

Автор едр.

1732

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

А. А. ПИКЕРСГИЛЬ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОЧНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель — д. т. н., проф. ПЛАТОНОВ П. Н.

1984

ОДЕССА  
1965

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

---

А. А. ПИКЕРСГИЛЬ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОЧНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель — д. т. н., проф. ПЛАТОНОВ П. Н.

1000.858



2  
1  
ОНАХТ

ОДЕССА  
22.06.12 1965

Исследование поточны



Работа выполнена в Одесском технологическом институте  
имени М. В. Ломоносова

Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам автореферат диссертации ассистента кафедры автоматизации и механизации производства А. А. Пикерсгиля — «Исследование поточных датчиков влажности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита диссертации намечается на „24“ XII 1965 г.

Ваши отзывы и замечания в двух экземплярах просим направить по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, № 112, Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

(Л. А. Запорожец)

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация процессов сушки зерна, обеспечивающая дальнейший рост производительности труда и повышение качества процесса, немыслима без наличия датчиков влажности зерна, работающих в потоке.

При этом к датчикам предъявляются требования:

- диапазон измерения 10—30%  $W$ ;
- измерение температуры зерна может быть в пределах +5 — +60° C;
- скорость потока зерна может изменяться в пределах 0,1 — 0,8 м/мин;
- в зерне могут присутствовать поверхностная влага и посторонние примеси в умеренных количествах;
- точность измерений  $\pm 1\%$   $W$ .

Рекомендации отечественных и зарубежных источников в области влагомеростроения порою противоречивы и не систематизированы. Результаты испытаний и эксплуатации влагомеров, предназначенных для экспрессных анализов влажности, показали, что при сравнении существующих приборов преимущества, либо недостатки различных типов влагомеров существенно зависят от условий работы.

С другой стороны, в результате многолетнего опыта накоплены обширные теоретические и экспериментальные данные в области электрофизических свойств влажных материалов, что позволяет приступить к созданию влагомеров на теоретической основе, гарантирующей получение заданного результата измерения.

Приведенные соображения определили направление настоящей работы, цель которой:

— рассмотреть возможность применения известных методов определения влажности для создания поточных датчиков влажности;

— на основе теоретических и экспериментальных данных, характеризующих электрофизические свойства зерна, выбрать оптимальные рабочие параметры для создаваемого прибора;

— исследовать возможность разработки новой методики измерения влажности, свободной от недостатков известных экспрессных методов;

— выбрать блок-схемы и принципиальные схемы приборов, предложить методику расчета элементов схем;

— произвести экспериментальную проверку теоретических выводов и дать рекомендации по применению влагомеров для контроля влажности зерна в потоке.

Вследствие того, что влагомеры предназначаются для автоматизации поточных процессов, при их создании следует учитывать требования к простоте обслуживания и невысокой стоимости приборов. Поэтому при выборе принципа измерения из рассмотрения были практически исключены некоторые методы, требующие для своего осуществления дорогостоящей аппаратуры и относительно высокой квалификации обслуживающего персонала (метод ЯМР и др.).

Материал диссертации уложен в четырех главах. В приложении приводятся фактические результаты испытаний предлагаемых типов влагомеров, а также некоторые расчетные данные по этим приборам.

В главе I — Методы определения влажности и возможности их применения для автоматизированных измерений в потоке — анализируются применяемые в настоящее время методы определения влажности. Среди них четко выделяются две основные группы: методы, основанные на разделении влаги и сухого вещества с последующим изменением одного из компонентов, и методы, использующие для измерения зависимость между влажностью материала и другими его параметрами, чаще всего электрическими. На принципе первой группы строятся основные или базисные методы определения влажности; вторая группа позволяет осуществить практические или косвенные методы, называемые методами преобразования.

Для успешного осуществления последних методов необходимо выбрать параметры, наиболее однозначно связанные с влажностью материала, и определить условия, способствующие этой однозначности.

В работе показано, что для решения поставленной задачи наиболее приемлемыми могут оказаться электрофизические методы определения влажности, позволяющие получить измеряемые величины в относительно небольшой промежуток времени. Кажущаяся целесообразность применения методов разделения, использующих для нагрева инфракрасное излучение, либо энергию поля ВЧ, является сомнительной, т. к. при полной автоматизации эти способы не позволяют сократить время высушивания ниже 15 мин. При более интенсивном нагреве с целью сокращения времени анализа, погрешность этого метода заметно возрастает и принимает тот же порядок, что

и другие методы, использующие более простую и дешевую аппаратуру.

