

Авторефер
588

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

БРОВКОВИЧ А.Д.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ
СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТАВА
ХРИЗОТИЛ - АСБЕСТОВОЙ РУДЫ И ХЛОПКА-СЫРЦА

Диссертация написана на русском языке

05.198 - Автоматизация производственных процессов
/пищевой и лёгкой промышленности/

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Одесса. - 1972

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

БРОВКОВИЧ А.Д.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ
СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТАВА
ХРИЗОТИЛ-АСБЕСТОВОЙ РУДЫ И ХЛОПКА-СЫРЦА

Диссертация написана на русском языке

Переучено 19.8.71

05.198 – Автоматизация производственных процессов
/пищевой и лёгкой промышленности/

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Одесса - 1972

1971

Одесский технологический
институт пищевой промышлен-
ности им. М. В. Ломоносова
Б И Б Л И О Т Е К А

ОНАХТ 08.06.11

Разработка и исследо



v011971

Работа выполнена в Ростовском-на-Дону институте сельскохозяйственного машиностроения.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор ПУСТЫННИКОВ В.Г.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор КРИЧЕВСКИЙ Е.С.,
кандидат технических наук, доцент ХУДОЛЕИ Л.Л.

Ведущая организация - Всесоюзный Государственный научно-исследовательский и проектный институт асбестовой промышленности.

Автореферат разослан "9" марта 1972г.

Защита диссертации состоится "21" апреля 1972г.
на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах прислать по адресу:
г.Одесса, ГСП-510, ул. Свердлова, 112, Технологический институт пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

Подписано к печати 4.III.72г. ПК 22305. Формат бумаги 60x84/16.
Объем I,3 усл.п.л. Уч-изд.л. I. Заказ С-13-72. Тираж 200 экз.

Редакционно-издательский отдел РИСХМа, пл. Гагарина, I.
Отпечатано в лаборатории офсетной печати РИСХМа, пл. Гагарина, I.

В В Е Д Е Н И Е

Возрастающие темпы производства волокнистых материалов настоятельно требуют внедрения косвенных электрических методов измерения их состава, которые, как известно, обладают значительным быстродействием по сравнению с прямыми методами и могут быть использованы в системах при автоматическом непрерывном контроле. Так, от состояния контроля содержания асбеста в руде зависит оперативность управления технологией её обогащения на асбестообогатительных фабриках, что в конечном итоге сказывается на количестве и качестве извлекаемого асбестового волокна. Измерение же влажности хлопка-сырца или отдельных его компонентов необходимо при приёме огромного потока хлопка на заготовительных пунктах во время уборки урожая, финансовых расчётах, хранении и дальнейшей его переработке.

Выбор измеряемых факторов в диссертационной работе / содержание хризотил - асбеста в руде и влажности хлопка - сырца / произведён исходя из задач, стоящих перед асбестообогатительной и хлопковой промышленностью, развитие которых настоятельно требует внедрения экспрессных методов измерения в технологию их производства. С точки зрения электрометрических методов измерения объединяющим звеном выбора является, во-первых, наличие в материалах волокнистого компонента, в одном случае органического, а в другом - неорганического происхождения и, во-вторых, единый измеряемый фактор - влага, содержание которой необходимо измерять в хлопке - сырце, а для второго материала она служит косвенным показателем содержания хризотил - асбеста в руде.

Исследования, проведённые ВНИИпроектасбест, ЦНИИХПром., ФТИ АН Уз.ССР, ГСКБ хлопкоприбор, показали принципиальную возможность

измерения содержания асбеста в руде и влажности хлопка-сырца по их электрическим характеристикам. Однако применение известных электрических методов измерения приводит к значительной методической погрешности, которая вызывается действием мешающих факторов. Одни из них заметно изменяют электрические характеристики и, следовательно, приводят к значительной методической погрешности — это существенные мешающие факторы, другие вызывают ошибку в допустимых для практики пределах — это несущественные мешающие факторы, действие которых можно не учитывать в процессе измерения.

Для хлопка-сырца и асбестовой руды одним из существенных мешающих факторов является переменная плотность материала в преобразователе, которая зависит не только от условий его заполнения, но и от ряда других причин. Так, для асбестовой руды изменение содержания асбеста приводит к значительному изменению насыпного веса. У хлопка-сырца же насыпной вес зависит от сорта, селекционной разновидности, степени созревания и т.д. Практика показала, что вызываемая действием этого фактора методическая погрешность как при измерении влажности хлопка-сырца, так и при определении содержания асбеста в руде оказывается недопустимо большой. Другим сильнодействующим мешающим фактором для рассматриваемых материалов является непостоянное распределение влаги между основными компонентами этих материалов. Влияние этого фактора зачастую настолько значительно, что делает невозможным использование для измерений известных электрических методов. Поэтому в данной работе основная задача сводилась к поискам способов и средств, которые позволили бы значительно уменьшить влияние этих мешающих факторов.

