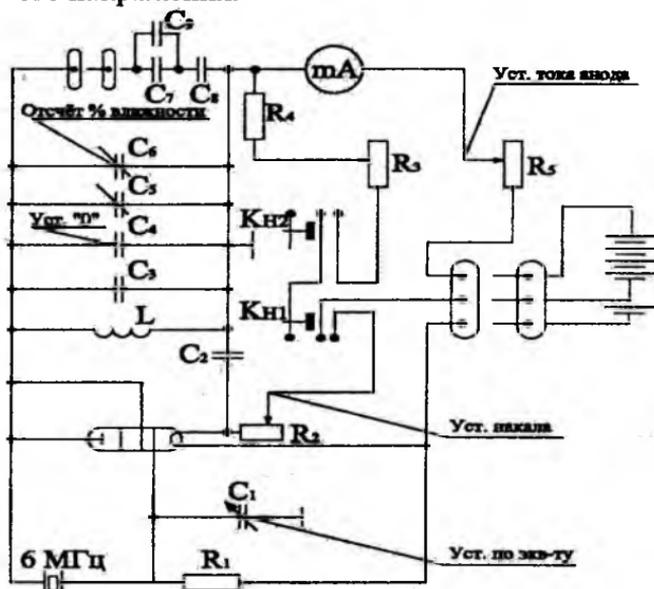


Рис. 5.7. Электрическая схема влагомера «Узбекистан-2»

Для поддержания постоянства коэффициента  $B$  в цепи сетка-катод установлен конденсатор переменной емкости  $C_1$ . Перед изменением конденсатор  $C_2$  (установка по эквиваленту) устанавливают в такое положение, чтобы конденсатор и сопротивление, подключенные одновременно, давали определенное, ранее установленное значение, указанное в заводском паспорте влагомера.

Таким образом, можно нейтрализовать влияние изменения параметров схемы на чувствительность схемы к потерям в датчике.

Влагомер "Узбекистан-2" имеет конденсаторный датчик с двумя плоскопараллельными пластинами, одну из которых образует дверца, прижимаемая двумя пружинами. Усилие прижатия устанавливается так, чтобы при уплотнении образца выше определенного предела происходило сжатие пружины, уменьшающее емкость датчика и компенсирующее изменение уплотнения.

Диапазон измерения влажности хлопка-сырца  $5 \div 25\%$ , масса образца  $100 \pm 0,5$  г. Опытная заводская партия прошла государственные испытания, однако в последующем эти влагомеры не нашли широкого применения.

Перейдем теперь к описанию разработанных в последние годы диэлектрических влагомеров для хлопковых семян и продуктов их переработки.

В НИИ энергетики и автоматики АН Узбекистана для хлопковых семян был разработан влагомер ИВХС-1. Он предназначен для лабораторных измерений. О влажности судят по величинам раздельно измеренных составляющих комплексной проводимости. Прибор измеряет емкость в диапазоне  $1 \div 435$  пФ, проводимости -  $1 \times 10^{-6} \div 50 \times 10^{-6}$  см на частотах 20 и 100 кГц.

Прибор (рис.5.8) состоит из блока питания БП, генератора Г, измерительного блока ИМ, блока усиления  $U_{oc}$ , ОУ, ПУ, индикатора и, амплитудного АД и кварцевого КД детекторов. Блок питания состоит из трансформатора, двухполупериодного выпрямителя, сглаживающего фильтра и стабилизатора напряжения. Трансформатор питается от сети переменного тока напряжением 220 В при частоте 50 Гц.

Генератор представляет собой сочетание двух каскадов усиления напряжения и двухтактного усилителя мощности, работает на двух фиксированных частотах - 100 и 20 кГц, которые выбираются переключателем. В схему введена глубокая обратная связь по переменному току, и положительная обратная связь через частотно-зависимый четырехполосник.

Измерительный блок представляет собой четырехплечий мост с индуктивно связанными плечами в цепи указателя, работающий в режиме квазиравновесия. Для уменьшения частотной погрешности моста и улучшения развязки контуров уравнивания в измерительную часть схемы введена параметрическая модуляция регулируемых параметров. Результаты производственных испытаний показали, что его погрешность составляет  $\pm 1\%$  абс., что ниже требований ГОСТа, но приемлемо для экспрессных измерений в процессе производства. Однако эксплуатация влагомера на нескольких хлопкомаслодобывающих предприятиях в районах с различным химическим составом воды выявила дополнительные погрешности от данного фактора. Кроме того, дополнительную погрешность измерений вызывает различная опущенность семян.

Для уменьшения указанных погрешностей была разработана усовершенствованная измерительная схема, реализованная в виде влагомера ИВХС-2, который также не нашел широкого применения.

Следующей модификацией этого прибора является влагомер ИВХС-3 для семян хлопчатника, основанный на зависимости емкости  $C$  и проводимости  $g$  от влажности материала, заполняющего конденсаторный датчик. Эти параметры измеряют раздельно на частоте 120 кГц с помощью моста переменного тока. Одновременно измеряется термометром сопротивления температура  $t$  материала мостом постоянного тока. Функциональная схема влагомера (рис.5.9) содержит конденсаторный датчик 1 с контролируемым материалом, включенный в мост переменного тока 6.

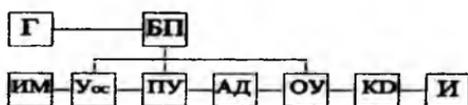


Рис.5.8. Функциональная схема влагомера ИВХС-1

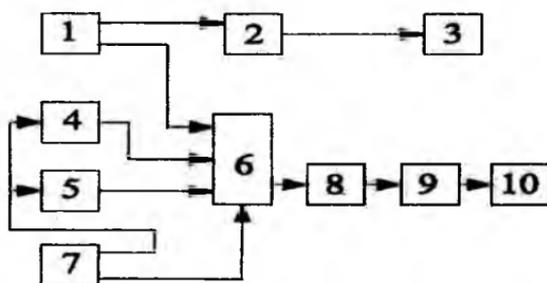


Рис.5.9. Функциональная схема влагомера ИВХС-3

Мост питает генератор 5 с рабочей частотой 120 кГц и модулятор 4, выдающий импульсы частотой 50 Гц при частоте заполнения 120 кГц. С выходом моста соединен избирательный усилитель 8, детектор 9 и амперметр 10. Синхронизация осуществляется блоком 7.

Термометр сопротивления, введенный в емкостной датчик, включен в мост постоянного тока 2, на выходе которого включен второй амперметр 3. Схема работает следующим образом: В зависи-

мости от температуры материала изменяется величина сопротивления термометра, которая измеряется при помощи моста постоянного тока методом компенсации. Затем производится измерение емкости конденсаторного датчика при положении "С" переключателя модулятора. При этом баланс моста не зависит от соотношения активных сопротивлений в его плечах, а только от фазового сдвига между опорными и модулированными колебаниями.

Баланс моста достигается компенсацией реактивной составляющей с помощью конденсаторного датчика путем изменения емкости образцового конденсатора, включенного в одну из плеч моста.

В положении "g" модулятора мост переменного тока разбалансируется из-за появления некоторого фазового сдвига между опорными и модулированными колебаниями. Вновь производится балансировка моста компенсацией активной составляющей конденсаторного датчика путем изменения образцового сопротивления в плече моста. Таким образом, достигается раздельное измерение активной и реактивной составляющих полного сопротивления конденсаторного датчика с влажным материалом, а также температуры материала.

Влажность определяется по параметрам  $c$ ,  $g$ ,  $t$  с помощью специальных градуировочных таблиц. Длительность одного определения влажности составляет 2,5 - 3 мин. Влагомер проходил лабораторные испытания в метрологической лаборатории ТашГТУ, лаборатории ЦПКТБ научного приборостроения АН РУз и на Кокандском масложиркомбинате. Однако, как и влагомеры ИВХС-1, ИВХС-2 он не нашел применения в производственных условиях.

В ТашГТУ разработан электровлагомер хлопковых семян, основанный на измерении при частоте 6 МГц емкости датчика и автоматической корректировке результата измерений по величине диэлектрических потерь. Такая схема позволяет уменьшить погрешность измерения влажности, вызванную неравномерностью распределения влаги по объему, влиянием температуры и концентрации электролитов.

Электрическая схема влагомера (рис.5.10) состоит из стабилизированного выпрямителя, кварцевого генератора, собранного на лампе 1Ж24Б, с колебательным контуром, включающим измерительный конденсатор  $C_6$  с отсчетной шкалой и датчик  $C_7$ . Емкость датчика измеряют по методу замещения емкостью  $C_6$ . Влияние ди-

электрических потерь компенсируется изменением крутизны генераторной лампы током ее накала с помощью резистора  $R_3$ . Параметром индикации при отсчете является срыв колебаний генератора, проявляющийся в резком увеличении (до максимального значения) анодного тока лампы. Масса пробы хлопковых семян составляет 800г.

Описанные влагомеры подтвердили возможность использования ВЧ диэлькометрического метода для экспрессного контроля влажности хлопковых семян в хлопкомаслоэкстракционном производстве.

Основным объектом, для которого данный метод дает положительные результаты, является хлопковое масло. Ниже приводится описание двух диэлькометрических влагомеров для растительного масла, нефтепродуктов и других неводных жидкостей.

Первый влагомер предназначен для растительного масла в диапазоне влажности 0,03 - 2,0%. Измерительное устройство влагомера основано на принципе биений (F- метр, рис.5.11).

Генераторы 2 и 4 вырабатывают непрерывные колебания частотой около 1 МГц. В контур генератора 2 включен датчик 1. Частота колебаний генератора 2 зависит от влажности материала, заполняющего датчик. Генератор 4 вырабатывает стабильные по частоте колебания. Колебания обоих генераторов поступают на смеситель 3. Колебания разностной частоты с выхода смесителя поступают на усилитель-ограничитель 5. На выходе усилителя получаются прямоугольные колебания низкой частоты. Частота этих колебаний зависит от влажности материала.

Прямоугольные колебания типа "меандр" с выхода усилителя - ограничителя поступают на формирователь 6, который в каждом периоде поступающих на него колебаний вырабатывает импульс постоянной длительности. Таким образом, скважность импульсов на выходе формирователя, следовательно, и их постоянная составляющая пропорциональны разностной частоте колебаний генераторов 2 и 4. Постоянная составляющая импульсов формирователя измеряется микроамперметром 7. Показания прибора 7 пропорциональны влажности материала, заполняющего датчик. Прибор имеет два диапазона измерения влажности 0 - 1% и 0 - 2%.

Второй влагомер основан на измерении комплексного сопротивления (проводимости) датчика на частоте 1МГц.

Влагомер предназначен для измерения влажности растительного масла с влагосодержанием 0,6 - 10%. В нем также применен конденсаторный датчик описанной выше конструкции (рис.5.3).

Генератор 1 вырабатывает (рис. 5.12) непрерывные колебания частотой 1 МГц. Эти колебания поступают в диагональ АВ измерительного моста, состоящего из резисторов 2, 3 датчика 4 и эталона 5. С диагонали ВС моста сигналы поступают на усилитель 6 и далее детектор 7. Микроамперметр 8 служит нагрузкой детектора. Датчик и эталон включен в смежные плечи моста, что позволяет осуществить компенсацию температурной погрешности. Эталон устроен аналогично датчику и отличается тем, что он помещен в закрытый сосуд, который, в свою очередь, погружен в исследуемый материал и заполнен эталонным материалом.

Испытания обоих влагомеров, выполненные в лабораторных и производственных условиях (Ташкентский масложиркомбинат), показали, что они обладают точностью, удовлетворяющей требованиям производства.

Основными тенденциями построения и дальнейшего развития современных диэлектрических влагомеров для хлопковых (как и других) материалов являются: использование современной элементной базы, обработка сигнала в цифровой форме выдачи информации, сопряжение с микропроцессорами и микро-ЭВМ.

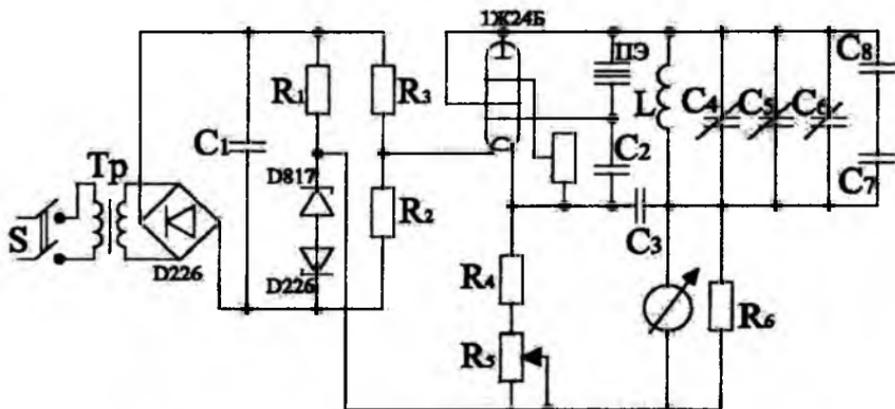
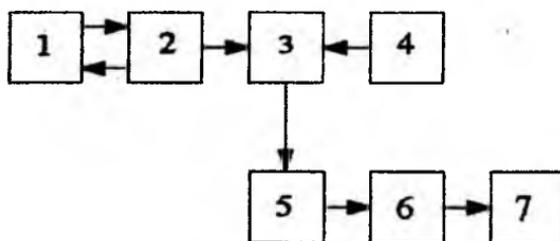
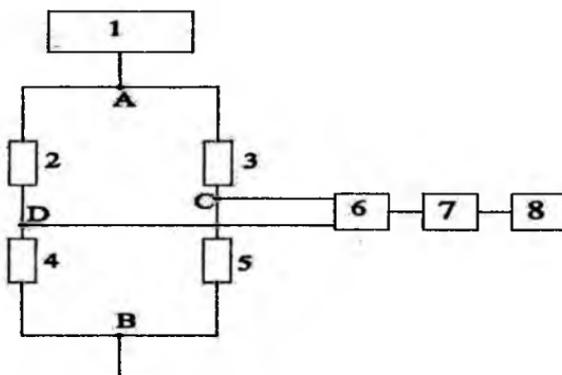


Рис.5.10.Электрическая схема влагомера ТашГТУ



**Рис.5.11. Функциональная схема влагомера ТашГТУ для хлопкового масла**



**Рис.5.12. Функциональная схема высокочастотного влагомера**

В измерительных устройствах влагомеров часто применяют модульный принцип построения, при котором все узлы реализуются набором модулей, т.е. элементов, выполняющих определенные (стандартные) функции и имеющих законченное конструктивное оформление. В качестве таких элементов широкое применение находят интегральные схемы, причем характерным является использование, наряду с обычной полупроводниковой, специфических схемных решений микросхемотехники.

Независимо от описанных усовершенствований, сфера применения для хлопковых материалов диэлькометрических ВЧ влагомеров определяется, главным образом, их метрологическими характеристиками при применении к этим разнообразным и сложным материалам.

Рассмотренные выше результаты испытаний ВЧ-диэлькометрических влагомеров подтвердили принципиальную возможность их применения в хлопкоперерабатывающих отраслях промышленности, в первую очередь - в производстве хлопкового масла. Доказано, что лабораторные влагомеры этого типа могут успешно использоваться для дискретных измерений влажности хлопкового масла, хлопковых семян и продуктов их переработки в промышленных условиях.

Пока еще нет опыта применения ВЧ диэлькометрических влагомеров для указанных материалов в качестве приборов полевого и поточного типов. Самым уязвимым местом диэлькометрических влагомеров являются отрицательные результаты их применения для хлопка-сырца. Несмотря на многочисленные попытки разработки и усовершенствования ВЧ диэлькометрических влагомеров для хлопка-сырца [5.2,5.3], не удалось создать прибор, обеспечивающий необходимую точность измерения. Отметим, что наиболее существенные составляющие погрешности связаны с неравномерностью распределения влаги и неоднородностью структуры хлопка.

Влияние указанных факторов существенно уменьшается при переходе к измерениям по диэлькометрическому методу на СВЧ, причем этот метод обладает и другими преимуществами метрологического, технического и экономического характера. Можно сделать вывод, что для решения поставленной и обоснованной нами задачи - создание единого комплекса технических средств измерения влажности хлопка-сырца и хлопковых материалов в сельскохозяйственном производстве, заготовительной системе и хлопкоперерабатывающих и других отраслях наиболее перспективным является метод СВЧ [5.4, 5.5, 5.6].

# ГЛАВА VI. ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА-СЫРЦА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

## *6.1 Теоретические основы и классификации СВЧ методов измерения влажности*

СВЧ методы измерения влажности твердых материалов и жидкостей основаны на взаимодействии радиоволн СВЧ с влагосодержащим материалом, причем информативным параметром служат интегральные характеристики различных свойств первичных преобразователей. К диапазону СВЧ относят радиоволны длиной волны от 1м до 1мм; во влагометрии используют преимущественно сантиметровые волны, реже - дециметровые и миллиметровые. В этом диапазоне частот первичные измерительные преобразователи представляют собой электромагнитные системы с распределенными параметрами и, хотя в основе СВЧ-влагомеров лежит диэлькометрический метод, принципы их построения существенно отличаются от принципов построения ВЧ-влагомеров диапазона длинных, средних и коротких волн, у которых первичные преобразователи можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами.

Исходя из приведенного определения, нельзя относить к СВЧ влагомерам устройства, у которых энергия СВЧ поля используется для удаления влаги из исследуемого материала, например, термогравиметрические влагомеры, описанные в главе 7.

Переход от диэлькометрических измерений влажности в диапазоне 0,5 - 50 МГц к диапазону СВЧ был вызван стремлением улучшить характеристики диэлькометрических влагомеров путем повышения их рабочей частоты. В частности, это относится к повышению точности влагомеров, благодаря уменьшению влияния химического состава и некоторых других параметров на результат измерения влажности.

Предпочтение, отдаваемое в СВЧ-влагометрии сантиметровому диапазону, связано с рядом причин: во-первых, с областью дисперсии диэлектрических свойств полярных жидкостей. Как уже указывалось в главе 2, для воды частота, соответствующая времени релаксации ориентации диполей в электрическом поле, т.е. максимальному поглощению энергии, находится в сантиметровом диапазоне. Следствием этого является высокая чувствительность СВЧ-

влагомеров сантиметрового диапазона. Во-вторых, определенную роль сыграли распространенность и доступность элементов волноводного тракта, регулирующих и других устройств, необходимых для построения СВЧ-влагомеров, в так называемой "X-полосе", т.е. для частот, близких к 3,2см. Другие особенности диапазона станут понятными при рассмотрении в последующих параграфах метрологических и других характеристик СВЧ-влагомеров.

Экспериментальные исследования параметров диэлектриков в диапазоне СВЧ были начаты еще в конце XIX века, главным образом на основе метода Друде-Кулиджа с использованием двухпроводной системы Лехера. Этот метод использовался, например, для исследования электрических свойств влагосодержащих нефти и нефтепродуктов в диапазоне метровых и дециметровых волн [6.1]. Широкое развитие исследования диэлектриков на СВЧ получили, начиная с сороковых годов, на основе современной техники СВЧ.

Однако принципиальные различия в целях и условиях измерений не позволяют механически перенести эти методы и средства в влагометрию по следующим причинам:

- значения  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  влагосодержащих материалов значительно выше и физико-химические свойства (плотность, химический и гранулометрический состав и т.д.) этих материалов существенно менее стабильны, чем у большинства диэлектриков, используемых в электротехнике и радиотехнике;

- измерению диэлектрических характеристик подвергаются однородные образцы материала заданной формы и размеров, тогда как материал, подлежащий контролю влажности (особенно в технологическом потоке), может быть неоднородным по толщине, плотности и влажности и иметь различную геометрическую форму и размеры;

- при измерении влажности числовые значения диэлектрических характеристик материала не определяются: факторы, влияющие на эти характеристики, кроме влажности, снижают точность измерения влажности;

- измерения диэлектрических характеристик материалов производятся в лабораторных условиях высококвалифицированным персоналом, сложность аппаратуры определяется требованиями к точности измерений, а время, необходимое для проведения анализа, как правило, не является решающим фактором.

Требования при контроле влажности – простота и надежность средств измерения, нормальная работа их в сложных условиях производства. Для работы в составе АСУТП необходимо высокое быстродействие влагомеров и автоматический вывод результатов измерений для возможности сопряжения их с автоматическими устройствами обработки, хранения и передачи информации, а также с устройствами автоматического управления технологическими процессами.

Начало СВЧ-влагометрии было положено во второй половине пятидесятых годов, когда были разработаны первые СВЧ-влагомеры Ю.Э.Недзвецким [6.2] для древесины и А. Ясукавой в Японии [6.3] – для вискозной целлюлозы. Оба прибора работали на принципе измерения затухания, вносимого материалом, находящимся в свободном пространстве (древесина) или пропускаемым через щель в волноводе (лист целлюлозы). В обоих приборах источником СВЧ колебаний служит клистронный генератор.

Последующие десятилетия характеризовались интенсивным развитием техники и теории СВЧ измерения влажности. В СНГ и других странах были разработаны и усовершенствованы различные модификации СВЧ методов и на их базе созданы многочисленные конструкции СВЧ-влагомеров дискретного и непрерывного действия для твердых материалов и жидкостей. Имеется обширная литература, посвященная СВЧ влагометрии и ее применению в науке и технике, из которой отметим работы [6.4, 3.6, 3.9, 6.5] и обзор зарубежных работ [6.6,6.7].

Рассмотрим теперь функцию преобразования СВЧ-влагомера, для аналитического описания которой воспользуемся методикой, примененной в главе 4 для диэлькометрических ВЧ-влагомеров.

Математической моделью преобразования влажности материала в его диэлектрические параметры, т.е. первого звена обобщенной структурной схемы влагомера, показанной на рис. 4.2, и в данном случае могут служить диэлектрические формулы смесей.

Как уже указывалось в 4.2, иногда в СВЧ влагометрии используют простейшую аддитивную модель, соответствующую представлению влагосодержащего твердого материала как совокупности трех прилегающих слоев – сухого вещества, воды и воздуха, имеющих конечную толщину. Ввиду очевидного несовершенства этой модели чаще применяют более сложные формулы смесей, в первую очередь формулы Винера и Бругемана, в эти формулы вводят эмпирические

коэффициенты для учета влияния формы связи влаги с сухим веществом.

Поиски более совершенной математической модели продолжают. Так, например, в последние годы для СВЧ влагометрии сыпучих материалов была предложена трехзвенная формула, основанная на формуле Бира (см.п.4.2):

$$\sqrt{\epsilon_m} = f_B \sqrt{\epsilon_B} + f_G \sqrt{\epsilon_G} + f_C \sqrt{\epsilon_C}$$

где  $\epsilon_m$ - диэлектрическая проницаемость материала;

$\epsilon_i$  (i=в,г,с) – диэлектрическая проницаемость i-го компонента;

$f_i$  (i=в,г,с) – объемное содержание i-го компонента ( $f_B + f_G + f_C = 1$ )

(индексы i=в,г, с относятся соответственно к воде, воздуху и сухому веществу).

В работе [6.6] было выполнено сравнение экспериментальных данных, полученных для некоторых двухфазных диэлектрических смесей (водная суспензия минеральных частиц, стеклянные шарики в  $CCl_4$ , водная эмульсия  $C_6H_5NO_2$  и др.) с различными диэлектрическими формулами.

Автор пришел к выводу, что наилучшее согласование экспериментальных и теоретических данных при самой различной форме включений обеспечивают следующие формулы:

$$\epsilon_m = [\epsilon_0^{1/2} + f_i (\epsilon_i^{1/2} - \epsilon_0^{1/2})]^2$$

$$\epsilon_m = [\epsilon_0^{1/3} + f_i (\epsilon_i^{1/3} - \epsilon_0^{1/3})]^3,$$

где  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_i$  - диэлектрические проницаемости, соответственно, смеси,

дисперсионной среды и дисперсной фазы;

$f_i$  - объемное содержание дисперсной фазы ( $f_0 + f_i = 1$ ).

Следует отметить, что вторая из приведенных формул совпадает с полученным Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшицем [6.8].

В целом и на СВЧ методы можно распространить вывод, сделанный для ВЧ-диэлькометрии, о том, что для сложных водосодержащих гетерогенных систем, к которым принадлежат хлопок и хлопковые материалы, еще нет достаточно точных моделей преобразования "влажность - диэлектрические параметры" и наиболее надежным источником получения этих моделей остаются экспериментальные характеристики. Эти характеристики хлопка-сырца, его компонентов и продуктов переработки рассматриваются ниже в п.п 6.2 и 6.3.

Что касается остальных двух звеньев структуры влагомера СВЧ, то третье звено - измерительное устройство влагомера, преобразующее выходной сигнал датчика в выходной сигнал влагомера, базируется на принципах радиоизмерительной техники. СВЧ измерительные приборы этого типа описаны в соответствующей литературе (например [6.9, 6.10, 6.11]).

Наибольшее значение имеет описание второго звена - первичного измерительного преобразователя влагомеров. Математическая модель этого звена зависит от типа (конструкции) первичного преобразователя и его выходной величины. Как уже отмечалось, СВЧ первичные преобразователи представляют собой взаимодействующие с исследуемым материалом электромагнитные системы различных типов с распределенными параметрами. Практическое применение нашли антенные устройства (рупорные, щелевые, штыревые) - волноводы, полосковые и коаксиальные линии; резонаторы объемные и другие резонансные системы.

В качестве выходных сигналов СВЧ первичных преобразователей используют различные интегральные характеристики перечисленных электромагнитных систем. Наиболее часто в СВЧ-влагометрии используют следующие характеристики:

- мощность или амплитуду прошедшей через объект измерения или отраженной от него радиоволны;
- фазовый сдвиг прошедшей или отраженной волны.

Указанные величины характеризуются также затуханием (ослаблением), вносимым преобразователем с исследуемым материалом, или модулем и (или) аргументом комплексных величин: постоянной распространения, коэффициентов пропускания и отражения.

Другие используемые характеристики:

- резонансная частота и добротность резонансной системы, т.е. модуль и аргумент ее комплексной круговой частоты;
- полное входное сопротивление и его составляющие, например, антенных СВЧ зондов.

Значительно реже находят применение такие характеристики, как изменение поляризации прошедшей или отраженной волны или длительность (время) распространения электромагнитной волны. Последняя характеристика используется в эмульсионных системах радиолокационного типа, редко применяемых в влагометрии, а также во временной рефлектометрии (Time domain reflectometry -

TDR) - одного из наиболее совершенных методов измерения электрических свойств диэлектриков [6.12].

Рассмотренные особенности первичных СВЧ-преобразователей их тип и используемая интегральная характеристика могут служить основой классификации не только самых СВЧ-датчиков, но и методов СВЧ-влажнометрии. Значение этой классификации определяется тем, что за последние десятилетия разработаны и применяются многие методы СВЧ-влажнометрии. При решении конкретных задач получения информации о влажности необходимо выбрать метод, оптимальный, с точки зрения метрологических, эксплуатационных, экономических и других характеристик, с учетом конкретных условий измерений и свойств объекта измерения.

В связи с этим были предложены различные признаки для классификации СВЧ-методов. Так, в работе В.К.Бензаря выделены методы, основанные на измерении диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от влажности и методы, основанные на измерении оптических характеристик влажных материалов - коэффициентов поглощения и отражения.

В работе М.А.Берлинера методы классифицируют следующим образом: методы свободного пространства (с использованием проходящей и отраженной волн), резонаторные и волноводные. Здесь же указаны методы, не применяющиеся широко во влажнометрии - зондовые, поверхностной волны, основанные на повороте плоскости поляризации.

В первой из приведенных классификаций перечислены параметры материала, зависящие от влажности, которые могут быть измерены на СВЧ, во второй - способы локализации электромагнитного поля в контролируемом материале. По нашему мнению, классификацию СВЧ методов измерения влажности следует проводить на основе взаимодействия электромагнитного поля с влажным материалом. На результат взаимодействия может влиять не только влажность материала, но и другие его характеристики (толщина, поверхностная влажность, диапазон измерения влажности и т.п.). При такой классификации появляется возможность учитывать эти влияния и более обоснованно выбирать метод измерений.

Классификацию для последовательной оценки методов будем строить от общего к частному. Общий результат взаимодействия электромагнитного поля СВЧ с влажным материалом - возникнове-

ние отраженной от материала и проходящий через него волн. Частные случаи (падение волны на материал под углом Брюстера, а также явление полного внутреннего отражения) исключены из рассмотрения ввиду их малого прикладного значения в СВЧ - влагометрии. Разделение на методы с использованием отраженной или проходящей волны может служить первым классификационным признаком.

Влажность материала, от которой зависят его диэлектрические характеристики, влияет на параметры взаимодействующего с ним поля. Деление на методы по измеряемому параметру электромагнитной волны служит вторым классификационным признаком.

В СВЧ-влагометрии наиболее распространены методы, основанные на измерении одного из параметров - амплитуды, фазы или частоты проходящей через материал или отраженной от него волны. Однако для получения более точной информации о влажности и устранения влияния мешающих факторов используются и комбинации этих методов. Для введения материала в поле СВЧ применяют антенны, волноводы, объемные резонаторы и зонды. Использование во влагомерах одного из перечисленных элементов - третий признак данной классификации, схема которого приведена на рис.6.1.

Рассмотрим теперь функцию преобразования, наиболее распространенного СВЧ преобразователя влажности на принципе измерения в свободном пространстве, приняв при этом некоторые упрощающие допущения.

Будем рассматривать нормальное падение плоской волны на плоскопараллельный слой бесконечной протяженности и конечной толщины  $l$ -«эм», причем материал является однородным и его диэлектрические свойства не зависят от координат, перпендикулярных направлению распространения волны. Для этого необходимо выполнение условия:

$$l > \lambda = 2\pi C / \omega$$

где  $l$  - размер (толщина) слоя по направлению распространения волны;  $C$  - скорость света.

В этом случае (рис.6.2), ввиду различия электромагнитных свойств материала и среды, в которой распространяется волна, возникает отраженная волна, и мощность прошедшей волны будет равна:

$$P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}$$

где  $P_{\text{прош}}$ ,  $P_{\text{пад}}$ ,  $P_{\text{отр}}$  - мощности, соответственно падающей, прошедшей и отраженной волн.

Ослабление, характеризующее потери СВЧ мощности, будет функцией электромагнитных свойств материала и среды, определяющих значения их комплексных постоянных распространения:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

где  $\alpha$ - коэффициент затухания;

$\beta$ - фазовая постоянная.

Составляющие постоянной распространения связаны с электромагнитными свойствами среды и материала известными соотношениями:

$$\alpha = 2\pi / \lambda \sqrt{\epsilon' \mu / 2 (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)} ; \quad \beta = 2\pi / \lambda \sqrt{\epsilon' \mu / 2 (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} + 1)}$$

где:  $\text{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon'$  - тангенс угла диэлектрических потерь.



Рис.6.1. Классификация СВЧ методов измерения влажности твердых материалов и жидкостей

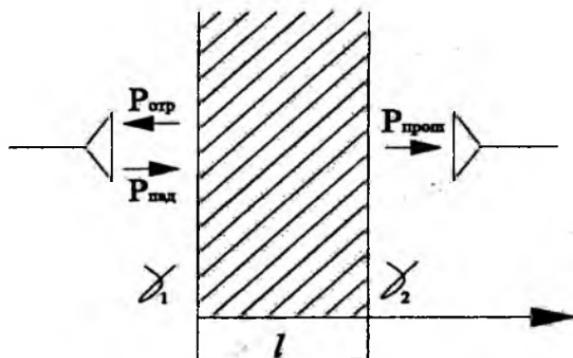


Рис.6.2. Схема первичного преобразователя в свободном пространстве.

В самом материале ослабление мощности описывается экспоненциальным законом:

$$P_{\text{прош}} = P_{\text{над}} e^{-\alpha_2 l},$$

Необходимо, однако, принять во внимание двухкратное отражение волны на границах слоя материала, т.е. на входе и выходе слоя. Систему показанную на рис.6.2 можно рассматривать, как линейный обратимый пассивный и симметричный четырехполосник, включенный между однородными линиями.

Методами теории четырехполосников можно определить матрицу рассеяния данного четырехполосника, приводящую к следующему выражению квадрата коэффициента пропускания через составляющие комплексной постоянной распространения [6.13]:

$$|S_{12}|^2 = \frac{[(1-\Gamma_{12})^2 + 4\Gamma_{12} \sin^2 \varphi_{12}] e^{-2\alpha_2 l}}{[(1-\Gamma_{12} e^{-2\alpha_2 l})^2 + 4\Gamma_{12} e^{-2\alpha_2 l} \sin^2(\varphi_{12} + \beta_2 l)]},$$

где  $\Gamma_{12} = \Gamma_{21}$  - коэффициент отражения поверхности воздух материал;

$\varphi_{12}$ - фаза коэффициента отражения;

где  $\alpha_1, \beta_1$  и  $\alpha_2, \beta_2$  - коэффициенты затухания и фазовые постоянные, соответственно воздуха и материала.

Общие потери мощности электромагнитной волны, прошедшей через слой материала, выраженные в децибелах, равны:

$$\begin{aligned} N &= 10 \lg P_{\text{прош}} / P_{\text{над}} \\ N &= -20 \lg |S_{12}| = 8,68\alpha_2 l - 4,343 \ln [(1-\Gamma_{12})^2 + 4\Gamma_{12} \sin^2 \varphi_{12}] + \\ &+ 4,34 \ln [(1-\Gamma_{12} e^{-2\alpha_2 l})^2 + 4\Gamma_{12} e^{-2\alpha_2 l} \sin^2(\varphi_{12} + \beta_2 l)] \end{aligned}$$

Это выражение можно упростить, выразив синусы через функции двойного угла и пренебрегая величинами второго порядка малости.

Тогда

$$\begin{aligned} N &\approx 8,68\alpha_2 l - 4,343 \ln (1-\Gamma_{12} \cos 2\varphi_{12}) + \\ &+ 4,343 \ln [1-2\Gamma_{12} e^{-2\alpha_2 l} \cos 2(\varphi_{12} + \beta_2 l)] \end{aligned}$$

Дальнейшего упрощения можно достичь, учитывая, что как следует из (6.1), угол меняется очень медленно и при низкой влажности  $\cos \varphi_{12} \approx 1$ , далее  $|\Gamma_{12}| < 3$  и  $e^{-2\alpha_2 l} \ll 1$  что позволяет получить приближенную формулу:

$$N = 8,68(\alpha_2 l + \Gamma_{12} - \Gamma_{12} e^{-2\alpha_2 l} \cos 2\beta_2 l)$$

На практике часто допускают идеализацию рассмотренной системы, соответствующую приближению геометрической оптики (т.е. без учета отражений). Такая гипотеза близка к действительности при значительной толщине слоя  $l$  и больших потерях в материале. При ней имеют место изменения амплитуды и фазы прошедшей волны:

$$\Delta a = \ln(E(0)/E(l)) \int_0^l \alpha dx ; \quad (6.2)$$

$$\Delta \varphi = \int_0^l [\beta(x) - 2\pi/\lambda] dx , \quad (6.3)$$

где  $x$  - координата по направлению распространения волны.

$E(0)$ ,  $E(l)$  - напряженность поля для  $x = 0$  и  $x = l$ .

Выражения (6.2) и (6.3) показывают, что выходные сигналы первичного преобразователя характеризуют интегральные (усредненные) свойства материала на пути волны. Измерение интегральной влажности - это важное достоинство рассматриваемого метода для хлопка и хлопковых материалов, неоднородность которых уже подчеркивалась нами.

Если распространить и на эти материалы допущение об их однородности, определяющей независимость от координаты их диэлектрических параметров  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ , то формулы (6.2) и (6.3) примут вид:

$$a = \alpha l \quad (6.4)$$

$$\Delta \varphi = l(\beta - 2\pi/\lambda) \quad (6.5)$$

Подставляя в (6.4) и (6.5) выражений для  $\alpha$  и  $\beta$  (с учетом того, что для хлопка и хлопковых материалов магнитная проницаемость  $\mu=1$ ) получим следующие формулы для вычисления ослабления  $A$  в децибеллах и фазового сдвига  $\Delta \varphi$  (относительно воздуха) в радианах:

$$A = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{\epsilon''/2(\sqrt{1 + i g^2 \delta} - 1)} ;$$

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi l}{\lambda} \sqrt{\epsilon''/2(\sqrt{1 + i g^2 \delta} + 1)} .$$

Эти формулы являются приближенными и не могут использоваться, например, для расчетной градуировки влагомеров. В то же время, они показывают, что оба информативные параметры выход-

ного сигнала СВЧ преобразователя рассматриваемого типа являются функциями  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  исследуемого материала (слагаемая  $\text{tg}^2\delta = (\epsilon''/\epsilon')$  под радикалом).

Пренебречь влиянием потерь можно только при условии, что  $\text{tg}\delta \ll 1$  (т.е. для хлопковых материалов при влажности  $W \Rightarrow 0$ ). Тогда величины  $A$  и  $\Delta\varphi$  можно рассматривать как функции одной лишь вещественной диэлектрической проницаемости:

$$A \approx 2\pi l / \lambda \sqrt{\epsilon'/2 - 1},$$

$$\Delta\varphi = 2\pi l / \lambda \sqrt{\epsilon' - 1}.$$

При измерениях в волноводах следует учитывать, что длина волны

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} = \lambda / \sqrt{1 - p^2},$$

где  $\lambda$  - длина волны в свободном пространстве;  $\lambda_{кр}$  - критическая длина волны;

$$p = \lambda/\lambda_{кр}.$$

Постоянное распространение выражается как

$$\gamma = \alpha + j\beta = j2\pi/\lambda (\epsilon' - p - j\epsilon'')^{1/2}.$$

Принятая выше идеализация материала - допущение о его изотропности - является наиболее споримой в случае хлопка-сырца - материала, отличающегося значительной неоднородностью, причины и проявления которой были рассмотрены в главе 2.

Неоднородность хлопка-сырца имеет существенное значение при измерениях его влажности СВЧ методами. В частности, она препятствует применению методов, основанных на отражении электромагнитной волны, так как эти методы дают информацию лишь о свойствах тонкого приповерхностного слоя материала, недостаточную для оценки его интегральной влажности. В измерениях с использованием проходящей волны погрешности могут вызывать неоднородность хлопка-сырца по плотности в направлении распространения волны и рассеяние энергии СВЧ поля на семенах.

Указанные источники погрешностей были исследованы в работах [2.6] и [2.8]. Было показано, что увеличение толщины образца в направлении распространения падающей волны увеличивает число слоев различной плотности, но существует оптимальная толщина, соответствующая минимальной погрешности. СВЧ метод ослабления позволяет увеличить массу лабораторной пробы до массы

среднедневного образца, причем точность измерения возрастает с ростом массы пробы, что является одним из преимуществ СВЧ метода.

Ослабление СВЧ излучения хлопком-сырцом с учетом рассеяния на семенах (с пренебрежением отраженной мощностью) выражается формулой:

$$A, \text{ дБ} = 10 \lg \left( P_{\text{рас}} / P_{\text{пад}} \right) = 10 \lg \frac{P_{\text{пад}} - P_{\text{рас}}(B, n)}{P_{\text{пад}}}$$

где  $P_{\text{рас}}(v, n)$  - мощность, рассеяния на семенах, являющаяся функцией размера семян  $B$  и их количества  $n$  в единице объема хлопка-сырца.

При оптимальном выборе параметров первичного преобразователя относительная погрешность измерения влажности, обусловленная рассеянием на семенах, находится в пределах от долей % до 1,5%.

Приведенные соображения подтверждаются опытом практического применения влагомера СВЧ для хлопка-сырца, а также результатами их экспериментального исследования, рассматриваемыми в следующем параграфе.

Наибольшее распространение получили СВЧ методы, основанные на измерении параметров проходящей волны в свободном пространстве. Для влагометрии хлопковых материалов большее значение имеет сравнение двух разновидностей этих методов – амплитудной и фазовой – с целью выбора оптимального метода и разграничения областей применения обоих методов.

В литературе имеются некоторые данные о метрологических характеристиках обоих методов применительно к определенным материалам. Так, в работе [6.14] сравниваются амплитудный и фазовый методы измерения влажности измельченного угля в диапазоне 110 МГц – 8 ГГц. Автор исследовал влияние неинформативных параметров угля (плотность, содержание электролитов, гранулометрический состав, сорт, зольность, температура) на погрешность измерений его влажности. Влияние некоторых параметров (сорт, зольность) пренебрежимо мало в обоих методах. Погрешности от изменений температуры, размеров частиц и концентрации электролитов меньше при измерении фазового сдвига, что привело автора к выводу о большей точности фазового метода.

Результаты, полученные в исследованиях такого рода, тесно связаны со специфическими особенностями исследуемых материалов и их обобщение требует большой осторожности. Нельзя также упускать из виду вопросы практической реализации СВЧ-влагомеров обоих типов. Фазовые влагомеры значительно сложнее и дороже амплитудных по ряду причин, таких как необходимость в дополнительном измерительном канале для компенсации затухания, отсутствие достаточно простых и точных фазовращателей для диапазона 0 -360°, неоднозначность результата измерения ввиду периодического характера измерительного сигнала (фазового угла). Все это очень усложняет построение фазовых СВЧ-влагомеров, в частности – автоматических [6.15].

Для СВЧ-влагомеров хлопковых материалов основной фактор, влияющий на точность, это неоднородность этих материалов. В связи с этим мы исследовали влияние на точностные показатели амплитудного и фазового СВЧ методов непостоянства массы и степени неоднородности материала в первичном преобразователе.

Непостоянство массы  $dM$ , соответствующе переменным технологическим потокам, вызывает погрешность измерения влажности  $dW$ , определяемую соотношением чувствительностей информативного параметра к массе ( $S_m$ ) и к влаге ( $S_w$ ):

$$dW = S_m / S_w dM$$

Для аналитического описания указанных чувствительностей использовались три модели влагосодержащего материала. Первая, наиболее простая, представляет материал, состоящий из двух компонентов: скелета и свободной воды; вторая – многокомпонентная, рассматривает воду в разных формах связи; третья – учитывает непрерывное изменение средней энергии связи влаги с материалом при изменении влажности. Для двух последних моделей принято допущение о прямой пропорциональности зависимости ослабления и фазового сдвига в единице массы материала от его влажности.

Исходя из простейшей аддитивной модели материала, зависимости ослабления  $A$  и фазового сдвига от влажности  $W$  и массы  $M$  материала можно описать уравнениями:

$$\begin{aligned} A &= [K_a(W)W + K_{aM}(1-W)]M \quad ; \\ \varphi &= [K_{\varphi B}(W)W + K_{\varphi M}(1-W)]M \quad , \end{aligned}$$

где  $M$  – масса материала;

$W$  – влажность материала в долях единицы;

$K_{ам}$  и  $K_{фм}$  — соответственно ослабление и фазовый сдвиг в сухом материале единицы массы;

$K_{аб}$  и  $K_{фб}$  — ослабление и фазовый сдвиг в единице массы вободной воды:

$$K_o = K_{ам} + (K_o - K_{ам})W \quad ;$$

$$K_{\varphi} = K_{фм} + (K_{фб} - K_{фм})W \quad .$$

Погрешности измерения влажности амплитудным и фазовым методом вследствие изменения массы исследуемого материала на величину  $dM$  будут:

$$dW_A = \left[ W + \frac{1}{\frac{K_o}{K_{ам}} - 1} \right] dM / M \quad ;$$

$$dW_{\varphi} = \left[ W + \frac{1}{\frac{K_{\varphi б}}{K_{фм}} - 1} \right] dM / M \quad .$$

Из последних выражений следует, что соотношение погрешностей  $dW_A$  и  $dW_{\varphi}$  зависит от соотношения величин  $(K_{аб} / K_{ам})$  и  $(K_{фб} / K_{фм})$ . Эти величины были рассчитаны нами по формулам для  $A$  и  $\Delta\varphi$  (стр.211) с учетом известных значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  воды и сухого хлопка. Были получены значения:

$$K_{аб} / K_{ам} \approx 20 \quad ; \quad K_{фб} / K_{фм} \approx 4 \quad ,$$

т.е.

$$K_{аб} / K_{ам} > K_{фб} / K_{фм} \quad .$$

откуда следует, что  $dW_A < dW_{\varphi}$  .

Следовательно, с принятыми допущениями, при непостоянстве массы материала погрешность амплитудного метода меньше, чем фазового.

Если перейти к более сложной модели, учитывающей наличие в исследуемом материале  $n$  форм связи с сухим веществом, выражения для  $A$  и  $\varphi$  примут вид:

$$A = \left[ \sum_{i=1}^n K_{a_i} W_i + K_e \left( 1 - \sum_{i=1}^n W_i \right) \right] M \quad \left\{ \right.$$

$$\varphi = \left[ \sum_{i=1}^n K_{\varphi_i} W_i + K_{\varphi} \left( 1 - \sum_{i=1}^n W_i \right) \right] M \quad \left. \right\} \quad (6.6)$$

где  $K_{\alpha bi}$  и  $K_{\phi bi}$  соответствуют ослаблению и фазовому сдвигу в воде  $i$ -ой формы связи;  $W_i$  - количество влаги  $i$ -ой формы связи. Для расчета  $dW_A$  и  $dW_\phi$  в этом случае необходимо знание коэффициентов  $K_{\alpha bi}$  и  $K_{\phi bi}$ , а также  $W_i$ .