Поэтому более подробно рассматриваются особенности электрических методов и выясняются возможности их использования для определения влажности зерна в потоке.

Несмотря на наличие определенных преимуществ, которыми обладают электрические принципы по сравнению с прочими методами определения влажности, они не нашли еще достаточно широкого применения в практике.

Сложившиеся несоответствия между перспективностью электрических методов и их практическим использованием можно объяснить многими причинами, но основная из них заключается, по-видимому, в недостаточно четком учете возможностей электрических методов, а также чрезмерных требованиях в отношении универсальности электрических влагомеров. Эти методы базируются на предположении, что ряд электрических параметров может быть однозначно связан с влажностью материалов. Практически же требуемая однозначность зависимости электрических свойств материалов от влажности не наблюдается. Следовательно, каждому электрическому принципу измерения влажности свойственны определенные погрешности метода, причем минимальное их значение зависит не только от правильного выбора метода, но и в равной степени от обоснованного выбора рабочих параметров, характеризующих этот метод.

Поэтому важно установить, какой электрический параметр и при каких условиях наиболее целесообразно измерять в данном случае. При этом необходимо оценить ожидаемые погрешности метода и лишь после этого техническими средствами обеспечить требуемые характеристики приборов.

На основании анализа электрофизических свойств влажных капиллярно-пористых тел показывается, что простейшие приборы, действие которых основано на кондуктометрическом принципе определения влажности, не смогут удовлетворить требованиям поставленной задачи, так как этот принцип способен обеспечить надежные результаты лишь в пределах влажности, ограниченной значениями  $W = 10—20\%$ . Кроме того, его осуществление связано с обязательным выполнением ряда дополнительных требований, обеспечивающих строгую идентичность условий измерения (прессование точно взвешенной навески образца и т. п.) и затрудняющих автоматизацию этого процесса. Эксперименты, специально поставленные автором с различными типами датчиков (валковыми, шнековыми и др.), полностью подтвердили этот вывод.

Изменение влажности материалов в переменном электрическом поле повышенной частоты позволяет теоретически получить более достоверные результаты, чем при использовании кондуктометрического метода.

Для линейных сред зависимость в операторной форме между плотностью тока  $\bar{J}$  и напряженностью электрического поля  $\bar{E}$  в любой точке выражается уравнением

$$\bar{J}_{(p)} = \sigma_{(p)} \bar{E}_{(p)}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — удельная проводимость.

Заменяя оператор  $(p)$  на мнимую частоту  $j\omega$ , получаем зависимость:

$$\bar{J} = \sigma(j\omega) \bar{E}. \quad (2)$$

Диэлектрические свойства материалов при заданной напряженности поля  $\bar{E}$  и частоте  $\omega$  характеризуются следующими параметрами  $\bar{J}$ ,  $\bar{J}_a$  и  $\bar{J}_r$ .

Диэлектрические свойства капиллярно-пористых материалов существенно зависят от влагосодержания, однако характер этой взаимосвязи для каждого из названных параметров различен. Поэтому при определении влажности в полях ВЧ следует найти самые благоприятные условия для измерения того параметра, который связан с влажностью наиболее однозначно.

В отечественной и зарубежной практике известное распространение получил метод определения влажности, основанной на измерении диэлектрических потерь во влажном материале.

В общем виде диэлектрические потери  $P$  могут быть выражены так

$$P = (\bar{J}_a + \bar{J}_{\text{скв}}) \bar{E}, \quad (3)$$

где  $\bar{J}_a$  — активная составляющая плотности абсорбционного тока;

$\bar{J}_{\text{скв}}$  — плотность тока сквозной проводимости;

$\bar{E}$  — напряженность электрического поля.

Для практических расчетов больший интерес представляет тангенс угла потерь:

$$\text{tg } \delta = \frac{\bar{J}_a + \bar{J}_{\text{скв}}}{\bar{J}_r}. \quad (4)$$

Независимо от используемой методики и принципиальных схем устройств измерение диэлектрических потерь не может надежно характеризовать влажность вещества.