Применение известных механических стабилизаторов плотности материала приводит к резкому снижению эксплуатационных качеств измерительных устройств и невозможности осуществления непрерывного контроля, а стабилизация непостоянного распределения влаги между компонентами /путём длительной выдержки в герметичных сосудах/ — к потере экспрессности измерений.

В последнее время появилось новое направление в косвенных электрических методах измерения, когда методическую погрешность уменьшают не стабилизацией мешающих факторов, а путём измерения

нескольких параметров преобразователя с материалом. В нашей стране в развитие многопараметровых методов измерения большой вклад внесли работы коллективов ученых, возглавляемых профессорами В.Г. Пустынниковым, П.Н. Платоновым, Е.С. Кричевским, М.А. Берлинером и др.

Целью данной диссертации являлась разработка и исследование многопараметровых методов измерения состава гетерогенных материалов с волокнистым компонентом на примере хлопка-сырца и асбестовой руды.

Диссертация, включающая в себя 173 страницы машинописного текста, состоит из 4 глав, 63 иллюстраций, 3 таблиц, 2 приложений и перечня литературы в количестве 102 печатных работ.

I. МНОГОПАРАМЕТРОВЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТАВА ХРИЗОТИЛ - АСБЕСТОВОЙ РУДЫ И ХЛОПКА-СЫРЦА.

Известно, что на величину сигнала U , снимаемого с преобразователя, влияют как измеряемый фактор X , так и ряд мешающих U_1, U_2, \dots, U_m . При многопараметровых измерениях используют несколько электрических параметров преобразователя и тогда выходные сигналы можно представить в виде системы уравнений:

$$U_i = F_i(X, U_1, U_2, \dots, U_m) \quad (I)$$

Выделение из сигналов преобразователя (I) полезной составляющей, которая бы характеризовала только фактор X , и составляет сущность многопараметровых способов измерения.

Параметры измерения должны быть выбраны так, чтобы реакция электрических характеристик материала на воздействие мешающих факторов отличалась от реакции на действия измеряемого фактора. Такие параметры измерения могли бы быть получены из частотных уравнений датчика. Однако, к сожалению, мы не располагаем ещё такими теоретическими зависимостями для рассматриваемых материалов, поэтому автору пришлось провести многочисленные эксперимен-

ты для получения частотных и частотно-влажностных характеристик при вариации как измеряемого, так и мешающих факторов.

На основе полученных зависимостей были разработаны изложенные ниже способы.

а) Способ измерения хризотил-асбеста в руде.

При измерении содержания асбеста значительное влияние на электрические характеристики руды оказывает её переменный насыпной вес (δ) в преобразователе и различная влажность. Однако, при сушке руды, которая является одной из операций в технологической цепочке её обогащения, влага удаляется из вмещающих пород / серпентинит, перидотит / и с поверхности волокон асбеста. Вода же, находящаяся в единичных волокнах асбеста / фибриллах /, не удаляется и, как показали эксперименты, оказывает заметное влияние на электрические характеристики асбестовой руды. Следовательно, сушкой руды достигается постоянство распределения влаги между основными её компонентами, а остаточная влага в фибриллах, является косвенным показателем содержания асбеста в руде (α).

Таким образом, при разработке многопараметрового способа измерения содержания асбеста в руде основная задача сводилась к получению отстройки от влияния насыпного веса на выходной сигнал. При такой постановке задачи линеаризованную систему (I) можно представить:

$$\begin{aligned} U_1 &= S_{1,\alpha} \alpha + S_{1,r} \cdot \delta, \\ U_2 &= S_{2,\alpha} \alpha + S_{2,r} \cdot \delta, \end{aligned} \quad (2)$$

где $S_{i,\alpha}$ - чувствительность измерения при использовании i -того электрического параметра к содержанию асбеста в руде, и

$S_{i,r}$ - чувствительность к насыпному весу руды.