Однако, как уже отмечалось, современное состояние теории влагосодержащих гетерогенных систем не дает возможности количественного определения указанных величин. Тем более неизвестны зависимости этих величин от энергии связи (влагосодержания).

Качественный анализ выражений (6.5) приводит к суждению о возможности распространения и на этот случай выводов, полученных для  $dW_A$  и  $dW_\phi$  в виде простейшей модели, т.е. при  $n = 1$ . Это подтверждается также результатами экспериментальных исследований фазового и амплитудного методов на хлопковых семенах при их непостоянной массе.

При влажности семян в диапазоне 6-17% и нестабильности массы, равной  $\pm 5\%$ , абсолютная погрешность измерения фазовым методом составит  $\pm 1,8 \div 3,1\%$ , а амплитудным  $\pm 0,4 \div 0,6\%$ .

Влияние неоднородности материала по толщине исследовалось при помощи двух физико-математических моделей неоднородного материала, показанных на рис.6.3. Физический смысл модели в виде двух плоскопараллельных ступеней, толщиной  $(l-\Delta l)$  и  $(l+\Delta l)$ , причем размеры обеих ступеней равны и значительно превышают длину волны - это предельный случай изменений толщины слоя материала, например, хлопка на ленте транспортера. Вторая модель типа "клин" соответствует естественному углу откоса насыпи сыпучих материалов, например, хлопковых семян.

У двухступенчатой модели (рис.6.3а) потоки, прошедшие через более высокую и более низкую ступени, равны соответственно:

$$\Phi_1 = (E_0 S / 2) \exp\{-\alpha(l + \Delta l) + j[\omega t + \beta_0(z - l - \Delta l) + \beta(l + \Delta l)]\};$$

$$\Phi_2 = (E_0 S / 2) \exp\{-\alpha(l - \Delta l) + j[\omega t + \beta_0(z - l + \Delta l) + \beta(l - \Delta l)]\}.$$

где  $\alpha, \beta$ , амплитудный и фазовый коэффициенты материала;

$\beta_0$  - фазовый коэффициент вакуума;

$E_0$  - напряженность электрического поля падающей волны;

$l, \Delta l, S$  - геометрические параметры ступеней.

Результирующий поток, воспринимаемый приемной антенной, будет:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

Ослабление этого потока определяется отношением модулей падающего и прошедшего потоков:

$$A = 20 \lg \frac{|\Phi|}{|\Phi_0|} = -8,68\alpha l + 4,34 \ln \left[ \exp(-2\alpha \Delta l) + \exp(2\alpha \Delta l + 2 \cos 2\Delta l (\beta - \beta_0)) \right] / 4 \quad (6.7)$$

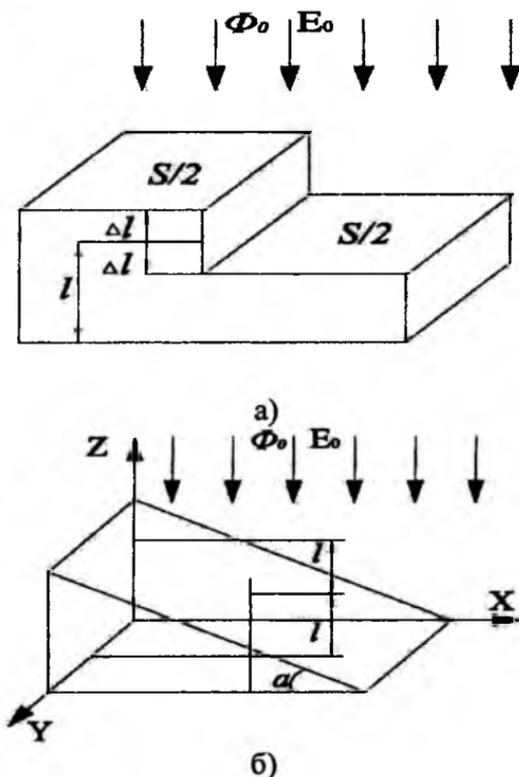


Рис. 6.3. Модели неоднородного материала.

а)- двухступенчатый модель, б)-модель типа "клин".

Первое слагаемое в (6.7) равно ослаблению в материале средней толщины  $l$ . Добавка к нему (второе слагаемое), значение которой зависит от  $\Delta l$ , определяет погрешность измерения амплитудным методом:

$$\Delta W_A = 4,43 K_A (W) \ln \left[ \exp(-2\alpha \Delta l) + \exp(2\alpha \Delta l) + 2 \cos 2\Delta l (\beta - \beta_0) \right] / 4$$

Для фазового метода погрешность измерения составит:

$$\Delta W_\varphi = K_\varphi (W) \arctg \left[ \frac{1 - \exp(2\alpha \Delta l)}{1 + \exp(2\alpha \Delta l)} \operatorname{tg}(\beta - \beta_0) \Delta l \right]$$

где  $K_A(W)$ ,  $K_\varphi(W)$  - амплитудный и фазовый коэффициенты влажности, равные изменению влажности, соответствующему изменению ослабления на 1 дБ и фазового сдвига на 1 рад.

Значение обоих коэффициентов тем меньше, чем больше средняя толщина слоя материала  $l$ ; следовательно, для уменьшения погрешностей от неоднородности по толщине в обоих методах необходимо, при прочих равных условиях, увеличивать  $l$ .

Расчет погрешностей амплитудного и фазового метода был выполнен по приведенным выше формулам для хлопковых семян в пределах 4,4 - 18,6% влажности при средней толщине образца, равной 9 см, и переходах по толщине от 0 до 4 см. Абсолютные погрешности составили для фазового метода 0,1 ÷ 0,9%, а для амплитудного 1,7-2,6%.

Для модели типа "клин", верхняя грань которого образует угол откоса  $\theta$  (рис.6.36), ослабление и фазовый сдвиг составляют:

$$A = -8,68\alpha \frac{\alpha \operatorname{tg} \theta}{2 \cos \Psi} +$$

$$+ 4,34 \ln \frac{\exp\left(-\frac{\alpha \operatorname{atg} \theta}{\cos \Psi}\right) + \exp\left(\frac{\alpha \operatorname{atg} \theta}{\cos \Psi}\right) + 2 \cos\left(a \left[\frac{\beta}{\cos \Psi} - \beta_0\right] \operatorname{tg} \theta\right)}{a^2 \left[\frac{\alpha^2}{\cos^2 \Psi} + \left(\beta_0 - \frac{\beta}{\cos \Psi}\right)^2\right] \operatorname{tg}^2 \theta},$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\exp\left(-\frac{\alpha \operatorname{atg} \theta}{\cos \Psi}\right) \sin \frac{\beta \operatorname{atg} \theta}{\cos \Psi} - \sin \beta_0 \operatorname{atg} \theta}{\exp\left(-\frac{\alpha \operatorname{atg} \theta}{\cos \Psi}\right) \cos \frac{\beta \operatorname{atg} \theta}{\cos \Psi} - \cos \beta_0 \operatorname{atg} \theta} + \operatorname{arctg} \frac{(\beta - \beta_0) \cos \Psi}{\alpha}$$

Этим выражениям соответствуют погрешности измерения:

$$\Delta W_A = K_A(W) 8,68 \frac{2\alpha l - \alpha \operatorname{atg} \theta}{2 \cos \Psi} - A;$$

$$\Delta W_\varphi = K_\varphi(W) \left( \beta l - \frac{2\beta l - \beta \operatorname{atg} \theta}{2 \cos \Psi} - \varphi \right).$$

Результаты расчетов по этим формулам для хлопковых семян (4,4 ≤ W ≤ 18,6%), при углах откоса от 5 до 40°, подтвердили меньшие значения погрешностей фазового метода по сравнению с амплитудным.

Общим выводом рассмотренных исследований является то, что при непрерывных измерениях в производственных условиях, т.е. при переменной массе материала, предпочтительным является амплитудный метод; в лабораторных измерениях меньшие погрешности от неоднородности материала обеспечивает фазовый метод.

## 6.2. Экспериментальные характеристики хлопка-сырца в диапазоне СВЧ

В данном разделе рассматриваются те же характеристики диэлектрических свойств хлопка-сырца, полученные в результате экспериментов, что и для диэлектрических влагомеров ВЧ диапазона (см. п.4.3.) влажностные, частотно-влажностные и описывающие основные функции влияния.

Наиболее полно электрические характеристики хлопка-сырца были исследованы в работе В.Н. Дроздова. Измерения выполнялись им на экспериментальной установке по принципу ослабления проходящей волны в свободном пространстве, собранной из стандартной аппаратуры. Функциональная схема установки приведена на рис. 6.4.

Для измерения на различных частотах сантиметрового диапазона в установке использовались четыре сменных генератора СВЧ с длинами волн: 1,1÷1,3 см; 1,3÷1,6 см; 1,6÷2 см; 2,9÷3,9 см.

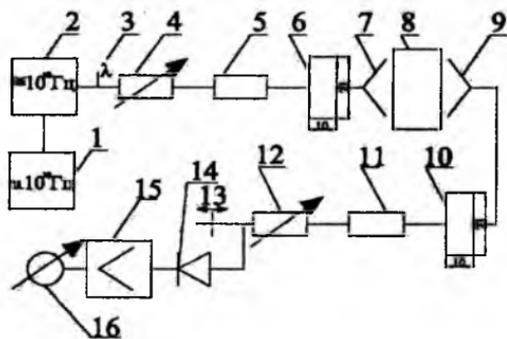
Измерения проводились по методу замещения с отсчетом затухания, вносимого образцом, по шкале измерительного аттенюатора 12. Если затухание в образце, имеющем большую толщину, превышало верхний предел шкалы аттенюатора, это затухание определяли по формуле

$$A = A_k + 10 \lg(P_{\text{прош}}/P_{\text{пад}}),$$

где  $A_k$  - максимальное ослабление измерительного аттенюатора;

$P_{\text{прош}}, P_{\text{пад}}$  - мощности падающей и прошедшей волны, измеренные с помощью детекторной секции.

Образцы хлопка-сырца необходимой влажности получали путем искусственного увлажнения с помощью распылителя или подсушивания, с последующей выдержкой в обоих случаях не менее 6 суток в плотно закрытых сосудах, с периодическим перемешиванием.



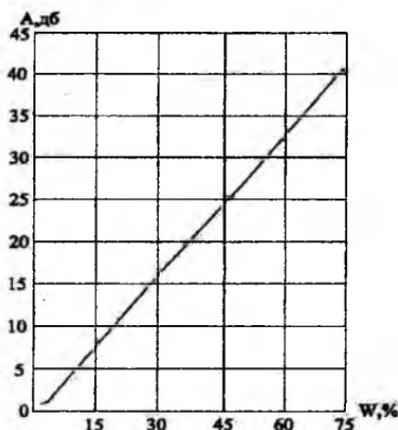
**Рис. 6.4. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования электрических характеристик хлопка-сырца в диапазоне СВЧ.**

Условные обозначение:

- |                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1-НЧ генератор (модулятор), | 7,9 - передающая и приемные антенны, |
| 2- источник СВЧ энергии,    | 8 - датчик для образца,              |
| 3 - соединительный фланец,  | 13 - согласующая нагрузка,           |
| 4, 12 - аттенюаторы,        | 14 - детекторная секция,             |
| 5, 11 - ферритовые вентили, | 15 - усилитель,                      |
| 6, 10 - волноводы,          | 16 - индикатор.                      |

Большинство образцов имело массу 3,85кг. В качестве образцового применялся термогравиметрический метод с высушиванием в шкафу "Восток" по 6 проб (массой 10 г) из каждого образца, отобранных до и после измерения: значение влажности определяли как среднее арифметическое для 12 проб.

Влажностная характеристика была получена при длине волны  $\lambda = 3$  см для образцов хлопка-сырца первого сорта, толщиной 25 см, в диапазоне влажности 0,5-73%. Толщину образцов, имеющих влажность ниже 3%, увеличивали до 1 м; во всех случаях результаты измерения пересчитывали на толщину 10 см и плотность  $110 \text{ кг/м}^3$ .



**Рис. 6.5. Зависимость ослабления энергии СВЧ в хлопке-сырца от влажности ( $\lambda=3$  см).**

Характеристика для хлопка-сырца с указанием доверительных интервалов (при доверительной вероятности 0,95) приведена на рис.6.5. Как и для других капиллярно-пористых материалов можно выделить две зоны.

Для диапазона от 6-8 до 70% влажностная характеристика близка к линейной и имеет большую крутизну, определяющую высокую чувствительность измерения влажности. При влажности ниже 6-7% крутизна существенно уменьшается, что объясняется увеличением доли воды, с сильными формами связи.

Характеристика показывает одно из преимуществ СВЧ метода: верхний предел диапазона измерения влажности превышает 70%, в то время, как у ранее разработанных диэлькометрических ВЧ-влажномеров этот предел находился в интервале 18-25%. Влажностную характеристику  $A(W)$  хлопка-сырца в диапазоне влажности, выше 6%, можно аппроксимировать эмпирической формулой:

$$A = \frac{2,66}{(W - 3)^2} + 0,576W - 2,1 ,$$

где  $A$  - ослабление в децибеллах при толщине образца, равной 10 см;

$W$  - влажность образца.

Частотно-влажностные характеристики были сняты в диапазоне волн 1,2-3 см на образцах хлопка-сырца 1-го сорта с влажно-

стью 1,5 и 9,4% (рис.6.6). Как у большинства других влагосодержащих материалов, ослабление СВЧ энергии в хлопке-сырце сильно возрастает с увеличением частоты. Это можно объяснить резонансным характером зависимости  $\text{tg}\delta$  воды от частоты с максимумом при  $\lambda=1,25$  см (см.гл.2). Возрастание ослабления с соответствующим повышением чувствительности  $S=dA/dW$  особенно заметно при приближении к миллиметровому диапазону волн и повышением влажности хлопка-сырца.

Однако повышение частоты имеет и некоторые отрицательные последствия. Во-первых, с ростом частоты увеличивается дисперсия значений ослабления  $A$  при повторных измерениях одного и того же образца хлопка с влажностью  $W=\text{const}$ , т.е. снижается точность измерения влажности. Во-вторых, при уменьшении длины волны  $\lambda$  из-за резкого увеличения ослабления уменьшается допустимая толщина образца  $L$  в направлении распространения падающей волны. Так, при длине волны равной  $\lambda=1,2$  см и влажности  $W=15\%$  толщина образца хлопка-сырца не может превышать 25 см, а при увеличении влажности толщину  $l$  приходится уменьшать до 3-5 см, что влечет за собой дальнейшее увеличение дисперсии результатов измерения. Если принять  $\lambda=3$  см, то при  $W=20\%$  толщина образца может достигать 50 см, что дает возможность уменьшения погрешности выборки и от неоднородности образца по плотности.

Увеличение рабочей длины волны сверх  $\lambda=3$  см в СВЧ-влагомерах дискретного действия нецелесообразно, так как оно понижает чувствительность измерения. Кроме того, практически нет необходимости увеличивать массу образца сверх 3-5 кг, т.е. сверх общепринятой в хлопковой промышленности массы среднечашечного образца.

Таким образом, принятая в большинстве СВЧ-влагомеров длина волны примерно равная 3 см представляет собой компромиссное, наиболее целесообразное решение.

Исключение составляют измерения по методу ослабления влажности хлопка-сырца и хлопкового волокна при исследовании большой массы материала и его высокой плотности, например, хлопка-сырца непосредственно в транспортной единице или хлопкового волокна в кипах. Нами исследовалась возможность бесконтактного измерения влажности хлопка-сырца в кузове транспортной тележки путем "просвечивания" хлопка в поперечном направлении [6.16]. Измерения были выполнены на СВЧ установке с длиной

волны  $\lambda = 12$  см, функциональная схема которой приведена на рис.6.7.

Установка работает следующим образом. Сигнал с частотой 2450 МГц генератора 2 поступает через передающую антенну 5, материал 6 и приемную

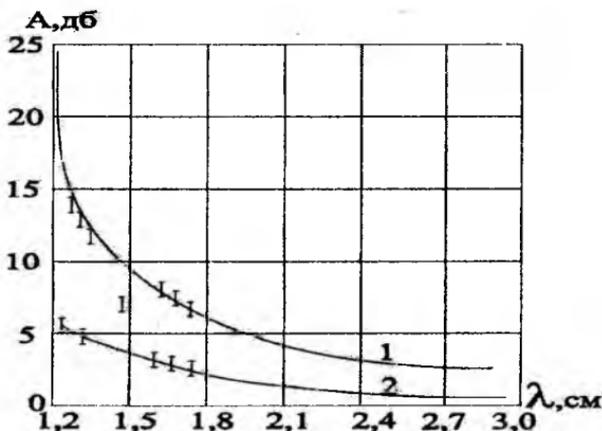


Рис.6.6. Зависимость ослабления энергии СВЧ в хлопке-сырце от длины волны; 1 - влажность 9,4%, 2 - влажность 1,5%.

антенну 8 в смеситель 9. Туда же поступает сигнал с гетеродина 1. Сигнал промежуточной частоты 6,5 МГц со смесителем 9 и сигнал с опорного генератора 4, промодулированные противофазными меандрами, частотой 400 Гц, и модулятора 3, поступают на вход широкополосного усилителя промежуточной частоты 10 и затем в схему сравнения 11.

Выходное напряжение со схемы сравнения подается на обмотку управления двухфазного индукционного двигателя 12 и вызывает перемещение плунжера образцового аттенюатора 7 до выравнивания сигналов, одновременно вращаются потенциометры усилителя 10, автоматически изменяя усилие так, что на выходе поддерживается постоянная величина напряжения. Как только сигналы сравниваются, на двигатель будет поступать напряжение рассогласования, меньше напряжения трогания и двигатель остановится. По шкале аттенюатора производится отсчет измеряемого ослабления.

Исследования зависимости ослабления электромагнитной энергии с длиной волны 12 см в хлопке-сырце от влажности проводились на хлопке селекционной разновидности "Ташкент-1" машинного сбора с естественной засоренностью 10,5% и влажностью как естественной, так и полученной путем подсушки в сушилке СХЛ-3 или увлажнения с помощью пульверизатора с последующей выдержкой в плотно закрытых баках.

Измерение влажности образцов производилось по O'zDSt 644:2006 [6.17] в сушильных шкафах Уз-7 и Уз-8 путем отбора пробы из образцов.

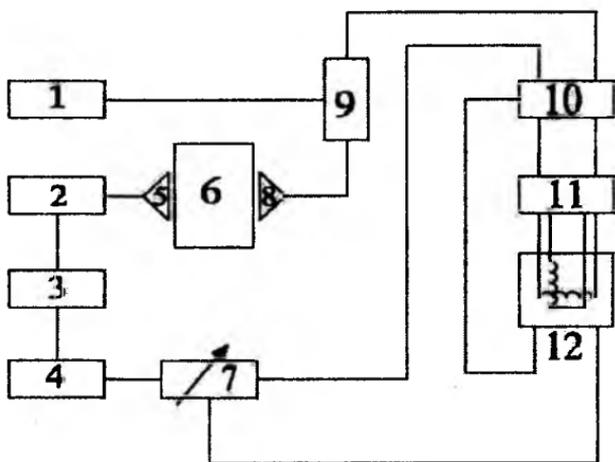
При снятии основной зависимости  $A(W)$  хлопок-сырец помещался в специальную кассету. Стенки кассеты, перпендикулярные направлению распространения падающей волны, выполнены из капроновой сетки, ослабление в которой пренебрежимо мало (рис.6.8). Плотность хлопка-сырца в кассете 153 кг/м.куб.

Каждый образец измерялся в пяти переукладках, причем после каждой переукладки ослабление образца измерялось 3 раза (после каждого измерения в полуавтоматическом режиме установка вручную разбалансировалась, а затем снова переводилась в автоматический режим для измерения ослабления).

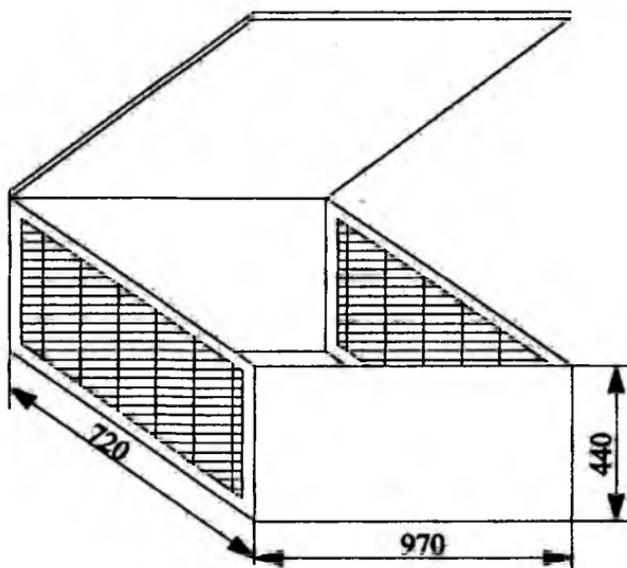
Всего было измерено 32 образца. Результаты измерений приведены на рис.6.9 в виде графика зависимости  $A=f(W)$ . Коэффициент вариации среднего значения ослабления в образце хлопка-сырца, обусловленный неоднородностью укладки образцов, по результатам обработки 32 измерений равен 2%, а среднее квадратическое отклонение значения ослабления 0,16 дБ.

Обработка результатов измерения на ЭВМ показала, что зависимость ослабления СВЧ при  $\lambda=12$  см от влажности хлопка-сырца выражается в виде полинома второй степени:

$$A = -0,23 + 0,59W + 0,028W^2.$$



*Рис. 6.7. Функциональная схема экспериментальной установки.*



*Рис. 6.8. Общий вид кассеты.*

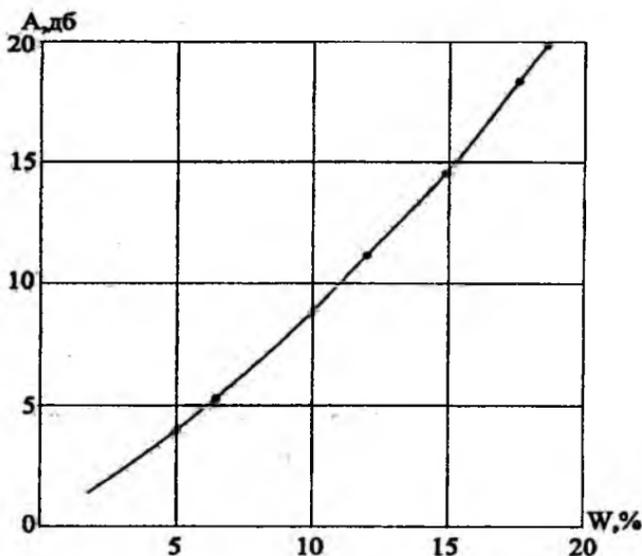


Рис. 6.9. Зависимость ослабления  $A$  от влажности  $W$  хлопка-сырца.

Таким образом, проведенные исследования показывают целесообразность использования дециметрового диапазона длин волн при разработке СВЧ-влажномеров для измерения влажности хлопка-сырца в кузове транспорта без отбора проб.

Температурные характеристики были исследованы для хлопка-сырца 1-сорта в диапазоне от  $+3,5$  до  $+51$  °С. Как отмечалось ранее, от температуры зависят значения частоты релаксации воды и электрические характеристики всех влагосодержащих материалов.

В указанном диапазоне температур установлено наличие зависимости ослабления  $A$  от температуры  $t$ , близкой к линейной. Для исследованных трех образцов хлопка-сырца, имевших влажность  $W = 9,5\%$ ;  $W = 14,1\%$ ;  $W = 21,4\%$ , были получены следующие уравнения линейной регрессии:

$$A_1 = 2,7 + 0,056t \quad ;$$

$$A_2 = 4,18 + 0,083t;$$

$$A_3 = 6,98 + 0,16t.$$

Таким образом, поправка на температуру (на  $1^\circ\text{C}$ ), выраженная в децибеллах, увеличивается с ростом влажности. По нашему мнению, правильнее определять относительную величину температурной поправки:

$$\delta = (1/A_0) (\Delta A / \Delta t),$$

где:  $A_0$  - ослабление, соответствующее градуировочной температуре, например  $t=20^\circ\text{C}$ ;  $\Delta A$  - приращение ослабления, вызванное ростом температуры на  $\Delta t$ .

Вычисленные для трех указанных выше значений влажности поправки будут равны  $\delta_1=0,19\%$ ,  $\delta_2=0,15\%$ ,  $\delta_3=0,16\%$ . Можно, следовательно, сделать вывод о допустимости введения единой температурной поправки  $\delta=0,15 \div 0,20\% / 1^\circ\text{C}$  для сравнительно небольших диапазонов температуры и влажности в пределах линейной части влажностной характеристики.

*Влияние толщины и плотности образца.* Теоретический анализ показывает, что ослабление в слое материала при нормальном падении волны можно представить в виде суммы трех составляющих:

$$A_\Sigma = A + A_{\text{отр}} + A_T,$$

где:  $A$ ,  $A_{\text{отр}}$  - затухание в материале за счет поглощения и отражения радиоволны;

$A_T$  - составляющая ослабления за счет отражения, зависящая от толщины слоя материала.

Первые две составляющие суммарного ослабления были рассмотрены в п.6.1. Эти величины учитываются при градуировке СВЧ-влажномера. Что касается величины  $A_T$ , то, как показано в классической работе Стрэттона [6.17], она имеет осциллирующий характер и ее вес возрастает с уменьшением толщины слоя. В работе [6.18] предлагается методика вычисления минимальной толщины образца  $l$  мин, обеспечивающей влияния величины  $A_T$ . Так, например, для зерна пшеницы при измерениях на частоте 10 ГГц обеспечивается отношение амплитуды  $A_T$  к  $A$ : 0,01 при следующих значениях  $l$  мин:

Объемная влажность пшеницы	0,05	0,10	0,15
$l$ мин, см	13,9	6,9	4,4

Следовательно, влияние  $A_T$  уменьшается с увеличением влажности материала. Что касается хлопка-сырца, то по причинам приведенным выше, толщина анализируемого слоя не ниже 20-25 см. Для таких относительно толстых образцов, осцилляция практически исчезает уже при невысокой влажности и влиянием  $A_T$  можно пренебречь.

Экспериментальные данные, полученные в [3.3], для толщин от 2 до 100 см при влажности хлопка-сырца 5,9 и 13,2% и его постоянной плотности  $110 \text{ кг/м}^3$ , хорошо согласуются с теоретическими соображениями: при условии стабилизации плотности ослабление прямо пропорционально толщине слоя хлопка.

Такой же характер имеет зависимость ослабления от плотности хлопка-сырца при постоянной толщине образца. Это подтверждают результаты измерений хлопка-сырца с влажностью 8,0; 13,0; 26,3 % при изменении его плотности от 80 до 300 кг/м. куб. Угол наклона прямых  $A(\rho)$ , описывающий зависимость ослабления от плотности, увеличивается с ростом влажности.

*Влияние концентрации электролитов и характера распределения влаги в хлопке-сырце.* Выращивание хлопчатника на больших территориях Средней Азии и Закавказья в разных природных условиях приводит к тому, что концентрация электролитов в хлопке-сырце может колебаться в сравнительно широких пределах. Уже ранее было показано [3.6], что повышение частоты электрического поля уменьшает влияние этого фактора на результаты измерения влажности, и в сантиметровом диапазоне волн погрешность, связанная с концентрацией электролитов, во много раз меньше, чем у диэлектрических влагомеров ВЧ-диапазона. Теоретически это можно объяснить, анализируя величину  $\epsilon''$  материала - параметра, описывающего движение электрических зарядов, т.е. проводимость материала. Наблюдаемая  $\epsilon''$  имеет две составляющие: вызванную инерционностью поляризации (диэлектрические потери) и ее влиянием на ток смещения и потери проводимости, связанные с действительным переносом зарядов. Это можно выразить следующим образом:

$$\epsilon'' = \epsilon''_{\text{диэл}} + K\sigma/\omega$$

Вторая составляющая, пропорциональная отношению проводимости  $\sigma$  к частоте, еще ощутимее, например, в дециметровом диапазоне волн, но уже при  $\lambda=3$  см ее влияние очень незначительно.

В работе [3.5] исследовались образцы хлопка-сырца, часть которых увлажнялась дистиллированной водой, а часть - водным раствором NaCl с концентрацией 0,5; 1,0; 3,0 и 15%.

Результаты измерений показали, что реальные концентрации электролитов в хлопке-сырце (в десятки раз меньше, чем принятые

в опытах) при длине волны  $\lambda=3$  см практически не влияют на ослабление и, следовательно, на точность измерения влажности СВЧ методом.

Распределение влаги между компонентами хлопка-сырца зависит от ряда неучитываемых (или трудно учитываемых) факторов: климатических условий в период уборки урожая; степени раскрытия коробочки, времени суток и т.д. Эта характеристика существенно изменяется также в результате технологических процессов, в первую очередь - сушки и увлажнения. Неравномерное распределение влаги в образце оказывает влияние на результаты измерения влажности любым электрическим методом.

В упомянутой выше работе влияние распределения влаги на ослабление А энергии СВЧ в хлопке-сырце изучалось путем сравнения значений А в образцах в момент поступления на заготпункт со значениями А в этих же образцах, выдержанных в плотно закрытых металлических баках в течение нескольких суток. Перераспределение влаги вызывало, как правило, уменьшение ослабления, главным образом первые сутки. Это уменьшение А практически заканчивалось на 4-8-ые сутки.

*Зависимость ослабления от засоренности промышленного и селекционного сорта хлопка-сырца.* Функции влияния указанных параметров являются специфическими для хлопка-сырца. Значение засоренности определяется ее допустимыми нормами (см.гл.3), а также составом посторонних примесей - минеральных (пыль, песок, мелкие камни) и органических (листья, створки коробочек, черенки и т.п.) Ослабление радиоволн СВЧ в этих примесях в сухом состоянии значительно меньше, чем в хлопке-сырце кондиционной влажности.

Экспериментальное исследование влияния сорных примесей выполнялось на образцах хлопка-сырца машинного сбора 3 сорта с засоренностью 12,8-21,8% путем сравнения с результатами измерения ослабления в том же образце, но предварительно очищенном от органического и минерального сора на приборе ЛКМ.

Полученные результаты показали, что погрешность измерения влажности хлопка-сырца влагомером СВЧ при измерении засоренности хлопка от 0 до 22% составляет 3,8% (отн.) в сторону уменьшения ослабления. Этой, сравнительно небольшой составляющей суммарной погрешности измерения можно пренебречь или вводить со-

ответствующую поправку по результатам засоренности. Как известно, этот параметр определяют в приемосдаточных операциях одновременно с влажностью хлопка-сырца.

Исследования, выполненные на хлопке-сырце 1, 2, 3 и 4 сортов, полностью очищенном от органических и минеральных примесей показали, что разница между результатами измерения для различных сортов не превышает сотых долей процента влажности, т.е. находится в пределах точности измерительной аппаратуры.

Можно, следовательно, сделать вывод, что промышленный сорт хлопка-сырца практически не влияет на результаты измерения влажности СВЧ-влажномером по ослаблению, работающим в сантиметровом диапазоне радиоволн.

Что касается влияния селекционного сорта, то здесь сравнение влажностных характеристик выявило различие в значениях ослабления между группами тонковолокнистых сортов, особенно заметное в диапазоне низкой влажности. Среднее значение систематической погрешности измерения влажности, обусловленное этим фактором, равно 3% (отн.) в диапазоне влажности 4,9 - 8% и только 0,3% (отн.) в диапазоне влажности 8-23%. Причиной может служить разница в структуре тонко- и средневолокнистых сортов, с которой связано различие в распределении влаги по формам связи; при повышении влажности и связанном с ним существенным превалированием свободной воды этот фактор теряет значение. Для устранения погрешности в диапазоне малых влагосодержаний можно использовать различные градуировки для тонко и средневолокнистых сортов.

Экспериментальные исследования СВЧ метода измерения влажности по ослаблению проходящей волны подтвердили его полную работоспособность для хлопка-сырца всех сортов.

Исследования функций влияния показали, что некоторые факторы и величины (засоренность, промышленный сорт, концентрация электролитов) практически не вносят дополнительных погрешностей в результат измерения СВЧ-влажномером. Наиболее важными влияющими величинами являются температура и плотность хлопка-сырца, и толщина слоя хлопка. Однако эти функции влияния описываются определенными и достаточно простыми зависимостями и погрешности, связанные с ними, можно устранить путем коррекции результатов измерения (влияния температуры, плотности, засоренности), стабилизации соответствующих величин (толщина и плотность

образца), или применением самостоятельной градуировки (тонковолокнистые сорта). Совокупность рассмотренных характеристик служит обоснованием возможности создания СВЧ-влагомеров различных типов для хлопка-сырца, обладающих метрологическими свойствами, вполне удовлетворяющими требованиям практики и действующими нормативными документами [6.19].

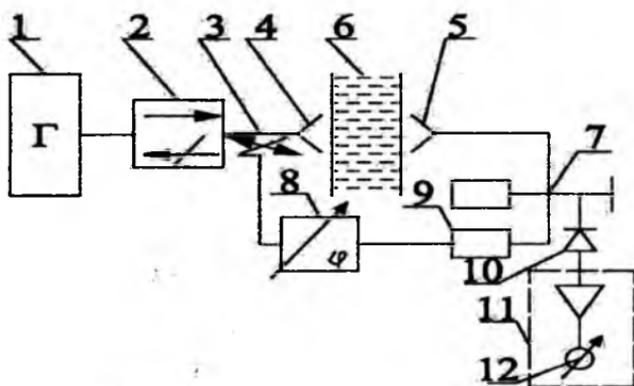
### ***6.3. Экспериментальные характеристики хлопковых семян и других хлопковых материалов в диапазоне СВЧ***

В этом разделе рассматриваются экспериментальные данные о функциях преобразования и функциях влияния для хлопковых материалов компонентов хлопка-сырца, т.е. хлопкового волокна и хлопковых семян, а также твердых продуктов переработки семян в производстве хлопкового масла. Исследования характеристик хлопковых семян и продуктов их переработки в СВЧ поле сантиметрового диапазона проводились в ТашГУТ под руководством проф. Исмагуллаева П.Р., итоги этих исследований подытожены в работе [2.6]. Измерения выполнялись на экспериментальной установке с рабочей частотой 9,3 ГГц. Существенное преимущество этой установки по сравнению с установкой, описанной в 6.2., заключается в том, что она дает возможность измерять не только ослабление, но и фазовый сдвиг проходящей волны в свободном пространстве.

Большинство современных влагомеров-СВЧ основано на преобразовании влажности в выходной сигнал, которым служит ослабление  $A$  проходящей (реже отраженной) электромагнитной волны или ее фазовый сдвиг  $\varphi$ . Целесообразно, следовательно, исследовать зависимости  $A$  и  $\varphi$  хлопковых материалов от влажности и главных влияющих величин.

Функциональная схема экспериментальной установки ТашГУТ [6.20] приведена на рис. 6.10. Сигнал СВЧ от генератора 1 через ферритовый вентиль 2 поступает на направленный ответвитель 3. С прямого плеча, направленного ответвителя 3 сигнал подается на антенну 4, проходит через материал 6 и принимается антенной 5. С ответвляющего плеча, направленного ответвителя 3 сигнал проходит через уравнивающий фазовращатель 8 и аттенюатор 9. Сигналы с антенны 5 и аттенюатора 9 суммируются двойным тройником 7, выходной сигнал которого подается на детектор 10. Низкочастотный

сигнал с выхода детектора усиливается усилителем 11 и поступает на индикатор 12.



**Рис. 6.10. Функциональная схема экспериментальной СВЧ установки ТашГТУ.**

Процесс измерения заключается в компенсации ослабления и фазового сдвига, вносимых материалом 6, с помощью аттенюатора 9 и фазовращателя 8. Отсчет ослабления и фазового сдвига производится по шкалам соответственно аттенюатора 9 и фазовращателя 8 в момент баланса моста, т.е. при минимальном выходном сигнале усилителя 11.

Рассмотрим полученные на установке характеристики, в первую очередь - влажностные характеристики хлопковых материалов. На диэлектрические характеристики материала в диапазоне СВЧ влияет в основном наличие в нем свободной влаги. Это объясняется тем, что при взаимодействии электромагнитной волны с влажным материалом происходит поляризация материалов, связанная с упорядоченным перемещением или переориентацией в нем электрических зарядов. В диапазоне СВЧ наибольшее значение имеет ориентационная поляризация молекул свободной воды. В зависимости от структуры и свойств материала он связывает воду в различных формах и количествах (см. классификацию форм связи с веществом, глава 2).

При увлажнении материала все связи заполняются последовательно от сильной к слабой, при этом уменьшается средняя энергия

связи и увеличиваются значения диэлектрических параметров материала. Это приводит к росту крутизны зависимости контролируемых параметров электромагнитной волны от влажности. Зависимости ослабления и фазового сдвига от влажности, полученные разными авторами, показали, что для большинства материалов они однотипны и приближенно могут описываться уравнениями второй степени.

Мы исследовали экспериментально зависимости  $A(W)$  и  $\varphi(W)$  хлопковых семян и продуктов их переработки при постоянных уплотнении и температуре материала (рис.6.11). Для получения этих зависимостей было подготовлено по 50 образцов каждого из исследуемых материалов, которые увлажняли или подсушивали и в течение 4 суток выдерживали в закрытых полиэтиленовых пакетах при периодическом перемешивании. Затем образцы помещали в плоскопараллельную кассету из оргстекла размером 300x 200x90 мм и вводили в межантенное пространство описанной установки. Каждый из образцов измеряли четырехкратно, за результат принимали среднее арифметическое.

Для получения уравнения регрессии результаты экспериментов обрабатывали по методу наименьших квадратов.

Зависимости  $A(W)$  и  $\varphi(W)$  были получены для хлопковых семян при массе 2,8 кг и опушенности 2,3 % (рис.6.11.а) для ядра семян (рис. 6. 11б), шрота (рис.6.11.в), шелухи (рис.6 .11.г). Форма влажностных характеристик для всех перечисленных материалов одинакова. При низких значениях  $W$  энергия связи волны весьма значительна и крутизна кривых  $A(W)$  и  $\varphi(W)$  меньше, чем в области преобладания свободной влаги, где энергия связи меньше, подвижность молекул воды и связанная с ней комплексная диэлектрическая проницаемость материала больше.

Обработка результатов, полученных более чем 2000 измерений, показала, что все влажностные характеристики адекватно описываются полиномами второй степени с указанными значениями дисперсии воспроизводимости:

хлопковые семена:

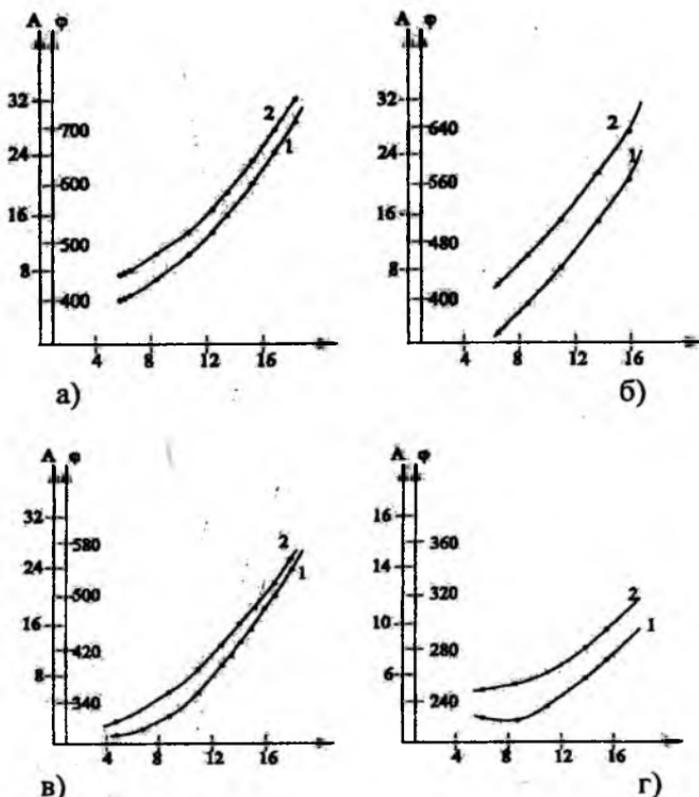
$$A = 0,55W^2 - 0,116W + 1,7; \quad \sigma^2_A = 0,14 \text{ дБ};$$

$$\varphi = 0,425W^2 - 3,127W + 3,127; \quad \sigma^2_\varphi = 10,2 \text{ град.}$$

мятка:

$$A = 0,098W^2 - 0,624W + 2,1; \quad \sigma^2_A = 0,11 \text{ дБ};$$

$$\varphi = 0,78W^2 - 1,06W + 314,2; \quad \sigma^2_\varphi = 12,96 \text{ град.}$$



**Рис. 6.11. Зависимость  $A(W)$  (1) и  $\varphi(W)$  (2) СВЧ сигнала от влажности хлопковых семян.**

**ядро:**

$$A = 0,115W^2 - 0,523W + 1,2;$$

$$\varphi = 0,94W^2 - 2,7W + 423,0;$$

$$\sigma^2_A = 0,17 \text{ дБ};$$

$$\sigma^2_\varphi = 8,41 \text{ град.}$$

**шелуха:**

$$A = 0,068W^2 - 0,612W + 4,6 ;$$

$$\varphi = 0,58W^2 - 3,1W + 255,4;$$

$$\sigma^2_A = 0,15 \text{ дБ};$$

$$\sigma^2_\varphi = 10,82 \text{ град.}$$

**шрот:**

$$A = 0,127W^2 - 0,80W + 1,7;$$

$$\varphi = 1,08W^2 - 1,42W + 320,1;$$

$$\sigma^2_A = 0,14 \text{ дБ};$$

$$\sigma^2_\varphi = 16,25 \text{ град.}$$

Частотно-влажностные характеристики хлопковых семян (рис.6.12) иллюстрируют влияние рабочей частоты (в пределах сантиметрового диапазона) на чувствительность влагомера СВЧ. При  $f=3 \times 10^{10}$  Гц чувствительность больше, чем при  $f=10^{10}$  Гц, что объясняется большей близостью первой частоты к резонансной (релаксационной) частоте воды.

Однако рабочую частоту влагомера приходится выбирать с учетом требований к размерам контролируемого образца материала. Так, для возможности контроля образца массой 3-5 кг в широком диапазоне влажности, нами была выбрана рабочая частота  $10^{10}$  Гц.

При этом доля рассеянной на неоднородностях (на семенах в хлопке-сырце) энергии существенно меньше чем при  $3 \times 10^{10}$  Гц, что приводит к более высокой точности влагомера. Наиболее существенными влияющими величинами, как и при низких частотах, являются плотность и температура материала. Плотность определяет количество сухого материала и влаги в контролируемом объеме, поэтому от нее зависят диэлектрические параметры образца. При уплотнении вначале происходят лишь количественные изменения значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ , в результате заполнения влажным материалом объема, ранее занимаемого воздухом.

При этом экспериментальные характеристики, связывающие ослабление  $A$  и фазовый сдвиг  $\phi$  с массой  $P$  хлопковых семян в рабочем объеме датчика показывают, что значения  $A$  и  $\phi$  линейно возрастают (рис. 6.13), причем крутизна зависимостей  $A(p)$  и  $\phi(p)$  тем больше, чем выше влажность. Однако при некотором значении плотности, зависящем от структуры материала и его влажности, происходит выдавливание воды из капилляров. В результате уменьшается средняя энергия связи и увеличивается поверхностная влажность, что нарушает линейность зависимости  $A$  и  $\phi$  от плотности.

Влияние температуры материала на его диэлектрические свойства обусловлено следующим: изменение температуры приводит к смещению частоты резонанса молекул свободной воды, изменению энергии связи влаги с материалом и перераспределению влаги между компонентами материала. Как было показано в гл.2, с повышением температуры, с одной стороны, уменьшается значение  $\epsilon'$  и увеличивается  $\epsilon''$  для свободной воды, с другой - снижается средняя энергия связи влаги с материалом, что приводит к увеличению значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ . Изменение диэлектрических параметров зависит от

средней энергии связи влаги с материалом, а она, в свою очередь, - от структуры и свойств материала, а также его влажности.

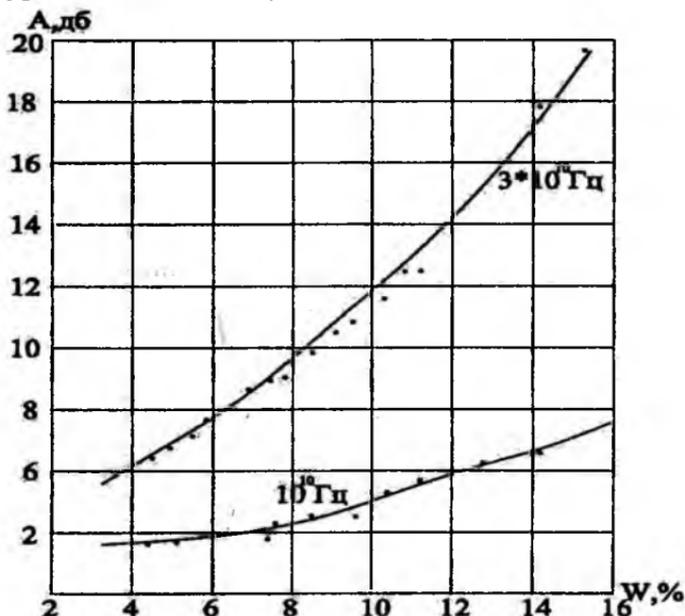


Рис.6.12. Частотно-влажностные характеристики хлопковых семян.