Исследования показывают, что незначительные добавления к влажному материалу электролитов (например, раствора NaCl в воде), при которых практически не изменялось влагосодержание, приводили к весьма заметным изменениям диэлектрических потерь. Этот метод чувствителен к изменениям

химического состава вещества и способен дать приемлемые результаты только при условии, что в состав исследуемого продукта входят химически чистые компоненты в строго определенной пропорции, а это практически никогда не обеспечивается. Проверка этого метода Е. С. Кричевским показала, что его результаты зависят от многих дополнительных факторов и что точность его недостаточна для практических целей. Поэтому метод диэлектрических потерь был исключен из дальнейшего рассмотрения.

Весьма широко используется так называемый «емкостной» метод определения влажности, основанный на измерении диэлектрической проницаемости материала. Если не приняты меры для измерения только реактивной составляющей полной проводимости, то название «емкостной» метод не точно отражает существо процесса измерения, т. к. для большинства влажных капиллярно-пористых материалов влияние диэлектрических потерь может быть соизмеримо с влиянием реактивной проводимости. Вместе с тем очень часто называют «емкостными» влагомеры, измеряющие комплексную диэлектрическую проницаемость материала. Опасность представляет не формальная неточность, а то обстоятельство, что у таких приборов существенное влияние на результат измерения оказывают диэлектрические потери, чем по-видимому и объясняются расхождения между хорошими теоретическими предположениями и сравнительно невысокими практическими результатами этого метода.

Так как термин «емкостные» влагомеры широко используется в технической литературе, применение его не исключается в дальнейшем при условии, что будут учитываться приведенные соображения.

В соответствии с теорией поляризации реальных дисперсных систем диэлектрическая проницаемость их не зависит от степени дисперсии, концентрации электролита и частоты поля. Результаты же экспериментов с капиллярно-пористыми коллоидными телами и твердыми неорганическими материалами расходятся с предыдущими выводами. Так, при добавлении к мясу 1% поваренной соли заметно возрастали значения  $\epsilon$  и  $\epsilon'$ , но было установлено, что при повышении рабочей частоты до 30 Мгц прирост значений  $\epsilon'$  заметно падает.

Экспериментально также было установлено, что реактивная проводимость значительно менее активной зависит от изменения биологических и химических свойств материалов. Весьма заметные преимущества «емкостного» метода были установлены Меллардом при исследовании электрических свойств угля. Он показал, что при правильном выборе рабочих параметров и весовом дозировании образцов влияние уплотнения материала на величину емкости датчика становится

практически неощутимым. К достоинствам «емкостного» метода следует отнести невысокую его чувствительность к примесям органического и минерального происхождения, к неравномерности распределения влаги в образце и т. д.

В результате проведенного предварительного исследования установлено, что наиболее благоприятным для решения поставленной задачи является метод, основанный на измерении диэлектрической проницаемости материала, который и был принят к дальнейшему исследованию.

В главе II — Выбор рабочих параметров «емкостных» датчиков влажности — рассматривается явление поляризации влажного неоднородного диэлектрика сложного состава. Суммарная поляризация материала, которая выражается средним дипольным моментом, может быть представлена в виде суммы отдельных видов поляризации

$$P = P_{\text{э}} + P_{\text{и}} + P_{\text{т}} + P_{\text{с}} + P_{\text{эл}}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{э}}$  — электронная,  
 $P_{\text{и}}$  — ионная,  
 $P_{\text{т}}$  — теплового движения,  
 $P_{\text{с}}$  — структурная,  
 $P_{\text{эл}}$  — электролитическая поляризации.

Перечисленные виды поляризации могут быть отнесены к двум видам: упругой и релаксационной, отличающимся друг от друга временной характеристикой достижения установившегося значения.

К первому типу относятся электронная и упругая ионная поляризация и для них характерны следующие особенности.

$$1. \frac{T}{T_p} \ll 1,$$

где  $T$  — время достижения установившегося значения;  
 $T_p$  — период колебаний ВЧ поля.

2. Вследствие отсутствия диэлектрических потерь мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'' = 0$ .

Остальные виды поляризации называют релаксационными и их основной особенностью является наличие диэлектрических потерь.