На основании экспериментальных данных было определено, что максимальную чувствительность к содержанию асбеста в руде

имеют реактивная (b) или полная (Y) проводимость преобразователя. При этом чувствительность преобразователя к α и γ определялась через приращения электрических параметров от приращения соответствующего фактора:

$$S_{i,\alpha} = \Delta b(\Delta \alpha)_i = \quad (3)$$

$$= b(\alpha_{k+1}, \delta_{\text{ср}(k+1)})_i - b(\alpha_k, \delta_{\text{ср}(k)})_i - K \cdot S_{i,\gamma} \Delta \delta',$$

$$S_{i,\gamma} = \Delta b(\Delta \delta)_i = b(\alpha_k, \delta_3)_i - b(\alpha_k, \delta_1)_i, \quad (4)$$

где $b(\alpha_k, \delta_{\text{ср}(k)})_i$ - среднее арифметическое значение реактивной проводимости преобразователя их трёх замеров, соответствующих плотности материала при свободной засыпке δ_1 , с некоторым принудительным уплотнением δ_2 , при максимальном уплотнении вибрацией δ_3 для пробы с α_k содержанием асбеста,

$\Delta \delta'$ - величина уменьшения насыпного веса при переходе от содержания асбеста α_k к содержанию α_{k+1} ,

K - коэффициент пропорциональности, учитывающий изменение насыпного веса от содержания асбеста в руде и определяемый из экспериментально полученной функциональной зависимости $\gamma(\alpha)$.

При реализации многочастотного метода выбор рабочих частот, при которых обеспечивается максимальная чувствительность метода к измеряемому фактору, может быть произведён из частотной функции

$$F(\omega_i) = \frac{S_{\omega_i,\alpha}}{S_{\omega_i,\gamma}}, \quad (5)$$

где $S_{\omega_i,\alpha}$ и $S_{\omega_i,\gamma}$ - чувствительности, определяемые по (3) и (4) при различных частотах.

Максимальное и минимальное значение функции (5) соответствует частотам, при которых обеспечивается максимальная чувствительность метода к измеряемому фактору. Дальнейшим графическим построением резольвент в координатах U_{ω_1} , U_{ω_2} производится

оценка погрешности метода.

Содержание асбеста в руде может быть оценено по углу φ наклона резольвент $U_{\omega_1} = F(U_{\omega_2})$. При этом определение по углу φ требует измерения приращений сигналов, тогда:

$$\varphi(\alpha) = \operatorname{arctg} \frac{\Delta U_{\omega_1}}{\Delta U_{\omega_2}}. \quad (6)$$

При таком способе обработки сигналов необходимо производить, как минимум, два замера одного и того же образца руды при двух значениях насыпного веса, что усложняет процесс измерения.

Измерение значительно упрощается, если линейную двухчастотную плоскость заменить нелинейной, например, логарифмической [2]. Тогда содержание асбеста может быть определено как функция отрезка B , отсекаемого на оси ординат

$$U(\alpha) = B = \lg U_{\omega_1} - K \lg U_{\omega_2}, \quad (7)$$

величина которого не зависит от насыпного веса руды в преобразователе. В уравнении (7) коэффициент K равен:

$$K = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta U_{\omega_1} (\Delta \delta)}{\Delta U_{\omega_2} (\Delta \delta)} \quad (8)$$

и не зависит от α и δ , т.е. он постоянен для всех значений α и δ и определяется экспериментально из построения резольвент в координатах $\lg U_{\omega_1}$, $\lg U_{\omega_2}$.

Проведённый графоаналитический расчёт показал, что при измерении реактивной проводимости преобразователя на частотах 50 кгц и 10 мгц и обработки сигналов по (7) погрешность измерения при изменении насыпного веса на 20-30% составляет $\pm 0,3\%$ абс. по α . При однопараметровом же измерении погрешность равна $\pm 2\%$ и $\pm 3\%$ абс. по α на частотах 50 кгц и 10 мгц соответственно.

Так как содержание асбеста определяется в горячих пробах, т.е. сразу после сушильных камер, возникла необходимость оценить влияние температуры руды на точность измерения двухпараметровым

методом. Экспериментальные исследования показали, что изменения температуры образца от 200°C до 80°C и колебания насыпного веса дают погрешность не более $\pm 0,5\%$ абс. по α .

В работе показано, что точность измерения может быть увеличена при использовании более двух электрических параметров. Однако, применение графоаналитического метода здесь значительно усложняется уже при выборе трёх параметров измерения, а при выборе более трёх его применение становится практически невозможным.

Поэтому был разработан алгоритм для ЭЦВМ на основе множественной линейной корреляции по выбору n - параметров измерения по экспериментальным электрическим характеристикам, полученных при вариации как измеряемого, так и мешающих факторов.