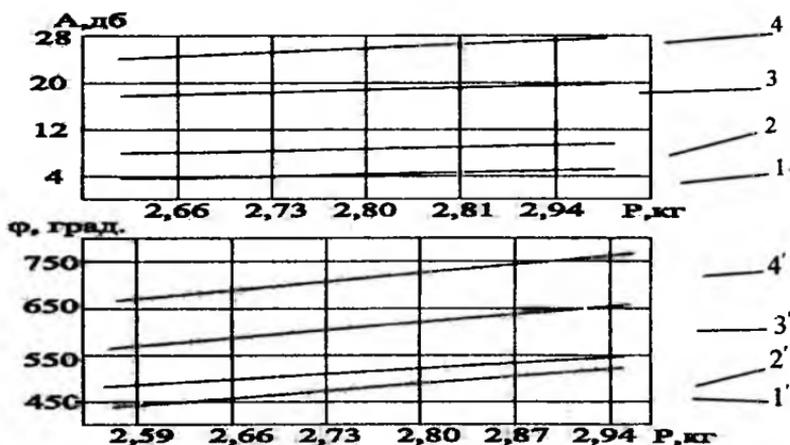


Рис.6.13. Зависимость  $A(\rho)$  и  $\phi(\rho)$  СВЧ сигнала для хлопковых семян при влажности: 1, 1' - 6,7%, 2, 2' - 9,8%, 3, 3' - 14,4%, 4, 4' - 17,1%.

Результаты исследований торфа [6.6] показали, что температурный коэффициент ослабления положителен при низких влажностях, при критической влажности он обращается в нуль и становится отрицательным при дальнейшем ее повышении. Для материалов с низкой энергией связи (песок, кирпич) зависимость ослабления и фазового сдвига от температуры повторяет зависимость от температуры, соответственно  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  во всем диапазоне измерения влажности. Проведенные нами исследования этих параметров для хлопковых семян и других материалов маслоэкстракционного производства показали, что обе зависимости монотонно возрастают во всем диапазоне изменения влажности (от 5 до 20%, рис.6.14). Крутизна линейных температурных характеристик также увеличивается с ростом влажности.

Сравнение влияния температуры и плотности на ослабление (амплитудный метод измерения влажности) и фазовый сдвиг (фазовый метод) дано в табл.6.1, в которой средние погрешности от влияющих величин выражены в процентах влажности.

Таблица 6.1

Погрешности амплитудного и фазового методов при нестабильности плотности на  $\pm 5\%$  и температуры на  $\pm 5^\circ\text{C}$

Влажность, %	Амплитудный (абс)		Фазовый (абс)	
	плотность	температура	плотность	температура
5	- 0,22	- 0,36	- 2,0	- 2,23
	+ 0,2	+ 0,33	+ 0,33	+ 0,23
10	- 0,23	- 0,32	- 1,4	- 0,35
	+ 0,22	+ 0,31	+ 1,3	+ 0,34
15	- 0,39	- 0,39	- 1,2	- 0,47
	+ 0,38	+ 0,38	+ 1,1	+ 0,46

На диэлектрические параметры существенно влияет энергия связи с материалом. Многочисленным материалам присущи разные формы связи, что определяет величину средней энергии связи влаги. Однако для одних и тех же материалов формы связи могут быть не-

одинаковыми. Так, для торфа причина этого - различие в происхождении и составе, для бумаги и тканей - размеры капилляров, для хлопковых семян - маслячность, опушенность и засоренность.

Установлено влияние опушенности и засоренности хлопковых семян на результат измерения влажности. Так, при амплитудных измерениях выявлена большая погрешность, чем при фазовых. Маслячность хлопковых семян в процессе их переработки не влияет заметно на результат измерения влажности указанными методами.

Изменение средней энергии связи влаги с материалом обусловлено также временем, прошедшим с момента увлажнения. Так, при увлажнении хлопковых семян влага попадает вначале на их оболочку и лишь через 8 часов в ядро семени; ленту и ядру присущи разные формы связи, поэтому с перераспределением (усреднением) влаги в семенах изменяется и средняя энергия связи.

При увлажнении материала обычно влага неравномерно распределяется по его объему. Усреднение с течением времени влаги в объеме образца также приводит к изменению ее средней энергии связи.

При сопоставлении данных зависимости ослабления  $A$  от длительности экспозиции увлажненных семян с аналогичной характеристикой на частоте 1 и 30 МГц установлено существенное уменьшение влияния неравномерности распределения влаги при измерениях в диапазоне СВЧ. Такой же вывод можно сделать о влиянии других неоднородностей исследуемого материала и примесей к нему.

Мы исследовали также математические модели  $A$  и  $\varphi$  с учетом их одновременной зависимости от нормативного параметра и влияющих величин  $t$  и  $\rho$ . Такая модель имеет большое значение на всех стадиях проектирования, разработки и эксплуатации СВЧ влагомеров. Если модель будет обладать высокой точностью, ее можно применять для предварительного вычисления градуировочной характеристики влагомера. Это позволит отказаться от громоздкой и трудоемкой операции - эмпирической градуировки, которая всегда создает "скрытую" составляющую систематической погрешности измерения. На основе такой модели возможна также наиболее точная коррекция воздействия мешающих величин [6.21].

Влияние большинства мешающих величин определяется не только их значениями, но и другими информативными и неинформативными параметрами входного сигнала. Например, значение (а иногда и знак) температурной погрешности зависит от влажности.

Следовательно, при определении метрологических характеристик СВЧ-влажмера приходится учитывать совместное влияние различных факторов, а задачу построения математической модели ослабления и фазового сдвига для хлопковых семян следует решать методами планирования эксперимента. Мы попытались решить задачу для трех величин - влажности  $W$ , температуры  $t$  и плотности  $\rho$ .

В связи с тем, что зависимости ослабления и фазового сдвига от влажности материала нелинейны, эксперименты нужно проводить на трех уровнях варьируемых параметров - минимальном, максимальном и в "звездных" точках.

Величина звездного плеча зависит от выбранного плана и жестко связана с уровнями варьирования, т.е. для его создания необходимо приготовить образцы материала с заданной влажностью, что трудно выполнить с высокой точностью, Погрешность значений влажности будет искажать искомые зависимости.

Мы предложили следующий способ определения зависимостей: заменим информативный параметр - влажность на некоторый другой параметр, являющийся функцией влажности, влияние которого на ослабление и фазовый сдвиг линейно. Тогда для выявления взаимного влияния изучаемых факторов можно провести полный факторный эксперимент, считая, что зависимости ослабления и фазового сдвига от плотности и температуры - линейные функции.

Экспериментальные исследования проводили на установке, на которой получены рассмотренные выше зависимости. Толщину контролируемого материала выбрали равной 90 мм. Затем определили значения ослабления и фазового сдвига при различных значениях влажности. Результаты экспериментов обрабатывали по методу наименьших квадратов, а адекватность полученных уравнений эксперименту проверяли по критерию Фишера. Установлено, что зависимости ослабления и фазового сдвига от влажности хлопковых семян адекватно (с доверительной вероятностью 0,95) описываются полиномами второй степени (рис.6.14);

$$A = 0,055W^2 + 0,116W + 1,74;$$

$$\varphi = 0,425W^2 + 3,127W + 255,7$$

Запишем указанные выражения в виде:

$$A = (0,234 W - 0,247)^2 + 1,68$$

$$\varphi = (0,652 W + 2,40)^2 + 250,0$$

Заменив квадраты выражений в скобках соответственно на X и Y, получим линейные зависимости ослабления и фазового сдвига от переменных

$$A = X + 1,68;$$

$$\varphi = Y + 250,0$$

При этом возможно проведение полного факторного эксперимента, так как влияние этих переменных, температуры и плотности на ослабление и фазовый сдвиг линейно.

Влажность, плотность и температуру варьировали на следующих уровнях:

$$W = 5,2\%, W = 17,0\% (X = 0,968, X = 1398, Y = 33,9, Y = 181,8),$$

$$P_1 = 330,2 \text{ кг/м}^3, P_2 = 421,7 \text{ кг/м}^3, t_1 = 6 \text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$$

Кодированные значения факторов X, Y, P и t определяли по формуле

$$Z_i = \frac{Z_i - Z_{0i}}{Y_j}$$

где  $Z_i, Z_{0i}$  - соответственно натуральные значения фактора и основного уровня;

$Y_j$  - интервал варьирования;

j - номер фактора.

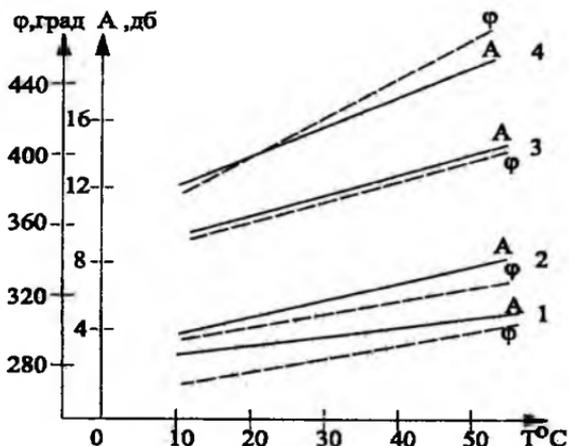


Рис. 6.14. Зависимости А (Т) и φ(Т) семян хлопчатника при влажности: 1 - 7,3%, 2 - 9,2%, 3 - 13,8%, 4 - 16%.

По результатам экспериментов находили кодированные значения коэффициентов регрессии:

$$B_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ij} \theta_i}{n}, \quad j=0, 1, 2, \dots, k$$

где  $\theta$  - значение измеряемого параметра (A или  $\phi$ );

n - количество опытов;

i - номер опыта.

Здесь даны значения дисперсий воспроизводимости, рассчитанные по результатам пяти измерений, проведенных в центре плана, значения остаточных дисперсий и коэффициентов Фишера. О значениях коэффициентов, полученных из уравнения, можно судить по следующим данным:

<b>B</b>	<b>A, дБ</b>	<b><math>\phi</math>, град</b>
B <sub>0</sub>	10,17	380,47
B <sub>1</sub>	7,40	83,32
B <sub>2</sub>	0,72	37,47
B <sub>3</sub>	2,07	24,67
B <sub>12</sub>	0,50	8,02
B <sub>13</sub>	1,35	16,42
B <sub>23</sub>	-0,07	2,62
B <sub>123</sub>	-0,03	-1,72
S <sub>ВОСПР</sub>	0,18	14,4
S <sub>СОСТ</sub>	0,52	39,7
F	2,9	2,7

Перед расчетом остаточной дисперсии проводили оценку коэффициентов B<sub>i</sub> по критерию Стьюдента для уровня значимости 0,95 и степени свободы (равной трем), которая показала, что коэффициенты B<sub>23</sub> и B<sub>123</sub> при полученных дисперсиях воспроизводимости незначимы.

Результаты проверки уравнений по критерию Фишера показали, что они адекватно описывают эксперимент. Пересчитав вычисленные значения коэффициентов влияния в натуральные, мы получили уравнения, связывающие ослабление и фазовый сдвиг с влажностью, плотностью и температурой материала:

$$A = -0,39 + 0,157X + 0,0037P + 0,00228t + 0,00189XP + 0,00902Xt$$

$$\varphi = 18,58 - 0,182Y + 0,632P + 0,0312t + 0,00266YP + 0,00966Yt$$

Приведенные уравнения подтверждают теоретические предположения о совместном влиянии на ослабление и фазовый сдвиг проходящей через материал волны его влажности и плотности, влажности и температуры. Совместное влияние плотности и температуры, а также влажности, плотности и температуры при заданной доверительной вероятности и полученной экспериментально дисперсии воспроизводимости выявить не удалось, хотя теоретически его влияние существует.

На основании полученных уравнений можно вычислить влажность исследуемого материала при известных значениях ослабления или фазового сдвига, температуры и плотности. При этом в случае получения этой информации в виде электрических сигналов, их можно ввести в вычислительное устройство, которое будет обрабатывать их автоматически по полученным алгоритмам. Кроме того, эти уравнения позволяют рассчитать погрешности амплитудного и фазового методов измерений влажности при известных из условий производства диапазонах изменения влажности, плотности и температуры.

По методике, аналогичной описанной выше, в работе [6.22,6.23] была получена математическая модель совокупного влияния влажности и засоренности и температуры хлопка-сырца на ослабление СВЧ энергии. В данном случае, с целью минимизации погрешности от изменения массы пробы хлопка-сырца, применялось ее уплотнение постоянным усилием 3-4 Н/см<sup>2</sup>, при котором плотность исследуемого материала (при минимальной влажности 5%) составляла 300 кг/м<sup>3</sup> ± 2%.

Объектом экспериментального исследования служил хлопок-сырец селекционной разновидности Ташкент-6 первого промышленного сорта. Влияющие параметры варьировали на следующих уровнях:

Влажность:  $W_{\text{мин.}} = 5,5\%$ ;  $W_{\text{макс.}} = 25\%$ .

Засоренность:  $Z_{\text{мин.}} = 3,0\%$ ;  $Z_{\text{макс.}} = 22\%$ .

Температура:  $T_{\text{мин.}} = 5^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{макс.}} = 50^{\circ}\text{C}$ .

Исходное уравнение, описывающее влажностную характеристику СВЧ-влажмера с уплотнением пробы постоянным усилием, имело вид:

$$N = 0,53W^2 + 12,27W - 7,55 \quad (6.8)$$

где  $N$  - выходной сигнал влагомера (сила тока уравновешивающего аттенюатора), мкА.

Величина  $N$  связана с ослаблением  $A$ , дБ соотношением:

$$A = -4 \times 10^{-5} N^2 + 0,1024 N.$$

Записав уравнение (6.8) в форме  $N = (0,728W + 8,42)^2 - 78,44$  и вводя вспомогательный параметр  $Z = (0,728W + 8,42)^2$ , получим:

$$N = Z - 78,44$$

В результате полного факторного эксперимента было получено уравнение:

$$N = 0,808Z - 0,938T + 0,0106TZ - 69,5$$

Эта модель описывает взаимное влияние влажности и температуры хлопка на ослабление проходящей волны. Взаимное влияние засоренности и температуры, а также засоренности, влажности и температуры при принятых условиях эксперимента - незначимы.

Электрические характеристики хлопкового волокна в диапазоне СВЧ были исследованы в работе [3.3, 6.24, 6.25]. Измерения выполнялись на частоте 10 Гц с помощью установки, основанной на волноводном методе определения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  диэлектриков. Исследуемый плоскопараллельный образец определенной толщины полностью заполнял сечение волноводной секции, одной из стенок которой служила короткозамыкающая пластина. Вторая стенка секции (закрытая тефлоновой пленкой) соединялась волноводным трактом с генератором СВЧ. Масса образца хлопкового волокна не превышала 10г и его влажность определяли термогравиметрическим методом, подвергая сушке в сушильном шкафу весь образец. Образцы увлажняли пропусканием через них пара, после чего они выдерживались в закрытых сосудах в течение 6-10 суток.

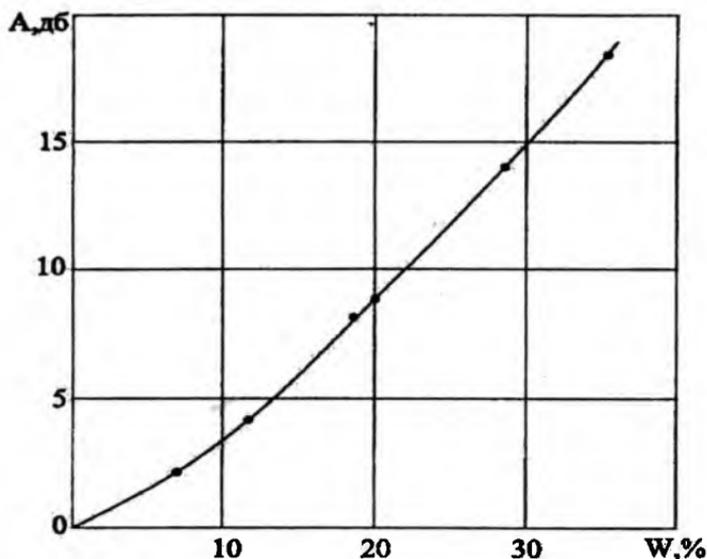
Измерения ослабления проводились на образцах хлопкового волокна 1 сорта при его плотности 55 кг/м<sup>3</sup> и влажности от 1,1 до 29%. Полученная влажностная характеристика  $A(W)$  (рис.6.15) аппроксимируется выражением:

$$A = \frac{28,8}{(W+1)^2} = 0,528W - 2,49$$

где:  $A$  - ослабление в децибеллах, приведенное к толщине слоя волокна

$l = 10$  см;

$W$  - влажность образца в процентах.



**Рис. 6.15. Зависимость ослабления  $A$  энергии СВЧ в хлопковом волокне от его влажности  $W$  ( $\lambda=3$  см).**

Влажностная характеристика хлопкового волокна по своей форме и характеру аналогична влажностным характеристикам хлопка-сырца и других хлопковых материалов; эта аналогия распространяется и на другие характеристики указанных материалов в диапазоне СВЧ.

## ГЛАВА VII. ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ

### *7.1. Основные положения. Конструктивные способы повышения точности СВЧ-влажномеров*

Задача повышения качества – одно из основных направлений научно-технического прогресса в нашей стране - полностью относится и влагометрии, как в ее современном состоянии, так и в дальнейшем развитии.

Оценка качества средств измерения влажности представляет некоторые трудности, обусловленные сложностью критерия оптимальности. Общепринятой является оценка по метрологическим характеристикам (точность, чувствительность, диапазон измерения, динамические характеристики и т.д.). Так, например, в работе М.Г. Матиса в качестве критерия оптимальности первичного преобразователя принят показатель селективности (избирательности) многопараметрового контроля, т.е. преобразования многомерного вектора входных величин в многомерный вектор измеряемой величины. Более распространенной является точностная оценка по суммарной погрешности средств измерения.

В наших работах по созданию и совершенствованию СВЧ-влажномеров для хлопка и хлопковых материалов ставилась цель – обеспечение наилучшего значения ведущего параметра при принятии ограничений на некоторые другие показатели качества, т.е. задача была сведена к "однокритериальной" оптимизации. Основным критерием качества являлось измерение влажности, с наложением ограничений по важнейшим экономическим и эксплуатационным характеристикам. Следовательно, ставилась задача не достижения максимальной точности влагомера, а точности экономически целесообразной с максимальной надежностью в реальных эксплуатационных условиях и обеспеченной необходимыми метрологическими средствами.

Задача повышения точности СВЧ-влажномеров имеет некоторые специфические особенности. Как было показано в главе 6, составляющими суммарной погрешности измерения у этих влагомеров являются погрешности, обусловленные функциями влияния неинформативных параметров исследуемого материала – его температуры, плотности, химического состава, распределения влаги и т.д. Для хлопка-

сырца погрешности по данным [7.1]: от неоднородности пробы - 9% от вариации выхода волокна - 7%, колебаний температуры - 14%, перераспределения влаги по формам связи - 8%.

Подобные погрешности у материалов хлопкомасложирового производства были исследованы нами на образцах, отобранных на Ташкентском масложиркомбинате непосредственно из технологических потоков.

Было установлено, что плотность этих материалов колеблется в пределах  $\pm 2,5\%$ . Расчет при влажности хлопковых семян 10% и изменении плотности на  $\pm 5\%$  показал, что на доверительном уровне 0,95 соответствующая погрешность амплитудного влагомера  $\delta_A \leq 0,3$  дБ, а фазового  $\delta_\phi \leq 18,0$  град. Температурные погрешности, соответствующие суточным изменениям температуры  $\pm 5^\circ\text{C}$ , составляют при  $W = 10\%$  соответственно  $\delta_A = 0,4$  дБ и  $\delta_\phi = 5,7$  град. По данным масложиркомбината, семена, поступающие на переработку, имели опушенность  $11 \pm 1\%$  и засоренность  $8 \pm 5\%$ . Колебаниям указанных параметров соответствуют погрешности  $\beta_{A0} = 0,4$  дБ,  $\delta_{\phi 0} = 2,2$  град и  $\delta_{A3} = 0,3$  дБ,  $\delta_{\phi 3} = 2,2$  град. Влияние неравномерности распределения влаги по формам связи было оценено погрешностями  $\delta_{Ac} = \pm 0,4$  дБ и  $\delta_{\phi c} = \pm 5,2$  град.

Результатирующее влияние перечисленных факторов влекло за собой погрешность, достигающую 60% суммарной погрешности амплитудного СВЧ-влагомера.

С учетом сказанного, оптимизация влагомера СВЧ ставит задачу (наряду с минимизацией инструментальной погрешности измерительного устройства) уменьшения влияния неинформативных параметров.

Задачу максимального подавления помех можно решить в измерительном и вычислительном устройствах, а также с помощью адекватного метрологического обеспечения.

В соответствии с этим, применяемые в влагометрии способы повышения точности измерения можно разделить на следующие группы:

1. Способы конструктивные, реализуемые в первичном измерительном преобразователе и предназначенные для воздействия на объект измерения [7.2].

2. Способы, реализуемые на стадии проектирования в измерительном устройстве воздействием на его структуру (структурные способы) или в процессе работы (адаптивные способы).

Из этой группы наибольшее применение в измерениях влажности нашли:

а) метод вспомогательных измерений влияющих величин и компенсации вызванных ими погрешностей с помощью вычислительного устройства вторичного преобразователя;

б) многопараметрические методы, заключающиеся в использовании в измерительном устройстве составляющих многомерного выходного сигнала датчика с целью компенсации влияния  $(n-1)$  мешающих величин.

Наиболее эффективная реализация этих методов достигается при компьютеризации средств измерения, в частности их сопряжением с микропроцессорами.

Предметом рассмотрения в данной главе являются вопросы реализации в СВЧ-влажномерах всех перечисленных способов повышения точности, а также вопросы, связанные с устройствами и системами их метрологического обеспечения.

Конструктивные способы решают задачу минимизации влияния таких величин, как плотность и температура исследуемого материала, распределение влаги в нем, изменения массы и (или) толщины слоя и т.п. Для этого используются устройства формирования пробы, выполняющие задачи искусственного уплотнения исследуемого материала, стабилизации толщины слоя в потоке сыпучих материалов или жидкостей, реже - термостатирования пробы, ее измельчения и т.д. Роль устройств формирования пробы особенно важна в поточных влажомерах, так как при лабораторных измерениях перечисленные операции (или их часть) может выполнять человек-оператор.

Нами были разработаны устройства для стабилизации плотности сыпучих хлопковых материалов в потоке. Как уже отмечалось, в технологическом потоке производства хлопкового масла плотность материалов не стабильна из-за колебаний опухленности и засоренности семян хлопчатника, наличия поверхностной влаги и влаги между опухенной оболочкой и ядром (что приводит к слипанию частиц), переменного гранулометрического состава шрота и мятки, комкового шрота.

Для минимизации погрешностей измерения, вызываемых этими факторами, было разработано несколько модификаций шнековых стабилизаторов плотности в потоке, схемы которых показаны на рис. 7.1.

Рис. 7.1а соответствует стабилизатору СШ-1, имеющему загрузочный шнек. Шнековый стабилизатор СШ-2 (рис.7.1б) с разгрузочным шнеком, как и СШ-1, содержит приемную воронку 1, трубу 2 из диэлектрика, в которой осуществляется измерение влажности, трубу 4, содержащую шнек 3, электродвигатель 6 с передачей 5. В этом устройстве материал под весом постоянного слоя уплотняется и разгружается равномерно с помощью шнека.

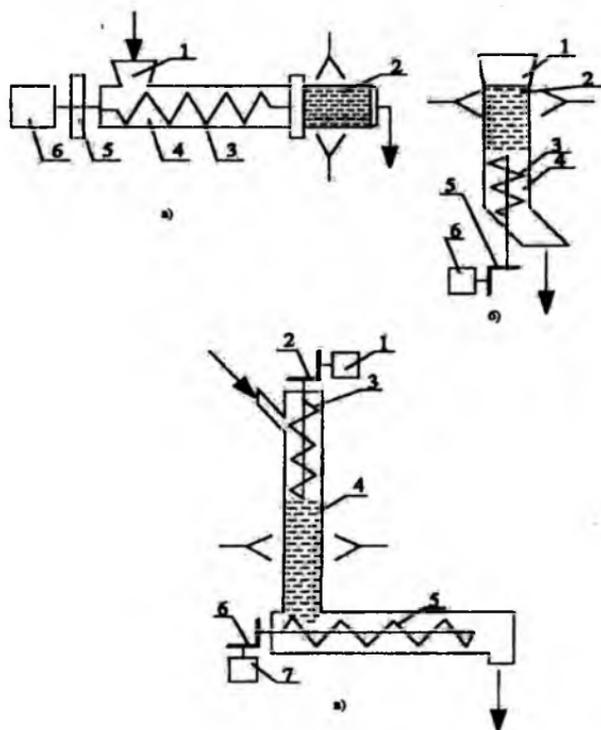
Испытания стабилизаторов СШ-1 и СШ-2 показали, что их характеристики близки; остаточная нестабильность плотности хлопковых семян не превышала  $\pm 6\%$ , а шрота -  $\pm 4\%$ .

Уменьшение остаточной нестабильности было достигнуто в третьей модификации - стабилизаторе СШ-3 [7.3]. Стабилизатор (рис.7.1в) содержит двигатели 1 и 7, редукторы 2 и 6, трубу 4 из диэлектрика и два шнека - загрузочный 3 и разгрузочный 5. Первый шнек подает контролируемый материал и уплотняет ее в измерительном пространстве, причем предусмотрена возможность выбора различной степени уплотнения для разных материалов.

Стабилизатор СШ-3 обеспечил стабильность плотности хлопковых семян  $\pm 3\%$ , а шрота  $\pm 2\%$ .

В работе [7.1] были разработаны формователи пробы с принудительным уплотнением образца для хлопка-сырца и некоторых других материалов. Устройство формирования пробы хлопка-сырца (рис.7.2) состоит из электродвигателя 1, и электромагнитной муфты 2, которая передает момент вращения электродвигателя на зубчатую передачу 3, превращающую с помощью ходового винта вращательное движение в поступательное движение поршня 4. Последний уплотняет пробу в камере 5 с плоскопараллельными стенками, к которым прикреплены передающая и приемная рупорные антенны 6,7, снабженные диэлектрическими линзами 8. На дне камеры 9 установлен датчик температуры (медный ферметр сопротивления) 10.

При включении электродвигателя поршень, перемещаясь в измерительной камере, уплотняет пробу до достижения равенства давлений образца и поршня, вызывающего проскальзывание (расцепление) электромагнитной муфты и прекращение перемещения поршня. Так достигается стабилизация уплотняющего усилия на уровне  $3-4 \text{ Н/см}^2$ , при этом массе образца 700-900 г соответствует объемная плотность пробы (при минимальной влажности  $W = 5\%$ ) равная  $300 \text{ кг/м}^3 \pm 2\%$ .

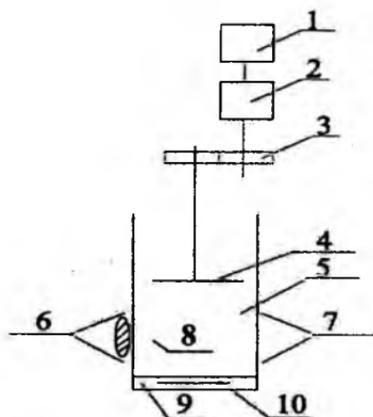


**Рис. 7.1. Шнековые стабилизаторы плотности материалов в потоке**

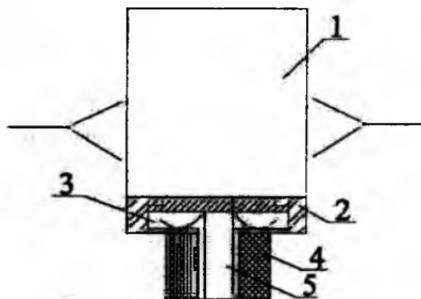
Такая стабилизация плотности образца позволяет свести относительную погрешность от нестабильности его массы до значения, не превышающего  $\pm 0,5\%$ , а также существенно уменьшить погрешность от другого влияющего параметра - выхода волокна хлопчатника. В результате был создан влагомер-СВЧ без предварительного взвешивания исследуемой пробы, имеющей относительную погрешность измерения влажности не больше  $\pm 8\%$ .

Для семян подсолнечника и сыпучих продуктов переработки семян хлопчатника разработано устройство формирования пробы с виброуплотнением (рис.7.3). В основании измерительной камеры 1 встроена пластина 2, связанная с сердечником 5 электромагнита 4, питаемого переменным током частотой 25 Гц, которая вибрирует с этой частотой. Максимальный ход пластины, нагруженной противодействующей пластинчатой пружиной 3, составляет 1,5 мм; длительность уплотнения образца - 15-20 секунд.

Описанные и некоторые другие устройства формирования пробы достаточно эффективно подавляют влияние плотности, толщины и переменной массы образца. Однако общими недостатками конструктивных способов являются усложнение конструкции первичного преобразователя (особенно у поточных влагомеров), необходимость индивидуальных решений, зависящих от конкретных объектов и условий измерения и пригодных для ограниченной группы задач. Наконец, для ряда материалов (сплошные, листовые) и влияющих величин (химический состав, распределение влаги) эти способы неприменимы. В связи с этим значительно большее распространение получили структурные методы, отличающиеся большей универсальностью.



*Рис. 7.2. Уплотнитель пробы хлопка-сырца*



*Рис. 7.3. Выброуплотнитель для семян масличных культур*

## 7.2. Структурные методы повышения точности СВЧ-влажномеров

Методы вспомогательных измерений нашли наибольшее применение в СВЧ-влажномерах для компенсации влияния температуры исследуемого материала. Это объясняется простотой датчиков температуры (чаще всего используются термометры сопротивления или полупроводниковые терморезисторы), устанавливаемых в рабочем пространстве первичного преобразователя или устройства формирования пробы и возможностью в большинстве случаев линеаризовать температурную характеристику.

Рассмотрим случаи применения температурных датчиков совместно с другими датчиками с целью достижения инвариантности относительно двух или более влияющих величин.

В амплитудном СВЧ-влажномере дискретного действия, предложенном в [7.4], измерительная камера определенного объема установлена на электронных весах. Весы выдают электрический сигнал, который вместе с сигналом датчика температуры, смонтированного в измерительной камере, поступает в вычислительное устройство влагомера, выдающее на выходной индикатор значения влажности, скорректированной с учетом температуры и плотности исследуемого материала.

Инвариантность относительно температуры и плотности обеспечивается в СВЧ-влажномере непрерывного действия для древесины [7.5] с помощью бесконтактных датчиков. Движущиеся пиломатериалы непрерывно проходят между передающей и приемной рупорными антеннами, а затем между источником и детектором гамма-лучей радиоизотопного плотномера. Температуру древесины измеряет радиационный пирометр по инфракрасному излучению. Сигналы от детектора, ослабление СВЧ энергии, плотномера и инфракрасного термометра обрабатываются микропроцессором, выдающим скорректированное значение влажности в диапазоне 5-30% с абсолютной погрешностью, не превышающей  $\pm 0,68\%$ .

Из отечественных приборов рассматриваемого класса отметим разработанный в Институте ядерной физики АН РУз СВЧ-влажномер хлопка-сырца, имеющий радиоизотопный плотномер [7.6]. Масса пробы составляет 1,7 - 6 кг; объемная плотность изменяется в пределах от 0,11 до 0,38 г/см<sup>3</sup>. Лабораторные испытания показали, что

погрешность влагомера не превышает 0,8% (абс.) в диапазоне влажности 6 - 42%, однако прибор не нашел практического применения из-за сложности конструкции и необходимости защиты от облучения обслуживающего персонала.

Основная группа структурных методов использует два параметра выходного сигнала первичного преобразователя с целью компенсации погрешности от одной влияющей величины. В таких двухпараметрических СВЧ-влагомерах по методу измерения в свободном пространстве измеряемыми параметрами сигнала датчика обычно служат ослабление  $A$  и фазовый сдвиг  $\varphi$  проходящей (реже отраженной) волны, а компенсируемой влияющей величиной - плотность (масса) исследуемого материала.

Примером может служить способ, предложенный в [7.7], который, по мнению его автора, позволяет минимизировать погрешности, вызванные изменениями плотности и толщины слоя материала. Исходя из допущения об однородности исследуемого материала и линейной зависимости компонентов СВЧ сигнала от масс воды и сухого вещества, можно написать:

$$\begin{cases} A = d(K_1 M_1 / V + K_2 M_0 / V) \\ \varphi = d(K_3 M_2 / V + K_4 M_0 / V) \end{cases} \quad (7.1)$$

где  $d$  - толщина слоя исследуемого материала;  $V$  - объем образца;

$M_1, M_0$  - масса соответственно воды и сухого материала;  $K_1, \dots, K_4$  - постоянные коэффициенты, характеризующие данный материал.

Из уравнений (7.1) можно вычислить влажность:

$$W = \frac{(K_4 A - K_2 \varphi)}{(K_1 - K_3) \varphi - (K_3 - K_4) A} \quad (7.2)$$

и погрешность измерения влажности:

$$\Delta W = \frac{(K_1 K_4 - K_2 K_3)(\varphi \Delta A + A \Delta \varphi)}{[(K_3 - K_4) A - (K_1 - K_2) \varphi]^2}$$

В выражения для  $W$  и  $\Delta W$  не входят величины толщины и плотности материала. Значения коэффициентов  $K_1 + K_4$  определяют по экспериментальным влажностным характеристикам  $A(W)$  и  $\varphi(W)$  каждого конкретного материала.

Способ реализуется в двухканальном измерительном устройстве (рис. 7.4), содержащем каналы измерения величин  $A$  и  $\varphi$  радиоволны, проходящей через материал, и вычислительное устройство, выдающее значение влажности, вычисленное по формуле (7.2).

На аналогичных предпосылках основаны двухпараметрические метод и влагомеры, предложенные в [7.8,7.9]. Экспериментальные исследования авторов показали, что при частотах  $f \geq 10 \text{ ГГц}$  у многих твердых материалов имеют место следующие зависимости вещественной и мнимой диэлектрических проницаемостей  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  от влажности  $W$  и плотности  $\rho$  влажного материала:

$$\epsilon' - 1 = f_1(W) g_1(\rho)$$

$$\epsilon'' = f_2(W) g_2(\rho)$$

где  $f_1, f_2, g_1, g_2$  - характерные для конкретного материала функции, причем  $g_1$  и  $g_2$  близки к линейным.

Как следствие этого,

$$F(W) = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} = C \frac{f_1(W)}{f_2(W)}$$

где  $C$  - постоянная, характеризующая значение влажности материала, независимо от его плотности.

Согласно [7.8], в СВЧ датчике влажности с двумя рупорными антеннами отношение фазового сдвига  $\phi$  к затуханию  $A$  равно:

$$\phi / A = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} \frac{2\sqrt{\epsilon'}}{1 + \sqrt{\epsilon''}}$$

и для малых значений  $\epsilon'$ , близких к единице, это отношение

$$\phi / A \approx \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''}$$

Полученные экспериментальные данные для некоторых материалов (табак, зерно, пшеница) подтверждают возможность измерения влажности СВЧ-влагомера по отношению  $\phi/A$ , инвариантного к изменению плотности материала. Более того, по приведенным данным, величины  $(\epsilon' - 1)/\epsilon''$  почти не зависят также от изменений температуры материала в достаточно широком диапазоне ( $20 - 80^\circ \text{C}$ ) и использование указанной величины в качестве измерительного сигнала позволяет минимизировать температурную погрешность без необходимости дополнительной термокомпенсации.

Предлагаемый способ реализуется в измерительном устройстве, аналогичном показанной на рис.7.4. Следует отметить, что, по данным [7.8], преимущества данного способа распространяются также на зондовые микрополосковые датчики влажности.

В дальнейшем указанные исследователи предложили и некоторые другие выражения функции  $A(W)$ , не зависящей от плотности или массы материала и применимые как для датчиков в свободном пространстве, так и волноводных, например:

$$F_1(W) = \frac{\varepsilon'(W) - 1}{\operatorname{tg} \delta(W)}, \quad F_2(W) = \frac{\varphi^2 - \varphi_0^2}{A\varphi}$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь исследуемого материала;

$\varphi_0$  - фазовый сдвиг датчика при отсутствии в нем материала.

Рассматриваемый двухпараметрический способ предложено распространить также на резонаторные датчики с использованием информативного сигнала:

$$F_3(W) = 2 \frac{(f_1 - f_0)/f_1}{(1/Q - 1/Q)}$$

где  $f$ ,  $Q$  - резонансная частота и добротность резонатора, а индексы относятся к: - 0 - пустому резонатору; 1 - резонатору, заполненному материалом.

Необходимо отметить, что описанные способы были успешно применены лишь в области невысокой влажности до преобладания свободной влаги.

Опубликованные данные не дают возможности судить об универсальности этих методов, испытанных на ограниченном количестве материалов, и дать полную характеристику их метрологических свойств.

В некоторых технологических процессах хлопкомасложировой промышленности и первичной обработки хлопка возникают условия, когда обычные СВЧ методы не могут обеспечить необходимую точность. Приведем два примера из процессов производства хлопкового масла. При перемещении хлопковых семян и некоторых продуктов их переработки на транспортной ленте и в пробоотборниках толщина слоя изменяется в очень широких пределах, что приводит к недопустимо высоким погрешностям. Влажность шрота на выходе из шнекового испарителя низка (3-5%) и чувствительность обычных влагомеров недостаточна.

Для этих и аналогичных условий измерения предложены два структурных метода улучшения метрологических характеристик СВЧ-влагомеров. Двухпараметрический метод [7.10] основан на измерении сигнала проходящей волны (ослабления или фазового сдвига), характеризующей влажность материала, и дополнительного сигнала - фазы волны, отраженной от передней поверхности материала - несущего информацию о его толщине.

Приняв допущение о том, что расстояние от передающей антенны до задней поверхности велико и отражением СВЧ волны от нее можно пренебречь, выразим фазу отраженной волны (рис.7.5) в точке А, через разность величин  $\varphi_{12}$ , являющуюся функцией влажности и  $\varphi_{\alpha}$ , зависящую от толщины материала  $l=l_1-d$ :

$$\Delta\varphi = \varphi_{12} - \varphi_{\alpha}$$

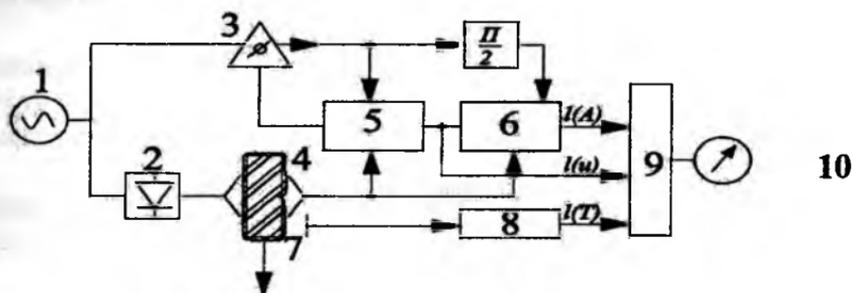


Рис.7.4. Функциональная схема двухпараметрического СВЧ- влагомера.

1- генератор СВЧ, 2-модулятор, 3-фазовращатель, 4-датчик влажности, 5-блок измерения сдвига фазы, 6-блок измерения ослабления, 7-датчик температуры, 8-блок измерения температуры, 9-измерительное устройство, 10-индикатор влагомера.

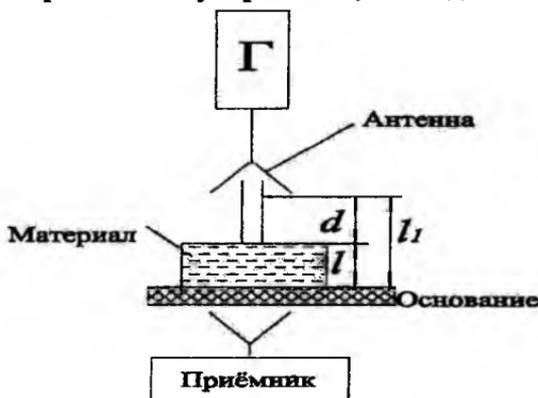


Рис.7.5. Принцип двухпараметрического метода

Если, в первом приближении, пренебречь влиянием влажности на фазу отраженной волны, то:

$$\Delta \varphi = \frac{4\pi(l_1 - l)}{\lambda} \quad (7.3)$$

Из (7.3) можно определить толщину  $l$  материала.

Относительная погрешность определения толщины материала из-за принятого допущения будет:

$$\delta = \frac{\lambda \Delta \varphi_w}{4\pi d} \quad (7.4)$$

где  $\Delta \varphi_w = \varphi_{12}(W_{\max}) - \varphi_{12}(W_{\min})$  - разность значений  $\varphi_{12}$  при максимальном значении влажности исследуемого материала.

Расчет по (7.4) показал, что погрешность измерения толщины при изменении влажности от 0 до 100% не превышает 0,5%, что соответствует пренебрежимо малой погрешности измерения влажности.

Исследование влияния неравномерности по толщине контролируемого материала показало, что фаза отраженной волны характеризует среднюю толщину материала.

Экспериментальное исследование рассмотренного метода было выполнено на установке, позволяющей измерять в свободном пространстве ослабление и фазу волны, проходящей через материал, а также фазу отраженной от него волны. На четырех образцах семян хлопчатника разной влажности определялось влияние переменной толщины образца на параметры проходящей и отраженной волн.

Полученные результаты подтвердили наличие тесной корреляционной связи между толщиной материала и фазой отраженной волны. Составляющая погрешности измерения влажности семян, обусловленная изменением толщины образца в пределах  $\lambda/2$ , не превышала 0,1% (абс.) при измерении фазы отраженной и амплитуды проходящей волн и 0,3% (абс.) при измерении фаз отраженной и проходящей волн. В первом случае метод дает четырехкратное уменьшение погрешности от влияния толщины по сравнению с обычными "однопараметровыми" влагомерами.

Метод "двух толщин" [7.10, 7.11] был разработан для измерений в диапазоне низких влагосодержаний. Исследуемый материал формируют в виде двух ступеней - плоскопараллельных слоев разной толщины (рис.7.6). На ступени падают потоки излучения:

$$\Phi_{01} = |\Phi_{01}| e^{j(\omega t + \beta_1 z)}$$

$$\Phi_{02} = |\Phi_{02}| e^{j(\omega t + \beta_2 z)}$$

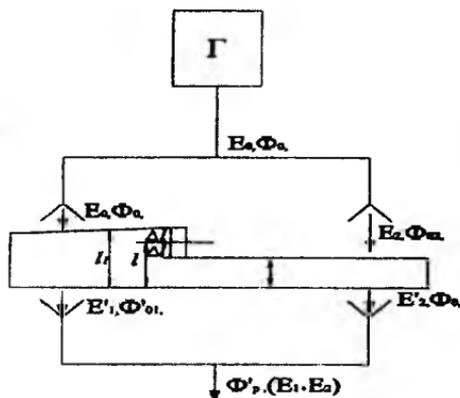


Рис. 7.6. Принцип метода “двух толщин”

Модули этих потоков изменяются в результате ослабления в слоях материала соответственно в  $e^{-\alpha l_1}$  и  $e^{-\alpha l_2}$  раз, а сдвиг фаз соответственно в  $\beta l_1$  и  $\beta l_2$  ( $\alpha, \beta$  - коэффициенты материала-ослабления и фазовый).

Модуль суммарного прошедшего потока будет:

$$|\Phi'_p| = \sqrt{\Phi_{01}^2 e^{-2\alpha l_1} + \Phi_{02}^2 e^{-2\alpha l_2} + 2\Phi_{01}\Phi_{02} e^{-\alpha(l_1+l_2)} \cos(\beta - \beta_0)(l_1 - l_2)}$$

Высоту ступеней выбирают такими, чтобы при максимальной влажности материала выполнялось условие:

$$\Delta l = \frac{n\pi}{2(\beta_m - \beta_0)} \quad \text{где: } n=1, 2, \dots$$

$$\alpha = \Phi_{01} / \Phi_{02} = \exp 2\alpha_m \Delta l.$$

где  $\alpha_m, \beta_m$  - коэффициенты (ослабления и фазовый) для материала максимальной влажности:  $\Delta l$  - половина разности высот ступеней.

Материал облучают двумя потоками энергии СВЧ; первый из них, превышающий второй на значение ослабления в материале разностной толщины, направляют на более высокую ступень, второй поток - на более низкую.