Вектор электрического смещения  $\bar{D}$  представляет собой векторную сумму мгновенного и релаксационного смещения

$$\bar{D} = \bar{D}_{\text{мгн}} + \bar{D}_{\text{рел}}. \quad (6)$$

Этим двум слагаемым соответствуют составляющие плотности тока смещения

$$\bar{J}_{\text{см. мгн}} = \frac{\partial \bar{D}_{\text{мгн}}}{\partial t},$$

$$\bar{J}_{\text{см.рел}} = \frac{\partial \bar{D}_{\text{рел.}}}{\partial t} \quad (7)$$

Следовательно, плотность тока смещения

$$\bar{J}_{\text{см}} = \bar{J}_{\text{см.мгн}} + \bar{J}_{\text{см.рел}} \quad (8)$$

и полная плотность тока в материале:

$$\bar{J} = \bar{J}_{\text{пр}} + \bar{J}_{\text{см}} = \bar{J}_{\text{пр}} + \bar{J}_{\text{см.мгн}} + \bar{J}_{\text{см.рел.}} \quad (10)$$

Как было выяснено, более достоверные результаты измерения обеспечиваются, если определять изменение реальной части комплексной диэлектрической проницаемости в функции влажности. Ток сквозной проводимости устраняется подключением датчика к измерительной схеме через разделительный конденсатор; при этом снижается и активная составляющая тока абсорбционной проводимости. С другой стороны, временные характеристики релаксационных видов поляризации показывают, что повышение рабочей частоты в разумных пределах сможет устранить отдельные виды поляризации, связанные с потерями, и тем самым дополнительно снизить влияние потерь на результат измерения.

Существуют специальные способы, устраняющие полностью влияние  $\text{tg } \delta$ , заключающиеся в применении мостовых методов измерения, метода  $Q$ -метра, двухконтурной измерительной схемы и т. д.

При выборе метода необходимо помнить, что на точность измерения влажности влияют также факторы, нарушающие однозначность связи  $\epsilon'$  с влажностью (тип и сорт зерна, температура и плотность укладки его в датчике и т. д.). Следует учитывать и дополнительные факторы, связанные с инструментальными погрешностями прибора, возможностью автоматизации процесса измерения, стоимостью аппаратуры и простотой ее обслуживания.

Например, мостовые схемы легко автоматизируются, но создать мостовую схему для частот выше 20 Мгц весьма сложно, особенно при массовом воспроизведении в приборах серийного выпуска. Метод  $Q$ -метра и двухконтурная измерительная схема не связаны с частотными ограничениями, но они значительно труднее поддаются автоматизации и требуют определенных навыков у оператора.

Таким образом, рабочие параметры устройства и методику измерения необходимо выбирать с учетом всех перечисленных особенностей. Верхняя граница диапазона рабочих частот, соответствующего «емкостному» методу определения влажности, как показано в настоящей работе, ограничивается значением  $10^8$  гц. Поэтому частотные свойства материала рассматриваются применительно к указанному и выводы, сде-

данные на основании анализа свойств зерна, будут строго справедливы только для рассматриваемых условий. Нижнюю границу частотного диапазона желательно выбирать так, чтобы исключить частоты релаксации  $\omega_p = \frac{1}{\tau_p}$  остающихся видов поляризации, так как частотам релаксации соответствуют максимумы характеристики

$$\epsilon'' = \varphi(f).$$

Анализ диэлектрических свойств зерна показывает:

— с повышением влажности зерна, диэлектрическая проницаемость зерновой массы  $\epsilon'$  увеличивается. Увеличение рабочей частоты ведет к снижению крутизны характеристики  $\epsilon' = f(W)$ , причем это явление проявляется наиболее интенсивно в диапазоне частот до 10,0 МГц;

— с увеличением влажности до 20—25% в диапазоне частот до 10,0—15,0 МГц, тангенс угла диэлектрических потерь резко возрастает;

— при увеличении рабочей частоты до 35,0—40,0 МГц тангенс угла диэлектрических потерь заметно уменьшается для всего диапазона влажности (10—30%) и для всех значений температур ( $\vartheta = +17 - +60^\circ\text{C}$ ), дальнейшее повышение рабочей частоты не ведет к заметному снижению величины  $\text{tg } \delta$ , так как постоянная времени  $\tau_p$  сохранившихся видов релаксационной поляризации достаточно мала;

— с повышением температуры зерна его диэлектрическая проницаемость увеличивается с ростом на пониженных частотах крутизны характеристики  $\epsilon' = f(\vartheta)$  при повышении влажности. При рабочей частоте  $f_p = 30,0 - 35,0$  МГц эта характеристика линеаризуется, что сможет упростить введение температурной поправки;

— повышение рабочей частоты снижает влияние сорта и типа зерна на величину диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и при частоте порядка 25,0 МГц существенно снижается взаимосвязь между  $\epsilon'$  и сортом, либо типом зерна.