По этому алгоритму были выбраны параметры измерения для определения содержания асбеста в руде. Сравнительный расчёт по реактивной проводимости показал, что при использовании одного параметра погрешность измерения составляет $\pm 1,9\%$, при двух параметрах - $\pm 0,36\%$, при трёх - $\pm 0,25\%$ и при четырёх - $0,19\%$ абс. по α . Дальнейшее увеличение числа измеряемых параметров практически не увеличивает точность определения содержания асбеста в руде.

В диссертации приводятся также расчёты оптимальных параметров при реализации совокупных измерений по полной, реактивной и активной проводимостям преобразователя, краткие результаты по которым приведены в общих выводах.

б) Способ измерения влажности хлопка-сырца.

Экспериментальные исследования электрических характеристик хлопка-сырца при перераспределении влаги между основными его компонентами в условиях постоянной влажности образца показали, что чувствительность преобразователя к влажности волокна примерно на три порядка выше, чем к содержанию влаги в семенах по активной проводимости, а по реактивной - в два раза. Это и приводит к существенному изменению электрических характеристик при перераспределении влаги между семенами и волокнами.

Напрашивается вывод, что методическая погрешность кондуктометрического и диалькометрического методов за счёт непостоянного распределения влаги между компонентами хлопка-сырца настолько велика, что продолжать попытки создания влагомеров, основанных на этих методах, практически бесполезно без стабилизации или строгого учёта этого мешающего фактора.

В связи с этим разработан новый метод [3] измерения влажности хлопка-сырца, заключающийся в том, что на образец перед измерением воздействуют импульсом ВЧ энергии, в результате чего влага перераспределяется из компонента с большим влагосодержанием в компонент с малым содержанием воды.

Выделяемая в хлопке-сырце ВЧ полем удельная активная мощность (P) равна сумме активных мощностей, выделяемых в семенах (P_c) и в волокне (P_v)

$$P = P_c + P_v = E^2 (\sigma'_{с.экв.} + \sigma'_{в.экв.}), \quad (9)$$

где E — напряженность электрического поля,
 $\sigma'_{с.экв.}$ и $\sigma'_{в.экв.}$ — эквивалентная действительная часть комплексной удельной проводимости семени σ'_c и волокна σ'_v с учётом сквозных проводимостей $\sigma_{ос}$ и $\sigma_{ов}$:

$$\sigma'_{с.экв.} = \sigma_{ос} + \sigma'_c(\omega), \quad \sigma'_{в.экв.} = \sigma_{ов} + \sigma'_v(\omega).$$

В хлопке-сырце естественной влажности большая часть влаги сосредоточена в семенах. Для того чтобы процесс перераспределения влаги происходил из семян в волокна, необходимо выделение большей активной мощности в семенах, чем в волокне. Тогда условие перераспределения влаги

$$\frac{P_c}{P_v} = K, \quad (K > 1). \quad (10)$$

Из (9) видно, что коэффициент K можно определить через удельную проводимость. Для расчёта K экспериментально были получены частотные характеристики $\sigma'_{с.экв.}(\omega)$ и $\sigma'_{в.экв.}(\omega)$ для семян и волокон при различной исходной влажности компонентов и определен диапазон частот электромагнитного поля, в котором выполняется условие (10).

Время окончания перераспределения влаги между компонентами может быть определено по минимуму производной тока преобразователя, так как в процессе вытеснения воды из семян в волокна проводимость преобразователя возрастает, а, следовательно, ток растет и достигает максимума практически при полном вытеснении влаги из семян и её распределении по объёму волокна. Это в сочетании с двухпараметровым измерительным устройством, дающим отстройку от колебания насыпного веса, позволяет получить точность измерения влажности не хуже $\pm 0,7\%$ (абс).

в) Покомпонентный способ измерения влажности
хлопка - сырца.

Как отмечалось выше, из-за различной чувствительности датчика к влагосодержанию компонентов хлопка-сырца, выходной сигнал преобразователя в основном несет информацию о влажности волокна.

Используя эту особенность материала, можно осуществить покомпонентное измерение влажности хлопка-сырца [1] :

1. Одним из электрических способов измеряется влажность волокна W_B , так как чувствительность преобразователя к влагосодержанию волокна на три порядка выше, чем к семенам.

2. На преобразователь подаётся импульс высокочастотной энергии, при воздействии которого вода вытесняется из семян в волокна.