Потоки, прошедшие через ступени, суммируют и в качестве информативного параметра для влажности принимают ослабление результирующего потока, равное:

$$Z = 20\alpha \lg l + 10 \lg \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{\pi(2K-1)l_{\max}}{\beta_{\max} - \beta_0} \right]^2 \right\} \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{\pi(2K-1)(2\alpha_{\max} - \alpha_0)}{\beta_{\max} - \beta_0} \right] + \exp \left[ \frac{\pi(2K-1)\alpha}{\beta_{\max} - \beta_0} \right] + 2 \cos \frac{\pi(2K-1)(\beta - \beta_0)}{\beta_{\max} - \beta_0} \exp \left[ \frac{\pi(2K-1)\alpha_{\max}}{\beta_{\max} - \beta_0} \right] \right\} \quad (7.5)$$

В выражении (7.5) первое слагаемое равно ослаблению в материале средней толщины  $l = (l_1 + l_2)/2$ , а второе представляет собой добавку, вызывающую повышение чувствительности измерения, так как ее величина растет с увеличением влажности. Отметим также, что толщина материала входит лишь в первое слагаемое и, как следствие этого, - результат измерения влажности зависит в данном методе значительно меньше от толщины материала, чем в "однопараметровом" амплитудном СВЧ методе.

Оценку степени повышения чувствительности можно выполнить аналитически, сравнивая значение ослабления по формуле (7.5) с ослаблением в обычном амплитудном влагомере ( $A = -8,68\alpha l$ ). Экспериментальное сравнение было выполнено для шрота, хлопкового волокна и хлопковых семян на установке, позволяющей измерять модуль суммарного потока через два слоя материала разной толщины. Для шрота в диапазоне влажности 3,3-5,5% установлено повышение чувствительности с 0,3 до 6 дБ/%  $H_2O$ . Результаты, полученные для хлопковых семян и волокна (рис. 7.7), подтвердили существенное повышение чувствительности с 1 и 0,2 дБ/%  $H_2O$  до 3 и 2 дБ/%  $H_2O$ , соответственно для этих материалов.

Метод "двух толщин", повышая чувствительность влагомера СВЧ, по существу улучшает его другую метрологическую характеристику - диапазон измерения, расширяя его в сторону низкой влажности. Аналогичная идея - расширение диапазона измерения влажности (но в сторону высокой влажности) с сохранением необходимой чувствительности и точности путем варьирования толщины исследуемого слоя материала - была реализована в СВЧ-влагомере ТашГТУ для хлопка-сырца без предварительного взвешивания пробы [6.20]. Техническая реализация этой идеи заключается в изменении направления потока радиоволн СВЧ с помощью переключателя с одной пары антенн на другую, расположенных во взаимно перпендикулярных направлениях. Это позволило перекрыть диапазон измерения 5-50% влажности с двумя поддиапазонами 5-25% и

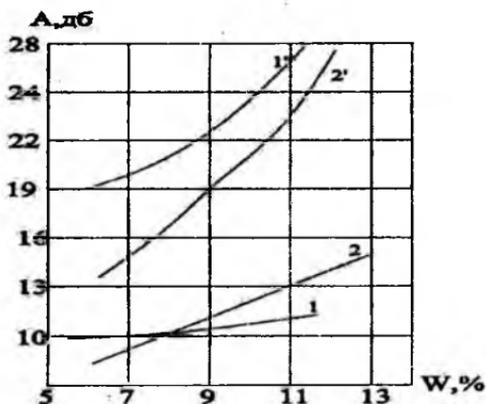
25-50% хлопка-сырца одним первичным измерительным преобразователем.

Приведенный обзор многопараметрических СВЧ методов измерения влажности позволяет дать общую оценку этим методам. Практически (если не использовать дополнительно вспомогательные измерения влияющих величин) были реализованы только двухпараметрические методы. Они позволяют достаточно эффективно улучшить одну-две метрологические характеристики и (или) минимизировать погрешности, связанные с одной влияющей величиной. Однако это достигается ценой значительного усложнения измерительного устройства, введением дополнительных каналов измерения, увеличивающих суммарную погрешность. Это влечет за собой и такие отрицательные последствия, как удорожание влагомера и ухудшение его эксплуатационных характеристик (в частности — надежности).

Поэтому предпочтение следовало бы отдать средствам измерения, влажности, основанным на методах, которые по своей сущности (по используемым физическим принципам преобразования влажности в измерительный сигнал) обеспечивают инвариантность по отношению к одной или нескольким главным влияющим величинам. Известны попытки создания таких методов на базе сверхвысокочастотных измерений влажности.

В [7.14] предлагается метод измерения влажности твердых материалов по их частоте релаксации, функционально связанной с влажностью, причем этот способ позволяет существенно снизить влияние таких неинформативных параметров исследуемого материала, как изменение геометрических размеров, плотности, состава и г.д.

Для измерения влажности почв и грунтов был исследован [7.15] метод, основанный на измерении их диэлектрической проницаемости при частоте 1 ГГц. Измерительное устройство представляет собой рефлектометр, определяющий минимум коэффициента отражения исследуемого образца в функции частоты радиоволн, полученных от транзисторного генератора качающейся частоты (0,5-2 ГГц).



**Рис. 7.7. Зависимость ослабления от влажности:**  
**1, 2-при известном способе; 1', 2'-при новом способе.**

Результаты экспериментов показали возможность применения единой градуировки влагомера, независимо от типа исследуемых почв и грунтов.

К сожалению, в литературе отсутствуют сведения о практической реализации и применении этого метода, которые подтвердили бы его преимущества и позволили рекомендовать их для хлопковых и других материалов.

### **7.3. Применение микропроцессорной техники**

Применение микропроцессоров позволяет не только наиболее эффективно решить рассмотренные выше задачи оптимизации влагомеров СВЧ, но и улучшить их эксплуатационные и экономические характеристики и значительно расширить функциональные возможности. Это достигается переходом от традиционных измерений с жесткой логикой к выполнению под управлением программы всех арифметических и логических действий, необходимых для обработки данных, преобразования и вывода измерительной информации, причем возможность замены программы другой программой, хранимой в памяти, обеспечивает большую гибкость и многофункциональность средства измерения.

Сопряжение средств измерения с микропроцессорами (точнее с микро-ЭВМ, содержащей кроме микропроцессора устройства

внешней памяти и ввода-вывода информации) стало одной из основных тенденций современной измерительной техники [7.16]. Оно особенно эффективно в области аналитических измерений, т.е. анализа состава и измерения свойств веществ и материалов, так как измерительным системам этого типа приходится взаимодействовать с многомерными входными и выходными величинами и использовать алгоритмы косвенных и совокупных измерений. Однако имеющийся опыт показывает, что во влагометрии и гигрометрии возможности микропроцессорной техники используются далеко не полностью, а лишь для решения ограниченного круга задач. В связи с этим возникает необходимость более исчерпывающего рассмотрения существенных для влагометрии (в частности - для СВЧ - влагометрии) функций, которые можно возложить на микропроцессоры [7.17]. Этими функциями являются:

а) выдача окончательных результатов измерения в различной форме, наиболее удобной для потребителя. Выходные данные могут быть выданы на дисплей, аналоговый или цифровой индикатор, цифрорпечатающее устройство или в виде данных для ЭВМ более высокого ранга;

б) обеспечение универсальности влагомеров.

В предыдущих главах было показано, что градуировка влагомеров СВЧ (как и влагомеров, основанных на других косвенных методах измерения) выполняется эмпирически. Переход от одного исследуемого материала к другому и даже от одного типа первичного измерительного преобразователя к другому требует новой градуировки влагомера. Это послужило причиной создания на первой стадии (и до настоящего времени) влагомеров узкого назначения - для одного или двух-трех материалов с применением датчика одного типа.

Для расширения области применения влагомеров первоначально применяли наиболее примитивные способы - переводные таблицы или сменные шкалы для различных объектов измерения с различными датчиками. Эти способы неприемлемы для автоматических влагомеров и в более современных приборах указанная задача решается в самой структуре измерительного устройства.

Для достижения универсальности влагомера, наряду с увеличением возможностей охвата многих материалов и типов датчиков, необходимо также расширение диапазона измерения влажности. Если рассматривать хлопок и хлопковые материалы, этот диапазон

должен охватывать значения влажности от 0-1% (хлопковое масло) до 50-60% (хлопок-сырец).

Микропроцессорные системы дают возможность решить перечисленные задачи наиболее просто и эффективно. В частности, для номинальных градуировочных характеристик, т.е. полученных с помощью естественных образцов уравнений регрессии выходного сигнала измерительного преобразователя и влажности, определенной образцовым методом для различных материалов, можно применить единый алгоритм вычисления, пригодный для датчиков всех типов. Градуировочные характеристики большинства твердых капиллярно-пористых материалов можно аппроксимировать полиномом  $m$ -го порядка:

$$y = a_0 + a_1u + a_2u^2 + \dots + a_mu^m$$

где  $y$  - выходной сигнал измерительного преобразователя;  
 $u$  - влагосодержание;  $a_i$  - коэффициент полинома.

Следовательно, достаточно записать в память значения коэффициентов  $a_i$ , соответствующие датчику определенного типа.

Практически возможно дальнейшее упрощение задачи и уменьшение необходимого объема ПЗУ, для всех хлопковых материалов градуировочные характеристики описываются достаточно точно параболой 2-го порядка, т.е. коэффициентами  $a_0$ ;  $a_1$ ;  $a_2$ . Для узких диапазонов влажности достаточно точной может быть линейная регрессия:  $y = a_0 + a_1u$ . Линеаризация градуировочной характеристики возможна и в более широких диапазонах для некоторых материалов (например, жидких - хлопковые масла) или для отдельных участков характеристики при применении кусочно-линейной аппроксимации.

в) Улучшение метрологических характеристик, в частности, повышения точности влагомера путем уменьшения систематической и случайной составляющих его суммарной погрешности. Определенное уменьшение систематической (методической) погрешности достигается, благодаря возможности использования большого числа номинальных градуировочных характеристик для различных сортов и разновидностей исследуемых материалов (см.гл.6). Разумеется, что достигаемый эффект определяется адекватностью принятой модели градуировочной характеристики, т.е. погрешностью этой характеристики.

Уменьшение инструментальной составляющей систематической погрешности обеспечивает автокалибровка вторичного измери-

тельного преобразователя. Блок автокалибровки корректирует смещение нуля и коэффициента передачи (чувствительность) измерительного канала по встроенным эталонам - образцовым мерам, стандартным образцам и т.п.

Как уже указывалось, основную составляющую суммарной погрешности влагомера образуют случайные погрешности, связанные с составом, состоянием и свойствами исследуемого материала. Микропроцессор не может обеспечить инвариантность результата измерения относительно влияющих величин, но он успешно решает задачи минимизации погрешностей от неинформативных параметров. Для этого можно использовать структурные методы, рассмотренные в п. 7.2.

Автоматическую коррекцию влияния двух наиболее значимых величин (для хлопковых материалов - температуры и плотности) позволяют осуществить математические модели совокупного влияния этих величин и влажности на выходной сигнал первичного преобразователя в сочетании со вспомогательными измерениями величин. Эти модели имеют вид функций  $y = F(W, \rho, T)$  ( $y$  - выходной сигнал первичного преобразователя;  $\rho$ ,  $E$  - плотность и температура исследуемого материала). Будучи заложенными в постоянное запоминающее устройство микропроцессора, они позволяют вычислить значение влажности, скорректированное на температуру и плотность, по сигналам датчиков влажности, температуры и плотности. Компьютеризация позволяет решить ряд задач, существенных для автоматических СВЧ-влагомеров непрерывного или дискретного действия. К этим задачам относятся:

- формирование управляющих (чаще всего аналоговых) сигналов и закона управления технологическим процессом;

- групповое измерительное преобразование и коммутация, необходимые в системах информационно-измерительных и централизованного контроля и управления. Наличие в микропроцессорном комплекте интерфейсной карты позволяет подключить его к стандартной интерфейсной шине и объединить с совокупностью других приборов и элементов системы в единый измерительный и (или) управляющий комплекс;

- повышение надежности прибора, благодаря упрощению аналоговой части измерительного преобразователя, уменьшению числа элементов схемы, реализации автодиагностики и повышению метрологической надежности (уменьшение погрешностей);

- автоматическое управление операциями процесса измерения, повышающее быстродействие прибора и устраняющее погрешности, обусловленные субъективными факторами человека - оператора.

Примерами могут служить операции формирования пробы исследуемого материала и характеристик, в частности, повышение точности влагомера путем уменьшения систематической и случайной составляющих его суммарной погрешности. Определенное уменьшение систематической (методической) погрешности достигается, благодаря возможности использования большого числа номинальных градуировочных характеристик для различных сортов и разновидностей исследуемых материалов (см. гл. 6).

Разумеется, что достигаемый эффект определения ее массы; управление шнековыми стабилизаторами плотности материала в потоке (см. п. 7.1), управление сканирующим устройством для получения продольного или поперечного профиля влажности материала в потоке. В результате может быть достигнута полная автоматизация процесса измерения. Структура микропроцессорного влагомера обычно состоит из следующих основных частей (подсистем) (рис. 7.8): входного блока 1 и пульта управления 2, микропроцессорной системы 3, выходного блока выдачи информации 4.

Реализация входного блока в отличие от остальных блоков полностью определяется измеряемой величиной. В этот блок входят датчики влажности ДВ и измерительный преобразователь ИПВ, выходной сигнал, которого характеризует значение влажности. Эти элементы влагомера рассматриваются подробнее в гл. 8.

Блоки автокалибровки БА и автоматической коррекции выполняют функции уменьшения систематических и случайных погрешностей влагомера. Блок автоматической коррекции содержит датчики ДК важнейших влияющих величин (в схеме рис. 7-8-плотности  $\rho$  и температуры  $t$  материала) и вторичные измерительные преобразователи  $U_1$  и  $U_2$  этих величин. Число корректируемых величин может быть увеличено.

Выходные сигналы измерительных устройств ИПВ,  $U_1$ ,  $U_2$  преобразуются аналого-цифровыми преобразователями АЦП в двоично-кодированную форму и поступают на интерфейс ввода микропроцессора ИФ ввода. Для использования одного АЦП можно применить аналоговый мультиплексор (коммутатор) с несколькими каналами.

Пульт управления ПУ служит для установления связи и взаимодействия человека-оператора с микропроцессорной системой и ее выходными устройствами.

Выходная информация микропроцессорной системы используется в блоке IV в цифровой или аналоговой (после преобразования цифро-аналоговым преобразователем ЦАП) форме. Цифровые сигналы поступают на табло прибора ЦИ, печатающее устройство АЦПУ и (или) на дисплей И.

В первом случае результаты измерения фиксируются в выбранной оператором форме, а на экране дисплея возможно получение измерительной информации одновременно в нескольких формах, например, значений влажности в процентах и отклонений от заданного значения. Аналоговый сигнал поступает на стандартные показывающие и (или) регистрирующие измерительные приборы. Этот сигнал можно использовать также для управления устройствами формирования пробы и другими вспомогательными операциями измерительного процесса. Кроме того, аналоговый сигнал можно передать в систему автоматического управления или в АСУТП.

Микропроцессорная система в данном случае исполняет роль подсистемы всего влагомера, взаимодействующей с другими подсистемами, но при этом сохраняет обычную общую структуру, важнейшими элементами которой являются арифметико-логическое устройство и управляющая память. Для хранения команд и данных служит внутренняя память, соответственно постоянное запоминающее устройство ПЭУ и оперативное запоминающее устройство ОЗУ. Программа работы микропроцессора хранится в ПЭУ и не разрушается; здесь же хранятся некоторые константы, а также данные для автокалибровки. ОЗУ служит для временного хранения данных, подлежащих обработке и промежуточных результатов вычислений.

Связь различных элементов микропроцессорной системы между собой и сопряжение с внешними устройствами реализует интерфейс ввода и вывода, соединяющий модули системы между собой и с внешними устройствами.

Общие рекомендации по выбору конкретного микропроцессора приводятся в литературе по микро-ЭВМ и микропроцессорам. Характерной особенностью микропроцессорных влагомеров являются невысокие требования к быстродействию микропроцессора,

так как физические процессы изменения влагосодержания материалов всегда являются весьма медленными и динамическими погрешностями микропроцессоров всех типов можно пренебречь.

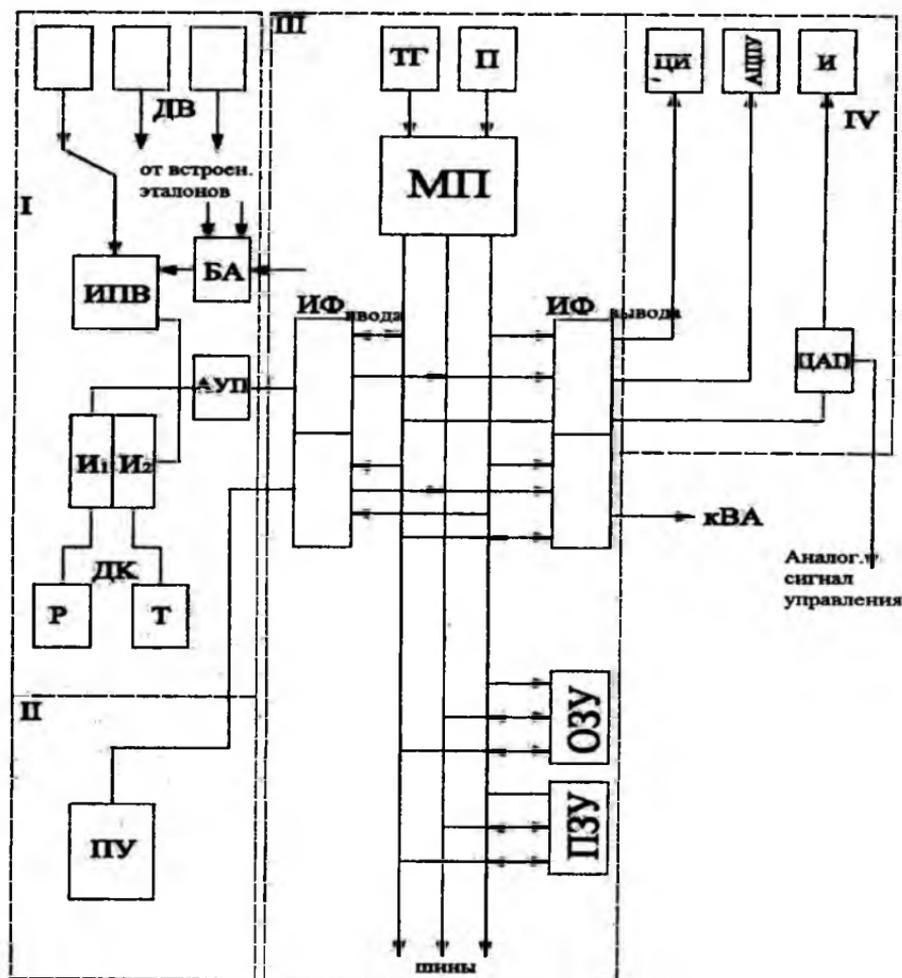


Рис. 7.8. Структурная схема микропроцессорного влагомера

В работе [7.18] рассматривается определение разрядности микропроцессора и преобразователей АЦП и ЦАП по метрологическим соображениям, исходя из статических погрешностей влагомера, вычислительного устройства и преобразователей микропроцессора.

#### **7.4. Метрологическое обеспечение СВЧ-влажномеров для хлопковых материалов**

Необходимым условием оптимизации влагомеров, как и других средств измерения, является создание метрологического обеспечения единства и точности измерений. Экономическое значение метрологического обеспечения определяется не только сокращением убытков потерь и повышением качества хлопка-сырца и хлопковых материалов в результате повышения достоверности и точности измерительной информации. Метрологическое обеспечение и его качество взаимосвязаны также с областью производства влагомеров (приборостроение) и их эксплуатацией (измерительная техника). Эти три отрасли образуют единую систему, играющую важную роль в народном хозяйстве нашей страны. Отсюда вытекает необходимость и решения частной задачи измерения влажности хлопка, его компонентов и продуктов первичной переработки, удаления достаточного внимания метрологическому обеспечению этих измерений.

Государственная система обеспечения единства измерений охватывает методы и технические средства поверки и градуировки влагомеров при их производстве и эксплуатации, создание комплекса эталонов, стандартизацию и научно-техническую документацию в области метрологии, включая создание единой терминологии, системы единиц измерения и стандартных справочных данных. При этом метрологические характеристики образцовых средств измерения должны быть согласованы с регламентированными (стандартизованными) требованиями к влажности рассматриваемых материалов.

Современное состояние метрологического обеспечения влагометрии твердых веществ характеризуется тем, что в последние годы были разработаны и апробированы методы и средства поверки таких важных для народного хозяйства материалов и продуктов, как зерно и продукты его переработки, строительные материалы, каменный уголь, минеральные удобрения и некоторые другие продукты агропромышленного комплекса [7.19]. Для перечисленных материалов разработана и опробована система поверок влагомеров с применением стандартных образцов [7.20]. Большинство образцовых средств и стандартных образцов предназначено для диэлькометрических высокочастотных влагомеров.

Значительно хуже обстоит дело с метрологическим обеспечением влагомеров СВЧ, в частности, влагомеров для хлопка-сырца, хлопковых семян и других хлопковых материалов. Для этих материалов регламентирован только термогравиметрический метод определения влажности.

Нормативные документы определяют аппаратуру, используемую для определения влажности термогравиметрическим методом. В настоящее время применяют следующие устройства:

1. Сушильные шкафы типа Уз-7М, Уз-8 или других типов, у которых температурный градиент в рабочем пространстве не превышает 2 °С.

2. Кондиционные аппараты типа АК-2.

3. Термовлагомеры для определения ускоренным методом влажности хлопка-сырца, семян, волокна, линта.

Установка Уз-8 предназначена для хлопка-сырца и продуктов его переработки. В комплект этой установки входят следующие элементы: сушильный шкаф типа ШСХ-1 с принудительной циркуляцией агента сушки-воздуха; стабилизатор напряжения; бюксы (20шт.), лабораторные весы на 200г, устройство для дробления семян, два эксикатора; часы; ртутно-стеклянные термометры контрольный с ценой деления 0,1 °С и контактный типа ТПК 5-11-100; щипцы для работы с горячими бюксами.

Пробы хлопка, массой 10 г. сушат в потоке воздуха, нагретого до температуры  $110 \pm 1,5$  °С. Одновременно можно сушить до 10 проб хлопка. Длительность сушки проб хлопка-сырца и хлопковых семян - 4ч; волокна, линта и волокнистых отходов - 2ч.

Термовлагомер УСХ-1 для определения влагосодержания хлопка-сырца в диапазоне 5-75% основан на методе контактной сушки проб хлопка-сырца между двумя металлическими плитами, нагреваемыми до 195 °С. Массы пробы хлопка-сырца 40 г. При проверке термовлагомера проверяют температуру поверхностей плит и амплитуду ее колебаний с помощью пяти термопар; средняя температура в каждой точке не должна отличаться от номинальной более чем на  $\pm 2$  °С, а амплитуда колебаний температуры не должна превышать  $\pm 5$  °С.

Термовлагомеры применяют в лабораториях заготовительных пунктов и хлопкоочистительных заводов для оперативного определения влажности принимаемого хлопка-сырца. Сушка в термовлаго-

мере выполняется при высокой температуре основания, которой соответствует температура высушиваемого хлопка-сырца 130-140 °С. При этом длительность сушки хлопка-сырца и хлопковых семян составляет 5-10 мин., а хлопкового волокна - не больше 8 мин.

В кондиционном аппарате длительность сушки хлопка-сырца достигает 8-10, а в сушильных шкафах - 3,5-6 ч. В связи с этим сушильные шкафы используются в хлопковой промышленности только для арбитражных и контрольных определений влажности. Термогравиметрический метод с сушкой в сушильных шкафах применялся также в качестве образцового метода для градуирования и поверки влагомеров, основанных на косвенных методах.

Массовое применение термогравиметрического метода и, особенно, его использование во влагометрии хлопка в качестве образцового метода, вызывает необходимость тщательного анализа характеристик этого метода. В первую очередь, представляет интерес важнейшая метрологическая характеристика - суммарная погрешность определения влажности.

Следует принять во внимание, что термогравиметрический метод является чисто эмпирическим, у которого результат определения влажности зависит и от используемой аппаратуры, и от режима сушки, который, в свою очередь, определяется рядом факторов.

Рассмотрим важнейшие влияющие факторы, применительно к наиболее точному способу сушке в сушильных шкафах и кондиционных аппаратах. При используемой в этой аппаратуре конвективной сушке важнейшее значение имеет температура теплоносителя и ее неравномерность в рабочем пространстве ( в объеме сушильной камеры).

По данным, приведенным в [2.9], для сушки хлопка-сырца в вакуумном или вытяжном сушильном шкафу, при 101 °С и при 130 °С, потеря массы оказывается различной, причем время, необходимое для достижения постоянного уровня дегидратации, практически не зависит от влажности образца. Для хлопковых семян при высушивании при 130 °С также были получены значительно более высокие значения влажности, чем при 101 °С.

Влияние температуры агента сушки на точность определения влагосодержания хлопка-сырца можно выразить коэффициентом  $K$ , характеризующим погрешность определения влагосодержания при изменении температуры теплоносителя на 1 °С:

$$K = \frac{U_{t+\Delta t} - U_t}{\Delta t} \%,$$

где  $U_t$ ,  $U_{t+\Delta t}$  - результаты определения влагосодержания при температурах теплоносителя, соответственно  $t$  и  $t+\Delta t$ ;

$\Delta t$  - отклонение температуры теплоносителя от номинального значения.

Установлено, что коэффициент  $K$  для низких влагосодержаний хлопка-сырца ( $U \leq 10\%$ ) равен  $0,05\%$ , для более высоких ( $23-26\%$ ) достигает  $0,09\%$ .

Если, в соответствии с требованиями хлопкоперерабатывающей промышленности, температура стабилизирована в пределах  $105-110^\circ\text{C}$ , т.е. с допуском  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  относительно среднего значения, погрешность, обусловленная указанным допуском, составит для хлопка-сырца с низким влагосодержанием  $\pm 0,25\%$  абс, а с высоким влагосодержанием  $\pm 0,45\%$  абс. При наличии же в рабочем пространстве сушильного шкафа градиентов температуры, превышающих указанные значения, погрешности, вызванные этими градиентами, соответственно увеличиваются.

Другая методическая погрешность обусловлена тем, что конец сушки соответствует не полному удалению влаги, а достижению гидротермического равновесия образца, т.е. равновесного давления водяного пара в сушильном материале и окружающем воздухе. Если, относительная влажность окружающего воздуха  $\phi_{30} = 80\%$  при температуре  $30^\circ\text{C}$ , то при нагреве до  $100^\circ\text{C}$  она составит  $\phi_{100} = 3,5\%$ . Значению  $\phi_{100}$  по изотермам сорбции хлопка-сырца соответствует равновесное (остаточное) влагосодержание  $U \approx 1\%$ .

Указанное явление - "недосушивание" исследуемого образца в результате влияния относительной влажности воздуха -  $\phi$  уменьшается с понижением  $\phi$  и повышением температуры сушки, однако полностью устранить его невозможно. Что же касается связанной влаги в коллоидных материалах, ее удаление невозможно без разрушения коллоидной частицы. Таким образом, понятие "абсолютно сухого" хлопка является чисто условным.

Дополнительным источником погрешности служит неточность взвешивания и усреднения результатов определения. Для определения влажности необходимо выполнить три серии взвешиваний: бюкс хлопком до сушки, а также пустых бюкс. При сушке в сушильном шкафу применяют технические весы с погрешностью взвешивания

10 мг, при сушке в кондиционном аппарате эта погрешность достигает 50 мг. Суммарная погрешность взвешивания в первом случае составляет около  $\pm 0,02$  г на каждую бюксу, что соответствует погрешности определения влажности  $0,1 \div 0,2\%$  абс. Некоторая, как правила небольшая, погрешность может быть вызвана адсорбцией влаги высушенной пробы в процессе ее охлаждения между окончанием сушки и взвешиванием.

Одной из важнейших составляющих суммарной погрешности гравиметрического метода является погрешность, обусловленная непредставительностью используемых проб, вследствие неравномерности распределения влажности хлопка-сырца и его компонентов.

Это фактор сказывается уже при вычислении средней влажности по результатам взвешивания четырех высушенных проб хлопка-сырца. Согласно ранее действовавшему ГОСТу 9679-81, максимальные расхождения между этими результатами не должны превышать 0,5% при влажности хлопка-сырца ниже 20% и 1,0% для более влажного хлопка. Отклонения, превышающие указанные значения, рассматривались как ошибочные и соответствующий результат отбрасывался. Такая методика была неправильной, так как такие и большие отклонения лишь характеризуют неравномерность влажности в пределах исследуемого образца и отбрасывание одного из четырех результатов искажает результат вычисления его средней влажности.

Количественная оценка погрешностей от неравномерности по влажности хлопка-сырца в партии (хлопка-сырца одного селекционного и промышленного сорта и одного вида сбора, поступившего от одного сдатчика в течение одного дня) и в среднедневном образце приведена в главе 2.

К менее существенным факторам, влияющим на результат определения влажности, можно отнести потерю летучек (особенно в хлопковых семенах) и термический распад клетчатки при высокой температуре сушки выше  $150^{\circ}\text{C}$ , возможность выдувания пыли и сора потоком нагретого воздуха (например, в кондиционных аппаратах).

Как известно, кондиционные аппараты не нашли широкого применения в лабораториях заготовительной системы и хлопкоочистительной промышленности ввиду их недостатков, громоздкости, значительного потребления электрической энергии и большой длительности высушивания.

Так как значение влажности по результатам определения в сушильном шкафу всегда меньше, чем при высушивании этого же образца в кондиционном аппарате, ранее была установлена поправка, равная  $\pm 0,54\%$  абс, которую необходимо было добавлять к результатам определения в сушильном шкафу для хлопка-сырца 1-3 сортов. Последующие исследования показали недостаточную обоснованность этой поправки. Кроме того, она может служить источником дополнительной погрешности из-за неправильного определения промышленного сорта (для 4 сорта поправка не вводится).

Определению влажности с помощью термовлагомера присущи некоторые дополнительные источники погрешностей, обусловленные как характером процесса сушки (ускоренная сушка при более высокой температуре, контактная сушка вместо конвективной), так и конструктивными особенностями аппарата.

Специфическими влияющими факторами являются не постоянство температуры основания (основной греющей поверхности) и крышки, а высота рабочей камеры, определяющая при заданной массе образца степень его прижатия к греющей поверхности и тепловой контакт с ней, давление пара в рабочей камере в период прогрева и в период откачки. Малая длительность сушки требует точного измерения времени. Недостатки, связанные с высокой температурой сушки, были отмечены выше.

К эксплуатационным недостаткам термовлагомера относятся его громоздкость (большие габариты и масса), неудобство работы, значительный расход электрической энергии.

Из сказанного выше следует, что суммарная погрешность определения влажности в сушильном шкафу или термовлагомере зависит от многочисленных факторов, связанных как с объектом измерения, так и условиями определения режим сушки и конструкция аппаратуры. Во влагометрии хлопка и хлопковых материалов термогравиметрический метод часто применяется в качестве образцового и то обстоятельство, что его суммарная погрешность соизмерима с погрешностью исследуемого влагомера, имеет существенное значение для оценки метрологических характеристик влагомера.

С точки зрения задач оперативного контроля и управления процессами производства хлопкового масла, главными недостатками термогравиметрического метода являются:

- большая длительность анализа;

- низкая представительность проб вследствие их малой массы, и значительная неравномерность распределения влаги в хлопковых семенах и продуктах их переработки;

- влияние субъективных факторов человека-оператора, которые могут повлечь за собой не только увеличение погрешности определения влажности (в результате ошибок при взвешивании, вычислении результатов и т.п.), но и преднамеренное изменение конечного результата.

Анализ современных технических возможностей усовершенствования термогравиметрических установок для определения влажности привел нас к следующим выводам:

- существенное повышение быстродействия установок (с нескольких часов до нескольких минут) может быть достигнуто применением сушки в поле сверхвысокой частоты (СВЧ);

- при СВЧ сушке массу исследуемого образца можно увеличить до 1 кг и более;

- для исключения субъективных факторов и получения объективного измерительного сигнала (или документа о результате определения) необходима автоматизация всех аналитических операций. Наибольшую эффективность для повышения точности и быстродействия обеспечит применение автоматических электронных весов для определения массы высушиваемой пробы, микропроцессора - для управления циклом операций установки и робототехники для выполнения операций загрузки, выгрузки и перемещения образца в установке.

При реализации перечисленных мероприятий возникают определенные затруднения, связанные с СВЧ сушкой хлопковых семян и продуктов их переработки.

В процессе сушки в полях высокой или сверхвысокой частоты тепло, необходимое для удаления влаги, направляется на высушиваемый материал электромагнитным полем ВЧ или СВЧ. Высокая скорость сушки достигается благодаря тому, что источники тепла, создаваемые электромагнитным полем, повышают температуру внутри материала и увеличивают скорость перемещения влаги из внутренних слоев к поверхности. Это является преимуществом диэлектрической сушки по сравнению с конвективной, контактной и радиационной, при которых температура на поверхности материала выше, чем внутри и градиенты температуры и давления препятствуют сушке.

Мощность -  $P$ , выделяемая в единице объема материала, зависит от напряженности  $E$  электрического поля и от диэлектрических параметров  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$  материала, зависящих, в свою очередь, от его влажности и температуры, а также от частоты

$$P = 0,55 \epsilon \text{tg}\delta E^2 f$$

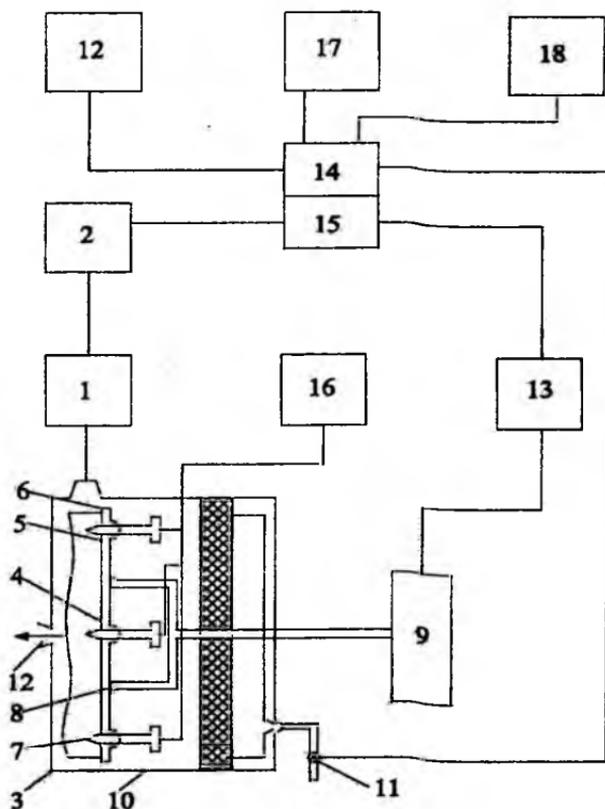
где  $P$  - выражено в Вт,  $E$  - в  $\text{kB}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,  $f$  - в МГц.

Коэффициент потерь  $K=\text{tg}\delta$  по мере высыхания материала уменьшается, вследствие чего уменьшается и выделяемая мощность  $P$ . Это влечет за собой необходимость регулирования мощности генератора ВЧ или СВЧ, так как на последнем этапе сушки ("период падающей скорости сушки"), по мере приближения к влажности равной нулю, необходимо более интенсивное воздействие на сушимый материал. Дополнительные трудности связаны с неоднородностью таких дисперсных материалов, как хлопковые семена и сыпучие продукты их переработки. Отдельные компоненты и части образца могут иметь различное влагосодержание. Диэлектрические характеристики отдельных элементов образца (особенно при его большой массе), могут сильно отличаться и по другим причинам: различная плотность, большее или меньшее содержание масла, различная опущенность и т.п.

Наконец, как уже отмечалось, диэлектрические параметры меняются в ходе сушки с изменениями температуры и влажности материала. Из-за перечисленных факторов возникают локальные перегревы отдельных частей образца, влекущие за собой потери летучих и термолабильных компонентов, а также окисление вещества. Более того, при экспериментальном исследовании СВЧ нагрева хлопкa-сырца наблюдалось даже обугливание отдельных частей образца. Указанные явления понижают точность определения влажности или даже делают неприменимой для этой цели СВЧ сушку.

Наиболее эффективным способом предотвращения локальных перегревов является непрерывный контроль состояния образца в процессе его сушки. Управление внутренней температуры образца будет оптимальным также в отношении расхода энергии, если комбинировать СВЧ сушку с конвективной и при превышении заданного предельного значения температуры переходить на сушку образца потоком подогретого воздуха. Дополнительным требованием в этом случае является регулирование влажности воздушного потока.

Проведенные выше соображения были реализованы в разработанном нами термогравиметрическом СВЧ-влажномере [7.21]. В нем предусмотрены дополнительные технические средства для получения информации о температуре в нескольких точках объема сушимого образца, и эта информация используется для управления процессом сушки. В установку введен также осушитель воздуха (агент сушки) с твердым сорбентом, непрерывно поддерживаемым в сухом состоянии путем использования энергии СВЧ, применяемой для сушки образца. Указанные устройства позволяют проводить сушку в оптимальном режиме с максимальным быстродействием и исключением перегревов образца.



**Рис. 7.9. Функциональная схема термогравиметрического СВЧ-влажномера**

На рис. 7.9 представлена структурная схема установки, которая содержит генератор СВЧ 1 с источником питания 2, снабжающий энергией сушильную камеру 3, в полость которой вводится образец 4 исследуемого материала в форме тонкого слоя, размещенного на густой сетке 5, проницаемой для воздуха. Через отверстия в сетке 5 в толщу образца вводятся датчики температуры 6, расположенные в различных точках площади образца и имеющие приспособление для введения в массу образца на различную высоту. Датчики 6 -полупроводниковые терморезисторы - имеют миниатюрный чувствительный элемент 7 и отличаются высоким быстродействием. Сетка 5 с образцом 4 расположена на приемном устройстве 8 автоматических весов 9 с тензорезисторным или магнитоупругим датчиком. В нижней части сушильной камеры расположен слой твердого сорбента (цеолитов) 10, который служит для осушения воздуха, подаваемого в камеру вентилятором 11 с приводом от электродвигателя (не показанного на рисунке). Осушенный воздух проходит через сетку 5, образец 4 и выбрасывается в атмосферу через отверстие 12. При включении генератора 1 твердый сорбент 10 подвергается сушке, как и образец 4.

Электрический выходной сигнал весов 9 поступает через аналого-цифровой преобразователь 13 на вход микропроцессора 14, имеющего внутреннюю память 15, сюда же поступает от измерительного устройства 16 цифровая информация о значениях температуры во всех точках образца, контролируемых датчиками 6. К выходу микропроцессора подключены дисплей 17, показывающий результат определения влажности в процентах, и цифropечатающее устройство 18. Микропроцессор имеет также аналоговый выход для управления блоком питания 2 (включение и отключение генератора 1) и пуска и остановки вентилятора 11. Для связи оператора с микропроцессором и дистанционного управления некоторыми операциями служит пульт оператора .

Описанная установка создает возможность точного экспрессного определения влажности больших образцов дисперсных материалов, неоднородных по составу и влагосодержанию, у которых начальная влажность может колебаться в широких пределах.

Одним из необходимых элементов системы обеспечения единства измерений является поверочная схема влагомеров.

На рис. 7.10 приведена предлагаемая нами поверочная схема для СВЧ-влагомеров хлопка-сырца и продуктов их переработки [7.22,7.23]. Она содержит установку высшей точности, образцовые

средства измерений и средства передачи единицы измерения от высших разрядов к низшим.

Установка высшей точности предназначена для воспроизведения единицы влажности семян хлопчатника и продуктов их переработки и передачи размера данной единицы при помощи образцовых средств измерений рабочим средствам измерений, применяемым в народном хозяйстве для обеспечения единства измерений в стране.

В основу измерений влажности семян хлопчатника и продуктов их переработки должна быть положена единица, воспроизводимая установкой высшей точности. Установка высшей точности состоит из группы воздушно-тепловых установок (Уз-8). Применение одновременно 18 проб (по шесть в каждой установке) дает возможность существенно снизить случайную составляющую погрешности. Диапазон воспроизводимых значений влажности от 5 до 30%. Среднее квадратическое отклонение воспроизведения единицы - не более 0,02%. Передача размера единицы от установки высшей точности к образцовым средствам измерения 1-го разряда производят непосредственным сличением.

В качестве образцовых средств измерения 1-го разряда рекомендуется применение воздушно-тепловых установок (Уз-8), в диапазоне измерения 5-30%, пределы допускаемых абсолютных погрешностей при доверительной вероятности 0,95 составляют от 0,15 до 0,30%.

Образцовые средства измерений 1-го разряда применяют для проверки образцовых средств измерений 2-го разряда и рабочих средств повышенной точности непосредственным сличением и методом косвенных измерений.

В качестве образцовых средств измерений 2-го разряда применяют воздушно-тепловые установки ( $\delta_{0,95} = 0,35 \div 0,90\%$ ) и установки для аттестации стандартных образцов - имитаторов влажности семян хлопчатника ( $\delta_{0,95} = 0,1 - 3\%$ ) в диапазоне 5-30%.

Образцовые средства измерений 2-го разряда применяют для проверки образцовых средств измерений 3-го разряда методом прямых измерений и рабочих средств измерений непосредственным сличением.

В качестве образцовых средств измерений 3-го разряда применяют стандартные образцы - имитаторы влажности семян хлопчатника в диапазоне измерений 5 - 30% ( $\delta_{0,95} = 0,15-3\%$ ). Для реализации поверочной схемы важное значение имеют образцовые меры,

используемые для градуировки и поверки рабочих средств измерения. При поверке они позволяют оценить систематическую составляющую основной погрешности влагомера - погрешность воспроизведения его номинальной градуировочной характеристики [7.24].

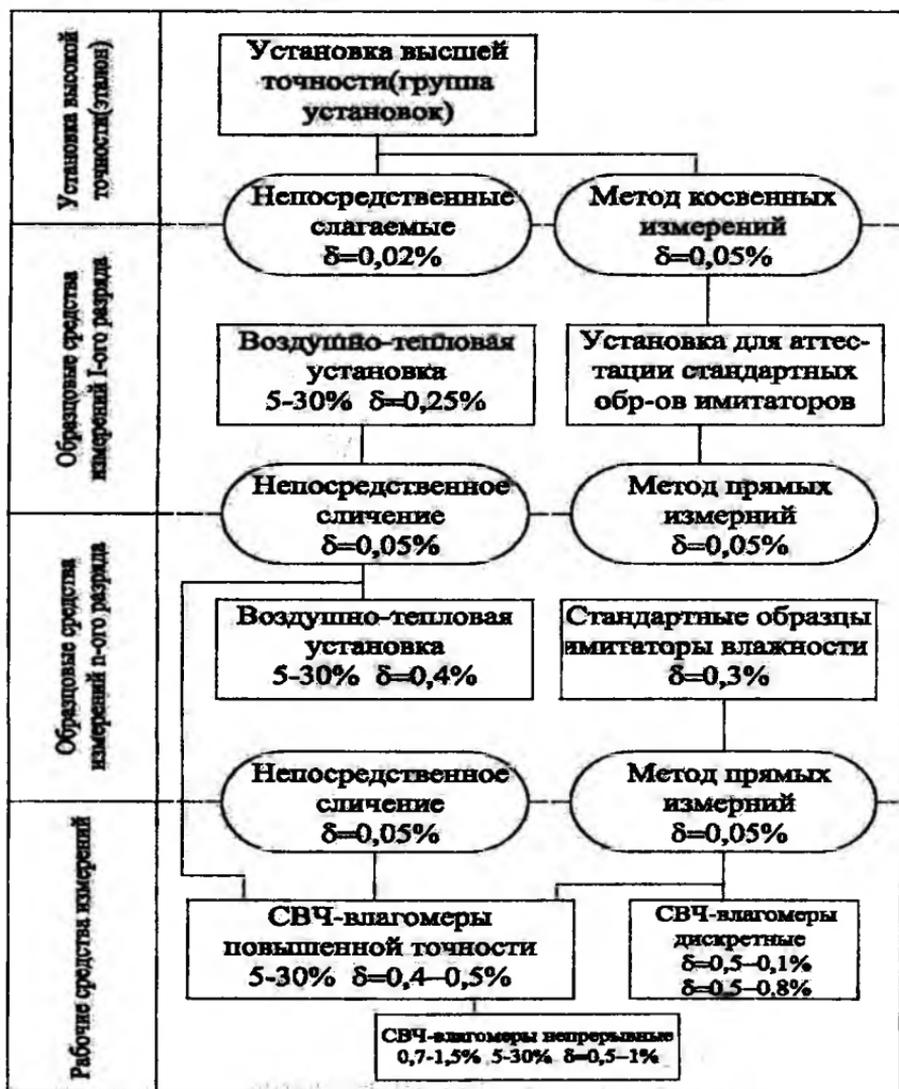


Рис. 7.10. Поверочная схема для СВЧ-влагомеров сыпучих и хлопковых материалов.