Изучение этих характеристик позволит сделать вывод о целесообразности измерения диэлектрической проницаемости при рабочей частоте порядка 30,0 МГц.

В главе III — Выбор схемы прибора, расчет элементов электронных блоков и определение погрешностей — дается анализ некоторых наиболее часто используемых для рассматриваемой цели схем и показывается, что наиболее рациональным является следующее решение.

Измерению подлежит полная проводимость датчика с материалом:

$$Y = y \cos \varphi + jy \sin \varphi = g + jb. \quad (11)$$

Рассматриваемый способ может дать приемлемые результаты только при минимальном влиянии первого члена правой части равенства на значение суммы в заданном диапазоне влажности. Снижение влияния абсорбционной проводимости\* может быть достигнуто путем выбора рабочей частоты в интервале 25,0—35,0 Мгц, где значения  $\operatorname{tg} \delta$  не превышают 0,15—0,25 при влажности зерна до 35% и температуре до 60°С. Ранее было показано, что влияние сорта и типа зерна на результат измерения также заметно снижается при выборе рабочей частоты в указанном диапазоне.

Выбор рабочей частоты порядка 30 Мгц позволяет также снизить погрешности, связанные с переменной плотностью укладки материала в датчике. И, наконец, выбор повышенной рабочей частоты упрощает систему термокомпенсации датчика.

Повышению рабочей частоты препятствуют факторы, связанные в первую очередь с инструментальными погрешностями прибора. Однако, как показывают расчеты, приведенные в приложениях к работе, сведение инструментальных погрешностей на порядок ниже методологических не требует ни усложнения аппаратуры, ни применения специальных деталей и материалов.

Приведенные соображения показывают, что при учете диэлектрических свойств зерна рабочая частота прибора должна быть выбрана в диапазоне 25—30 Мгц.

Предлагаемый принцип позволяет сохранить хорошую взаимосвязь между измеряемым параметром и влажностью и в то же время дает возможность использования сравнительно простых электронных схем. Весьма часто как в автоматических, так и в неавтоматических влагомерах используются дифференциальные схемы, работающие на частоте 1—3 Мгц (приборы ВС1-01 и т. д.).

Принципиально подобные схемы могут быть применены и на более высоких частотах, но показывают расчеты при рабочей частоте  $f_p = 30$  Мгц, разрешающая способность их может оказаться недостаточной для многих практических целей, если не применять специальных мер с целью ее повышения. Но не это является главным их недостатком. При создании автоматических влагомеров с непрерывной записью результатов анализа на диаграммную ленту необходимым условием является требование к равномерности шкалы устройства.

Дифференциальные схемы без функциональных преобразователей не способны удовлетворить этому требованию. К недостаткам этих схем можно также отнести нестабильность результатов измерения, связанную с изменением параметров

---

\* Устранение влияния сквозной проводимости рассматривалось ранее.

электронных ламп в процессе работы, а также необходимость подстройки прибора при замене электронных ламп.

При дальнейшем рассмотрении электронных схем была признана наиболее совершенной схема автоматического влагомера с автоматическим компенсатором.

При использовании метода биений подобная схема позволяет получить чрезвычайно высокую разрешающую способность. При подключении компенсирующей емкости к колебательному контуру вспомогательного генератора, установленного в блоке измерительного устройства, появляется возможность разнести датчик и измерительный блок на расстояние до 100—150 м, обеспечив согласование выхода генератора ВЧ датчика с линией связи через катодный повторитель.

По рассмотренной схеме был собран автоматический влагомер ОТИ-2. Методика расчета и результаты лабораторных и производственных испытаний этого влагомера приводятся в приложениях к работе.