3. Повторным измерением определяется суммарная влажность пробы W_Σ , так как вытесненная из семян в волокна влага изменит электрические характеристики образца, а влажность семян определится разностью

$$W_c = W_\Sigma - W_B .$$

Для отстройки от влияния переменного насыпного веса пробы на результат измерения, как и в ранее описанном способе, используются две частоты.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСЛОВИЙ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАГИ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ ХЛОПКА-СЫРЦА В ПОЛЯХ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ.

Структура хлопка-сырца такова, что волокно можно представить в виде сплошной однородной среды, а семена в виде отдельных эллипсоидальных включений, которые занимают сравнительно малый объём в преобразователе. В этом случае напряжённость электрического поля в семени и на границе раздела семя-волокно будет зависеть от формы и размеров семени, электрических свойств компонентов хлопка-сырца и положения семени относительно вектора напряжённости электрического поля.

Напряжённость поля в семени E_c при направлении внешнего поля вдоль его большой оси (а) и при условии $\epsilon_{с.экв} > \epsilon_{в.экв}$ будет равна:

$$\dot{E}_{ca} = \frac{\dot{E}_в}{1 + N_a \tilde{\alpha}_{с.экв}}, \quad (11)$$

а при направлении внешнего поля вдоль малых осей семени **b** или **c** ($b=c$)

$$\dot{E}_{cb} = \frac{\dot{E}_в}{1 + N_b \tilde{\alpha}_{с.экв}}. \quad (12)$$

Здесь $\tilde{\alpha}_{с.экв}$ - эквивалентный комплексный коэффициент диэлектрической восприимчивости с учётом сквозной проводимости.

N_i - коэффициент деполяризации вдоль соответствующей оси семени.

При соотношении осей семени хлопка-сырца $a/b = 3$ ($b=c$) и направлении электрического поля, совпадающего с направлением большой оси семени, коэффициент деполяризации равен: $N_a = 0,1$, а при направлении поля вдоль малых осей $N_b = N_c = 0,45$. В этом случае напряжённости поля, определяемые (11) и (12), теоретически могут иметь максимальное отличие в 4,5 раза, а, следовательно, удельные активные мощности в 20 раз.

При условии $\bar{\sigma}_{с.экв} < \bar{\sigma}_{в.экв}$. напряжённости поля, аналогичные (II) и (I2), будут равны:

$$\dot{E}_{сa} = \dot{E}_в (1 + N_a \tilde{\alpha}_{в.экв}), \quad (13)$$

$$\dot{E}_{св} = \dot{E}_в (1 + N_b \tilde{\alpha}_{в.экв}). \quad (14)$$

В этом случае теоретически максимальное отличие напряжённости поля в семенах, находящихся во взаимноперпендикулярных плоскостях также возможно в 4,5 раза, но только большая мощность выделяется в семенах, малая ось которых совпадает с направлением поля.

На границе же раздела семя-волокно в отдельных точках семени в зависимости от его ориентации напряжённости поля могут отличаться в 10 раз, а выделяемые активные мощности в 100 раз.

Условие (I0) с учетом анизотропии семени для случая $\bar{\sigma}_{с.экв} > \bar{\sigma}_{в.экв}$ можно записать:

$$K_i = \frac{\sigma'_{с.экв}}{\sigma'_{в.экв}} \cdot \frac{1}{(1 + N_i \tilde{\alpha}_{с.экв})^2}. \quad (15)$$

Вводя коэффициент K_0 , определяемый равенством (I0) для изотропной неоднородной среды, в которой обеспечивается равенство напряжённости поля в семени и волокне, количественную оценку влияния анизотропии семени можно произвести через отношение:

$$\frac{K_i}{K_0} = \frac{1}{(1 + N_i \tilde{\alpha}_{с.экв})^2}. \quad (16)$$

В случае $\bar{\sigma}_{с.экв} > \bar{\sigma}_{в.экв}$. имеем:

$$K_i = \frac{\sigma_{с.экв}}{\sigma'_{в.экв}} \cdot (1 + N_i \tilde{\alpha}_{в.экв})^2, \quad (17)$$

$$\frac{K_i}{K_0} = (1 + N_i \tilde{Z}_{в.экв})^2. \quad (18)$$

Мощности, выделяемые в семенах с различной ориентацией их в преобразователе, можно оценить

$$\frac{K_b}{K_a} = \frac{(1 + N_a \tilde{Z}_{с.экв})^2}{(1 + N_b \tilde{Z}_{с.экв})^2}. \quad (19)$$

Таким образом, анизотропия семени хлопка-сырца вызывает как изменение условия (10), так и приводит к неодинаковому выделению мощности в семенах с различной ориентацией относительно направления поля. При измерении на сравнительно малых образцах это повлияет на точность определения влажности.