В настоящее время общепринятым является применение натуральных образцов исследуемого материала, влажность которых определяют образцовым (термогравиметрическим) методом.

Хорошо известны недостатки этого метода: длительность и трудоемкость подготовки и анализа образцов, необходимость подготовки перед каждой поверкой, ввиду невозможности длительного хранения и транспортировки образцов, трудности получения исходных (принятых при градуировке) параметров материала (для хлопка - сортность, засоренность, выход волокна и другие) и т.д.

Эти затруднения можно устранить, применяя образцовые меры, имитирующие физические свойства влагосодержащего материала. Использование образцовых мер для поверки влагомеров, значительно упрощает операции поверки, сокращает их длительность и необходимые затраты.

Наиболее простыми образцовыми мерами могут служить меры электрической выходной величины преобразователя, например, для кондуктометрических и диэлькометрических влагомеров - образцовые магазины, соответственно, сопротивлений и емкостей. У сверхвысокочастотных влагомеров эту роль могут выполнять градуированные образцовые аттенюаторы (для амплитудных влагомеров) или фазовращатели (для фазовых), вводимые вместо датчика в измерительный канал вторичного измерительного преобразователя и позволяющие воспроизвести различные значения информативного сигнала датчика, соответствующие различным значениям влажности номинальной градуировочной характеристики.

Основной недостаток этого способа заключается в том, что он позволяет оценить погрешность только измерительного устройства, но не датчика.

Этот недостаток устраняет применение эквивалентных мер влажности, вводимых непосредственно в рабочее пространство датчика. Такими мерами у диэлькометрических высокочастотных влагомеров могут служить вкладыши из твердого диэлектрика, вводимые в межэлектродное пространство и имеющие форму, соответствующую этому пространству. Другой, не всегда приемлемый способ, заключается в заполнении межэлектродного пространства жидкостью, диэлектрические параметры которой известны с большой точностью (см.п. 4.2).

Для СВЧ - влагомеров по методу ослабления в свободном пространстве точными мерами могут служить либо кюветы (датчики),

заполненные эталонной жидкостью, либо пластины из твердого диэлектрика или диэлектрика с соответствующим наполнителем, введенные в пространство между передающей и приемной антеннами. В последнем случае можно имитировать разные значения влажности, изменяя толщину пластины или их состав (при неизменных размерах).

Описанные эквивалентные меры влажности также не лишены недостатков. Они воспроизводят лишь один выходной параметр исследуемого материала, но отнюдь не другие физические свойства реального материала, влияющие на результат измерения, такие как гранулометрический и химический состав, плотность, наличие примесей и т.д. Воспроизведение основной электрической характеристики также несовершенно. Например, имитатор влажности из твердого диэлектрика, хорошо воспроизводя ослабление (затухание) энергии СВЧ, вносимое влажным материалом, может существенно отличаться по фазовому сдвигу. На высокой частоте проводимость диэлектрического вкладыша может быть в сотни раз меньше проводимости исследуемого материала и т.д.

Стандартные образцы, имитирующие определенные физические свойства исследуемого материала, изготавливаются по определенной технологии и аттестуются на образцовых установках. Они предназначены для влагомеров определенного типа и для определенного исследуемого материала.

## **ГЛАВА VIII. ВЛАГОМЕРЫ СВЧ ДЛЯ ХЛОПКА-СЫРЦА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

### ***8.1. Принципы построения и первичные измерительные преобразователи влагомеров СВЧ***

В последние десятилетия в Республике Узбекистан, в странах СНГ и за рубежом были разработаны и частично доведены до промышленного выпуска многочисленные модификации влагомеров СВЧ для различных материалов.

Для хлопка-сырца, хлопковых семян и других хлопковых материалов специализированные СВЧ-влагомеры были разработаны, главным образом, в Ташкентском государственном техническом университете имени Беруни, а также в «Научном центре пахтасаноат» и НПО "Сигнал" (г.Ташкент). В данной главе описываются эти приборы и рассматриваются общие принципы построения сверхвысокочастотных влагомеров.

Современный технический уровень этих приборов (как и технических средств измерения других величин) определяется следующими факторами: нуждами потребителей, т.е. назначением влагомеров СВЧ, используемой для их построения элементной базой; развитием теории и техники СВЧ методов измерения влажности; общим развитием техники обработки измерительной информации; состоянием метрологического обеспечения.

В последние годы элементная база сверхвысокочастотных средств измерения была существенно усовершенствована. Вместо электровакуумных и газоразрядных приборов применяются ферритовые и полупроводниковые, используемые в сверхвысокочастотных генераторах, усилителях, умножителях и делителях частоты, а также регулирующих устройствах - аттенюаторах, фазовращателях, переключателях и ограничителях. При построении влагомеров СВЧ широко применяют микроэлектронную базу, в частности аналоговые и цифровые устройства на интегральных микросхемах.

С внедрением новой элементной базы можно существенно уменьшить массу, габариты и потребляемую мощность, повысить надежность и увеличить срок службы влагомеров СВЧ. Современные влагомеры СВЧ по этим показателям (а в дальнейшем - и по стоимости) могут значительно опережать влагомеры, основанные на

других методах измерения (например, на высокочастотных диэлектрических), которые в то же время уступают влагомерам СВЧ и по метрологическим свойствам (чувствительность, точность, диапазон измерения). Благодаря этому значительно расширилась область применения влагомеров СВЧ.

Схема и конструкция влагомера зависят от используемого СВЧ метода, назначения и типа прибора, а также условий его работы. Основные элементы любого влагомера СВЧ - это первичный измерительный преобразователь (датчик влажности) и измерительное устройство (промежуточный и измерительный преобразователи). Именно эти два элемента определяют характеристики влагомера в целом, причем для влагомеров СВЧ (как основанных на других физических методах измерения) характерно преобладающее влияние первичного преобразователя на важнейшую метрологическую характеристику суммарную погрешность влагомера.

Датчик влагомера СВЧ предназначен для излучения радиоволн на объект измерения и их приема; кроме того, он должен содержать устройства, необходимые для введения, выгрузки и транспортирования (в поточном влагомере) используемого материала.

Важнейшим требованием к первичному преобразователю является высокая воспроизводимость выходного сигнала при повторных измерениях одного и того же образца материала. Кроме того, к первичному преобразователю предъявляются и другие требования метрологического характера: высокая чувствительность и перекрытие заданного диапазона измерения влажности.

Тип и устройство первичного измерительного преобразователя зависят от СВЧ метода измерения, объекта измерения (характер материала, его внешняя структура), условий измерения (непрерывные или дискретные, в потоке или в неподвижном объекте), типа влагомера (лабораторный или промышленный, переносной или стационарный) [8.1]. Одно из преимуществ СВЧ-влагомеров - возможность создание большого числа модификаций датчиков влажности для самых разнообразных задач. Для этого используются различные методы измерения и разновидности конструктивного оформления датчиков.

Рассмотрим основные типы первичных преобразователей по признаку метода измерения. Преобразователи для измерения в свободном пространстве получили наибольшее распространение во вла-

гометрии, ввиду возможности оценки интегральной влажности больших объемов материала и бесконтактных измерений. Большинство СВЧ-влажномеров имеют преобразователи данного типа. Для согласования коаксиального кабеля или волновода со свободным пространством применяются следующие типы СВЧ антенн: рупорные, параболические, диэлектрические, щелевые.

В диапазонах сантиметровых и дециметровых волн чаще всего используют рупорные антенны, состоящие из прямоугольного рупора, связанного с волноводом.

Рассмотрим теперь некоторые соотношения, позволяющие выбрать параметры первичного преобразователя на стадии его проектирования, исходя из критериев - максимизации чувствительности и обеспечения заданного диапазона измерения влажности.

Приняв приближение геометрической оптики, т.е. полностью пренебрегая отражением радиоволн, можно описать ослабление  $A$  (в децибеллах) и фазовый сдвиг  $j$  (в радианах) в материале упрощенными формулами:

$$A = -8,68 aL;$$

$$j = (b-b_0) L,$$

где  $a$  и  $b$  - соответственно коэффициент затухания и фазовая постоянная материала;

$b_0$  - фазовая постоянная воздуха;

$L$  - толщина исследуемого слоя материала.

Чувствительность преобразователя будет: при амплитудном методе измерения (т.е. при преобразовании влажности  $W$  в параметр  $A$ )

$$S_A = dA/dW = -8,68 L da/dW,$$

при фазовом методе (при преобразовании  $W$  в  $j$ ):

$$S_j = dj/dW = L db/dW.$$

Таким образом, чувствительность преобразования тем выше, чем больше толщина материала и производные  $da/dW$  и  $db/dW$ .

Увеличение влажности приводит к увеличению значений  $a$  и  $b$ . Для большинства материалов зависимости  $a$  и  $b$  от влажности можно приблизительно описать полиномами второй степени

$$a = a_0 + a_1 W + a_2 W^2 \quad (8.1)$$

$$b = b_0 + b_1 W + b_2 W^2 \quad (8.2)$$

где  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  - коэффициенты, постоянные для данного

материала и условий измерений.

Продифференцируем (8.1) и (8.2):

$$da/dW = a_1 + 2a_2 W \quad (8.3)$$

$$db/dW = b_1 + 2b_2 W \quad (8.4)$$

Из (8.3) и (8.4) следует, что чувствительность измерений пропорционально возрастает при увеличении влажности. Однако это справедливо лишь для ограниченного диапазона влажности, после которого (в диапазоне преобладания свободной влаги в материале) чувствительность максимальна и постоянна, и значение близко к коэффициенту затухания в свободной воде. Если принять простейшую двухзвенную аддитивную модель влажного материала, можно выразить ослабление в материале в следующем виде:

$$A = -8,68a_m L(100-W)/100 + a_b$$

где  $a_m$  и  $a_b$  - соответственно коэффициенты затухания сухого материала и воды.

Тогда чувствительность:

$$S_a = -8,68 \frac{L}{100} (-\alpha_m - \alpha_b)$$

Аналогично

$$S_b = \frac{L}{100} (-\beta_m - \beta_b)$$

где  $b_m$  и  $b_b$  - соответственно фазовые коэффициенты сухого материала и воды.

Таким образом, чувствительность измерения влажности прямо пропорциональна величинам  $a_b$  и  $b_b$ .

По приведенным в гл.2 зависимостям  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  воды от частоты и формулам, связывающим величины  $a$  и  $b$  с составляющими комплексной диэлектрической проницаемости (см.п.6.1), были рассчитаны зависимости  $a_b$  и  $b_b$  от длины волны в диапазоне 1,3 - 18 см. Результаты расчетов графически представлены на рис.8.1, из которого следует, что увеличение длины волны электромагнитных колебаний приводит к уменьшению чувствительности измерения влажности.

Чувствительность измерения должна обеспечивать получение заданной точности. Для хлопка-сырца и хлопковых материалов погрешности, установленные нормативными документами, обычно находятся в пределах 0,5 - 1,0% (абс).

Разрешающая способность влагомера ( $R_R$ ) должна позволить различать величину, по крайней мере, вдвое меньшую суммарной погрешности измерений ( $d$ ):

$$R \leq d/3 \quad (8.5)$$

Разрешающая способность влагомера выражается через разрешающую способность измерительной части ( $R_M$ ) и чувствительность ( $S$ ):

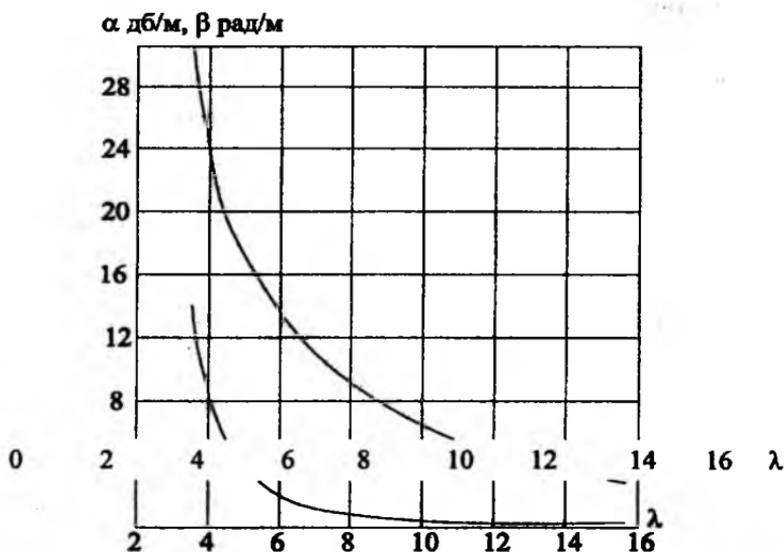
$$S = 3R_M / d \quad (8.6)$$

Из выражений (8.5) и (8.6) вытекают требования к чувствительности преобразования:

$$S >= 3K_M / d \quad (8.7)$$

Из этих требований следует выбирать  $a$  и  $L$  при минимальной влажности (т.е. при минимальной чувствительности).

Рассмотрим последнее из поставленных требований - обеспечение заданного диапазона измерения. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы уровень прошедшего сигнала был достаточен для измерения его параметров.



**Рис. 8.1. Зависимость коэффициентов затухания -  $\alpha$  и фазы -  $\beta$  воды от длины волны -  $\lambda$ .**

Аппаратура, обычно применяемая в СВЧ-влажнометрии, позволяет производить измерения параметров сигнала при ослаблении до 50 дБ, т.е.

$$8,68aL \leq 50 \text{ дБ} \quad (8.8)$$

Из неравенства (8.8) выбираются значения  $a$  и  $L$  при максимальной влажности (т.е. максимальном ослаблении).

Разработанная методика использовалась нами при создании влагомеров для семян хлопчатника и хлопка-сырца. Влажность семян необходимо контролировать в заводской лаборатории в диапазоне 5-25% с погрешностью не более 0,8% абс.

Были проведены предварительные эксперименты для определения коэффициентов  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  уравнений (8.1) и (8.3) при наиболее часто применяемой в СВЧ-влажнометрии длине волны 3,2 см в кассете толщиной 9 см. Эти коэффициенты оказались равными  $a_0=2,1 \times 10^{-2}$ ,  $a_1=1,45 \times 10^{-3}$ ,  $a_2=7 \times 10^{-4}$ . Разрешающая способность измерителей ослабления, обычно используемых в СВЧ-влагомерах, близка к 0,1 Дб. Тогда из неравенства (8.7) должно быть:

$$S \geq 0,4 \text{ дБ}/\% \text{H}_2\text{O}$$

При этом толщина материала рассчитывается из неравенства (8.8) и в данном случае равна 12 см. Расчет показал, что максимальное ослабление при влажности 25% равно 49,8 дБ, т.е. неравенство (8.8) выполняется.

Таким образом, задача измерения влажности семян хлопчатника решается при использовании влагомера с рабочей длиной волны 3,2 см при толщине материала 12 см. Второй пример относится к измерению влажности хлопка-сырца, которое необходимо производить непосредственно в кузове транспорта, без отбора проб. Диапазон измерения влажности 5-40%, заданная погрешность - 10% (отн.), толщина слоя хлопка - 2,3 м.

Ввиду того, что кроме других параметров задана также толщина  $L$ , выполнение сформулированных выше требований к влагомеру может быть осуществлено за счет выбора рабочей частоты. Нами получены зависимости  $a$  и  $b$  от влажности в диапазоне волн - 2 и 12 см. По ним и разработанной методике была определена рабочая длина волны влагомера [6.16]. Она оказалась равной 12 см, что позволяет контролировать влажность хлопка-сырца в транспортной тележке до 18% (рис. 8.2). Для решения же задачи контроля влажности до 40% необходимо провести исследования в более широком диапазоне частот.



**Рис. 8.2. Устройство для измерения влажности хлопка-сырца в кузове транспортной тележки.**

Волноводные преобразователи применяются главным образом для жидкостей. Их чувствительность выше чувствительности преобразователей свободного пространства вследствие большей концентрации поля. Информативным параметром этих преобразователей служит ослабление, фазовый сдвиг волны, проходящей через материал, который заполняет (полностью или частично) волновод, или волны, отраженной от материала.

Волноводные преобразователи позволяют измерять малые и микровлагосодержания жидкостей, особенно при работе в диапазоне миллиметровых волн, в котором, как правило, резко возрастает коэффициент затухания воды. Переход от сантиметровых волн к миллиметровым позволяет существенно увеличить чувствительность СВЧ-влагомера для жидкостей. Эта особенность была использована, например, в влагомере для жидких топлив и других нефтепродуктов в потоке [8.2], в диапазоне влажности 0,003-0,05%, с рабочей длиной волны 6,9 мм. Датчик выполнен в виде отрезка трубы рабочего сечения с двумя емкостными штырями для ввода и вывода радиоволн, он настраивается на оптимальную связь с помощью коротко замыкающего поршня.

Датчик в виде отрезка круглого волновода применялся также для измерения влажности маргарина в более высоком диапазоне (14-18 %). Такие датчики представляют интерес для контроля влажности хлопкового и других растительных масел, а также маргарина и пастообразных продуктов.

Использованию волноводных преобразователей для твердых материалов препятствует сложность введения контролируемого материала в волновод. В связи с этим, они нашли применение лишь для некоторых видов материалов. Так, например, датчик в виде прямоугольного волновода со щелями в противоположных (широких) стенках применялся для измерений движущихся тонких листовых материалов (бумага, фотопленка и т.п.) и пучков нитевидных или волокнистых материалов. Для сыпучих материалов известна конструкция волноводного датчика с трубкой из диэлектрика, перпендикулярной оси волновода; через трубку проходит поток сыпучего материала. Из-за ограниченности объема материала, взаимодействующего с полем СВЧ, чувствительность такого датчика низка.

Резонаторные преобразователи имеют чувствительность, наибольшую по сравнению с другими, благодаря высокой напряженности поля в полости резонатора и сильному взаимодействию этого поля с объектом измерения. Датчики этого типа позволяют измерять с достаточной точностью низкие влагосодержания.

Из параметров полого резонатора, являющегося аналогом колебательного контура в низкочастотной области, в измерениях влажности чаще всего используется собственная добротность  $Q_0$  или резонансная частота  $\omega_0$ . При двухпараметровых измерениях возможно также использование обоих параметров.

Основная трудность при реализации резонаторных датчиков влажности - это способ введения исследуемого твердого материала в резонатор. При измерениях диэлектрических параметров необходимы строго фиксированные положения, форма и размеры (обычно небольшие) исследуемого образца; изменение этих параметров существенно влияет на результат измерения. Соблюдение указанных условий сильно усложняет измерение влажности даже в лабораторных условиях и неприемлемо для непрерывного контроля влажности в потоке.

Зондовые преобразователи представляют собой сверхвысокочастотные излучатели, вводимые в толщу исследуемого объекта. Преимуществом этих преобразователей является локальность измерения - возможность получения информации о влажности малых объемов материала внутри его массы. Величина этих малых объемов зависит от "зоны контроля" преобразователя, определяемой его конструкцией и зависящей также от влажности других свойств исследуемого материала. Изменяя конструктивные параметры датчика,

можно фокусировать СВЧ излучение на нужную глубину и в известных пределах изменять зону контроля.

Основной недостаток зондовых датчиков - это возмущение исследуемого объекта вводимым в него зондом. Рассматриваемые преобразователи лишены одного из важнейших преимуществ преобразователей ранее рассмотренных типов - бесконтактности измерения.

Наибольший интерес в рассматриваемой категории представляют полосковые датчики СВЧ, т.е. преобразователи с применением полосковых линий передачи [8.3].

При использовании полосковых датчиков для хлопка-сырца и хлопковых материалов следует иметь в виду, что глубина проникновения поля невелика, и на результаты измерений влияют поверхностная влажность материала и неоднородность по влажности и плотности его приповерхностного слоя. В то же время при использовании полоскового датчика, например, на стенке бункера, можно устранить затруднения, связанные с введением зонда в массу материала.

Полосковые датчики можно применять для измерения влажности жидкостей, например, хлопкового масла. Установка такого датчика в стенке трубопровода позволяет осуществить контроль жидкости.

Из СВЧ датчика влажности других типов отметим преобразователи поверхностной волны, основанные на измерении напряженности электрического поля волны, излучаемой на поверхность исследуемого материала.

Достоинствами рассматриваемого преобразователя являются бесконтактные и односторонние измерения с большой чувствительностью в диапазоне высокой влажности. Однако его применению для хлопка и хлопковых материалов препятствует получение информации о влажности только тонкого приповерхностного слоя материала, а также зависимость выходного сигнала от характера и состояния поверхности материала.

## ***8.2. Измерительные устройства влагомеров СВЧ***

Измерительные устройства влагомеров СВЧ представляют собой совокупность промежуточного и выходного измерительных преобразователей, преобразующую выходной сигнал датчика в анало-

говый или цифровой выходной сигнал влагомера. У влагомеров, работающих по амплитудному или фазовому методам, принципы действия измерительных устройств аналогичны принципам действия установок и приборов для измерения затухания и фазового сдвига, применяемых в технике СВЧ. Однако при этом на схемные решения влагомеров СВЧ накладываются отпечаток особенности этих приборов, отмеченные в пп. 6.1 и 8.1.

Отметим важнейшие из них:

1. Ввиду того, что основную составляющую суммарной погрешности влагомера СВЧ образуют погрешности, связанные с состоянием и свойствами объекта измерения, а удельный вес погрешности измерительного устройства невелик, нецелесообразно предъявлять слишком высокие требования к точности измерительного устройства. У амплитудных влагомеров СВЧ для хлопковых материалов абсолютная погрешность измерительного устройства в большинстве случаев может находиться в пределах 0,05-0,10 дБ.

2. Минимизация погрешности измерения не является единственным критерием оптимальности измерительного устройства влагомера СВЧ. Для реальных условий хлопководства, заготовительной системы, и хлопкоочистительной промышленности важное значение имеют также технические и эксплуатационные характеристики: надежность, простота обслуживания, совместимость с другими элементами измерительных и управляющих систем и т.д.

3. По причине, указанной в п.1, в измерительных устройствах часто предусматривают структурные решения или вводят специальные блоки для коррекции влияния важнейших влияющих величин температуры, плотности, толщины материала.

4. В измерительных устройствах современных влагомеров СВЧ предусматривают автоматизацию (полную или частичную) измерительных и настроечных операций, а также вывод выходных сигналов на устройства печати и (или) сопряжение с микропроцессором или ЭВМ.

Схема и конструкция влагомера СВЧ зависят в основном от используемого СВЧ метода и от назначения и условий работы прибора. В то же время некоторые элементы применяются во влагомерах СВЧ независимо от их конкретной реализации. К "типовым" элементам измерительных устройств относятся генераторы СВЧ, преобразователи СВЧ сигнала в низкочастотный, элементы волноводного тракта и измерительного (как правило, низкочастотного) устройства.

Приведем некоторые сведения об этих элементах современных влагомеров СВЧ. Генераторы СВЧ, используемые во влагометрии, должны иметь частоту выходного сигнала  $1 \times 10^{10} - 3 \times 10^9$  Гц при уровне мощности 10-50 мВт, наиболее часто применяется частота  $10^{10}$  Гц ( $\lambda=3$  см). До конца 60-х годов в качестве источника СВЧ колебаний во влагомерах чаще всего использовали отражательные клистроны, а затем их вытеснили полупроводниковые приборы.

Основное требование к генераторам СВЧ - стабильность выходных параметров. Нестабильность выходного уровня генераторов влияет в основном на результат измерений влажности при амплитудном методе. Минимизация этого воздействия возможна при применении двухканальной схемы измерения на принципе уравнивания. В генераторах с клистрономиспользовалось также питание первичного преобразователя стабилизированным напряжением.

Нестабильность генератора по частоте влияет непосредственно на частотные методы измерения, а также на результат измерений амплитудными и фазовыми методами. При измерении частоты изменяются ослабление и фазовый сдвиг [8.4].

В генераторах СВЧ на полупроводниковых приборах используют туннельные, лавинно-пролетные диоды, чаще всего диоды Ганна. Уступая клистронным по чувствительности к температуре окружающей среды, генераторы с диодами Ганна имеют хорошие показатели в отношении влияния колебаний напряжения питания, и, главное, не требуют стабилизированных высоких напряжений и позволяют существенно понизить мощность источника питания.

Для повышения чувствительности измерений путем применения в низкочастотных трактах влагомера избирательных усилителей СВЧ генераторы модулируют по амплитуде. Модуляция осуществляется либо в самом источнике питания изменением его напряжений или токов, или же применением отдельного модулятора между источником и генератором. Для построения модуляторов используют также ферритовые элементы или (чаще) р-і-п диоды.

Генераторные методы, существенно повышающие чувствительность измерительного устройства, используются при очень низких (менее 1 мкВт) уровнях сигнала. Реализация этих методов требует применения высокостабильных гетеродинов, смесителей и избирательных усилителей, что сильно усложняет схемы влагомера.

Во влагомерах часто используются методы уравнивания, отличающиеся простотой реализации и высокой точностью. Их сущность заключается в компенсации изменения уровня выходного сигнала СВЧ при изменении влажности соответствующими параметрами схемы (вносимым ослаблением, фазовым сдвигом и др.). При этом преобразователь СВЧ сигнала применяется для указания относительного уровня. Для этого используются детекторы на полупроводниковых диодах СВЧ, чувствительность которых достаточна для обнаружения мощности порядка  $10^{-12}$  Вт.

Для канализации энергии в СВЧ тракте используются различные типы направляющих систем - коаксиальные кабели, волноводы, полосковые линии. Коаксиальные кабели передают широкий диапазон частот, однако они конструктивно сложны, отличаются высоким затуханием. Во влагомерах эти кабели используются, как правило, только для соединения подвижных элементов, например, измерительной линии, волноводного тракта с первичным преобразователем или при такой рабочей длине волны, когда применение волноводов приведет к недопустимому увеличению габаритов прибора.

Низкие потери, простота конструкции и механическая жесткость волноводов предопределили их широкое использование как в технике СВЧ, так и во влагометрии. Для соединения между собой различных элементов СВЧ тракта, фиксирования положения первичного преобразователя в технологическом потоке волноводы можно применять как элементы несущей конструкции влагомера. Для передачи энергии прямоугольному волноводу обычно используют волны типа  $H_{10}$  или  $H_{01}$ . Смещение осей при соединении волноводов между собой приводит к возникновению отражений в местах соединения, что является причиной дополнительных погрешностей измерения, вызванных интерференцией прямых и отраженных волн. На практике используются дроссельные соединения, существенно снижающие коэффициент стоячей волны.

В последнее время для сочетания положительных свойств коаксиальных кабелей и волноводов и уменьшения массы и габаритов используют полосковые линии, состоящие из проводящих полосков, разделенных диэлектриком.

Первичный преобразователь - один из основных источников отражений и переотражений в СВЧ-влагомерах. Уровень отраженного от него сигнала изменяется в зависимости от влажности материала. Для улучшения согласования тракта и защиты генераторов от

отраженной волны можно использовать развязывающие аттенюаторы. Обычно элементы такого типа состоят из отрезка прямоугольного волновода, внутри которого помещается поглощающая пластинка. Волна, отраженная от неоднородности, проходит через аттенюатор и ослабляется, в результате ее влияние на измерение снижается.

Недостаток такого решения - ослабление не только отраженной, но и прямой волны, что уменьшает уровень рабочего сигнала влагомера и требует соответствующего увеличения чувствительности его измерительного блока. Наиболее пригодны для развязки вентильные элементы, обладающие различным ослаблением в прямом и обратном направлениях. Такой эффект наблюдается при помещении феррита в постоянное магнитное поле и используется в серийно выпускаемых ферритовых вентилях.

Основной элемент вторичных преобразователей СВЧ-влагомеров компенсирующие (уравновешивающие) аттенюаторы и фазовращатели, служащие для измерения параметров волны, взаимодействующей с влажным материалом. Аттенюаторы могут быть основаны на эффекте поглощения или изменения плоскости поляризации. В компенсирующих аттенюаторах поглощающего типа поглощающая пластина вводится в волновод. Ослабление зависит от глубины погружения пластины и отсчитывается по показаниям индикаторов перемещения.

Поляризационные аттенюаторы выполняются на базе круглого волновода, внутри которого помещается поглощающая пластина, а вносимое ослабление определяется углом ее поворота относительно продольной оси. Конструктивно такие аттенюаторы сложнее поглощающих, преимущество их в независимости фазового сдвига от ослабления, а также в повышенной точности.

Рассмотренные типы аттенюаторов можно успешно использовать для лабораторных измерений влажности.

Для автоматизации процесса измерения во влагомерах, работающих по методу уравнивания, первоначально также применяли уравнивающие аттенюаторы механического типа, которые снабжены приводом от реверсивного электродвигателя. Однако они громоздки и недостаточно надежны, что обусловлено наличием вращающихся деталей. Кроме того, постоянная времени приводного электродвигателя повышает инерционность влагомера, что является

недостатком при его работе в качестве элемента автоматической управляющей или информационной системы.

От указанных недостатков свободны аттенюаторы и фазовращатели, построенные полностью на статических элементах - ферритовых, основанных на изменении вносимого затухания под воздействием приложенного магнитного поля и полупроводниковых, изменяющих проводимость в зависимости от силы тока, проходящего через них. Преимущество последних, в частности аттенюаторов на р-и-п элементах, значительно меньшие габариты и стоимость, удобный выходной сигнал (сила тока управления) [8.5].

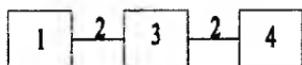
Для разветвления СВЧ энергии в опорный и измерительный каналы, сложения сигналов и выделения отраженной волны во влагомерах применяют различные типы трех и четырехполосников: направленные ответвители, мосты, тройники, циркуляторы и переключатели; последние реализуют, как правило, на полупроводниковых элементах.

При использовании во влагомерах компенсационного метода измерений, измерительное устройство выполняет функции предварительного усиления рабочего и опорного сигналов, их сравнения, формирования разностного сигнала для управления уравнивающим элементом (аттенюатором, фазовращателем) и выдачи выходного сигнала, характеризующего значение влажности.

Для предварительного усиления низкочастотных сигналов обычно используются избирательные усилители, работающие на частоте модуляции СВЧ колебаний. Формирование разностного сигнала опорного и рабочего каналов и компенсации влияния мешающих факторов производятся операционными усилителями. Разностный сигнал подается на схему управления уравнивающим элементом. Отсчет влажности иногда производится по шкале компенсирующего элемента, проградуированной в процентах. Для индикации, кроме того, можно также использовать выходной сигнал операционных усилителей. Ферритовые и полупроводниковые компенсирующие элементы управляются выходными сигналами операционных усилителей. Измерительные блоки влагомеров сейчас реализуют на серийно выпускаемых интегральных микросхемах, а информация о влажности представляется в цифровом виде.

Многообразие методов СВЧ измерения влажности, целей и условий измерения предопределяет различные возможности постро-

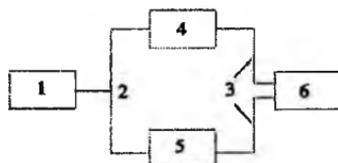
ения сверхвысокочастотных влагомеров [8.6]. Наиболее простой является одноканальная схема, состоящая из генератора СВЧ 1, СВЧ тракта 2, первичного преобразователя 3 и приемника 4 (рис.8.3).



**Рис.8.3. Функциональная схема одноканального влагомера**

Электромагнитная волна СВЧ от генератора 1 по СВЧ тракту 2 подается на первичный преобразователь 3, в котором она взаимодействует с влажным материалом и изменяет свои параметры (амплитуду, фазу, частоту). Приемник 4 измеряет один из этих параметров, по величине которого судят о влажности материала.

На результат измерений влияет нестабильность характеристик генератора 1 и приемника 4, которые необходимо периодически уточнять. Поэтому схемы указанного типа нашли применение в основном для измерений в лабораторных условиях. Двухканальные схемы (рис.8.4) состоят из генератора СВЧ 1, разветвителя энергии СВЧ 2, СВЧ тракта 3, первичного преобразователя 4, эталонного аттенюатора (фазовращателя, резонатора) 5 и приемника 6.



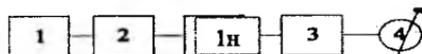
**Рис.8.4. Функциональная схема двухканального влагомера.**

Схемы данного типа работают по принципу сравнения опорного и рабочего сигналов, что снижает влияние нестабильности параметров генераторов СВЧ на результат измерения влажности. Двухканальные схемы применяются в автоматических влагомерах непрерывного действия.

По способу измерения информативного параметра СВЧ сигнала различают методы прямого отсчета и компенсационные.

В схемах с прямым отсчетом измеряемый сигнал СВЧ подается на приемник, индикатор которого проградуирован в процентах

влажности. Точность измерений в этом случае зависит от класса точности приемника и индикатора. Основная область применения данных схем - измерение материалов, влажность которых изменяется незначительно и контроль технологических процессов. Компенсационные схемы (рис.8.5) содержат компенсирующее устройство 1 в СВЧ или 1н в НЧ тракте, преобразователь СВЧ сигнала 2, усилитель 3 и измерительный прибор 4.



**Рис. 8.5. Функциональная схема компенсационной части влагомера**

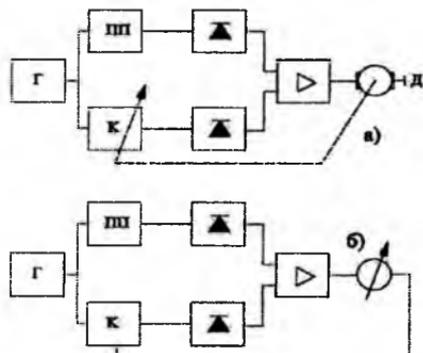
Отсчет влажности в этом случае производится по величине изменения параметра компенсирующего устройства (аттенюатора, фазовращателя или резонатора), необходимого для компенсации изменения параметра СВЧ волны от влажности материала, а измерительный прибор 4 выполняет функцию нуля - индикатора. При установке компенсирующего устройства в СВЧ тракт преобразователь СВЧ сигнала, усилитель и индикатор работают на постоянном уровне сигнала. При установке же компенсирующего устройства в низкочастотную цепь постоянную рабочую точку имеют только усилитель и индикатор.

Выбор места установки компенсирующего устройства определяется по типу применяемого преобразователя СВЧ сигнала, диапазону измерения данного сигнала и возможности наиболее точного изготовления данного устройства в СВЧ или низкочастотном варианте. Наиболее широко распространены схемы влагомеров с компенсирующим устройством в СВЧ тракте. Погрешность этих схем обусловлена в основном погрешностью компенсирующего устройства.

В автоматических влагомерах компенсирующие устройства с механическим приводом управляются посредством реверсивного двигателя (рис.8.6а). Это сравнительно сложная система, обладающая низкой чувствительностью и большой инерционностью.

Более совершенны схемы с компенсаторами, выполненными в виде полупроводниковых структур, управляемых током (рис.8.6б). Они миниатюрны, безинерционны, обладают более высокой чувствительностью. Микропроцессорная обработка первичной информации во влагомерах - СВЧ позволяет существенно упростить

схему измерительного устройства, благодаря устранению необходимости в вычислительных блоках (погрешностей от влияющих величин и т.д.) и некоторых других блоках.



**Рис. 8.6. Функциональная схема автоматического влагомера с механическим приводом (а) и полупроводниковым компенсатором (б), Г - генератор, ПП - первичный преобразователь, К - компенсационное устройство.**

В то же время улучшаются точность измерения и другие метрологические характеристики влагомера.

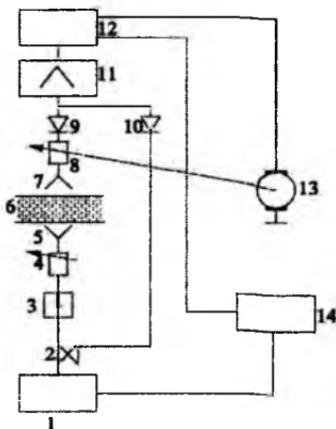
### **8.3. Влагомеры и измерительные установки СВЧ для хлопковых семян и продуктов их переработки**

В данном параграфе описываются средства измерения влажности семян хлопчатника, полупродуктов и продуктов производства хлопкового масла [8.7]. Опыт применения этих влагомеров показал, что при условии сочетания их со специализированными датчиками, они пригодны также для измерения влажности хлопка-сырца и некоторых других материалов.

Автоматический влагомер для непрерывного измерения влажности материалов хлопкомаслоэкстракционного производства, информативным параметром которого служит амплитуда проходящей через материал волны, а измерения проводятся в свободном пространстве, реализован по двухканальной компенсационной схеме (рис.8.7) [8.8].

Схема содержит генератор СВЧ 1, направленный ответвитель 2, ферритовый вентиль 3, подстроечный аттенюатор 4, передающую 5 и приемную 7 антенны с контролируемым материалом 6 между ними, детекторные секции 9 и 10, блок усилителей 11, блок реле 12, реверсивный двигатель 13, механически связанный с движком аттенюатора 8 и блок питания всех элементов схемы 14.

Схема работает следующим образом: сигнал генератора СВЧ 1 разветвляется на опорный и рабочий каналы направленным ответвителем 2. Сигнал опорного канала подается на детектор 10, а рабочего - через ферритовый вентиль 3, подстроечный аттенюатор 4, антенну 5, материал 6, антенну 7 и компенсирующий аттенюатор 8, на детектор 9. Низкочастотные сигналы с детекторов 9 и 10 подаются на блок усилителей 11, с выхода которого на блок реле 12 поступает сигнал постоянного тока положительной или отрицательной полярности в зависимости от того, какой из выходных сигналов больше по амплитуде.



**Рис. 8.7. Функциональная схема автоматического влагомера для непрерывного измерения влажности хлопковых семян.**

Выходной сигнал блока реле 12 питает реверсивный двигатель 13 таким образом, что направление вращения вала двигателя зависит от полярности входного сигнала блока реле 12. При вращении вала двигателя 13, механически связанного с движком аттенюатора 8, амплитуда рабочего сигнала изменяется до тех пор, пока не станет рав-

ной амплитуде опорного сигнала. При равенстве указанных сигналов на выходе блока усилителей амплитуда сигнала равна нулю, и блок реле отключает питание электродвигателя 13. Отсчет влажности производится по установившемуся значению ослабления, внешнего компенсационным аттенуатором.

Для уменьшения влияния температуры была разработана схема температурной компенсации [8.9] (рис.8.8). Влагомер содержит генератор СВЧ 1, передающую 2 и приемную 3 антенны, между которыми вводится исследуемый материал 4, блок сравнения 5, узкополосный фильтр 6, фазочувствительный усилитель 7, связанный с реверсивным двигателем 8, измерительный прибор 9, волновод 10 и генератор тока 11. Блок сравнения 5 выполнен в виде активного коммутационного элемента, представляющего собой два ферромагнитных сердечника 12 и 13, компенсационная обмотка 14 и обмотка блокировки 15, которые подключены к блоку питания 16 через регулировочные потенциометры 17 и 18, причем их приводы механически связаны с реверсивным двигателем.

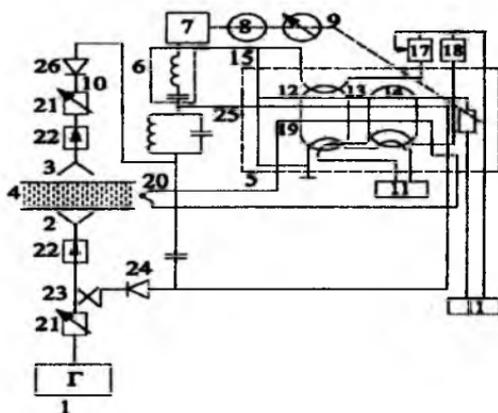
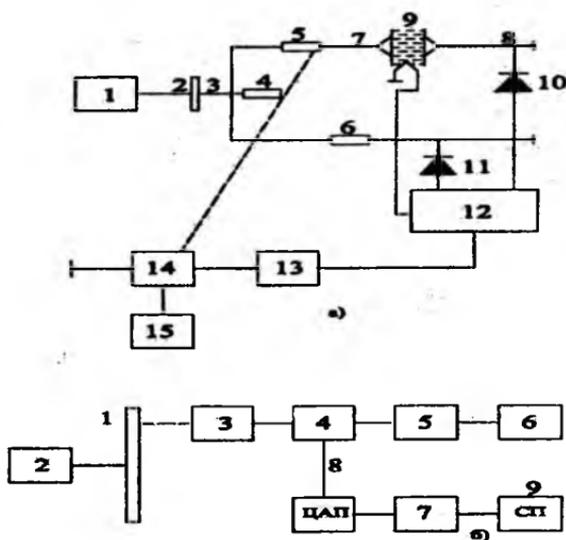


Рис.8.8. Схема влагомера с температурной компенсацией.

При этом в активный коммутационный элемент введена дополнительная обмотка 19 и соединенная с ней термопара 20, помещенная в исследуемый материал 4. Элементы 21 представляют собой механические аттенуаторы, 22 - вентили, 23-ответвитель, 24,26 - детекторы, 25 управляющая обмотка.

Функциональная схема автоматического СВЧ-влажномера с цифровым выходом по амплитудному методу свободного пространства [8.10] приведена на рис.8.9. Измерительное устройство содержит генератор СВЧ 1, ферритовый вентиль 2, двойной волноводный тройник 3, поглощающую нагрузку 4, измерительный 5 и подстроечный 6 аттенюаторы, передающую 7 и приемную 8 антенны с измеряемым материалом 9 между ними, детекторные секции 10,11, блок сравнения 12, блок управления двигателем 13 и реверсивный двигатель 14, механически связанный с измерительным аттенюатором 5 и блок считывания 15. Для устранения влияния температуры материала на результат измерения его влажности, в материал вводится терморезистор, подключенный к блоку сравнения.



**Рис.8.9. Функциональная схема автоматического СВЧ влагомера с цифровым выходом.**

Электромагнитная энергия от генератора 1 проходит через ферритовый вентиль 2 и разветвляется двойным волноводным мостом на два канала измерительный и опорный. Часть энергии, попавшая в измерительный канал, проходит через измерительный аттенюатор 5 и на передающую антенну 7, проходит через материал 9, в котором

ослабляется и с приемной антенны 8 поступает на детекторную секцию 10. В опорном канале энергия через подстроечный аттенюатор 6 поступает на детекторную секцию 11.

Сигналы постоянного тока с детекторных секций 10,11 поступают на блок сравнения 12, с выхода которого сигнал разбаланса подается на блок управления двигателем 13, формирующий сигнал, который приводит во вращение вал двигателя 14. Двигатель вращает движок аттенюатора 5 до момента уравнивания сигналов измерительного и опорного каналов, после чего питание двигателя отключается. Значение ослабления в материале считывается по шкале аттенюатора 5.

Блок считывания 15 выдает информацию о влажности в цифровом виде, а также формирует сигнал для самописца.

Диск с метками 1, закрепленный на оси двигателя 2, поворачивается на определенный угол, зависящий от влажности материала. Импульсы, количество которых определяется количеством меток в сегменте поворота диска 1, с фотосчитывателя 3 подаются на цифровой линейаризатор 4, с выхода которого снимаются импульсы, количество которых численно равно влажности материала в десятых долях процента.

Эти импульсы подаются на ход реверсивного счетчика 5, который в зависимости от направления поворота диска прибавляет или вычитает их из записанного в нем ранее числа, соответствующего предыдущему измеренному значению влажности. Состояние счетчика 5 регистрируется блоком цифровой индикации 6. Кроме того, импульсы с линейаризатора 4 подаются на блок управления 7 самописцем 9 через цифроаналоговый преобразователь 8.

Разработанные в последние годы в ТашГТУ влагомеры серии ЭАВ-СВЧ, как уже отмечалось, могут использоваться для различных хлопковых материалов и построены с применением современной элементной базы и микроэлектроники. Последние влагомеры этой серии имеют цифровой выход и могут работать в качестве элементов информационно-вычислительных комплексов и автоматизированных систем управления.

Всего было разработано и испытано пять модификаций влагомеров типа ЭАВ-СВЧ, представляющих собой автоматические СВЧ-влагомеры, построенные по двухканальной схеме по методу уравнивания и отличающиеся только элементной базой и схемными решениями.

По результатам проведенных лабораторных и производственных испытаний были рекомендованы две модификации влагомеров данной серии - приборы ЭАВ-СВЧ-2 и ЭАВ-СВЧ-4; ниже ограничимся рассмотрением устройства и действия только этих двух приборов. Отметим, что влагомер ЭАВ-СВЧ-4 прошел с хорошими результатами испытания на хлопковых семенах и продуктах переработки.

Влагомер ЭАВ-СВЧ-2 предназначен для автоматического измерения влажности хлопковых семян и выдачи показаний на шкале затухания в децибеллах, на цифровое табло в виде числового значения влажности и на регистрирующее самопишущее устройство для непрерывной записи результатов в процессе измерения влажности хлопковых семян. Кроме того, имеется блок коррекции показаний в зависимости от температуры измеряемого материала, а также предусмотрена возможность регистрации разброса показания влажности относительно заданного среднего значения.

Основные технические данные влагомера ЭАВ-СВЧ-2: диапазон измерения влажности хлопковых семян: 5-18%; шрота 6-16%; шелухи 5-30%; мятки 6-15%. Основная погрешность определения влажности хлопковых семян составляет  $\pm 0,8\%$  (абс.).