Отличительной особенностью лабораторных и стендовых испытаний влагомера ОТИ-2 был их сравнительный характер: в аналогичных условиях точность определения влажности этим прибором сравнивалась с точностью измерения «емкостных» влагомеров, работающих на пониженных рабочих частотах 1—3 Мгц. В большинстве случаев точность практических результатов анализов хорошо согласуется с расчетными данными для прибора ОТИ-2 и, таким образом, для многих условий измерения с определенным запасом удовлетворяются требования к точности анализа  $\pm 1\%$ . Были также установлены некоторые преимущества высокочастотного прибора ОТИ-2 по сравнению с приборами, работающими на низких рабочих частотах при измерении влажности загрязненного или свежесушеного зерна и при переменной плотности укладки материала в датчике.

С другой стороны, была отмечена несколько большая сложность тарировки и подготовки прибора ОТИ-2 к работе. Самым существенным недостатком этого прибора является значительная погрешность измерения влажности при установке прибора в горячих зонах шахтных зерносушилок. При этом как высокочастотные приборы типа ОТИ-2, так и низкочастотные оказывались непригодными к работе из-за недопустимо большой погрешности измерения. Поэтому была признана необходимость дальнейшего продолжения работ в двух направлениях, позволяющих расширить область применения влагомеров:

— усовершенствовать и упрощать приборы типа ОТИ-2 с целью применения его в условиях, при которых «емкостной» высокочастотный метод определения влажности обеспечит требуемую точность измерения;

— вести поиск новых методов определения влажности, способных обеспечить требуемую точность в самых сложных условиях измерения.

В главе IV — Пути совершенствования методов автоматического применения влажности зерна — приводятся данные по модернизации прибора ОТИ-2.

Модернизированные влагомеры ОТИ-2 испытывались и длительно эксплуатировались на Московском мельзаводе «Новая Победа», а также на входе и выходе из шахтной зерносушилки Бийского элеватора и обеспечили требуемую точность измерений и надежность в работе. Так, например, по данным завода «Новая Победа», среднеквадратное значение отклонения показаний влагомера ОТИ-2 составляет 0,37% от результатов анализов по стандартному методу; аналогичные результаты были получены и на Бийском элеваторе.

Однако результаты стендовых испытаний на Кустанайской МИС показали, что при резком нагреве зерна повышенной влажности (23%  $W$  и выше) погрешности измерений растут, достигая 6—10%  $W$ , независимо от конструкции датчика влагомера, системы термокомпенсации и рабочей частоты. Хаотичный характер возникновения указанной погрешности затруднял выявление условий, способствующих ее появлению. Для исследования этого явления была проведена специальная проверка на установке, позволяющей широко варьировать условия нагрева зерна. В результате проведенного исследования была найдена причина рассматриваемого явления: при резком нагреве зерновой массы и последующей даже кратковременной отлежке материала интенсивно выделяющаяся на поверхности влага образует мостики, замыкающие накоротко обкладки датчика. Присутствие даже незначительного количества электролита приводит в рассматриваемых условиях к резкому увеличению диэлектрических потерь. При этом нестабильность образования мостиков влаги чрезвычайно затрудняет расчет ожидаемых погрешностей и борьбу с причинами их возникновения.

При помощи специально разработанного измерителя были измерены значения  $\epsilon'$  и  $\operatorname{tg} \delta$  применительно к рассматриваемым условиям. При анализе данных отмечены расхождения со значениями этих параметров, определенными ранее в обычных условиях и, если отклонения значений  $\epsilon'$  были несущественными, то значения  $\operatorname{tg} \delta$  отличались в несколько раз.

Первоначально для измерения влажности зерна при неблагоприятных условиях предполагалось использовать принцип измерителя ОТИ, разделяющего составляющие полной проводимости. Однако это решение не было признано лучшим, т. к. оно не исключало погрешности, связанные с влиянием природы зерна и ряда других факторов.

Поэтому в результате анализа диэлектрических свойств зерновой массы в широком диапазоне рабочих частот и учета закономерностей поляризации диэлектриков сложного состава на существенно отличных рабочих частотах в начале 1963 г. были сформулированы основные принципы нового метода определения влажности, условно названного «компенсационным».

В отличие от обычного «емкостного» метода определение влажности, использующего зависимость  $\epsilon = f(W)$ , здесь определяется разность приращений диэлектрической проницаемости на разных рабочих частотах.