Устранить этот источник погрешности можно, если использовать вращающееся в пространстве электрическое поле. Очевидно, вращение вектора электрического поля должно происходить таким образом, чтобы во всех семенах, независимо от их ориентации в преобразователе, за время T выделялось одинаковое количество энергии A . Тогда, это необходимое условие будет выполняться и для граничных случаев расположения семян, большие оси которых совпадают с направлением координатных осей X , Y и Z преобразователя, т.е.

$$A_i = \int_0^T P_x dt = \int_0^T P_y dt = \int_0^T P_z dt, \quad (20)$$

где P_i — активная мощность, выделяемая в одном семени при расположении его вдоль i — той координатной оси.

Вращающееся в пространстве электрическое поле можно сформировать с помощью амплитудной модуляции. При этом на три пары взаимно перпендикулярных электродов преобразователя необходимо подать переменные напряжения, которые в межэлектродном пространстве создадут напряжённости поля:

$$\begin{aligned} e_x &= E_{mx} \cdot \sin \omega t, \\ e_y &= E_{my} \cdot \sin \omega t, \\ e_z &= E_{mz} \cdot \cos \omega t, \end{aligned} \quad (21)$$

где E_{mi} - амплитудное значение напряжённости ВЧ поля с частотой ω . Если амплитуды напряжённости поля между электродами X и Y изменять во времени с низкой частотой Ω :

$$\begin{aligned} E_{mx} &= E_m \cdot \cos \Omega t, \\ E_{my} &= E_m \cdot \sin \Omega t, \end{aligned} \quad (22)$$

то модуль результирующего вектора электрического поля $E_{рез}$. не будет зависеть от времени

$$E_{рез} = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2} = E_m, \quad (23)$$

а его положение в пространстве преобразователя определится

$$\begin{aligned} \theta &= \arctg \frac{\sqrt{e_x^2 + e_y^2}}{e_z} = \omega t, \\ \varphi &= \arctg \frac{e_y}{e_x} = \Omega t. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, результирующий вектор электрического поля в межэлектродном пространстве будет постоянен по величине ($E_{рез} = E_m$) и вращаться вокруг оси Z с угловой скоростью Ω а в плоскостях XOZ и YOZ со скоростью ω , то есть своим концом за время $2\pi/\Omega$ будет описывать сферу.

Составляющие напряжённости поля e_x и e_y в (21) представляют собой частный случай амплитудно-модулированного сигнала - балансную модуляцию, при которой спектр каждой из составляющих содержит две боковые частоты:

$$\begin{aligned} e_x &= E_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \Omega t = \\ &= \frac{1}{2} E_m [\sin(\omega + \Omega)t + \sin(\omega - \Omega)t]. \end{aligned} \quad (25)$$

Если амплитудную модуляцию этих составляющих осуществить промышленной частотой ($\Omega = 314$), то при ВЧ нагреве ($\omega = 5 \cdot 10^7 - 30 \cdot 10^7$) всегда будет иметь место $\omega \gg \Omega$, а, следовательно, можно считать, что на материал в преобразователе воздействует поле с частотой ω .

Мгновенную удельную мощность, выделяемую в каждом семени можно представить тремя составляющими:

$$P = P_x + P_y + P_z \quad (26)$$

каждая из которых пропорциональна квадрату соответствующей напряжённости поля E , коэффициенту деполяризации N и действительной части комплексной проводимости $\sigma'_{с. экв}$ семени:

$$P_i = N_i \cdot \sigma'_{с. экв} \cdot E_i^2. \quad (27)$$

Составляющие (27) за время $2\pi/\Omega$ выделяют в семени энергии

$$A_i = \int_0^{2\pi/\Omega} P_i dt = \int_0^{2\pi/\Omega} N_i \sigma'_{с. экв} \cdot E_i^2 dt. \quad (28)$$

Положив $\omega = \pi \Omega$ и считая, что $\omega \gg \Omega$, с учётом (21) и (22) после несложных преобразований найдем:

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{1}{2\Omega} \pi \cdot N_a \cdot E_m^2 \cdot \sigma'_{с. экв}, \\ A_y &= \frac{1}{2\Omega} \pi \cdot N_b \cdot E_m^2 \cdot \sigma'_{с. экв}, \\ A_z &= \frac{1}{\Omega} \pi \cdot N_c \cdot E_m^2 \cdot \sigma'_{с. экв}. \end{aligned} \quad (29)$$