Диапазон температуры, для которого вводится поправочный коэффициент, составляет от  $35^{\circ}\text{C}$  до  $70^{\circ}\text{C}$ . Масса пробы образца хлопковых семян  $1,7 \pm 0,01$  кг. Мощность, потребляемая прибором, не более 200 ВА. Масса прибора не более 10 кг.

Компенсация затухания сверхвысокочастотной энергии, вносимая исследуемым образцом, осуществляется путем автоматического вращения оси уравнивающего аттенуатора с помощью электрического двигателя, управляемого сигналом разбаланса плеч опорного и измерительного каналов СВЧ-тракта.

На рис. 8.10. приведена функциональная схема влагомера ЭАВ-СВЧ-4, выполненного на микрополосковых и полупроводниковых СВЧ элементах, а в низкочастотной части - на микросхемах и транзисторах.

СВЧ часть влагомера состоит из двух блоков: блока генератора и блока детектора. Эти два блока электрически соединены между собой коаксиальным кабелем.

Основные технические характеристики влагомера ЭАВ-СВЧ-4: диапазон измерения влажности хлопковых семян 5-22%, хлопко-сырца 5-40%. Основная погрешность составляет  $0,8\%$  (абс.). Масса

пробы хлопковых семян 0,25 кг. Мощность, потребляемая прибором, не более 30 ВА. Масса прибора 5 кг.

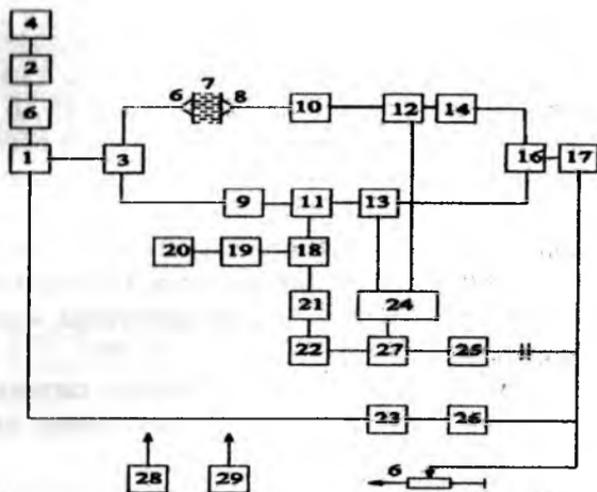


Рис. 8.10. Функциональная схема влагомера ЭВБ СВЧ-4.

Блок генератора содержит генератор 2, вентиль 3, аттенюатор АРМ-4, делитель мощности 5 и передающую антенну 6. Исполнение блока, кроме антенны - микрополосковое. Антенна - рупорная с диэлектрической линзой. Генератор выполнен на элементе Ганна типа ДА 715Б; выходная мощность 150 мВт. Аттенюатор АРМ выполнен на р-і-п диодах и имеет диапазон регулировки ослабления 0,7 -22 дБ, при токе управления 0-10 мА. Вентиль 3 выполнен в виде полоскового ферритового циркулятора с согласованной нагрузкой. Делитель мощности 5 делит поступающий на него сигнал с ослаблением в направлении основного канала 3,5 дБ и компенсационного канала - 0,2 дБ. Максимальная мощность СВЧ сигнала на выходе антенны составляет 65 мВт.

Блок детектора содержит приемную антенну 8, вентили 9 и 10, уравновешивающий аттенюатор 11, модуляторы 12 и 15, аттенюатор начальной установки мощности 14, суммирующее устройство (разветвитель мощности в инверсном включении) 16 и детектор 17. Элементы блока детектора выполнены в микрополосковом исполнении в одном корпусе. Антенна приемная идентична передающей. А вен-

тили 9 и 10 выполнены в виде полосковых ферритовых циркуляторов с согласованной нагрузкой. Атенюаторы 11 и 14 и модуляторы 12 и 15 выполнены на р-і-п диодах.

Модуляторы 12, 15 имеют диапазон регулировки ослабления 1,2-65 дБ в диапазоне управляющих токов 0-5 мА. Уравновешивающий аттенюатор имеет диапазон ослабления 0,7-65 дБ при управляющем токе 0-10 мА. Суммирующее устройство 16 обеспечивает коэффициент передачи мощности от входов к выходу с ослаблением на 3,5 дБ. Максимальная мощность сигнала, поступающая вход детектора может достигать 10 мВт при открытом основном канале и 5 мВт при открытом компенсационном канале. НЧ часть влагомера соединена с блоком генератора и блоком детектора многожильными кабелями.

Блок НЧ состоит из трех источников питания 1, 28, 29 (рис.8.10.) усилительно-преобразовательных узлов, включенных в два следящих контура:

а) автоматической регулировки мощности (АРМ) (элементы 4, 13, 26, 23);

б) автоматического выравнивания ослабления в каналах СВЧ части (элементы 17, 25, 27, 22, 21, 18, 11, 12, 15, 24, 16).

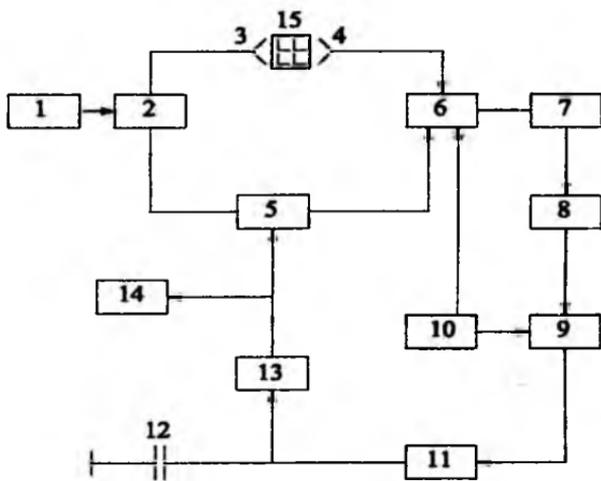
Отсчет измеряемого ослабления в материале 7 производится измерителем тока 18, который измеряет силу тока, управляющего аттенюатором 11. Этот управляющий ток (пропорциональный влажности материала) поступает также на устройство сопряжения с микрокалькулятором 19, и далее - на микрокалькулятор 20, который реализует уравнение регрессии и выдает показания в процентах влажности.

#### **8.4. Влагомеры СВЧ для хлопка-сырца**

Это специализированные приборы, предназначенные для измерения влажности хлопка-сырца, однако, в сочетании с соответствующими первичными измерительными преобразователями их можно применять и для хлопковых семян и продуктов их переработки, а также для других твердых, сыпучих и жидких материалов.

Автоматический влагомер ТашГТУ с аналоговым выходом для хлопка-сырца и хлопковых семян построен по схеме, представленной на рис.8.11. Поступающий с генератора 1 сигнал сверхвысокой

частоты делится в разветвителе мощности 2 между опорным и измерительным каналами. В измерительном канале мощность сигнала ослабляется в исследуемом материале 15, помещенном в первичный преобразователь в пространстве между антеннами 3 и 4, а в опорном канале мощность ослабляется управляемым аттенюатором 5. Коммутатор 6 подключает к входу детектора 7 поочередно выходы измерительного и опорного каналов. Коммутатор управляется низкочастотным сигналом, частотой  $\omega$ , вырабатываемым низкочастотным генератором 10.



**Рис. 8.11. Функциональная схема автоматического СВЧ-влажмера ТашГТУ.**

Переменная составляющая сигнала на выходе детектора представляет собой прямоугольные колебания, частоты  $F$ , амплитуда которых пропорциональна величине рассогласования, а фаза принимает значения  $0^\circ$  или  $180^\circ$  относительно фазы колебаний, управляющих переключением коммутатора, и определяется знаком рассогласования каналов по ослаблению. Колебания с выхода детектора, после усиления первым усилителем 8, поступают на блок умножения 9. На второй вход перемножителя поступает низкочастотное колебание частоты  $F$  с низкочастотного генератора 10.

Напряжение на выходе блока 9 пропорционально амплитуде колебаний в выходе усилителя 8, а полярность определяется их фазой относительно фазы колебаний генератора 10.

Выходное напряжение перемножителя управляет генератором тока 11, который заряжает или разряжает накопительный конденсатор 12. Скорость и знак изменения напряжения на конденсаторе определяется амплитудой и фазой колебаний на выходе детектора, а стало быть, величиной и знаком рассогласования каналов по ослаблению СВЧ мощности. Напряжение на конденсаторе 12 через усилитель 13 управляет уравнивающим аттенуатором 5. Сигнал, управляющий аттенуатором, отображается индикатором 14.

Показания индикатора 14 пропорциональны ослаблению, вносимому аттенуаторами, в установившемся режиме и характеризуют значение влажности исследуемого материала. Напряжение на конденсаторе 12 изменяется до тех пор, пока ослабление СВЧ мощности в опорном канале не сравняется с ослаблением в измерительном канале. Время установления равновесия схемы определяется постоянной времени заряда конденсатора 12 через генератор тока 11 и входную цепь усилителя 13.

Описанный влагомер обеспечивает повышение точности измерений благодаря усреднению шумов, возникающих в схеме. Усреднение происходит на конденсаторе 12, например, при постоянной времени заряда - разряда конденсатора 1с и частоте переключения коммутатора равной 10 кГц, усреднение производится за несколько тысяч переключений каналов. Усреднение шумов позволило расширить диапазон измерения влажности, т.е. схема устойчиво работает и при слабых сигналах на выходе детектора.

Испытания влагомера показали, что погрешность измерения ослабления СВЧ энергии в диапазоне от 0 до 63 составляет 0,05 дБ или в пересчете на погрешность измерения влажности составляет 0,3% (абс.), в диапазоне измерения влажности хлопковых семян от 5 до 35%.

В последующих разработках ТашГТУ была усовершенствована элементная база путем широкого применения микроэлектроники, в них предусмотрены цифровой выходной сигнал и возможность работы влагомеров как в автономном режиме, так и в сопряжении с ЭВМ. Базовым прибором для этих разработок послужил сверхвысокочастотный автоматический влагомер ВХС-2 для хлопка-сырца, разработанный в НПО "Сигнал" [8.11].

Функциональная схема влагомера ВХС-2 приведена на рис.8.12. В первоначальном варианте (без блоков А, обведенных на

рис.8.11 штриховкой) влагомер содержит следующие основные элементы: генератор СВЧ 1 на диоде Ганна, разветвитель на волноводных Н-тройниках 2, измерительный и опорный каналы. Первый канал содержит излучающую и приемную антенны 3,4 между которыми находится исследуемый материал 18 и детектор 5. В опорный канал перед вторым детектором 7 включен уравнивающий аттенюатор 6, собранный на р-и-п диодах и управляемых генератором 13 линейно изменяющегося напряжения. Блок 13 представляет собой интегратор, синхронизируемый тактовыми импульсами генератора 14 и выполненный на операционном усилителе, в качестве источника неизменного тока применен полевой транзистор. Линейность и частота пилообразного напряжения, вырабатываемого генератором 13, не зависят от изменений управляющего напряжения.

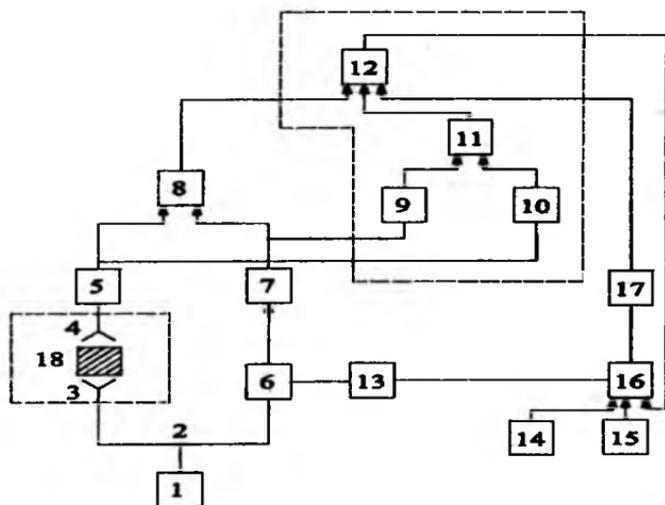


Рис. 8.12. Функциональная схема СВЧ- влагомера ВХС-2

К выходу обоих каналов подключен блок сравнения 8 (компаратор, выполненный в виде интегральной схемы), выходной, сигнал которого поступает на блок управления 16, связанный с генератором тактовых импульсов 14, а также с генератором счетных импульсов 15, выполненным на симметричном мультивибраторе, стабилизированном кварцем с частотой 100 кГц. Блок управления через генератор 13 управляет уравнивающим аттенюатором 6 и связан с вы-

числительным блоком 17, содержащим трехзарядный двоично-десятичный счетчик. Он осуществляет цифровую индикацию влажности в процентах, блок 17 имеет также выход на цифровой печать.

Исследуемый образец материала, массой  $800 \pm 8$  г помещают в рабочую камеру корпуса влагомера. В момент закрытия крышки камеры влагомер включается автоматически.

В автономном режиме влагомер работает следующим образом. Поступающий с генератора СВЧ 1 сигнал с начальной амплитудной  $V_0$  разветвителем 2 делится между опорным и измерительным каналами, а затем, пройдя исследуемый материал 18, ослабляется и на выходе приемной антенны 4 выделяется в виде синусоидального сигнала:

$$U_i = V_0 \sin(\omega t + j) / 2$$

Это напряжение, преобразованное детектором 5 в сигнал постоянного тока, сравнивается с сигналом опорного канала. Сравнение сигналов производится путем уменьшения опорной величины сигнала до значения, установившегося на выходе измерительного канала. Показателем влажности при этом служит интервал времени, в течение которого выполнялось сравнение. Результат измерения через интервалы в 6 сек. повторяется и в процентах влажности высвечивается на цифровом табло. Интервалы между запуском и индикацией, достаточные для отработки цифр печати и визуального наблюдения, задаются генератором тактовых импульсов 14.

Для осуществления процесса измерения генератор 14 через блок управления 16 одновременно запускает генераторы 15 и 13. Получив разрешение от генератора 14, импульсы с генератора 15 через блок 16 поступают в вычислительный блок 17 до тех пор, пока генератор 13 посредством аттенюатора 6 не ослабит СВЧ энергию в опорном канале до значения, равного в измерительном канале. В момент равенства этих напряжений на выходе блока сравнения 8 вырабатывается сигнал, запрещающий прохождение импульсов с генератора 15 и блок 17 и одновременно генератор 13 переводится в исходное состояние. В результате реализуется линейное уравнение, аппроксимирующее градуировочную характеристику для хлопкосырца:

$$W = (A + B) / K$$

где  $W$  - массовое отношение влаги (влагосодержание);

$A$  - затухание энергии СВЧ;

$K, B$  - постоянные.

Число импульсов, поступивших с генератора счетных импульсов в вычислительный блок, пропорционально продолжительности работы генератора линейно изменяющегося напряжения. Оно определяется разностью напряжений, приложенных к входу блока сравнения.

Описанная схема была в последующем усовершенствована с целью расширения диапазона измерения влажности в сторону высоких значений. Для этого она была дополнена устройством, расширяющим диапазон измерения путем автоматического переключения измерительного устройства с одного поддиапазона на второй. Это устройство содержит дополнительные блоки (А), обведенные на схеме рис.8.11 штриховой линией: усилители постоянного тока 9 и 10, второй блок сравнения 11 и блок коммутации 12, который содержит схемы совпадения и исполнительный триггер.

Если измеряемая влажность не превышает 25%, сравнение выходных напряжений измерительного и опорного каналов производится в блоке сравнения 8. Усилители 9 и 10 в этом случае находятся в состоянии насыщения (или близком к нему) и не участвуют в работе.

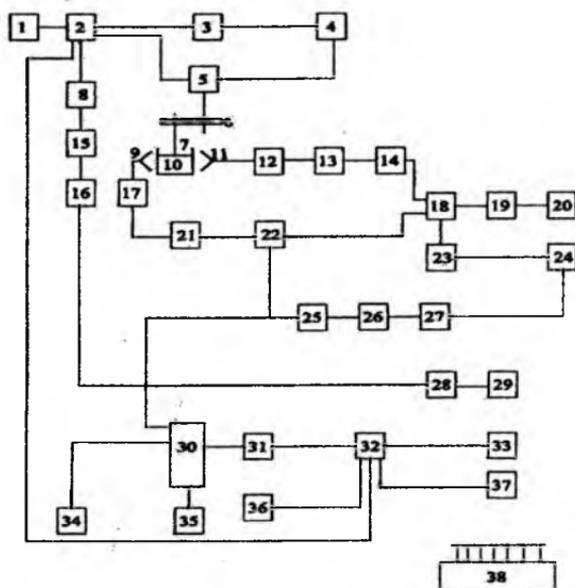
Если влажность превышает 25%, на выходе двоично-десятичного счетчика вычислительного блока формируется код, который через схему совпадения воздействует на триггер. Последний переключается в состояние, при котором на его инверсном выходе появляется ЛОГ "1", в на прямом - ЛОГ "0". Это состояние посредством схемы совпадения запрещает прохождение информативного сигнала через блок сравнения 8 и разрешает через блок сравнения 11, т.е. переключает влагомер на второй диапазон.

Установившиеся при этом в опорном и измерительном каналах величины напряжений предварительно усиливаются операционными усилителями 9 и 10, затем сравниваются в блоке сравнения 11, расширяя диапазон измерений влажности до 35-37%.

В последнее время в ТашГТУ были разработаны новые СВЧ-влагомеры для хлопка-сырца, характеризующиеся применением современной элементной базы по микропроцессорной технике и пригодные не только для хлопковых, но и для других материалов.

Первый из этих влагомеров типа ЭАВ СВЧ-5 предназначен для измерений без предварительного взвешивания пробы [8.12]. В нем применены первичный преобразователь с принудительным уплотне-

нием исследуемого образца хлопка, описанный в п.7.1 и микропроцессор, который вычисляет значение влажности материала с учетом его температуры и выдает это значение в цифровой форме на индикатор.



**Рис.8.13. Функциональная схема влагомера без необходимости взвешивания пробы.**

На рис.8.13 приведена функциональная схема этого влагомера. содержащая пусковую кнопку 1, реле 2, двигатель 3, переключатель "реверс" 4, электромагнитную муфту 5, зубчатую передачу 6, ходовой винт 7 с поршнем, СВЧ генератор 8, передающую 9 и приемную 11 антенны, кювету с исследуемым образцом материала 10 между ними, вентили 12, 15, 21, аттенюаторы 13, 14, 16, 22, делитель СВЧ сигнала 17, коммутатор СВЧ каналов 18, детектор 19, усилитель низкой частоты 20, генератор низкой частоты 23, перемножитель 24, усилители постоянного тока 25, 29, интегратор 26, генераторы тока 27, 28, коммутатор сигналов 30, аналого - цифровой преобразователь 31, микропроцессор с памятью 32, индикатор 33, первичные измерительные преобразователи (ПИП) 34, 35, блок управления АЦП 36, блок клавиатуры 37 и блок питания 38.

Алгоритм работы влагомера приведен на рис.8.14. Цикл измерения влажности состоит из трех этапов. Первый этап включает загрузку материала, его уплотнение и работу измерительного преобразователя (блоки 1 и 2 алгоритма).

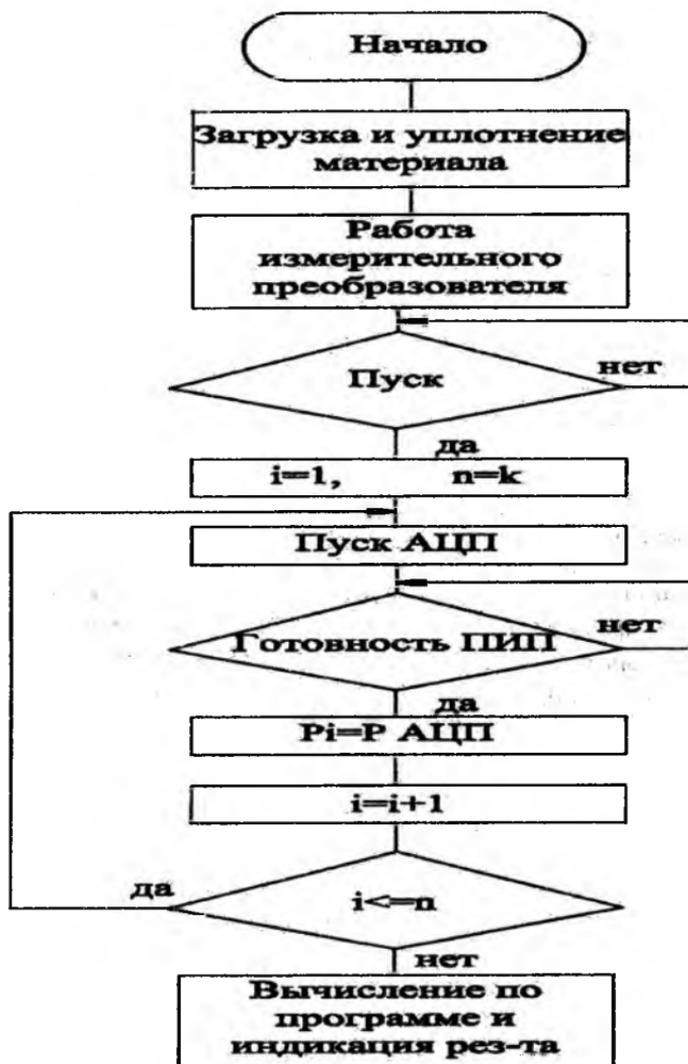


Рис.8.14. Алгоритм работы прибора

При нажатии пусковой кнопки 1 начинает работать электродвигатель 3 и реле времени 2, которое через заданный промежуток времени включает электромагнитную муфту 5. Муфта 5 передает момент вращения электродвигателя 3 на зубчатую передачу 6, ведомое колесо которого с помощью ходового винта 7 превращает вращательное движение вала электродвигателя 3 в поступательное движение поршня. Поршень, перемещаясь в кювете 10, уплотняет образец.

При равенстве давлений образца и электродвигателя 3 на поршень, электромагнитная муфта 5 начинает проскальзывать. Затем реле времени 2 включает СВЧ генератор 8. СВЧ сигнал с генератора 8 проходит через вентиль 15, аттенюатор мощности 16 и разветвляется делителем 17 на измерительный и опорный каналы. В измерительном канале СВЧ сигнал излучается антенной 9, проходит через материал, принимается антенной 11, проходит через вентиль 12, аттенюаторы установки нуля 13 и образцовой 14.

В опорном канале СВЧ сигнал проходит через вентиль 21 и измерительный аттенюатор 22. Сигналы измерительного и опорного каналов поочередно подаются через коммутатор 18 на детектор 19. Продетектированные сигналы усиливаются усилителем 20 и поступают на перемножитель 24. Коммутатор 18 и перемножитель 24 управляется генератором низкой частоты 23 таким образом, что продетектированные и усиленные измерительный и опорный сигналы поступают через генератор тока 27 на интегратор 26 и противофазе.

При этом на выходе интегратора 26 получается разностный сигнал, характеризующий ослабление в измерительном канале и пропорциональной влажности материала, который усиливается усилителем постоянного тока 25 и поступает на управляющий вход измерительного аттенюатора 22. В результате ослабление, вносимое измерительным аттенюатором 22 в опорном канале, становится равным ослаблению в измерительном канале.

Время установления следящей системы при частоте генератора 23 3-5 кГц не превышает 5с. Затем реле времени 2 инициирует сигнал "Пуск" микропроцессора, что является началом второго этапа измерения (блоки 3-9 алгоритма, рис 8.13), в котором производится аналого-цифровое преобразование сигналов с измерительного преобразователя влажности и преобразователей ПИП, 34, 35 и засылка информации в регистры общего назначения микропроцессора. Вна-

чале программа определяет количество опрашиваемых преобразователей ( $n$ ) и по номеру первого опрашиваемого преобразователя выставляет адрес на адресный вход коммутатора 30. При этом на вход АЦП 31 подключается соответствующий преобразователь ПИП. Затем выдается команда "Пуск АЦП" и производится аналогоцифровое преобразование сигнала с выхода ПИП.

Цифровая информация регистра АЦП (Рацп) переписывается в регистры микропроцессора с номером  $i(P_i)$ , и номер опрашиваемого ПИП увеличивается на единицу. Затем определяется количество опрошенных преобразователей. При  $i < n$  выдается команда "Пуск АЦП" и производится опрос ПИП с номером  $i+1$ . Таким образом, информация со всех ПИП $i$  последовательно записывается в последующие регистры  $P_i$  микропроцессора. Максимально возможное количество ПИП равно семи. Во влагомере использовано два входа: ПИП влажности и температуры материала. При  $i > n$  программа переходит к третьему этапу - обработке информации и индикации результата (блок 10 алгоритма). Программа обработки результатов измерений составляется по полученному экспериментально уравнению регрессии градуировочной зависимости и коэффициентов влияющих величин.

Блок клавиатуры 37 предназначен для набора программы и ввода известных параметров материала для коррекции результата измерения влажности. На индикаторе 33 высвечивается значение влажности в процентах. Элементы 16, 28, 29 обеспечивают постоянный уровень СВЧ сигнала на входе делителя 17. Установка нуля производится регулировкой тока на управляющем входе аттенюатора 13. Аттенюатор 14 предназначен для проверки отклонения градуировки влагомера от номинальной. В качестве блока постоянного питания 38 использованы стабилизированные источники тока.

СВЧ тракт влагомера, кроме кюветы с антеннами, выполнен на несимметричных микрополосковых линиях. СВЧ генератор и аттенюаторы выполнены на полупроводниковых элементах. Конструктивно СВЧ элементы собраны в двух блоках. Блок генератора включает в себя элементы 12, 13, 14, 18, 19, 21, 22. Блоки собраны в одинаковых корпусах, являющихся одновременно радиаторами охлаждения. Габаритные размеры блоков (130x90x40) мм.

Использование современной элементной базы и микропроцессорной техники позволило улучшить метрологические характеристики влагомера и уменьшить его габариты по сравнению с существующими.

Влагомер можно применять как для экспрессных измерений, так и для контроля влажности в АСУТП хлопкоперерабатывающего предприятия, так как при его использовании нет необходимости взвешивания пробы. Гибкая программируемая логика преобразования информации позволяет применять влагомер также для других материалов при условии изменения программы соответственно градуировочной характеристике для данного материала.

Описанный влагомер позволяет контролировать влажность хлопка-сырца с заданной точностью в диапазоне 5-30% влажности. Для контроля влажности хлопка-сырца в диапазоне 5-50% был разработан СВЧ-влагомер с расширенным диапазоном измерений.

Для перекрытия широкого диапазона измерения влажности с помощью одного первичного преобразователя применен предложенный нами способ: изменение направления облучения материала в преобразователе с одной пары антенн на другую, причем обе пары антенн расположены во взаимно перпендикулярных направлениях.

Соответственно принятым двум поддиапазнам, схема измерительного устройства влагомера имеет два измерительных канала. Переключение каналов осуществляется электронным переключателем, собранным на сосредоточенных полупроводниковых элементах и микрополосковых линиях.

Второй СВЧ-влагомер был разработан для измерения влажности хлопка-сырца в кузове транспортных средств без отбора пробы [8.13]. Аналогичными являются задачи измерения влажности хлопкового волокна и другим легко деформируемых материалов в кипах, тюках, насыпи и т.п.

На рис.8.15 приведена функциональная схема влагомера автоматическим введением поправки, компенсирующей погрешность, обусловленную углом наклона оптической оси антенн ко дну транспортной тележки, СВЧ сигнал с генератора 1 делится в разветвителе 2 на две части. Одна часть через вентиль 3 поступает в передающую антенну 5. Пройдя хлопок-сырец 6, ослабляется им и принимается приемными антеннами 8,9,10. Передающая и приемная антенны помещены в экране 4, 11.



При наличии тележки между антеннами оператором запускается генератор тактовых импульсов 27. Периодически с паузой, достаточной для отработки цифропечати и визуального наблюдения результата измерения, на индикаторе 21 и информационном табло 7 генератор тактовых импульсов через блок управления 25 запускает одновременно генератор счетных импульсов 28 и генератор линейно-изменяющегося напряжения 24.

Получив разрешение от генератора тактовых импульсов 27, импульсы с генератора счетных импульсов 28 через блок управления 25 начинают поступать в логический блок 22 до тех пор, пока измерительный аттенюатор 23, управляемый генератором линейно-изменяющегося напряжения 24, не ослабит СВЧ сигнал в опорном канале до величины сигнала, принимаемого антенной 9. В момент равенства этих сигналов на выходе блока сравнения 19 вырабатывается сигнал, запрещающий прохождение импульсов с генератора 28 в логический блок 22 и одновременно переводящий генератор 24 в исходное состояние.

Продолжительность работы генератора линейно - изменяющегося напряжения 24, пропорциональная числу импульсов генератора 28, поступивших в логический блок 22, находится в функциональной зависимости от влажности объемной массы хлопка-сырца в зоне измерения и угла наклона дна транспорта к оптической оси антенн 5 и 9, установленных и определяется разностью приложенных к блоку сравнения 19 напряжений, т.е. ( $U_2 - U_4$ ).

Число импульсов, прошедших в генератор линейно-изменяющегося напряжения и логический блок, определяет в первом приближении влажность хлопка-сырца. Однако, если масса хлопка-сырца отличается от средней массы, при которой градуировался влагомер, и если дно транспорта не параллельно оптической оси антенн, то это значение влажности будет грубым. Поэтому после поступления через вход 18 информации о массе хлопка-сырца в кузове транспорта логический блок 22 вычисляет окончательное значение влажности путем ввода соответствующих поправок. Для этого используется экспериментально установленные зависимости поправок от величины отклонения массы хлопка-сырца в кузове транспорта от средней массы равной 2т, и от величины R, характеризующей наклон дна транспорта к оптической оси антенн и равной

$$R = (U_1 - U_2) / (U_3 - U_2)$$

Длительность однократного определения влажности составляет доли секунды и принципиально измерение влажности можно производить без остановки транспорта. С учетом необходимости многократного измерения влажности в кузове транспорта общая длительность не превышает 0,5 мин.

### **8.5. Двух- и многопараметровые влагомеры СВЧ**

Описанные выше влагомеры можно назвать "однопараметровыми", так как в них измеряется лишь один информативный параметр выходного сигнала первичного измерительного преобразователя.

С целью повышения точности измерения влажности нами были разработаны "многопараметровые" модификации влагомеров СВЧ, позволяющие компенсировать влияние одной или двух наиболее существенных влияющих величин, в соответствии с принципами действия многопараметрических влагомеров, изложенными в п.3.3 и разработанными нами методами улучшения метрологических характеристик СВЧ-влагомеров (п.7.2).

В "двухпараметровых" влагомерах измеряемыми компонентами выходного сигнала датчика являются ослабление и фазовый сдвиг проходящей волны, т.е. реализуется амплитудно-фазовый метод измерения. В "трехпараметровом" варианте к этим двум величинам добавляется третья-коэффициент отражения электромагнитной волны от границы раздела сред воздух - исследуемый материал. Функциональная схема двухпараметрового влагомера представлена на рис.8.16.

Измерительное устройство содержит генератор 1, направленный ответвитель 2, передающую антенну 3, приемную антенну 4, коммутатор 5, уравнивающий аттенюатор 6, детектор 7, блок сравнения 8, аттенюатор 9, генератор 10 счетных импульсов, генератор 11 тактовых импульсов, блок управления 12, распределитель импульсов 13, генераторы 14, 15 (ГСН 14 и ГСН 15) ступенчатого напряжения, вычислительный блок 16, индикатор 17.

Влагомер работает следующим образом. Во время первого тактового импульса  $t_0-t_1$ , поступающего с генератора 11, ГСН 15 устанавливается в положение, при котором аттенюатор 6 полностью запрещает прохождение СВЧ энергии с генератора 1 на вход детек-

торной секции 7, а аттенюатор 9 сигналом первого выхода распределителя импульсов 13 разрешает прохождение СВЧ энергии по измерительному каналу.

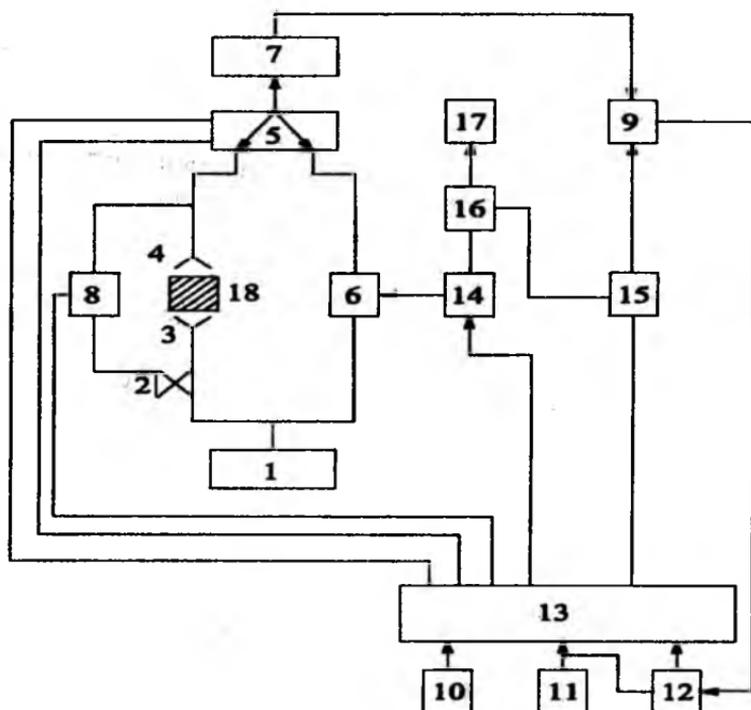


Рис. 8.16. Функциональная схема двухпараметрового СВЧ-влажномера

В результате этого на входе детекторной секции образуется сигнал  $U_4$  в виде гармонического напряжения, величина которого зависит от влажности и плотности исследуемого материала 18:

$$U_4 = U_m \sin(\omega t + j),$$

где:  $U_m$  - амплитудное значение напряжения на входе детектора. Это напряжение, преобразованное детекторной секцией 7 в сигнал постоянного тока, прикладывается к одному из входов блока сравнения 8. Одновременно с генератора 10 счетные импульсы через распределитель импульсов 13 поступают на вход ГСН 14 до тех пор, пока не наступит равенство напряжений на входах блока сравнения

8. При достижении этого равенства на выходе блока 8 вырабатывается сигнал, который посредством блока управления 12 запрещает поступление счетных импульсов на вход ГСН 14. При этом на выходе ГСН 14 запоминается напряжение, равное напряжению на выходе детекторной секции 7.

Во время второго тактового импульса  $t_1-t_2$  блок сравнения 8 возвращается в исходное положение, а ГСН 15 сбрасывает напряжение и СВЧ энергия от генератора 1 проходит по опорному каналу на вход детекторной секции 7. Одновременно сигналом с выхода распределителя импульсов 13 установочный аттенюатор 9 переключается в положение, при котором запрещается прохождение СВЧ энергии по измерительному каналу. При этом счетные импульсы от генератора 10 через другой выход распределителя импульсов 13 начинают поступать на вход ГСН 15. Последний, воздействуя на аттенюатор 6, вносит затухание СВЧ энергии в опорный канал до величины, равной напряжению на выходе ГСН 14, приложенному ко входу блока сравнения 8.

После этого с выхода блока 8 через блок управления 12 вновь поступает сигнал запрета и запись импульсов в ГСН 15 прекращается. В результате завершения двух циклов в вычислительном блоке 16 реализуется уравнение

$$A_i = K_1 W_i + b$$

где  $A_i$  - величина затухания СВЧ энергии, характеризующая значение влажности по разности напряжений в опорном и измерительном каналах;

$W_i$  - влажность материала;

$K_1, b$  - постоянные коэффициенты для данного материала.

Во время третьего тактового импульса  $t_2-t_3$  с выхода распределителя импульсов 13 на аттенюатор 9 вновь поступает команда, разрешающая прохождение СВЧ энергии по измерительному каналу, а аттенюатор 6 остается в состоянии, принятом во втором такте. При этом на входе детекторной секции 7 устанавливается результирующее напряжение  $U_p$ , зависящее только от фазовых соотношений сигналов в опорном и измерительном каналах равно:

$$U_p = \sqrt{U_m^2 + U_{m2}^2 + 2U_m U_{m2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \cos \varphi}$$

Это напряжение также, как и в первом такте, преобразованное в сигнал постоянного тока, запоминается ГСН 14 и подается на вход блока сравнения 8.

В четвертом такте  $t_3-t_4$  ГСН 15 переводится в состояние, при котором вновь полностью разрешается прохождение СВЧ энергии по опорному каналу и далее, также как и во втором такте, генератор счетных импульсов 10 через соответствующий выход распределителя импульсов 13 в ГСН 15 записываются импульсы до равенства напряжений на выходах блока сравнения 8. В результате завершения двух последующих циклов в вычислительном блоке 16 реализуется уравнение  $j_i = K_i W_i + b$  - величина, характеризующая значение влажности по фазовому сдвигу между опорным и измерительным каналами.

Трудности, возникающие в определении  $j_i$ , связаны с неоднозначностью величин, обусловленных изменением фазы от 0 до  $2\pi$ . Преодолеваются они следующим образом. Выразив  $j = \rho$  и  $j = 2\rho$  через характеристики  $A_1$  и  $A_2$  соответственно, в нужный момент при помощи ГСН 14 и ГСН 15 в память вычислительного блока 16 выдают команды на запись чисел  $180^\circ$  и  $360^\circ$ , которые в дальнейшем учитываются при обработке результатов измерений.

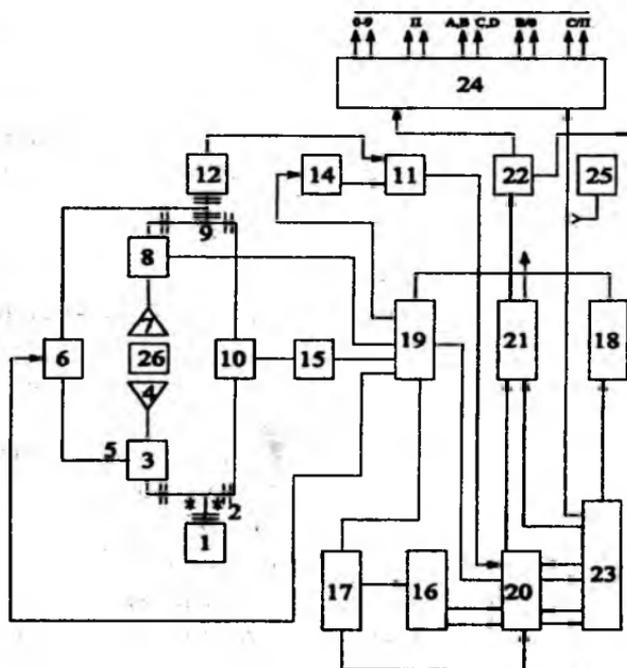


Рис. 8.17. Функциональная схема многопараметрового СВЧ-влажномера

Рассмотрим теперь "многопараметровый" влагомер СВЧ, позволяющий, как уже указывалось, измерять ослабление А, фазовый сдвиг  $j$  и коэффициент отражения К. Функциональная схема этого влагомера дана на рис.8.17.

Влагомер содержит СВЧ генератор 1, соединенный с делителем мощности 2, к первому плечу которого через посредство циркулятора 3, соединены передающая антенна 4 и ответвитель 5 с установочными аттенуатором 6 и приемная антенна 7. Последняя через второй установочный аттенуатор 8 соединена с первым входом двойного Т-образного моста 9, со вторым входом которого соединен уравнивающий аттенуатор 10. Выходы ответвителя 5 и двойного Т-образного моста 9 через тройник 11 соединены со входом детектора 12.

Схема содержит также блок сравнения 13, преобразователь 14 - код-напряжение, преобразователь 15 код-ток, делитель 16 частоты, генератор 17 счетных импульсов, счетчик 18 и дешифратор 19 команд, блок 20 управления, счетный блок 21, преобразователь 22 параллельного кода в последовательный, блок 23 команд и адресов, блок 24 автоматического ввода данных в микрокалькуляторы, блок 25 питания. Образец исследуемого материала обозначен 26.

Весь цикл приема, преобразования и передачи в микрокалькулятор или ЭВМ информации о затухании, фазовом сдвиге и коэффициенте отражения от границы раздела сред воздух-материал электромагнитной волны, происходит за четыре такта.

Первый такт начинается с появления на выходе делителя 16 частоты сигнала разрешения, поступающего через блок 20 управления на вход блока 23 команд и адресов. Последний, воздействуя на счетчик 18 команд, устанавливает его в состояние, при котором на выходе дешифратора 19 команд появляется сигнал, разрешающий запись счетных импульсов с блока 17 в преобразователь 14 "код-напряжение" и в счетный блок 21.

Вместе с тем подается команда, приводящая преобразователь 15 "код-ток" в состояние максимального тока на его выходе, который через посредство уравнивающего аттенуатора 10 запрещает прохождение СВЧ энергии в опорном канале. Одновременно подается команда на управление установочными аттенуаторами 6,8, первый из которых запрещает прохождение СВЧ энергии в ответвителе 5, а второй - разрешает передачу энергии с приемной антенны 7 на вход детектора 12.

Эта энергия, преобразованная детектором 12 в напряжение постоянного тока, прикладывается к первому входу блока 13 сравнений; ко второму входу прикладывается нарастающее напряжение с выхода преобразователя 14 "код-напряжение", полученное путем суммирования счетных импульсов в двоичном коде. В момент равенства этих напряжений на выходе блока 13 сравнения появляется сигнал, который через блок 20 управления запрещает запись импульсов в преобразователь 14 "код-напряжение", в счетный блок 21 и разрешает в блоке 22 произвести преобразование параллельного кода в последовательный с последующей передачей его в блок 24 автоматического ввода данных в микрокалькулятор. Это преобразование необходимо для того, чтобы нужные клавиши микропроцессора могли последовательно замыкаться столько раз, сколько слов содержится во всех разрядах счетного блока.

После ввода в микропроцессор числа, полученного в первом такте, с блока 23 команд и адресов в блок 24 поступает следующая команда, которая позволяет последовательным замыканием клавиш сначала "П", затем "С", перевести это число в ячейку памяти "С". Последующие команды, поступающие с блока 23 команд и адресов в блок 20 управления, устанавливают схему в следующее исходное состояние: установочные аттенюаторы 6, 8 запрещают прохождение электромагнитной волны в ответвителе и измерительном канале, а уравнивающий аттенюатор 10 открывается и незатухающие колебания электромагнитной волны, преобразованные детектором 12 в напряжение постоянного тока, из опорного канала поступают на первый вход блока 13 сравнения.

На втором входе блока 13 сравнения сохраняется величина напряжения, установившаяся в результате работы первого такта. При этих условиях блок 13 сравнения возвращается в первоначальное состояние, в счетном блоке 21 стирается число предыдущего такта, а счетчик 18 команд устанавливается в режим второго такта.

Во втором такте с ГСИ 17 вновь поступают импульсы в счетный блок 21 и преобразователь 15 код-ток. При этом на выходе преобразователя 15 растет ток, который, управляя уравнивающим аттенюатором 10, перекрывает опорный канал до равенства напряжений на входе блока 13 сравнения. Затем процесс обработки информации повторяется с той разницей, что число, полученное во втором такте, записывается в ячейку памяти "В".

В третьем такте на выходе преобразователя 14 устанавливается ноль, установочный аттенюатор на выходе 8 открывается, а уравнивающий аттенюатор 10 сохраняет состояние предыдущего такта. При этом на выходе двойного Т - образного моста 9 устанавливается результирующее напряжение, зависящее от разности фаз в опорном и измерительных каналах:

$$U_p = 2U \cos^2(e^r \varphi_p / 2) \quad \text{или} \quad \varphi_p = \arccos \sqrt{U_p / 2Ue^r}$$

где  $\varphi_p$  - результирующий фазовый сдвиг;

$e^r$  - коэффициент преобразования детектора 12.

Как и в первом такте, это напряжение в счетном блоке 21 преобразуется в двоично-десятичный код и записывается в ячейку памяти "Д".

В четвертом такте аттенюаторы 8,10 закрываются, а аттенюатор 6 открывается, разрешая прохождение в ответвителе 5 отраженной от границы раздела сред электромагнитной волны. В результате этого на первом входе блока 13 сравнения появляется напряжение, величина которого определяется аналогично первому такту и записывается в ячейку памяти "А".

По окончании четвертого такта запись массива данных в ОЗУ микрокалькулятора прекращается и с блока 23 команд и адресов в блок 24 поступает команда на замыкание клавиш "В/О" (обработка массива данных, начиная с нулевого регистра) и "С/П" (пуск и остановка).

По истечении 30 секунд с делителя 16 частоты в блок 20 управления поступает второй импульс, и весь цикл измерений повторяется. В описанном влагомере дополнительная информация о коэффициенте отражения R позволяет учесть влияние рассогласования волновых сопротивлений на границе раздела сред воздух - материал, когда последний изменяет свои диэлектрические свойства в зависимости от влажности.

Ниже описывается реализация разработанных нами двух методов - двухпараметрического и двух толщин (п.7-2). В двухпараметрическом влагомере измеряемыми параметрами выходного сигнала преобразователя являются ослабление проходящей волны и фазовый сдвиг отраженной волны.