Таким образом, измерению подлежит величина

$$\Delta\epsilon = \epsilon_1(W) - \epsilon_2(W), \quad (17)$$

где  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — значения диэлектрической проницаемости соответственно для частот  $f_1$  и  $f_2$ .

Идеализируя этот принцип, можно предположить, что при изменении условий измерения в равной степени изменяется ход характеристик  $\epsilon_1(W)$  и  $\epsilon_2(W)$  и, следовательно, взаимосвязь  $\Delta\epsilon = f(W)$  остается неизменной для всех условий измерения.

Практически, подобное условие не соблюдается и необходимо вносить определенную коррекцию во влияние обоих членов разности (17) на девиацию частоты  $f_{\text{раз}}$  на выходе датчика путем надлежащего выбора коэффициентов перекрытия по частоте каждого из генераторов.

При правильно выбранных рабочих частотах  $f_1$  и  $f_2$  и требуемой глубине коррекции можно получить исключительно высокую однозначность характеристики  $f_{\text{раз}} = \varphi(W)$ .

При практическом осуществлении рассматриваемого метода может быть рекомендована следующая методика выбора рабочих частот и коэффициентов перекрытия по частоте: измерению подлежит

$$\Delta f_{\text{раз}} = \Delta f_1(W) - \Delta f_2(W).$$

Рабочая частота одного из генераторов  $f_1$  выбирается такой, чтобы его контур был нагружен минимальным сопротивлением потерь. Расчеты и практические зависимости диэлектрических свойств зерна показывают, что оптимум значения  $f_1$  лежит в пределах 35—45 Мгц. Коэффициент перекрытия по частоте  $kf_1$  ограничивается с датчиком разделительного конденсатора  $C_0$ , обеспечивающего надежную генерацию во всем диапазоне диэлектрических потерь материала и параллельно подключенных термокомпенсирующих и монтажной емкостей. Здесь обеспечивается ощутимое приращение  $\Delta f_1(W)$  и относительно малое влияние посторонних факторов: плотности укладки материала в датчике, типа и сорта зерна, температуры и способа увлажнения зерна.

Рабочая частота второго генератора  $f_2$  выбирается так, чтобы перечисленные вредные влияния проявлялись достаточно интенсивно. Это позволяет выбрать малое значение коэффициента перекрытия  $kf_2$ , при котором обеспечивается требуемая компенсация влияний и в то же время сокращается высокая чувствительность прибора, так как изменение  $\Delta f_2(W)$  невелико. Оптимум лежит в пределах 6—7 Мгц. Дальнейшему снижению частоты препятствуют не только методологические соображения, но и факторы конструктивного характера, т. к. несмотря на фильтрацию возможно проникновение гармоник частоты  $f_2$ , могущих дать нежелательные биения с  $f_1$  и  $f_{раз}$ .

Расчеты, приведенные в работе, иллюстрируют принцип выбора глубины коррекции и показывают, что при самых неблагоприятных условиях измерения «компенсационный» метод определения влажности способен обеспечить требуемую точность  $\pm 1\%$ .

Лабораторные испытания прибора ОТИ, построенного на этом принципе, показали хорошее соответствие расчетных значений погрешностей и практически полученных результатов.

Дальнейшие испытания позволили установить, что в обычных режимах работы, соответствующим лабораторным условиям определения влажности зерна, прибор ОТИ, способен обеспечить точность измерений, удовлетворяющую требованиям ГОСТа 3040-55 на зерновые влагомеры.

## ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Электрические методы, обладая рядом преимуществ в сравнении с простыми способами определения влажности материалов, не вошли прочно в практику анализа и там, где позволяет время, эксплуатационники предпочитают пользоваться методами высушивания, ссылаясь на ненадежность результатов, даваемых электровлагомерами.

Подобный разрыв между теоретическими выводами и практическими результатами зависит от многих причин, но основа неудач заключается прежде всего в направленном применении влагомеров; в стремлении к излишней универсальности приборов, могущих обеспечить требуемую точность измерений лишь при строго конкретных условиях анализа.

Например, совершенно очевидно, что кондуктометрический метод может обеспечить достоверные результаты при влажности зерна до 20%  $W$ , в то время как таблицы к прибору ВЭ-2 содержат данные для более высоких значений влажности зерна и т. п.