Отсюда следует, чтобы энергия в семени, выделяемая составляющими поля, зависела только от коэффициента деполяризации, амплитуду напряжённости поля вдоль оси Z необходимо уменьшить в $\sqrt{2}$ раз, т.е.

$$E_z = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos \omega t. \quad (30)$$

Тогда полная активная энергия, выделяемая в семени, с учётом что $N_a + N_b + N_c = I$ определится:

$$A = \sum A_i = \frac{1}{2\Omega} \pi \cdot E_m^2 \cdot \sigma'_{с. экв.} \quad (31)$$

Выражения (29) написаны для семени расположенном своей большой осью O вдоль направления X . Аналогично можно показать, что та же энергия (31) будет выделяться и в семенах ориентированных большой осью вдоль Y и Z .

Таким образом, условие (20) удовлетворяется, если составляющие поля изменяются во времени по законам:

$$\begin{aligned} e_x &= E_m \cdot \sin \omega t \cdot \cos \Omega t, \\ e_y &= E_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin \Omega t, \\ e_z &= 0,707 E_m \cdot \cos \omega t. \end{aligned} \quad (32)$$

Результирующий вектор напряжённости поля в этом случае будет описывать в пространстве эллипсоид вращения с осями $a = b = E_m$ и $c = 0,707 E$.

Вращающееся в пространстве электрическое поле обеспечивает периодическое изменение направления действия поля, тем самым создает условия при которых количество выделяемого тепла во всех семенах /при их одинаковой влажности/ будет одинаковым независимо от пространственного положения их осей анизотропии. Это значительно улучшает метрологические свойства методов [1,3].

Вращающееся электрическое поле может быть также использовано для ускоренной сушки различных анизотропных материалов, не вызывая в них локальных перегревов и механических перенапряжений, а при сушке семян и биологической гибели отдельных зерен.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

1. Предложен метод [3] измерения влажности хлопка-сырца, позволяющий путем воздействия на образец импульсом высокочастот -

©. 6V0-1971

ной электромагнитной энергией значительно уменьшить погрешность, вызываемую непостоянным распределением влаги между компонентами хлопка-сырца.

Экспериментальная проверка предложенного способа измерения влажности хлопка-сырца показала, что при значительной вариации этого мешающего фактора и при постоянном времени воздействия ВЧ поля на образец / независимо от характера распределения влаги / точность измерения возросла в 4 раза.

2. Разработан двухпараметровый способ [2] определения содержания асбеста в руде с отстройкой от влияния переменной плотности материала в преобразователе. При этом на ЭЦВМ были выбраны оптимальные электрические параметры измерения, обеспечивающие минимальную погрешность при действии переменного насыпного веса и температуры руды в преобразователе. Сравнительная оценка погрешностей показала, что при использовании одного электрического параметра / реактивная или полная проводимость на частоте 50 кгц / для измерения содержания асбеста в руде минимальная погрешность составляет $\pm 1,5 - 2\%$ абс. по d . Использование второй частоты / 10 мгц / при линейной обработке сигналов повышает точность измерения до $\pm 1,0$ абс. по d , а при учёте нелинейности электрических характеристик асбестовой руды позволяет снизить погрешность измерения до $\pm 0,3 - 0,4\%$. При введении третьего параметра и учёте нелинейных свойств асбестовой руды точность может быть увеличена до $\pm 0,2\%$ абс. по d .

Аналитический расчёт погрешности, проведённый при использовании совокупных измерений / активной и реактивной проводимости /, показал, что использования двух параметров g ($f = 1 \cdot 10^6$ гц) и b_1 ($f = 1 \cdot 10^7$) гц без нелинейной их обработки может быть получена точность не хуже $\pm 0,5\%$, а при трёх параметрах g , b_1 и b_2 ($f = 1 \cdot 10^4$ гц) - $\pm 0,3\%$ абс. по d .

По выданным автором рекомендациям во Всесоюзном Государственном Научно-исследовательском и проектном институте асбестовой промышленности / г. Асбест / изготовлены и внедряются в промышленность двухпараметровые устройства для определения содержания асбеста в руде.

Промышленная проверка показала, что при измерении на горячих пробах точность составляет не хуже $\pm 0,5\%$ абс. по d . Ожидаемый экономический эффект по отрасли от внедрения этого устройства на асбестообогатительных фабриках составит 190 тыс. руб.