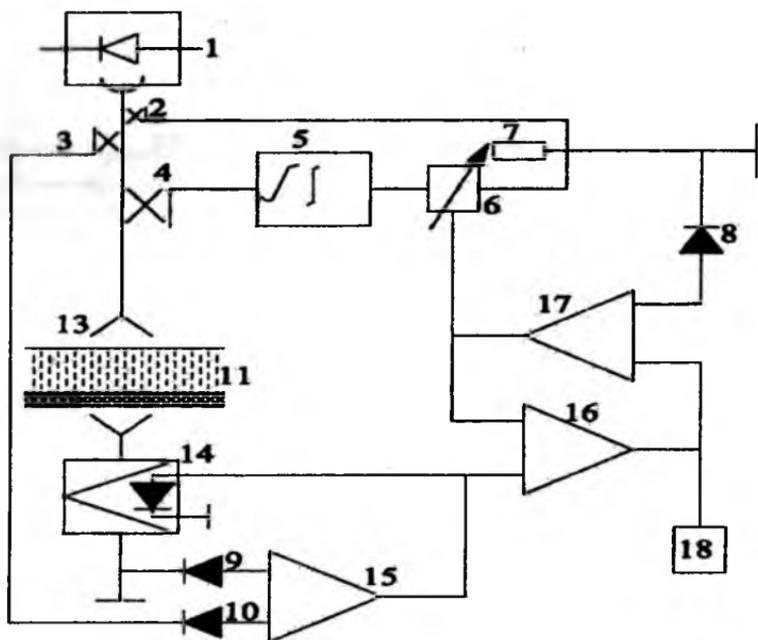
Функциональная схема двухпараметрического влагомера приведена на рис. 8.18. Влагомер работает следующим образом.

Энергия от генератора СВЧ 1 разветвляется в опорный и рабочий каналы направленным ответвителем 3. Часть энергии, поступившая в рабочий канал, излучается передающей антенной 13 и частично проходит через исследуемый материал 11, а частично отражается от него. Прошедшая часть попадает на приемную антенну 12 и проходит через управляемый аттенюатор 14 на детектор 9. Энергия, ответвленная направленным ответвителем 3 в опорный канал, поступает на детектор 10. Сигналы опорного и рабочего каналов подаются на вход дифференциального усилителя 15, выходной ток которого пропорциональный ослаблению в материале, управляет аттенюатором 14, а также поступает на один вход формирующего усилителя 16

Часть энергии, отраженная от исследуемого материала, через антенну 13, направленный ответвитель 4, электронный стабилизатор мощности 5 и управляемый фазовращатель 6, поступает на одно плечо волноводного сумматора 7, на второе плечо которого через направленный ответвитель 2 поступает энергия с генератора СВЧ 1. Электронный стабилизатор мощности 5 поддерживает уровень отраженного сигнала постоянным и равным уровню сигнала, поступающего на волноводный сумматор 7 с генератора СВЧ 1, независимо от влажности контролируемого материала. При этом уровень выходного сигнала волноводного сумматора 7 определяется только разностью фаз сигналов, поступающих на его плечи.

Выходной сигнал волноводного сумматора 7 преобразуется детектором 8 в низкочастотный сигнал и поступает на управляющий усилитель 17, выходной сигнал которого управляет фазовращателем 6, а также поступает на второй вход формирующего усилителя 16. Усилитель 16 формирует сигнал пропорциональный отношению сигналов на его входах. Этот сигнал поступает на индикатор 18, а также на вход усилителя 17 для коррекции его выходного сигнала.

Описанный влагомер обеспечивает формирование выходного сигнала, пропорционального отношению ослабления в материале к величине разности фаз волн, падающей и отраженной от передней границы материала.

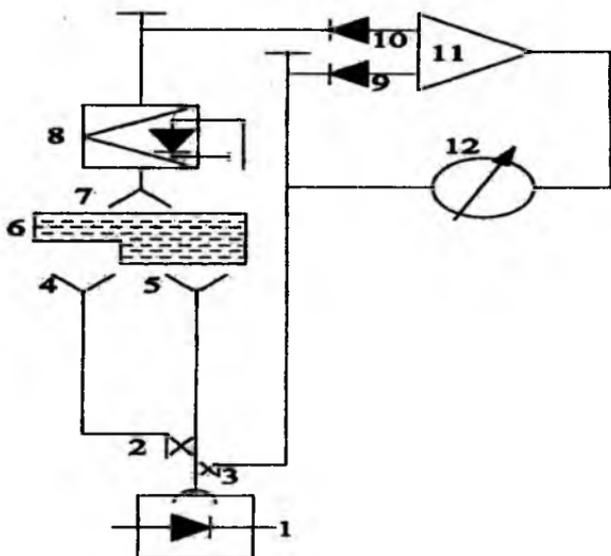


**Рис. 8.18. Функциональная схема влагомера по ослаблению проходящей волны и фазовому сдвигу отраженной волны.**

Как показано ранее (глава 6), фаза отраженной волны имеет тесную корреляцию с толщиной материала и низкую - с его влажностью, и сигнал, пропорциональный отношению ослабления к фазе отраженной волны, несет информацию о величине ослабления в материале единичной толщины, т.е. о его влажности.

Полное устранение влияния влажности на результат измерения фазы отраженной волны достигается подачей выходного сигнала, пропорционального влажности, на вход управляющего усилителя 17. Таким образом, выходной сигнал влагомера определяется только влажностью материала и не зависит от его толщины, что позволяет контролировать влажность материалов, имеющих переменную толщину с более высокой точностью, чем у известных СВЧ-влагомеров.

Функциональная схема влагомера, основанного на способе двух толщин, приведена на рис. 8.19.



**Рис.8.19. Функциональная схема влагомера по методу двух толщин.**

Схема содержит генератор СВЧ 1, направленные ответвители 2, 3, передающие 4,5 и приемную 7 антенны, с материалом 6 между ними в виде двух ступеней, компенсирующий аттенюатор 8, детекторы 9, 10, дифференциальный усилитель 11 и индикатор 12. Схема работает аналогично ранее описанным двухканальным компенсационным схемам амплитудных влагомеров, за исключением того, что волны, излученные антеннами 4 и 5, проходят через части материала разной толщины и складываются в антенне 7. Это обеспечивает эффект векторного суммирования волн, что, как показано в п.7.2, существенно повышает чувствительность измерений.

### **8.6. Унифицированная система средств получения информации о влажности**

Для наиболее эффективного решения задачи получения использования информации о влажности хлопка и хлопковых материалов на различных этапах их производства и переработки, необходимо применить системный подход. Системная методология диктует в данном случае целесообразность отказа от приборов частного

применения, решающих отдельные разрозненные задачи, не связанные между собой, как это практикуется в измерениях влажности в большинстве отраслей.

Как уже указывалось в главе 3, необходимо создать единую унифицированную систему, решающую широкий круг задач, связанных с получением и использованием информации о влажности хлопка-сырца, промежуточной и готовой продукции предприятий на всех этапах производства, начиная с лабораторного контроля поступающего сырья, вплоть до контроля и автоматического управления технологического процесса и выдачи необходимой информации в высшие ступени иерархии автоматизированной системы управления предприятием.

Подобная система была предложена для АСУТП строительной индустрии [8.14], но она является новой для хлопководства, хлопкоочистительной и хлопкомасложировой промышленности. Для реализации системы необходим комплекс технических средств, характеризующийся информационной, метрологической, эксплуатационной и другими видами совместимости. Важнейшие предпосылки для этого - унификация выходных сигналов всех используемых первичных измерительных преобразователей (датчиков) влажности, а также измерительных устройств, в условиях бывшего союза унификация выходных сигналов измерительных преобразователей реализовалась на базе Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

Преимущества этого очевидны. Унифицированная система позволяет решить максимальное число задач с помощью минимально возможного числа типов технических средств, т.е. обеспечивает минимизацию избыточности технических средств. Это существенно упрощает и облегчает эксплуатацию и метрологическое обслуживание технических средств, их ремонт и наладку, обучение технического персонала, что имеет большое значение в реальных условиях хлопководства, заготовительной системы и хлопкоперерабатывающих предприятий. Своевременное получение и использование достаточно точной и полной информации о влажности, полученной с помощью унифицированной системы, дает также значительный экономический эффект.

Важнейшим вопросом реализации унифицированной системы является выбор единого метода измерения влажности для сырья и продуктов его переработки. Согласно анализу, выполненному в

предыдущих главах, оптимальным оказался метод СВЧ по универсальности, возможности бесконтактных и автоматизированных измерений, по быстрдействию, метрологическим характеристикам (диапазон, чувствительность и точность измерений, возможность оценки интегральной влажности больших объемов материала), эксплуатационным и экономическим характеристикам (надежность, срок службы, безопасность - отсутствие вредных воздействий на человека - оператора).

Техническая структура рекомендуемой нами унифицированной системы средств измерения влажности состоит из трех частей: комплекса первичных измерительных преобразователей, базового измерительного устройства и вычислительно-управляющего устройства.

Комплекс датчиков должен обеспечивать возможность решения максимального числа задач измерений влажности, возникающих в народном хозяйстве и научных исследованиях, и иметь унифицированный выходной сигнал, поступающий на вход базового измерительного устройства. Наиболее простые схемные и конструктивные решения обеспечиваются при использовании в качестве естественного выходного сигнала первичного преобразователя ослабления (затухания) энергии СВЧ в исследуемом влагосодержащем объекте измерения.

С помощью различных модификаций метода СВЧ (методы свободного пространства, волноводные, резонаторные, зондовые, поверхностной волны и др.) можно реализовать многочисленные датчики влажности. Важнейшее преимущество СВЧ-влажметрии - возможность создания первичных преобразователей для всех задач измерения влажности, причем независимо от используемого способа измерения (модификации СВЧ метода) все датчики могут выполнять преобразование влажности в единую величину - ослабление энергии СВЧ.

При выборе способа измерения и типа СВЧ датчика для определенной задачи необходимо в каждом конкретном случае принимать во внимание факторы и величины, относящиеся как к объекту измерения (исследуемый материал или изделие), так и к условиям измерения. Из характеристик первой группы важнейшими являются агрегатное состояние (твердое или жидкое) и внешняя структура

(материалы сыпучие, мягкие, легко деформируемые, гранулированные, твердые сплошные и др.) объекта измерения, диапазон влажности, плотность и температура влагосодержащего материала.

Среди условий измерения основное значение имеют способ перемещения материала (неподвижный или поток на транспортере, в трубопроводе и др.) необходимый характер получения информации (дискретный, периодический, непрерывный) и место установки датчика. Перечисленные факторы обуславливают выбор не только типа первичного измерительного преобразователя и его конструктивное исполнение, но и типа и конструкции "устройства формирования пробы", т.е. дополнительных устройств (пробоотборники, питатели, уплотняющие устройства), для сопряжения датчика с объектом измерения, введения в рабочее пространство первичного преобразователя и вывода из него исследуемого материала, сканирования поверхности объекта и др.

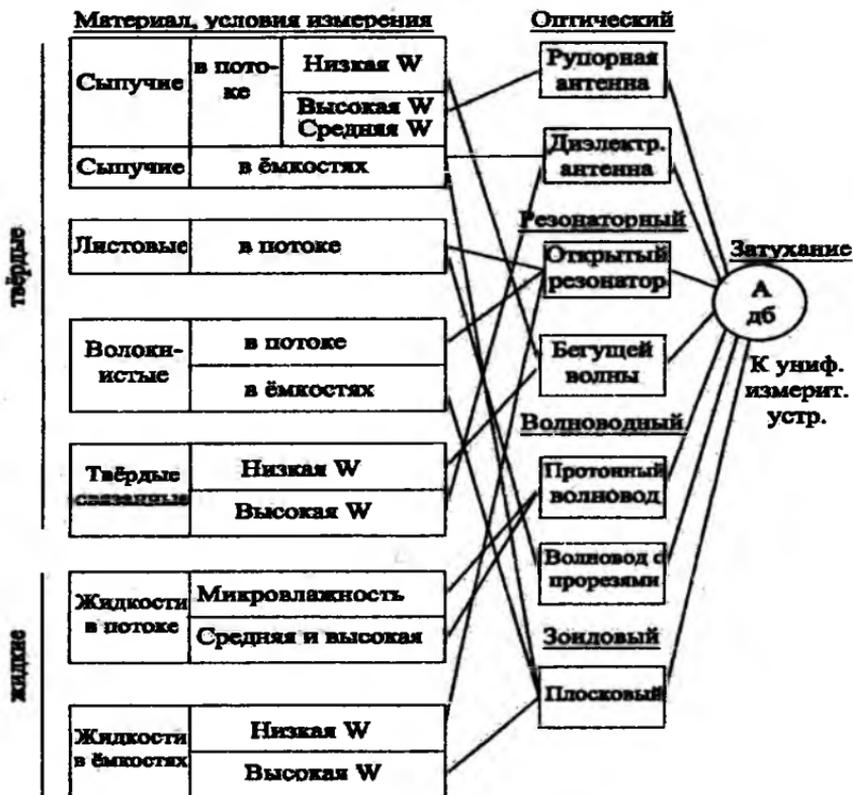
В рассматриваемой системе датчик одного типа может применяться для решения многих задач и, наоборот, для решения одной задачи можно использовать различные датчики.

При решении определенной конкретной задачи для выбора оптимального типа датчика можно использовать методику, рассмотренную выше для выбора оптимального метода измерения.

Структура комплекса первичных измерительных СВЧ преобразователей влажности, основанного на изложенных принципах, показана на рис.8.20. Схема комплекса построена по принципу матрицы "объекты измерения - датчики".

Она охватывает не только хлопковые, но и другие материалы. В качестве примера рассмотрим предложенный нами комплекс датчиков для унифицированной системы контроля влажности в производстве хлопкового масла.

Базовым измерительным устройством служит влагомер СВЧ с унифицированным входным и выходным сигналами. В качестве такого вторичного измерительного преобразователя можно использовать, например, влагомер типа ЭАВ-СВЧ-4, описанный в гл.7. Ранее был обоснован выбор амплитудного метода СВЧ; в связи с этим унифицированным входным сигналом для измерительного устройства будет единый выходной параметр первичных преобразователей - ослабление радиоволн СВЧ.



**Рис.8.20. Структура комплекса первичных измерительных СВЧ преобразователей влажности.**

Унифицированный выходной сигнал ГСП (аналоговый или цифровой) обеспечивает возможность сопряжения прибора со средствами обработки информации агрегатных комплексов ГСП, разработанных в республике для локальных информационно управляющих систем, централизованных систем контроля и регулирования, автоматизированных систем управления технологическими процессами и производством (АСУТП и АСУП).

Базовый влагомер должен быть построен по блочно-модульному принципу. В простейшем случае (лабораторные и цеховые влагомеры дискретного действия) он имеет на выходе показывающий или (и) регистрирующий прибор, градуированный в единицах влаж-

ности одного или нескольких материалов. В этом случае, кроме основных блоков измерительного устройства, базовый вторичный преобразователь может содержать дополнительные блоки для коррекции погрешностей, вызванных наиболее существенными влияющими величинами (температура, плотность, толщина слоя материала), а также блок линеаризации выходного сигнала.

Наиболее современным решением является применение в рассматриваемой унифицированной системе в качестве вычислительно-управляющего устройства микропроцессора (или микро-ЭВМ). Сопряжение СВЧ - влагомера с микропроцессором было рассмотрено в п. 8.3. В этом случае выходной сигнал базового измерительного устройства через аналого-цифровой преобразователь поступает в микропроцессор. Микропроцессор выполняет все вычислительные операции вместо вспомогательных блоков. В постоянную память микропроцессора можно вводить градуировочные характеристики (зависимости ослабления от влажности) для многих материалов.

Средствами индикации и представления выходной информации могут служить (в зависимости от требований конкретной задачи) показывающие и (или) регистрирующие приборы, световое табло, алфавитно-цифropечатающее устройство и т.п. Если необходимы и сигналы управления (при работе влагомера в локальной управляющей системе или АСУТП), микропроцессор через цифро-аналоговый преобразователь и блок управления реализует нужный закон автоматического управления или регулирования технологическим процессом. При необходимости использования информации о влажности в АСУТП или АСУП микропроцессор передает эту информацию в вышестоящую иерархическую ступень.

Блок-схема унифицированной системы средств измерения влажности, построенная на базе СВЧ датчиков и влагомеров и сопряженной с микропроцессором, приведена на рис.8.21. Выходную информацию унифицированной системы контроля влажности можно использовать для производственного, лабораторного и цехового контроля, в информационно-измерительных и управляющих системах.

В каждом из указанных применений система контроля влажности решает разные по значению задачи. Для лабораторного и цехового контроля важен переход от длительных и трудоемких определений влажности к экспрессным и автоматизированным измерениям, а также возможность фиксации и хранения информации о

влажности сырья, промежуточных и готовых продуктах. С помощью локальных информационно-измерительных и управляющих систем можно оптимизировать технологические процессы, в которых влажность обрабатываемого материала или выходного продукта - главный или один из важнейших параметров процесса.

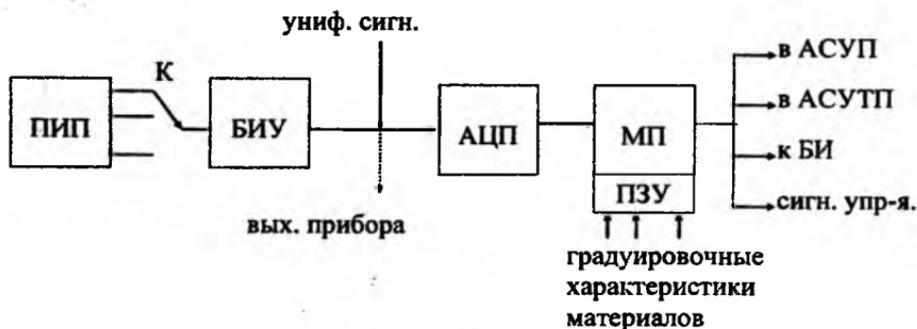


Рис.8.21. Блок-схема унифицированной системы средств измерения влажности, содержащий микропроцессор.

Передача информации о влажности в АСУП, кроме того, дает возможность вычислить некоторые технико-экономические показатели, повысить эффективность деятельности предприятий в целом, так как информация о влажности - одна из важных разновидностей сведений о его работе.

В конечном счете, технико-экономическая эффективность предлагаемой унифицированной системы зависит от масштабов ее внедрения в народном хозяйстве и здесь необходимо коснуться вопроса о перспективах такого внедрения в различных отраслях.

Уже в ближайшем будущем предлагаемую систему можно широко применить в отраслях народного хозяйства, связанных с выращиванием хлопка (сельское хозяйство), операциями сдачи-приемки (заготовительная система) и первичной обработкой (хлопкоочистительная промышленность).

Необходимость получения и использования информации о влажности хлопка-сырца, его компонентов и продуктов переработки возникает на всех стадиях производства и переработки хлопка (см. схему рис.3.1).

Рассмотренную выше комплексную систему контроля влажности в хозяйствах масложировой промышленности можно использовать во всех перечисленных отраслях народного хозяйства. Для этого не требуются никаких изменений в ее структуре и достаточно выбрать оптимальные первичные преобразователи из числа входящих в состав комплекса датчиков. Предложенная нами структура системы технических средств позволяет например, за счет сокращения числа блоков измерительного устройства, реализовать простые, переносные полевые влагомеры для хлопководства.

В последние годы были проведены испытания основных элементов унифицированной системы - датчиков и влагомеров СВЧ на некоторых не хлопковых материалах, с целью решения вопроса о возможности и целесообразности применения этих средств измерения в различных отраслях народного хозяйства.

В первую очередь, это относится к масложировой промышленности. В лаборатории НПО "Масложирпром" проводились испытания влагомеров ЭАВ-СВЧ-4 на семенах подсолнечника и рапса, а также подсолнечного шрота. Один из датчиков был снабжен вибрационным устройством для уплотнения исследуемой пробы материала.

Результаты испытаний показали, что продолжительность одного измерения без учета загрузки образца не превышает 30с, а с операциями загрузки и выгрузки - 40-60с. При градуировке влагомеров была установлена высокая степень корреляции (0,99) между выходным сигналом влагомера и влажностью, определенной стандартным термогравиметрическим методом. В диапазоне влажности 5-25% основная абсолютная погрешность измерения составляла (для семян подсолнечника без уплотнения образца)  $\pm 0,6\%$ , с уплотнением  $\pm 0,3\%$ ; для подсолнечного шрота -  $\pm 0,25\%$ ; для семян рапса  $\pm 0,2\%$ . Дополнительная абсолютная погрешность, вызванная изменением засоренности на 10%, не превышала 0,3%, а влияния изменения маслячности на 25% и содержания олеиновой кислоты на 9% оказались незначительными.

По результатам испытаний влагомер ЭАВ-СВЧ-4 рекомендован к применению в масложировой промышленности. Особо следует подчеркнуть: в процессе испытаний было установлено, что место произрастания не оказывает заметного влияния на показания влагомера.

Указанное свойство является важным практическим преимуществом СВЧ-влагомеров, так как, например, высокочастотные диэлькометрические влагомеры, требуют при градуировке учета района произрастания различных культур. Нечувствительность к указанному фактору - еще один довод в пользу СВЧ-влагомеров в унифицированной системе средств измерения.

Из других материалов отметим успешные испытания СВЧ-влагомера на таком сложном продукте, как белковые кормовые дрожжи.

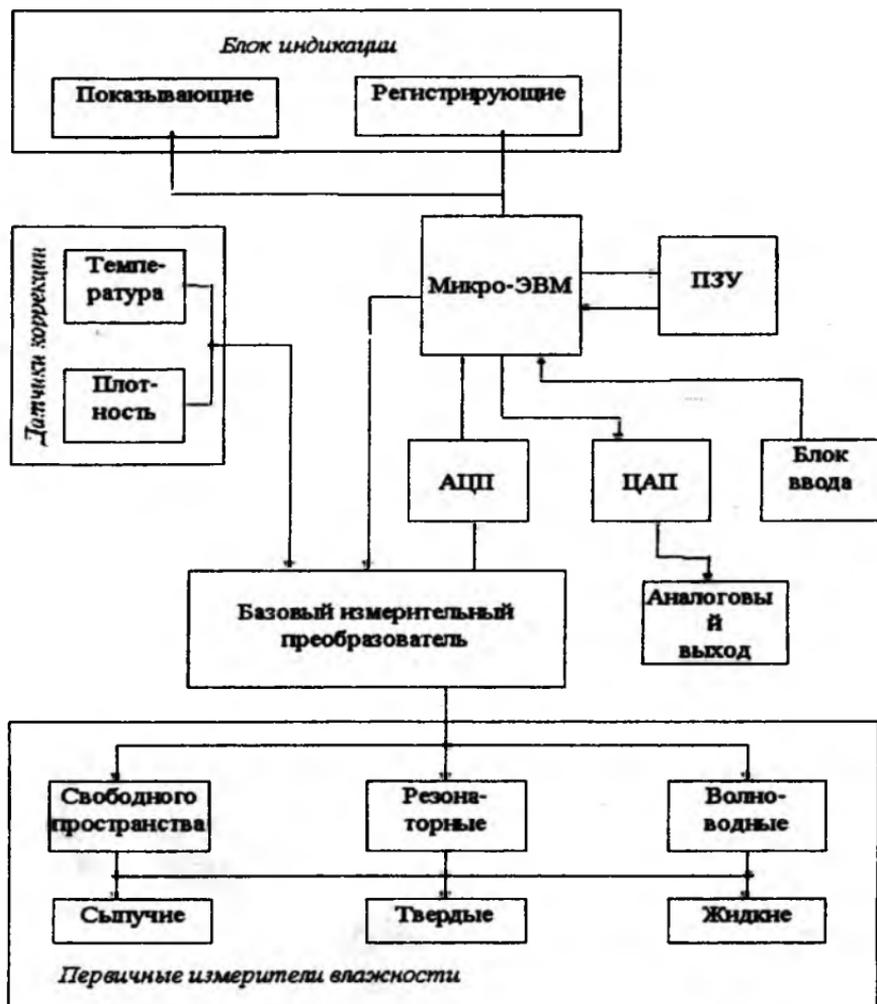
Проведенные нами теоретические и экспериментальные исследования привели к необходимости создания микропроцессорного универсального СВЧ прибора для измерения влажности материалов [8.15-8.17]. Оптимальным методом создания универсальной системы для большинства материалов является СВЧ метод измерения влажности. Структура предлагаемой обобщенной системы показана на рис.8.22.

Система призвана решать все задачи, связанные с получением измерительной информации о влажности хлопка-сырца и продуктов его переработки.

Основными частями системы являются:

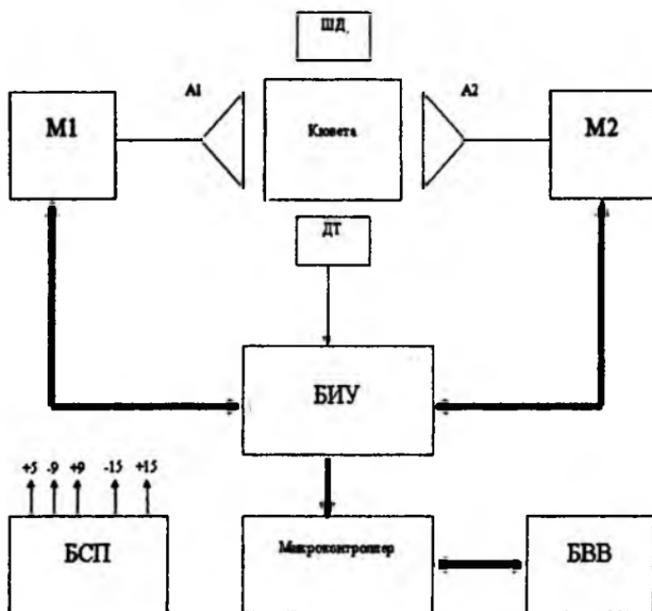
- комплекс первичных измерительных преобразователей влажности;
- базовое измерительное устройство с дополнительными блоками и встроенным микропроцессором;
- комплекс выходных средств отображения регистрации и накопления измерительной информации.

В комплекс первичных измерительных преобразователей входят датчики, основанные на модификациях СВЧ метода: квазиоптические (свободного пространства), резонаторные, волноводные. Выбор датчика для различных материалов с учетом конкретных свойств объекта и условий измерения показан на примере сыпучих и волокнистых материалов при приемке и первичной переработке. Датчики всех типов имеют унифицированный естественный выходной сигнал.



**Рис. 8.22.** Структурная схема универсальной системы измерения влажности сыпучих и волокнистых материалов.

Базовым измерительным устройством (БИУ) служит СВЧ-влажномер с вращающейся кюветой. Структурная схема влагомера приведена на рис.8.23.



**Рис.8.23. Структурная схема СВЧ-влажгомера с встроенным микропроцессорным устройством**

Кювету вращает вокруг вертикальной оси шаговый двигатель (ШД), который управляется включателем, расположенным на крышке влагомера. Базовый влагомер построен по блочно-модульному принципу. СВЧ тракт влагомера состоит из следующих частей: А1, А2 - передающая и приемная антенна, М1, М2 - СВЧ модули (соответственно СВЧ генератор и детектор).

Сигналы с М1, М2 и датчика температуры (ДТ) поступают на БИУ, здесь сигналы ослабления -  $N_L$ , фазового сдвига -  $\varphi$  СВЧ волны и температура образца -  $t$  формируются на стандартные сигналы для сопряжения с микроконтроллером. Во влагомере предусмотрены коррекции погрешностей вызванные основными влияющими величинами (температура, плотность). Как мы уже отмечали, одним из основных достоинств амплитудно-фазового метода считается, что влияния плотности материала на результат измерения незначительно.

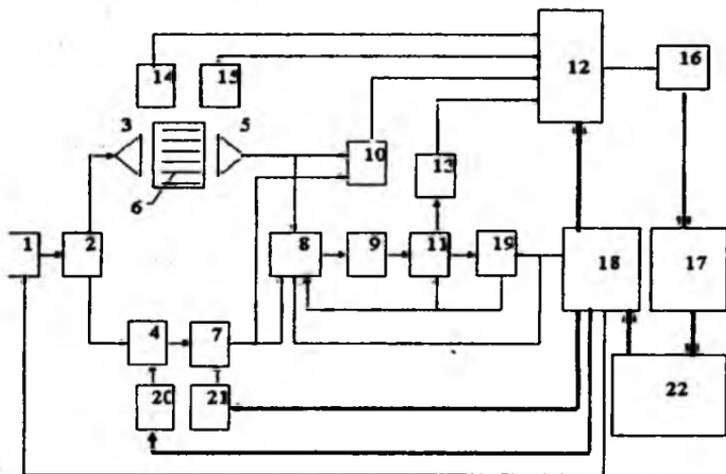
Поэтому плотность измеряемого материала можно не контролировать. В постоянную память микропроцессора вводятся градуировочные характеристики (зависимости выходного сигнала от влажности) измеряемого параметра с помощью клавиатуры (блока ввода и вывода - БВВ), а также градуировочные характеристики влияющих факторов математически связанных с влажностью материала. В этом случае выходные сигналы измерительного устройства ( $N_L, \varphi, t$ ) поступают на микроконтроллер. Через аналоговый интерфейс сигналы  $N_L, \varphi$  и  $t$  преобразуются на цифровые сигналы с помощью аналого-цифрового преобразователя и поступают на интерфейс внешних устройств микропроцессора. Микропроцессор выполняет все вычислительные операции. После вычисления полинома выводится влажность материала в цифровом виде через индикатор (БВВ).

Средствами индикации (БВВ) в данной системе могут служить (в зависимости от требований приборы, световое табло, цифropечатающие устройства и т.п., и сигналы управления (при работе влагомера) непосредственно в технологическом процессе или в АСУТП), микропроцессор через цифроаналоговый преобразователь и блок управления технологическим процессом, реализующий требуемый закон автоматического управления или регулирования технологическим процессом. При необходимости использования или при запросе информации о влажности в АСУТП сообщение поступает в бухгалтерский учет. В случаях составления баланса сырья и готовой продукции микропроцессорный блок передает эти данные на вышестоящую иерархическую ступень.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований [8.18, 8.19] нами разработан универсальный автоматический измеритель влажности сыпучих материалов на СВЧ [8.20-8.23], учитывающий все недостатки, которые были выявлены в предыдущих главах.

Основным различием разработанного прибора является введение блока - управляемого фазовращателя, что позволяет определить разность не только амплитуд, но и фаз между сигналами СВЧ излучения, прошедшего через опорный и измерительный каналы, а значит уменьшить погрешности определения влажности исследуемых объектов. Также в данный прибор введены датчики температуры и давления, учитывающие погрешности вводимые изменением температуры и плотностью образца.

На рис. 8.24 приведена функциональная схема разработанного автоматического измерителя влажности на СВЧ:



**Рис. 8.24. Функциональная схема разработанного автоматического измерителя влажности на СВЧ**

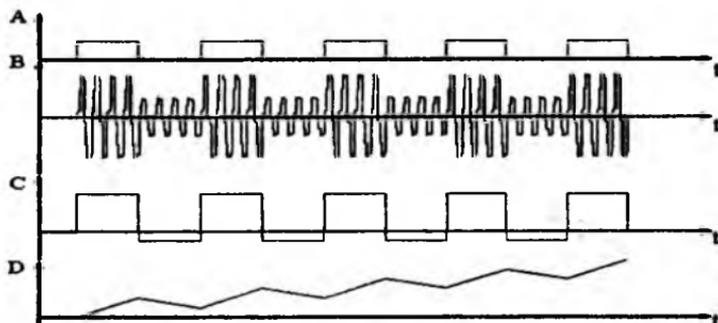
Автоматический СВЧ-влажномер содержит: управляемый СВЧ генератор 1, выход которого подключен к входу делителя мощности 2. Первый вход делителя мощности 2 подключен к передающей 3 антенне, а второй - к входу управляемого аттенюатора 4. Между передающей 3 и приемной 5 антеннами.

Выход управляемого фазовращателя подключен также к первому входу фазового детектора 10, ко второму входу которого подключен выход приемной антенны 5. Выход детектора 9 подключен к входу демодулятора 11, а выход детектора - к первому мультиплексу 12. Выход демодулятора 11 подключен к входу интегратора 13, выход которого подключен ко второму входу аналогового мультиплексора 12. К третьему и четвертому входам аналогового мультиплексора 12 подключены, соответственно, выходы датчика давления 14 и датчика температуры 15, а к выходу - вход аналого-цифрового преобразователя 16. Группа выходов данных аналого-цифрового преобразователя 16 подключена к группе входов блока 17 вывода данных.

На рис. 8.25. показаны - временные диаграммы напряжений: А - на выходе управляемого низкочастотного генератора, В - на выходе

коммутатора, С - на выходе демодулятора, D - на выходе интегратора.

Группа адресных входов аналогового мультиплексора 12 подключена к первой группе выходов блока 18 ввода управляющей информации. К входу синхронизации демодулятора 11 подключен выход управляемого низкочастотного генератора 19, к которому подключен также третий вход коммутатора 8.



**Рис. 8.25. Временные диаграммы напряжений: А - на выходе управляемого низкочастотного генератора, В - на выходе коммутатора, С - на выходе демодулятора, D - на выходе интегратора.**

К входам управления управляемого аттенюатора 4 и управляемого фазовращателя 7 подключены выходы первого 20 и второго 21 цифро-аналоговых преобразователей, соответственно.

Группа входов данных первого 20 цифро-аналогового преобразователя подключена ко второй группе выходов, а группа входов данных второго 21 цифро-аналогового преобразователя - к третьей группе выходов блока 18 ввода управляющей информации. К первому выходу сигнала активизации блока 18 ввода управляющей информации подключены входы управления коммутатора 8 и управляемого низкочастотного генератора 19, а ко второму выходу сигнала активизации подключен вход управления управляемого СВЧ генератора 1. Группа входов блока 18 ввода управляющей информации и группа выходов блока 17 вывода данных подключены к портам ввода-вывода данных управляющей электронно-вычислительной машины (ЭВМ) 22.

Автоматический СВЧ-влажномер работает следующим образом: поступающее с управляемого СВЧ генератора 1, СВЧ излучение делится в делителе мощности 2, между содержащим управляемый аттенюатор 4 и управляемый фазовращатель 7 опорным каналом и содержащим передающую 3 и приемную 5 антенны с размещенной между ними кюветой 6 измерительным каналами. В измерительном канале интенсивность СВЧ излучения понижается в результате его поглощения материалом исследуемого объекта, а в опорном канале - в результате поглощения СВЧ излучения в управляемом аттенюаторе 4. Коммутатор 8 подключает к входу детектора 9 поочередно выходы опорного и измерительного каналов.

Коммутатор 8 включается в работу при поступлении на его вход управления из блока 18 ввода управляющей информации сигнала активизации и управляется управляемым низкочастотным генератором 19. Данный сигнал активизации используется также и для включения управляемого низкочастотного генератора 19. Сигнал с выхода детектора 9 поступает на вход демодулятора 11, на вход синхронизации которого поступает напряжение с выхода управляемого низкочастотного генератора 19. В результате чего сигнал на выходе демодулятора 11 представляет собой прямоугольные колебания, для которых разность между амплитудами напряжений положительной и отрицательной полуволнами соответствует величине рассогласования по ослаблению в измерительном и опорном каналах.

Таким образом, величина напряжения на выходе интегратора 13 соответствует величине, а полярность - знаку указанного рассогласования. Фазовая задержка СВЧ излучения проходящего через опорный канал автоматического СВЧ- влагомера устанавливается с помощью управляемого фазовращателя 7, а СВЧ излучения, проходящего через измерительный канал, определяется влажностью материала исследуемого объекта, помещенного в кювету 6. Определение фаз между СВЧ излучением, прошедшим через опорный и измерительный каналы, осуществляется фазовым детектором 10, величина напряжения на выходе которого соответствует величине, а полярность - знаку указанной разности фаз.

Напряжение на выходе датчика температуры 15 пропорционально температуре помещенного в кювету 6 исследуемого объекта, а напряжение на выходе датчика давления 14 - весу указанного объекта. Сигналы с выходов фазового детектора 10, интегратора 13,

датчика давления 14 и датчика температуры 15 подаются, соответственно, на первый, второй, третий и четвертый входы аналогового мультиплексора 12. Поступающие в его группу адресных входов из блока 18 ввода управляющей информации двоичные многоразрядные слова определяют порядок подачи входных сигналов аналогового мультиплексора 12 на его выход. Данный порядок устанавливается оператором, осуществляющим измерение влажности с помощью автоматического СВЧ-влажномера.

Сигнал с выхода аналогового мультиплексора 12 преобразуется в цифровую форму аналого-цифровым преобразователем 16 и подается в блок 17 вывода данных, обеспечивающий связь автоматического СВЧ-влажномера с портами ввода-вывода данных управляющей электронно-вычислительной машины (ЭВМ) 22. Управляющая ЭВМ 22 производит расчет величин и полярностей напряжений, подаваемых на входы управления управляемого аттенюатора 4 и управляемого фазовращателя 7 и необходимых, соответственно, для устранения рассогласования по ослаблению и разности фаз в измерительном и опорном каналах автоматического СВЧ-влажномера. Двоичные многоразрядные числа, соответствующие данным напряжениям записываются последовательно в блоке 18 ввода управляющей информации и затем подаются из него на группу входов данных первого 20 и второго 21 цифро-аналоговых преобразователей.

В результате чего, в опорном и измерительном каналах для проходящего в них СВЧ излучения устанавливаются одинаковые ослабление и фазовая задержка, то есть автоматический СВЧ-влажномер переходит в установившийся режим. При этом величине сигнала управления на входе управления управляемого аттенюатора 4 соответствует коэффициент поглощения, а величине сигнала управления на входе управления управляемого фазовращателя 7 соответствует величина фазовой задержки СВЧ излучения в исследуемом объекте.

После перехода автоматического СВЧ-влажномера в установившийся режим управляющая ЭВМ 22 по показаниям датчика давления 14 и известного объема кюветы 6 определяет плотность исследуемого материала, затем по эмпирическим таблицам, описывающим функциональную зависимость между плотностью, температурой материала исследуемого объекта и коэффициентом поглощения указанным материалом и фазовой задержкой СВЧ излучения в исследуемом объекте определяет влажность материала исследуемого объекта, а затем если надо осуществляет расчет общего количества

воды, содержащейся в данном материале и относительное весовое содержание влаги в нем.

Микропроцессоры в приборах контроля влажности в настоящее время находят широкое распространение. Как показал анализ литературы, в данное время большое количество разнообразных моделей влагомеров, предназначенных для измерения влажности отдельных материалов, носят узкоспециализированный характер применения, что ограничивает возможность организации серийного производства влагомеров, а также приводит к необходимости создания многочисленных систем обеспечения единства измерений.

Необходимость использования микропроцессоров в разрабатываемых влагомерах определена нами, исходя из следующих к ним требований:

- возможность расширения области применения;
- использование прибора с учетом градуировочных характеристик для различных сортов хлопка и зерновых продуктов;
- возможность коррекции результатов измерения влажности с учетом влияния неинформативных параметров материала;
- автоматизация процесса измерений и обработка результатов;
- возможность получения выходной информации в различных формах;
- возможность автоматической подстройки и периодической поверки измерительного устройства влагомера.

Требования к параметрам микропроцессоров определены нами исходя из объема задач и от технического уровня и современного состояния элементной базы измерительных и микропроцессорных схем.

Основные из этих требований следующие:

- разрядность двоичных разрядов, не менее - 8;
- объем памяти, не менее - 3 Кбайт;
- возможность перепрограммирования;
- низкая стоимость.

Характерной особенностью микропроцессорных влагомеров являются невысокие требования к быстродействию микропроцессора, так как физические процессы изменения влагосодержания материалов весьма медленны, а динамическими погрешностями микропроцессоров всех типов можно пренебречь.

Исходя из этих требований, мы выбрали МП (микропроцессор) с расширенной внешней памятью КР 1816 ВЕ 35. МП КР 1816 ВЕ 35 выполнен по *n*-МДП технологии и представляет собой однокристалльную 8-разрядную микро ЭВМ, содержащую функциональные узлы (центральный процессор, ОЗУ данных, многоканальный интерфейс ввода/вывода, 8-разрядный таймер/счетчик, векторную систему прерываний с приоритетом, тактовый генератор, устройство синхронизации, программную память), обеспечивающие универсальность, автономность и гибкость применений в устройствах самого различного назначения.

Следует отметить, что архитектура микро ЭВМ серии 1816 не может обеспечить разработку собственных программ и построенных на них систем общего назначения. Это обусловлено тем, что микро ЭВМ является, по существу, микроконтроллером, а построение таких систем сильно затруднено.

На основе МП КР 1816 ВЕ 35 мы разработали микроконтроллер (МК), структурная схема которого приведена на рис.8.26. Он состоит из следующих частей:

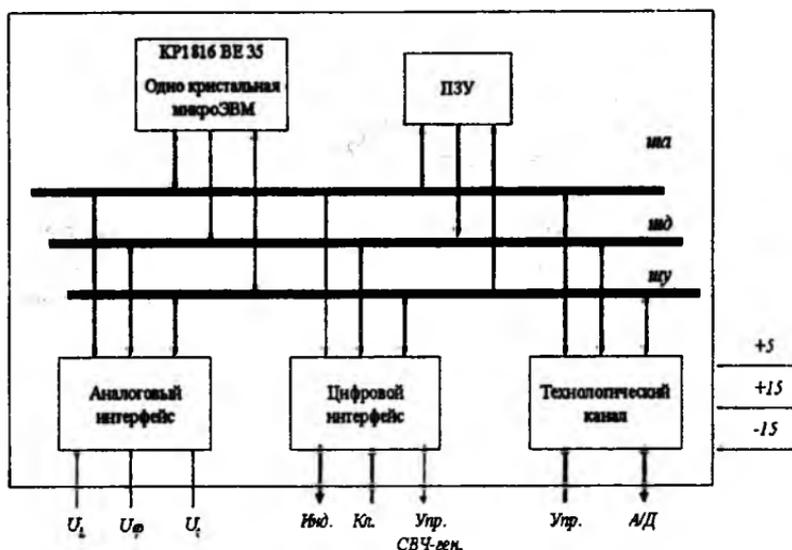
- ПЗУ (постоянное запоминающее устройство) выполненное из 3-х ИС серии 580. В ПЗУ хранятся программы для обеспечения работы МП, коэффициенты градуировочных характеристик некоторых зерновых культур и некоторые константы.

- Аналоговый интерфейс используется для сопряжения аналогового модуля с микропроцессором. Сигналы ослабления  $U_L$ , фазы  $U_\phi$  СВЧ энергии, и температура исследуемого образца -  $U_t$  с аналогового модуля поступают в аналоговый интерфейс, который преобразует эти сигналы в цифровые.

- Цифровой интерфейс используется для сопряжения цифровых устройств с МП и создания управляющего сигнала для управления (вкл./выкл.) СВЧ генератора.

- Технологический канал создает сигналы с нужными законами управления для АСУТП, а также используется для сопряжения с ЭВМ для обмена данными.

- Микропроцессор КР 1816 ВЕ 35 создает и формирует сигналы для управления прибором, на основе программы, хранившейся в ПЗУ и на данных поступивших с интерфейсов.



**Рис. 8.26. Структурная схема микроконтроллера для СВЧ - влагомера**

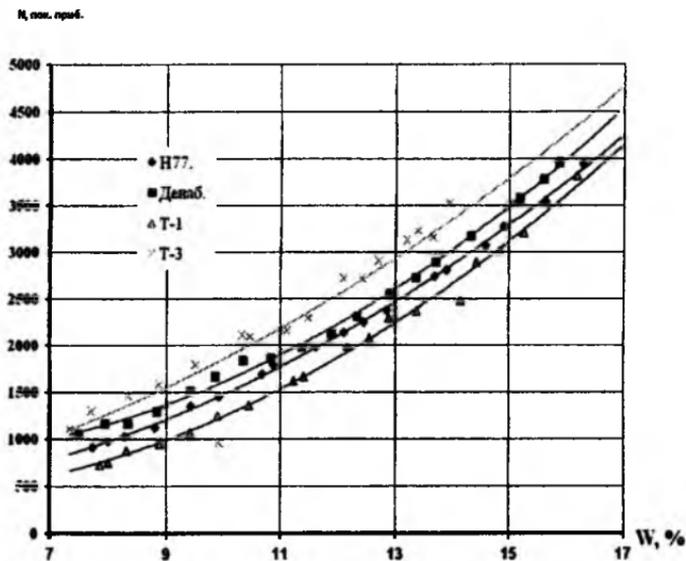
Метрологических характеристик разработанного универсального СВЧ-влагомера были проверены в производственных условиях для измерения влажности хлопка-сырца, зерна и продуктов их переработки. Градуировку влагомера выполняли методом регрессионного анализа. Эти характеристики строились для различных объектов измерения: хлопок-сырец, волокно, хлопковые семена, зерно-пшеница, рис-зерно, кукуруза и ячмень.

Для градуировки готовили несколько образцов материала различной влажности, в совокупности охватывающего весь диапазон влажности контролируемых образцов от 5 до 20%. Влажность каждого образца измеряли аттестуемым прибором и термогравиметрическим методом.