3. Предложен способ [1] раздельного измерения влажности семян и волокон хлопка-сырца с применением мощного высокочастотного электромагнитного поля. Первоначально измеряется влажность волокна за счёт использования высокой чувствительности преобразователя к влагосодержанию волокна, затем при воздействии ВЧ электромагнитным полем влага из семян вытесняется в волокна и повторно измеряется суммарная влажность образца, а по разности результатов измерения определяется влажность семян.

4. Разработано устройство [4] для измерения влажности хлопка - сырца с воздействием высокочастотного электромагнитного поля, в котором окончание процесса перераспределения влаги из семян в волокна определяется величиной производной тока преобразователя по времени.

5. Работа показала, что в семенах, различно ориентированных относительно направления поля, в силу их анизотропных свойств напряжённости поля могут отличаться в 4,5 раза, а выделяемые активные мощности в 20 раз. Такое распределение мощностей приводит к неодинаковому вытеснению влаги из отдельных семян и может явиться источником погрешности при измерении влажности хлопка-сырца разработанным методом.

Для одинакового нагрева всех семян в преобразователе независимо от их положения предложено использовать вращающееся в пространстве электрическое поле.

6. Предложены способы формирования вращающегося в пространстве электрического поля, результирующий вектор напряжённости которого описывает эллипсоид вращения, что обеспечивает равенство активных энергий, выделяемых в семенах с различной ориентацией их в преобразователе.

7. Введён критерий, позволяющий по электрическим характеристикам компонентов хлопка-сырца определить частоту электромагнитного поля, при которой обеспечивается перераспределение влаги из семян в волокна.

8. Для разработки многопараметровых устройств предложен алгоритм выбора оптимальных измеряемых электрических параметров преобразователя и их совокупности по минимуму погрешности контролируемой величины.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Пустынников В.Г., Бровкович А.Д., Джемелла В.В. - Способ определения влажности хлопка-сырца. Авторское свидетельство № 276506 от 4 мая 1970 г.

2. Бровкович А.Д., Джемелла В.В. - Двухчастотный способ измерения содержания хризотил-асбеста в руде. Заводская лаборатория, 1968, № II.

3. Джемелла В.В., Бровкович А.Д. - Способ определения влажности хлопка-сырца. Авторское свидетельство № 299793 от 13 января 1971 г.

4. Пустынников В.Г., Бровкович А.Д., Джемелла В.В., Дроздов В.Н., Свиридов Я.Ф. - Устройство для измерения влажности многокомпонентных материалов. Авторское свидетельство № 320765 от 4 ноября 1971 г.

5. Бровкович А.Д. - Измерение влажности хлопка-сырца с отстройкой от неравномерного распределения влаги между зерном и волокном. Приборы и методы контроля и регулирования влажности. Тезисы III-й научно-технической конференции, Иркутск, 1969 г.

6. Бровкович А.Д., Протодяконов А.М. - Снятие частотных характеристик ёмкостного датчика для определения качественного состояния диэлектрических материалов. В сб. Завод-ВТУЗ-производству, Ростов-на-Дону, 1969 г.

7. Джемелла В.В., Бровкович А.Д. - Влияние некоторых физических параметров руды асбеста на его электрические характеристики. В сб. Многопараметровый контроль в машиностроении. Ростов-на-Дону, 1969 .

8. Бровкович А.Д. - Влагометрия зерноволокнистых материалов и проблема измерения влажности хлопка-сырца. В сб. Многопараметровый контроль в машиностроении, выпуск I, Ростов-на-Дону, 1971 .

9. Джемелла В.В., Бровкович А.Д. - Методы определения оптимальных частот для двухпараметровых приборов косвенного контроля. В сб. Завод-ВГУЗ- производству, Ростов-на-Дону, 1969 .

10. Бровкович А.Д., Холмогоров Н.Н. - Обработка результатов автоматического контроля, полученных в виде алгебраических и трансцендентных уравнений на аналоговых машинах. В сб. Завод-ВГУЗ- производству, Ростов-на-Дону, 1969 .

11. Лис Л.С., Бровкович А.Д., Куптель Г.А. - К вопросу выбора частот измерительной схемы при двухпараметровом методе контроля влажности торфа. В сб. Переработка и использование торфа и сапропелей. АН БССР, институт торфа, Минск, 1971 .

По материалам диссертации сделаны доклады:

1. На третьей научно-технической конференции по приборам и методам контроля и регулирования влажности, Иркутск, сентябрь 1969 .

2. На научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава РИСХМ"а, Ростов-на-Дону, 1968, 1969, 1970, 1971 .

3. На семинаре по многопараметровым методам неразрушающего контроля материалов и изделий, Ростов-на-Дону, 1970 .