На рис.8.27 приведены графические зависимости результатов измерения влажности различных разновидностей хлопковых семян. Они аппроксимируются регрессионным уравнением второго порядка

$$W = AN^2 + BN + C$$

Значение последнего свидетельствует о высокой степени соответствия аппроксимирующей зависимости и экспериментальных данных во всех случаях. Из графической зависимости этих данных видно, что градуировочные характеристики имеют приблизительно одинаковый вид. Степень расхождения регрессионной зависимости между различными разновидностями материалов имеет 0,25 % (абс.). С этой точки зрения, нами выдвинуто предложение о создании на базе СВЧ метода многоцелевого прибора для большинства хлопковых и зерновых продуктов.



**Рис.8.27. Зависимость показания прибора от влажности для различных разновидностей хлопковых семян**

*Технические параметры разработанного СВЧ-влажмера.*  
 Применение микропроцессорных устройств позволяет не только наиболее эффективно решить задачи оптимизации влагомеров СВЧ, но и улучшить их эксплуатационные и экономические характеристики и значительно расширить функциональные возможности. Это достигается переходом от традиционных измерений с жесткой логикой к выполнению под управлением программы всех арифметических и логических действий, необходимых для обработки данных,

преобразования и вывода измерительной информации, причем возможность замены программы другой программой, хранимой в памяти, обеспечивает большую гибкость и многофункциональность средства измерения.

Условия эксплуатации влагомера в закрытых помещениях: температурой от 10 до 50°C, относительная влажность воздуха (60±20)%, корпус влагомера должен быть заземлен и выполнен искре защищенном исполнении.

Сравнительные технические характеристики базового и разработанного СВЧ - влагомера приведена на табл.8.1. Из этой таблицы видно, что разработанный прибор имеет очевидное преимущество перед базовым, т.е. термогравиметрическим прибором.

*Таблица 8.1.*

**Сравнительные технические характеристики базового и разработанного СВЧ-влагомера**

<b>Технические характеристики</b>	<b>Базовый влагомер</b>	<b>Разработанный СВЧ-влагомер</b>
Диапазон измерения, %	7÷45	7÷22
Погрешность измерения, %	0,5	0,5
Время измерения, мин	90÷120	1
Температура образца, °С		10÷40
Масса образца, грамм	10	400±50
Доп. погр. св-я с выборкой образца, %	0,12	0,02
Возможность измерения в потоке	нет	да
Питание	220 В, 50 Гц	220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт	1200	40
Габаритные размеры, (ШхДхГ), мм	400х450х400 - СЭШ-3М; 500х420х300 - анал. весы	300х250х200
Масса прибора, кг	36	8

*Программное обеспечение микропроцессорного СВЧ-влажмера.* Процесс разработки программного обеспечения (ПО) для МП включает в себя несколько этапов:

I. На первом этапе сформулировали информационную задачу. Вся последовательность действий составных частей измерительного прибора должна быть переведена на математический язык. Определяется состав входных сигналов и стимулирующих воздействий, и форма представления выходных переменных, способы обмена информацией с устройствами ввода-вывода (УВВ). Разрабатываются методы коррекции ошибок в работе системы.

Для повышения достоверности информации о влажности мы использовали следующие способы:

1. Для уменьшения случайной погрешности использовали способ, основанный на вращении анализируемого образца вокруг вертикально расположенной оси цилиндрической кюветы и усреднении результатов многократных наблюдений за один оборот. Этот способ измерения имеет следующие преимущества:

а) измерение во вращающемся анализируемом образце за один полный оборот вокруг вертикальной оси уменьшает погрешность, возникающую из-за неоднородности исследуемых материалов.

б) известно [8.24], что среднеквадратическое отклонение результатов "n" измерений определяется следующим образом:

$$\sigma(\bar{W}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n-1}},$$

где  $x_i$  - результат единичного измерения,

$x_{cp}$  - среднее значение "n" измерений.

Доверительный интервал на уровне 0,95 определяется из выражения:

$$\Delta_{cl} = t \cdot \sigma(\bar{W}) / \sqrt{n},$$

где t - коэффициент Стьюдента,

$\Delta_{cl}$  - случайная составляющая погрешности.

Следовательно, при количестве наблюдений, равных "n", случайная погрешность измерения снижается на  $\sqrt{n}$  раз. На основе статистических методов обработки результатов измерения и для удобства работы микропроцессора (восьмиразрядность) мы выбрали оптимальное число измерений, которое равно  $n=64$ .

2. Для уменьшения систематической составляющей погрешности учитываем влияющие факторы на результат измерения. Таким

образом, кроме ослабления и фазового сдвига ( $N_L$  и  $N_\varphi$ ) СВЧ волны учитываем температуру  $N_t$  и плотность материала. Плотность материала можно выразить при постоянном объеме  $V = \text{const}$  кюветы с массой материала  $\rho = m/V$ .

Тогда, с использованием теории многофакторного анализа [8.23] мы получили следующее обобщенное уравнение регрессии:

$$W = a_0 + a_1 N_L^2 + a_2 N_L + a_3 \varphi + a_4 N_t + a_5 m + a_6 N_L N_t + a_7 N_L N_\varphi N_t m$$

где  $m$  - масса исследуемого образца,

$a_0, \dots, a_7$  - коэффициенты регрессии.

II. Во втором этапе необходимо разработать программу реализующую алгоритм измерения [8.25, 8.26]. Обычно на этом этапе разрабатывается блок-схема алгоритма прибора. Блок-схема алгоритма прибора приведена на рис.8.28. (а,б).

Краткое словесное описание алгоритма следующее:

1. Начало;

2. Присвоить  $N$  значение 0,  $\varphi$  значение 0,  $I$  значение 1;

Если  $I > 64$ , то перейти к шагу 4 алгоритма;

иначе:

начало;

вести значение  $N_L$  и  $\varphi$ ;

присвоить  $N$  значение  $N + N_L$ ;

присвоить  $\varphi$  значение  $\varphi + \varphi_L$

увеличить  $I$  на 1;

перейти к шагу 3 алгоритма;

конец;

4. Присвоить  $N_L$  значение (затухание)  $N/64$ ;

5. Присвоить  $N_\varphi$  значение (фазовый сдвиг)  $\varphi/64$ ;

6. Ввести значение (температура образца)  $N_t$ ;

7. Ввести значение (масса образца)  $m$ ;

8. Присвоить  $I$  значение 0;

9. Если  $I > 7$ , то перейти к шагу 10 алгоритма;

иначе:

начало;

вести значение (коэффициенты полинома)  $a_i$ ;

увеличить  $I$  на 1;

перейти к шагу 9 алгоритма;

конец;

10. Вычислить значение (полинома) по формуле:

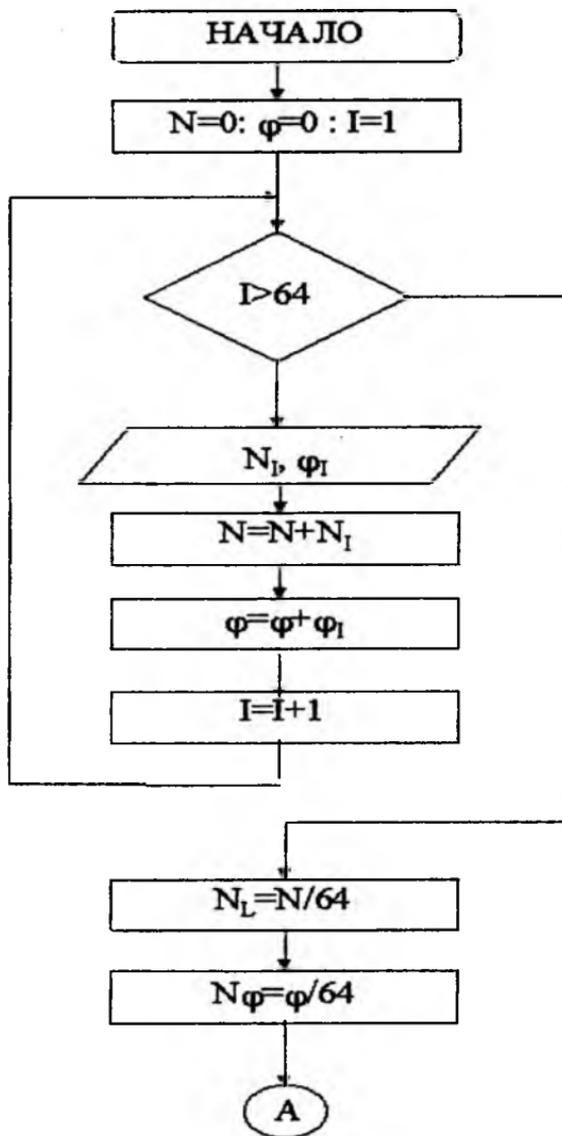


Рис. 8.28. (а). Блок схема алгоритма работы прибора.

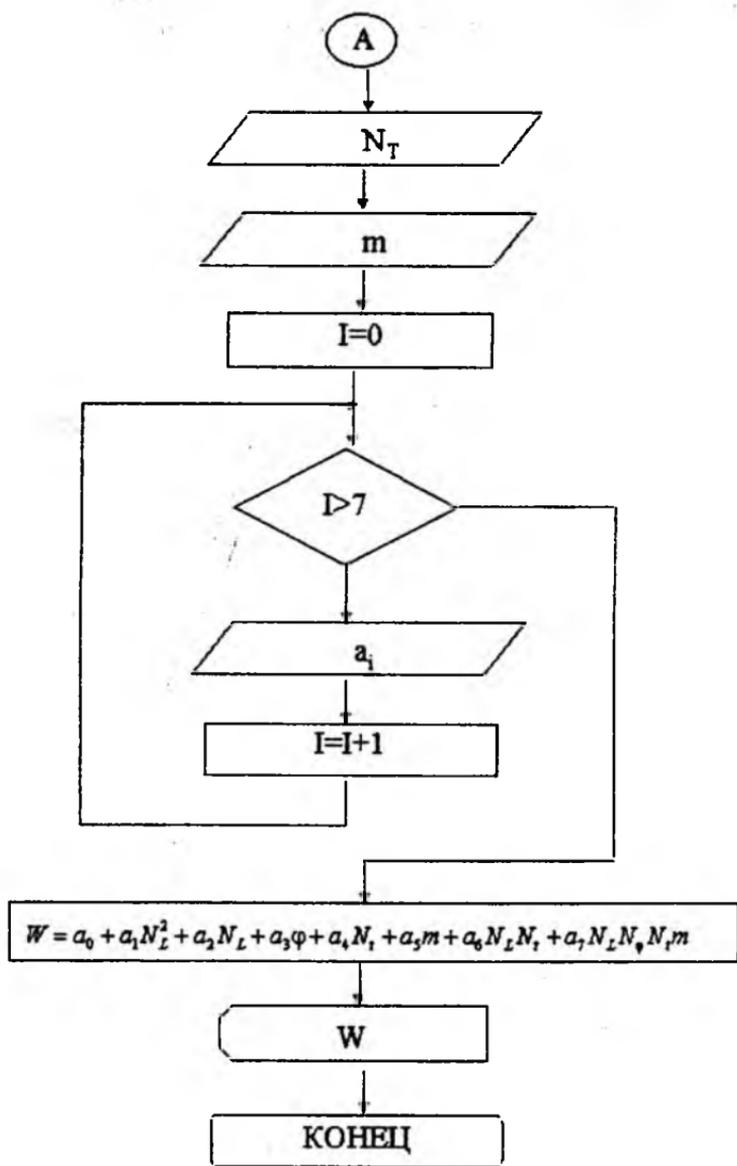


Рис.8.28. (б). Блок схема алгоритма работы прибора (продолжение).

$$W = a_1 N_L^2 + a_2 N_L + a_3 N_L N_t + a_4 N_t + a_5 M_B + a_6 N_L M_B + a_7 N_L N_t M_B + a_8$$

1. Вывести значение (полинома)  $W$ ;
2. Конец.

III. На третьем этапе необходимо кодирование и проведение отладки программы. Алгоритм работы прибора переводится на язык машинных команд соответствующего МП.

Ниже приводим инструкцию программисту.

1. Инструкция программисту:

2.  $N$  и  $\varphi$  - информации (ослабление и фазовый сдвиг СВЧ энергии), снимаемые с датчика (СВЧ модуля);

3.  $I$  - количество обращений к датчику (счетчик);

4.  $N_I$  - значение, снятое за  $I$ -ое обращение к датчику;

5.  $\varphi_I$  - значение, снятое за  $I$ -ое обращение к датчику;

6.  $N_L$  - среднее значение (ослабления) за 64 обращения;

7.  $N_\varphi$  - среднее значение (фазовый сдвиг) за 64 обращения;

8.  $N_t$  - коэффициент температуры, снимается с датчика температуры;

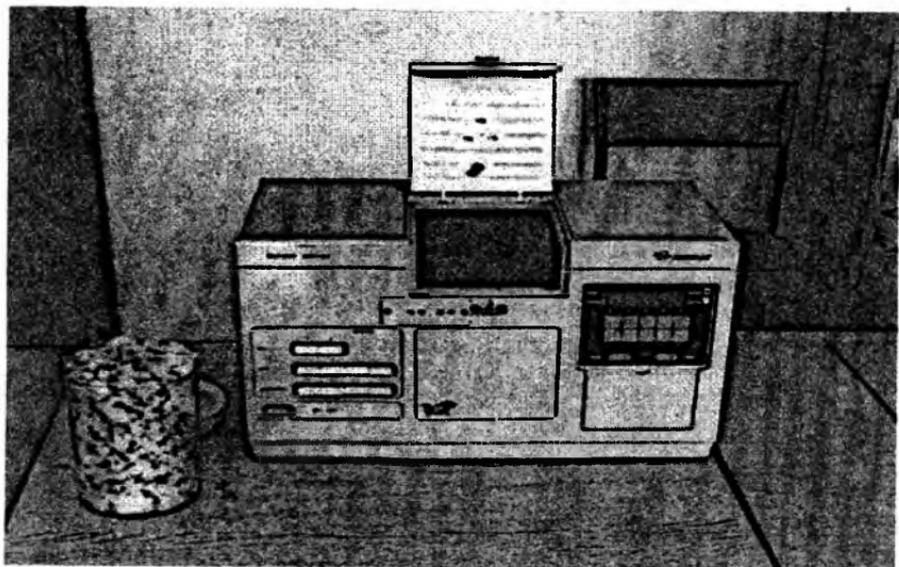
9.  $m$  - масса исследуемого образца;

10.  $a_1$  -  $I$ -ый коэффициент полинома.

Внешний вид многофункционального микропроцессорного СВЧ-влажмера приведена на рис.8.29.

Применение многофункционального влагомера позволяет получить надежную информацию о влажностных характеристиках веществ, контролировать и регулировать процессы влаготепловой обработки материалов в соответствии с этим решать задачи экономии топливно-энергетических ресурсов, получения материалов с заданными характеристиками.

Многофункциональный влагомер может работать как в автономном режиме, так и в системах управления технологическими процессами. Расширение сферы применения предложенной многофункциональной измерительной системы представляет собой перспективу ее дальнейшего развития и может дать существенный технико-экономический эффект для народного хозяйства.



**Рис. 8.29. Внешний вид многофункционального микропроцессорного СВЧ-влажмера.**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом монография посвящена проблемам измерения влажности хлопка и хлопковых материалов. Приводятся данные, характеризующие технико-экономическое значение контроля влажности хлопка-сырца и хлопковых материалов.

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований можно отметить следующие важные моменты:

Рассмотрены основные (структура, химический состав, физические, механические) свойства хлопка-сырца и продуктов его переработки, как объект измерения влажности. Исследованы механизмы взаимодействия воды с хлопком и хлопковыми материалами. Критически изучены прямые и косвенные методы измерения влажности применительно к хлопку - сырцу и продуктов его переработки. Рассмотрены теоретические основы диэлькометрического метода измерения влажности. Проведены экспериментальные исследования характеристик диэлектрических свойства хлопка и хлопковых материалов.

Разработан и экспериментально апробирован влагомер хлопковых семян, работающий при частоте 6 МГц и автоматической корректировкой результатов измерений по величине диэлектрических потерь. Также разработаны два варианта влагомера: 1) для измерения влажности растительного масла с влагосодержанием 0,03 - 2,0% (измерительное устройство влагомера основано на принципе биений F-метр), 2) для измерения влажности растительного масла с влагосодержанием 0,6 - 10% (работа влагомера основана на измерении комплексного сопротивления датчика на частоте 1МГц). Доказано, что лабораторные влагомеры этого типа могут успешно использоваться для дискретных измерений влажности хлопкового масла, хлопковых семян и продуктов их переработки в промышленных условиях.

Исследованы теоретические основы и разработана классификация СВЧ методов измерения влажности. Теоретические положения дополнены примерами и иллюстративными материалами исследований. Изучены экспериментальные характеристики хлопковых семян и других хлопковых материалов в диапазоне СВЧ. Предложены структурные способы повышения точности, а также пути решения проблем метрологического обеспечения СВЧ-влагомеров для хлопковых материалов.

Разработаны несколько модификаций щнековых стабилизаторов для стабилизации плотности сыпучих хлопковых материалов в потоке. Для семян подсолнечника и сыпучих продуктов переработки разработано устройство формирования пробы с виброуплотнением. Также разработан термогравиметрический СВЧ-влажомер. В нем предусмотрены дополнительные технические средства для получения информации о температуре в нескольких точках объема сушимого образца, и эта информация используется для управления процессом сушки.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработан многофункциональный автоматический измеритель влажности сыпучих и волокнистых материалов на СВЧ. Основным различием разработанного прибора является введение блока управляемого фазовращателя, что позволяет определить разность не только амплитуд, но и фаз между сигналами СВЧ излучения, прошедшего через материал. Также в данный прибор введены датчики температуры и давления, учитывающие погрешности, вводимые изменением температуры и плотностью образца.

Применение многофункционального влагомера позволяет получить надежную информацию о влажностных характеристиках веществ, контролировать и регулировать процессы влаготепловой обработки материалов в соответствии с этим решать задачи экономии топливно-энергетических ресурсов, получения материалов с заданными характеристиками. Многофункциональный влагомер может работать как в автономном режиме, так и в системах управления технологическими процессами.

## ЛИТЕРАТУРА

В.1. Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А. Микропроцессорное сверхвысоко-частотное устройство для измерения влажности волокнистых и сыпучих продуктов. Вестник ТГТУ. Ташкент. № 3-4. 2012. с 17-23

В.2. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. Оптимизация структуры СВЧ влагомеров. Химический журнал. № 1. ГХТИ. Ташкент, 2005. С. 29-32.

В.3. Исматуллаев П.Р. СВЧ влагометрия хлопковых материалов. ТГТУ. Ташкент. 2011. 94с.

В.4. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А., Азимов Р.К. Исследование статических и динамических характеристик первичных преобразователей. Отчет о НИР, Ташкент, ГНТП - П-10.27. 2006. 99 с.

В.5. Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А. Проблемы измерения влажности в хлопкоперерабатывающей промышленности. РНТК. Минсельхоз, "Научные основы развитие стандартизации в агропромышленном комплексе". Сборник научных трудов. Ташкент. 2011. с. 95-99.

В.6. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. Исследование метрологических характеристик многофункционального автоматического СВЧ влагомера для хлопковых семян. Отчет по теме 21-08 (НИИСМС). ТГТУ. Ташкент, 2008, 119 с.

В.7. Ismatullaev P.R., Usmanova H.A. Ultrahigh-frequency transducers moisture with out weighing the sample. World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, B-Quadrat Verlag, WCIS-2012. - PP. 175-178.

В.8. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. Преимущество СВЧ метода измерения влажности хлопка-сырца. Вестник ТГТУ. №1-2. 2011. стр. 47-50.

1.1. Справочник по первичной обработке хлопка. Под ред. Максудова И.Т., Т.: «Мехнат», 1994. 346 с.

1.2. O'zDSt 619,620: 2009. Волокно хлопковое. Методы определения зрелости и линейной плотности.

1.3. Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А. Исследование строения и состава хлопковых материалов, как объект измерения влажности. Вестник ТГТУ. №1. 2014.с. 124-128.

1.4. O'zDSt 618:2009. Волокно хлопковое. Методы определения удельной разрывной нагрузки.

- 1.5. Preston L.M. Fibre sciences, March, 1995.
- 1.6. Fourth Z., Sooché A., Howorth Q.M., Slliott M.G., Rutherbot M.B. Streicher. 1998.
- 1.7. Исмагуллаев П.Р., Матякубов К.Р., Икрамов Г.И. Исследование влияние электромагнитного поля на качественные показатели семян хлопчатника. Сборник научных трудов МНТК «Актуальные проблемы обеспечение интеграции науки, образования и производства». Ташкент, 2008, с. 382 - 387.
- 1.8. Гафаров В. И. Отчет ЦНИИХпрома по теме 5.85.08.01: Создание прибора для экспрессного измерения засоренности хлопка-сырца. Ташкент, 1987.
- 1.9. Архипов М.А. О величине светопропускания бородки из волокон // Технология текстильной промышленности.1994. № 2. с.21-25.
- 1.10. Ульдяков А.И. Сушка хлопка-сырца. М.: Легкая индустрия,1985.
- 2.1. Franks F. (U). Woter, a comprehensive treatise, vol.1,n, j-London, Pleuim Press, 1990, 596с.
- 2.2. Эйзенберг Д. Структура и свойства воды. Л., ГМИ, 1985 , 280 с.
- 2.3. Hasted J.R. Aducous dielectric, London, Chapman and Hall, 1993, 302 p.
- 2.4. Королев В.И. Равновесная влажность хлопка-сырца. Изд. АН 1983, №7.
- 2.5. Казанский В.В. Электрические свойства хлопка. Ташкент: Фан.1989.88 с.
- 2.6. Исмагуллаев П.Р., Тургунбаев А. и др. Разработка опытных образцов измерителей влажности хлопка-сырца и волокна и исследование их метрологических характеристик. Отчет о НИР, ТГТУ, Ташкент, 1999. № гос. рег. 01.97.0006110. 111 с.
- 2.7. Исмагуллаев П.Р., Усманова Х.А. Проблемы и перспективы измерения влажности в хлопкоперерабатывающей промышленности. РНТК. “Научные основы развитие стандартизации в агропромышленном комплексе”. Сб. научных трудов. Минсельхоз. Ташкент. 2011. С. 95-99.
- 2.8. Усманова Х.А.Измерение влажности и их классификация по метода измерений. Научные проблемы энергетического обеспечения в современном производстве. Сборник научных трудов РНТК. Бухара. 2014. том-II.С.86-99.

- 2.9. Митчелл Дж., Смит Д. Акваматрия. М: Химия,1990, 600 с.
- 2.10. Кикоин И.К. (ред.) Таблицы физических величин: Справочник М., Атомиздат, 1991. 345 с.
- 2.11. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. –Л.: Гидрометеиздат, 1989, 348 с.
- 2.12. Дмитриев Д.А., Федюнин П.А., Тетушкин В.А. Основы микроволновой термовлагометрии // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством: Материалы пятой международной теплофизической школы / ТГТУ. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.
- 2.13. Ахмедов Б.М. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Научные основы и методология единства измерений при управления качеством пищевых продуктов.. Ташкент. 2009. 48с.
- 3.1. Ismatullaev P. R., Usmanova H.A. Microwave moisture metering and problems of metrological softwa. Sixrth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, B-Quadrat Verlag, 2010. – PP. 191-195.
- 3.2. Usmanova H.A., Turgunbaev A., Boboev G. Methods of reducing the influence of the forms of communication moisture to error converter. «International Journal of Advanced Research in Science». INDIA. Vol 2. ISSUE 10. 2015. PP. 964-969.
- 3.3. Бабаев Г.Г. Изучение инфракрасного метода сушки зерна и зернистых материалов. Молодой ученый. М.: №14.2016.с-116.
- 3.4. Медведевских С.В. Измерения влажности термогравиметрическим методом и условия минимизации погрешности измерений. Автореферат диссертации к.т.н. Челябинск, 2001. 32с.
- 3.5. Усманкулов А.К. Экспериментальные исследования теплофизических свойств хлопка-сырца и его компонентов. Известия высших учебных заведений. №1(349) Технология текстильной промышленности. 2014. С.33-37.
- 3.6. Loughlin C. Tutorial: Moisture content and humidity // Sensor Rev. 1999.-Vol. 10. - N 3. - PP. 137-140.
- 3.7. Neutron moisture garges. "Techn. Repth. Ser. Into atom Energy agency".Vienka, 1998, № 112.
- Афонин В.С. Разработка прибора контроля влажности зерновой продукции на основе многоэлектродных емкостных преобразователей.

Автореф. диссертации кандидат технических наук. Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул, 2009. 28с.

3.9. Семенко Н.Г., Панева В.И., Лахов В.М. Стандартные образцы в системе обеспечения единства измерений / под ред. Н.Г.Семенко. М.: Изд-во стандартов, 1990. 288 с.

3.10. Берлинер М.А. Измерения влажности. В кн.: Итоги науки и техники // Метрология и измерительная техника. Т.4.М., ВИНТИ, 1995.

4.1. Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. –М.: Наука и Учеба. 2015. 234 с.

4.2. Де Лоор. Диэлектрические свойства гетерогенных вла-госодержащих смесей // Приборы и системы управления, 1984, № 9.

4.3 Бабаев Г.Г. Анализ емкостных преобразователей влажности зерна. Журнал "ПРИБОРЫ" № 5, Россия. 2016.

4.4. Борисова М.Э., Галюков О.В.. Физика диэлектрических материалов. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2004. 320 с.

4.5. Kraszewski A.W. Microwave aquametry needs and perspectives; IEEE Trans. Microw. Theor. Techn. - 1991- V. 39 P.P. 828-835.

4.6. Тургунбаев А. Экспериментальное исследование электрофизических характеристик зерна. МНТ симпозиум «Образование через науку» посвященного 175-летию МГТУ им. Баумана. Калуга, Россия. Секция 3. Методы теплофизического эксперимента. Сб. научных трудов. 2005.

4.7. Исматуллаев П.Р. и др. Высокочастотный метод и устройство для измерения влажности твердых и сыпучих материалов. Химическая технология. Контроль и управления. №1. Ташкент. 2012. 32-35 с.

4.8. Krasrevski A.W. Model of the dielectric properties of wheat at 9.4. GHz i of Microwave Power, 1989, 13, №4, p.293-296

4.9. Берлинер М.А., Лелянов В.Н., Иванов В.Л. Применение диаграммы Коул-Коула во влагометрии СВЧ // Известия вузов. Серия, Приборостроение, 1973 , № 4.

4.10. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. и др. Разработка приборов контроля влажности хлопка-сырца и хлопкового волокна при их сертификации. Отчет о НИР, ТГТУ, Ташкент, 1996. № гос. рег. 01.94.000270.150 с.

4.11. Усманова Х.А., Тургунбаев А. Анализ и классификация материалов, как объектов контроля влажности. Сборник статей 8-й

Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды». Бийск. 2014. С.163-166.

5.1. Исмагуллаев П.Р. и др. Емкостной преобразователь для измерения влажности сыпучих материалов. "Мир измерений". 2013. №1 21-24 с.

5.2. Тургунбаев А., Исмагуллаев П.Р., Зибицкер Г.А. Способ измерения влажности диэлектрических материалов. Патент РУЗ № 4241. Оpubл. РА №1,1997.

5.3. Усманова Х.А., Исмагуллаев П.Р. Разработка первичных преобразователей влажности для сыпучих и хлопковых материалов. Сборник научных трудов РНТК посвященная всемирному дню метрологии. Агентство Узстандарт, 2010. С 84-87.

5.4. Усманова Х.А., Тургунбаев А., Махмудов М.И. Многофункциональный микропроцессорный прибор для измерения влажности сыпучих и волокнистых материалов. Научные проблемы энергетического обеспечения в современном производстве. Сборник научных трудов РНТК. Бухара. 2014. том-II. С.135-140.

5.5. Исмагуллаев П.Р., Тургунбаев А. Измерение влажности шихты автоматическим сверхвысокочастотным методом. С-Пб, Горный журнал, №8 (спец. выпуск), 2009. С. 16-19

5.6. Усманова Х.А., Исмагуллаев П.Р. Разработка универсального датчика влажности для применения в горноперерабатывающей промышленности. Сборник научных трудов МНТК "Проблемы горной металлургии и инновационные пути развития». Ташкент. 2 часть. 2014. С. 125-128.

6.1. Беляков В.Л. Автоматический контроль параметров нефтяных эмульсий. М.: Недра, 1996. 186с.

6.2. Недзвецкий Ю.Э. Электрический способ определения влажности непроводящих материалов и устройство для осуществления этого способа. А. С. № 107977 с приоритетом от 22-04-55.

6.3. Ясукава А. Измерение и автоматическое регулирование влагосодержащей вязкой целлюлозы. "Кэйсоку" (Япон), 1966 , 6, № 86 386-391.

6.4. Исмагуллаев П.Р., Тургунбаев А. Преимущество СВЧ метода измерения влажности хлопка-сырца. \ Вестник ТГТУ. Ташкент.-2011-№1-2. С.47-49.

- 6.5. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. Применение микроволновой техники в сельском хозяйстве. Тр. 8-МНТК «Крымико-98», Крым, Украина, 1998. С. 22-25.
- 6.6. Kraszevski A. Microwave agumetry are vieri microwave. Power. 1988, 15, №4.
- 6.7. Исматуллаев П.Р. и др. Зарубежный опыт в области влагометрии сельскохозяйственных материалов. Standart. № 2. 2013. 30-33 с.
- 6.8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Физматгиз, 1979.
- 6.9. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ. М.: Изд-во Радиотехника. 2008. 184с.
- 6.10. Петров Б.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Радио и связь, 2008. 231с.
- 6.11. Чижов А.И. Метод крайних импедансов в исследовании СВЧ цепей. М.: Изд-во Радиотехника. 2014. 200с.
- 6.12. Соколова Ж.М. Приборы и устройства СВЧ диапазона. М.: Изд-во Радиотехника. 2012. 282с.
- 6.14. Boat A.R., Watson A. Applications of centmetric radiowaves in non-destructive testing. Intern, conf. on materials. Philadelphia, February.3, 1996.
- 6.15. Lee R.D., H.J. Kim, Yu. P. Semenov Precise measurement of the dielectric constant of liquids using the principle of cross-capacitance // IEEE. Trans. Instr. Meas. 2001. v. 50. № 2 - p.p. 298 - 301.
- 6.16. Матякубов К.Р. Экспериментальные исследования зависимости ослабления электромагнитных волн в хлопке-сырце от влажности на частоте 2,45 ГГц. Научные труды МНПК «Инновация 20012», Ташкент. 2012.- с.61-63.
- 6.17. O'z DSt 644:2006. Хлопок-сырец. Методы определения влажности.
- 6.18. Махмудов М.И. Микропроцессорный СВЧ прибор для измерения влажности зерна. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Ташкент, 2000.
- 6.19. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А., Оптимизация структуры СВЧ-влагомеров. XVI МНПК «Математические методы в технике и технологиях». Сб. научных трудов. Ростов-на-Дону. РГАСХМ. 2003. Том 6. С.34-36.
- 6.20. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. Теоретические исследование электрофизических характеристик зерна в диапазоне СВЧ

энергии. Химическая технология. Контроль и управление. №2. Ташкент. ТГТУ. 2005. С.50-54

6.21. Тургунбаев А. Математическое моделирование преобразователей влажности. МНТК «Интеграция науки, образования и производства» Сборник научных трудов. ТашГТУ. Ташкент. 2008.

6.22. Исмагуллаев П.Р., Ахмедов Б.М. и др. Измерение влажности семян масличных культур.//Масложировая промышленность, 1986, №9. С.14-15.

6.23. Исмагуллаев П.Р., Тургунбаев А. Способы уменьшения влияния форм связи влаги на погрешность преобразователя. МНТК «Проблемы формирования и внедрения инновационных технологий в условиях глобализации». Сборник научных статей. Ташкент, 2010, -С.55-57.

6.24. П.Р.Исмагуллаев, Х.А.Усманова. Измерение влажности хлопка - сырца и хлопковых материалов. РНТК «Роль молодых ученых в развитии науки и техники». Ташкент. ТГТУ. Март, 2010.

6.25. Тургунбаев А. Исследование взаимодействия СВЧ волны с влажным материалом. Россия, Москва, Журнал «Датчики и системы» №5, 2006.

7.1. Исмагуллаев П.Р. и др. Разработка СВЧ - влагомера хлопка-сырца без взвешивания пробы. Отчет о НИР, № гос. рег. 01.88.020865.Ташкент. 70 с.

7.2. Усманова Х.А. Исмагуллаев П.Р. Разработка первичного СВЧ преобразователя влажности повышенной чувствительности. Вестник ТГТУ. Спец. выпуск. 2015. С. 51-56

7.3. Исмагуллаев П.Р., Икрамов Г.И. Шнековое устройство для обработки дисперсных материалов. А.С. № 1242420.

7.4. Medden I., Beran Z., Sample geometry, temperature and density factor in the microwave measurment of moisture. I microwave Power, 1990, 15, №4.

7.5. Fiuri M. Al. Microwave instrument for accurate moisture and density measurement of timber. I of Microwave Power, 1989, 15.№4, P.P.251-254.

7.6. Хабибуллаев П. К. и др. Определение влажности волокнистых материалов // ДАН УзССР, 1985, № 1. С.20-22.

7.7. Исмагуллаев П.Р., Усманова Х.А. Разработка первичных преобразователей влажности для сыпучих и хлопковых материалов. РНТК посвященная дню Метрологии. Узстандарт, Май. 2010.

7.8. Meyer W., Schilz W, A microwave method for density independent determination of the moisture content in solids. I Phys.P Apple.Physics. 1989, №10, P.P. 23-30.

7.9. Kraszewski A. W. Microwave aquametry needs and perspectives; IEEE Trans. Microw. Theor. Techn. - 1991. - V. 39 P.P. 828-835.

7.10. Исмагуллаев П. Р. И др. Автоматический сверхвысокочастотный влагомер. А. С. № 646874. Б.И. № 5, 1979.

7.11. Исмагуллаев П.Р., Гринвальд А.Б. Способ измерения влажности на сверхвысокой частоте. А. С. СССР № 676913.

7.12. Исмагуллаев П.Р., Тургунбаев А. и др. Устройства для измерения влажности. А.С. СССР №1185200, БИ №38, 1985.

7.13. Усманова Х.А. Об одном методе повышение точности СВЧ метода измерения влажности. РНТК «Роль интеллектуальной молодёжи в развитии науки и техники».Сб. научных трудов. Ташкент. ТГТУ. 2013.

7.14. Спиридонов В.И., Соколов В.Г., Берлинер М.А., Воробьев В.А. Измерение влажности твердых материалов по частоте релаксации. В сб.: Тезисы докладов седьмой всесоюзной научно-технической конференции. НПО "Аналитприбор", Кутаиси, 1986.

7.15. Lebrun A., Dominique S. The measurement of soil humidity. Proc. Microwave Power symp, Waterloo, 1995, Edmonton, PP.186-187.

7.16. Семенова Т.И. Основные принципы построения структурных схем измерительно-вычислительного комплекса для определения влаги зерна. Сборник НПК «Технологии, научно-техническое обеспечение в образовании и производстве». Вязьма, 2001. Вып.1.-С.10-12.

7.17. Исмагуллаев П.Р., Тургунбаев А., Махмудов М. И. Разработка собственного микроконтроллера для управления универсальным СВЧ влагомером. Межвузовский сб. научн. трудов, ТГТУ, вып.3. 2006. с.33-37.

7.18. Кейсель Р.В. Разработка универсального СВЧ влагомера. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Калининград. 1998. 33с.

7.19. Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск. 2005.

7.20. Ексина М.В. и др. Опыт внедрения стандартных образцов влажности твердых тел // Измерительная техника, 1986. № 2.

7.21. Исмагуллаев П.Р, Берлинер М.А., Икрамов Г.И. Автоматическая установка для экспрессного определения влажности

хлопка. В кн.: УП Всесоюзная научно-техническая конференция, НПО "Аналитприбор". Кутаиси, 1984. С.43-44.

7.22. Тургунбаев А. Каландаров П.И., Икрамов Г.И. Иммитационное моделирование и метрологическое обеспечение контроля физических величин. Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: Междунар. сб. научн. трудов. – Россия. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. Тех. Университета им. Г.И.Носова, 2011. – Ч.II. – С. 98 – 105.

7.23. Х.А.Усманова, П.Р.Исматуллаев. Обеспечение единства измерений влажности методом сверхвысококачастотной влагометрии твёрдых, сыпучих и волокнистых материалов. Журнал «Метрология» №4. Россия. 2016.

7.24. Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А. Состояние метрологического обеспечения в СВЧ влагометрии. «Standart» № 11. Ташкент, 2012.

8.1. Лисовский В.В. Теория и практика сверхвысококачастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск. 2005.

8.2. Секанов Ю.П. Влагометрия сыпучих и волокнистых растительных материалов: монография / Ю.П. Секанов; ВИМ. - М.: 2001. - 189 с.

8.3. Kent M. The use strip-line configuration in microwave moisture measurement and microwave Power, 1992, № 3,185-195.

8.4. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. и др. Способ определения влажности материалов. А.С. СССР №1283632, БИ №12, 1987.

8.5. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А. Оптимизация структуры СВЧ – влагомеров // Вестник ТГТУ, №2-3, 2006.

8.6. Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А. Многофункциональное сверхвысококачастотное устройство для измерения влажности волокнистых и сыпучих материалов. Журнал «Метрология и приборостроение». Минск. №3. 2015. С. 45-48.

8.7. Ахмедов Б.М. Научные основы и методология единства измерений при управлении качеством пищевых продуктов: Автореф. дисс. докт. техн. наук. Ташкент, 2006. 48с.

8.8. Ахмедов Б.М., Ахмедов Б.Б. Вопросы влагометрии в пищевой промышленности. Изд-во ООО «Нашр ХА», Ташкент, 2006 - с.104.

8.9. Сайтов Р.И. СВЧ-влагометрия сельскохозяйственных продуктов. Уфа «Гилем». 2009. 127 с.

8.10. Исматуллаев П.Р. Автоматический цифровой влагомер для хлопкомаслоэкстракционного производства // Выпуск № 311. Современные методы и технические средства измерения влажности. Сб. научн. тр. Ташкент, ТашПИ, 1990.

8.11. Помощников В. С., Архипова К. С. Автоматический СВЧ-влагомер ВХС-2 // Приборы и системы управления, 1982, № 8.

8.12. Исматуллаев П. Р. и др. СВЧ - влагомер без взвешивания образца с расширенным диапазоном измерения. А.С. СССР № 1312457.

8.13. Матякубов К.Р. СВЧ-метод и устройство для измерения влажности хлопка-сырца в кузове транспорта без отбора проб. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Ташкент, 1987.

8.14. Берлинер М.А. Отчет по НИР "Исследование принципов построения АСУТП на базе информации о влажности ВНИИ центр, № 88022771. М.: 1988 . 44 с.

8.15. Тургунбаев А. СВЧ-метод и устройство повышенной чувствительности для измерения влажности хлопкового волокна: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Ташкент, 1990.

8.16. Ахмедов Б.М. Разработка многоцелевого влагомера для контроля влажности маслосодержащих сыпучих продуктов: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Ташкент, 1993.

8.17. Исматуллаев П.Р., Тургунбаев А., Махмудов М.И. Автоматический универсальный СВЧ влагомер. Москва, "Научтехлитиздат", Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. №6, 2000 . С. 51-53.

8.18. Исматуллаев П.Р., Ахмедов Б.М., Тургунбаев А., Махмудов М.И. Применение микропроцессорной техники при измерении влажности сыпучих материалов. //Актуальные вопросы в области технических и фундаментальных наук: Межвуз. сб. науч. трудов / 2007. Вып. №4.

8.19. Х.А.Усманова, Р.С.Абдурахманова, А.Тургунбаев. Анализ структуры первичных измерительных преобразователей влажности на СВЧ. ТошДТУ хабарлари. ТошДТУ.–Toshkent: 2016.

8.20. Исматуллаев П.Р., Усманова Х.А. Микропроцессорное сверхвысокочастотное устройство для измерения влажности волокнистых и сыпучих продуктов. Вестник ТГТУ. № 3-4. 2012.

8.21. Turgunbaev A., Ismatullaev P.R., Akhmedov B.M., Makhmudov M.I. Automatic universal microwave humidity measurer // World

Conference on Intelligent Systems for industrial Automation (WCIS-2000).

8.22. Усманова Х.А., Тургунбаев А. Универсальное устройство для измерения влажности твердых и сыпучих материалов. РНТК «Роль интеллектуальной молодежи в развитии науки и техники». Сборник научных трудов. ТГТУ. Ташкент. 2011.

8.23. Ахмедов Б.М., Бегунов А.А. Теоретические основы аналитических измерений в технологических отраслях. Ташкент: МЧЖ «Нашр-ХА». 2006. 84с.

8.24. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990.

8.25. Машарипов Ш.М., Усманова Х.А. Программа для обработки результатов эксперимента при измерении влажности хлопковых материалов. № DGU 02748 от 08.04.2013.

8.26. Машарипов Ш.М., Усманова Х.А. Программа для определения влажности хлопка-сырца по его диэлектрической проницаемости и рабочей частоты влагомера. № DGU 03095 от 31.03.2015.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
----------------------	----------

### **ГЛАВА I. ХЛОПОК И ХЛОПКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

1.1. Общие сведения о хлопке-сырце, его компонентах и продуктах переработки.....	7
1.2. Строение и химический состав компонентов хлопка-сырца.....	8
1.3. Основные свойства хлопка-сырца и продуктов его переработки.....	12

### **ГЛАВА II. ВОДА И ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ХЛОПКОМ И ХЛОПКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

2.1. Физические свойства воды.....	18
2.2. Влага в хлопке-сырце и его компонентах.....	28

### **ГЛАВА III. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА-СЫРЦА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

3.1. Общие сведения. Задачи и особенности измерения влажности хлопка и хлопковых материалов.....	41
3.2. Классификация методов измерения влажности. ....	46
3.3. Косвенные неэлектрические методы измерения влажности.....	51

### **ГЛАВА IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

4.1. Основные положения. Кондуктометрические методы измерения влажности хлопка.....	67
4.2. Теоретические основы диэлькометрического метода измерения влажности.....	77
4.3. Экспериментальные характеристики диэлектрических свойств хлопка и хлопковых материалов.....	87

## **ГЛАВА V. ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВЛАГОМЕРЫ ХЛОПКА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

- 5.1 Первичные измерительные преобразователи и измерительные устройства диэлькометрических влагомеров..... 98
- 5.2 Диэлькометрические высокочастотные влагомеры для хлопка-сырца, хлопковых семян и продуктов их переработки..... 108

## **ГЛАВА VI. ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ХЛОПКА-СЫРЦА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ**

- 6.1 Теоретические основы и классификация СВЧ методов измерения влажности..... 120
- 6.2 Экспериментальные характеристики хлопка-сырца в диапазоне СВЧ..... 137
- 6.3 Экспериментальные характеристики хлопковых семян и других хлопковых материалов в диапазоне СВЧ..... 149

## **ГЛАВА VII. ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ**

- 7.1 Основные положения. Конструктивные способы повышения точности СВЧ-влагомеров..... 163
- 7.2 Структурные методы повышения точности СВЧ-влагомеров..... 169
- 7.3 Применение микропроцессорной техники..... 178
- 7.4 Метрологическое обеспечение СВЧ-влагомеров для хлопковых материалов..... 185

## **ГЛАВА VIII. ВЛАГОМЕРЫ СВЧ ДЛЯ ХЛОПКА-СЫРЦА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

- 8.1 Принципы построения и первичные измерительные преобразователи влагомеров СВЧ..... 199

8.2	Измерительные устройства влагомеров СВЧ.....	207
8.3	Влагомеры и измерительные установки СВЧ для хлопковых семян и продуктов их переработки.....	215
8.4	Влагомеры СВЧ для хлопка-сырца.....	222
8.5	Двух и многопараметровые влагомеры СВЧ.....	235
8.6	Унифицированная система средств получения информации о влажности.....	244
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	271
	<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	273

**Патхулла Рахматович Исматуллаев,  
Хулкар Асадуллаевна Усманова,  
Асадулла Тургунбаев**

## **ВЛАГОМЕТРИЯ ХЛОПКА И ХЛОПКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Ташкент – «Fan va texnologiya» – 2017**

Редактор:	Ш.Кушербаева
Тех. редактор:	Ф.Тешабоев
Художник:	Д.Азизов
Корректор:	Н.Хасанова
Компьютерная вёрстка:	Ш.Миркосимова

**E-mail: [tipografiyacent@mail.ru](mailto:tipografiyacent@mail.ru) Тел: 245-57-63, 245-61-61.  
Изд.лиц. АЛ№149, 14.08.09. Разрешено в печать: 02.10.2017.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура «Times New Roman».  
Офсетная печать. Усл. печ.л. 17,75. Изд. печ.л. 18,0.  
Тираж 50. Заказ №160.**

**Отпечатано в типографии  
«Fan va texnologiyalar Markazining bosmaxonasi».  
100066, г. Ташкент, ул. Алмазар, 171.**