Поэтому данная работа не могла считаться законченной, если бы она не содержала рекомендаций по применению электрических влагомеров для определения влажности зерна.

1. Кондуктометрические влагомеры ввиду своей простоты и дешевизны не должны исключаться из обращения, но они обеспечат требуемую точность измерений только при соблюдении следующих условий:

— диапазон измеряемой влажности должен быть ограничен пределами 10—20%  $W$ ;

— тарировка шкал приборов должна производиться на том типе и сорте зерна, влажность которого подлежит определению в дальнейшем;

— обязательно принудительное уплотнение образцов и поэтому построение автоматических приборов нецелесообразно, т. к. чрезмерно усложняется конструкция датчика;

— измерение влажности свежепосушенного и свежемоченого зерна недопустимо без предварительного тщательного измерения и перемешивания образца;

— температурная поправка должна вноситься по специальной методике, гарантирующей требуемую точность измерения температуры зерна, причем верхний предел температуры зерна желательно ограничить значением  $\vartheta = 35\text{—}40^\circ\text{C}$ .

2. Применение влагомеров, построенных на принципе определения диэлектрических потерь на отрицательно низких рабочих частотах, нецелесообразно, так как, не обладая существенными преимуществами по сравнению с кондуктометрическими влагомерами, эти приборы заметно сложнее и дороже.

3. Наиболее простые среди «емкостных» влагомеров приборы, работающие на невысоких рабочих частотах (1—3 МГц), у которых не устранено влияние активной проводимости материала, могут применяться для практических целей при выполнении следующих условий:

— приняты специальные меры по обеспечению воспроизводимости заполнения датчика;

— зерно, подлежащее анализу, будет того же типа, сорта и, примерно, с таким же содержанием примесей как и зерно, на котором производилась тарировка шкалы прибора;

— после увлажнения, либо сушки зерна измерение влажности производится не ранее чем через 6—8 часов;

— температурная поправка вносится по специальной методике, гарантирующей необходимую точность измерения температуры зерна, либо автоматически. В последнем случае из-за нелинейности характеристики  $\Delta\epsilon = f(\vartheta)$  желательно ограничить максимальную температуру значением  $\vartheta = 35^\circ\text{C}$ ;

— желательно также ограничить максимально допустимую для анализа влажность зерна значением  $W = 22\text{—}23\%$ .

При выполнении этих условий приборы указанной группы могут обеспечить точность измерений в пределах  $\pm 1\%$ . Очевидно, что низкочастотные «емкостные» влагомеры не имеют каких-либо существенных преимуществ по сравнению с при-

борами, использующими кондуктометрический принцип определения влажности. Тем не менее их применение возможно для автоматизированных измерений влажности в потоке, так как рассматриваемый принцип допускает укладку материала в датчике без принудительного уплотнения.

4. Влагомеры, работающие на принципе измерения реактивной составляющей полной проводимости, могут обеспечить точность измерений, удовлетворяющую большинство практических целей. Если в этих приборах используется повышенная рабочая частота (25—35 МГц), то ограничения, препятствующие их применению, сводятся к обеспечению воспроизводимости заполнения датчика зерном и правильному внесению температурной поправки.

Как показано в работе, использование этого принципа определения влажности более целесообразно для лабораторных приборов.

5. Автоматические влагомеры с минимальным числом ограничений более целесообразно строить без разделения составляющих полной проводимости при условии выбора относительно высокой рабочей частоты (25—35 МГц). Влияние вредных факторов на точность измерения для таких приборов будет несколько большим, чем в предыдущем случае. Как показали исследования влагомера ОТИ-2, в котором используется рассматриваемый принцип, точность измерений  $\pm 1\%$  в диапазоне 10—30%  $W$  может быть обеспечена при выполнении следующих условий:

— обеспечивается воспроизводимость заполнения датчика материалом (колебания плотности могут быть несколько большие, чем для «емкостных» влагомеров с частотой 1 — 2 МГц);

— свежееувлажненное, либо подсушенное зерно повышенной влажности подвергается анализу после отлежки в течение 20—40 мин.;

— температурная поправка вносится автоматически.

Приборы всех рассматриваемых выше групп недопустимо применять в особо сложных условиях измерений как, например, в условиях горячей зоны шахтной зерносушильной установки при зерне повышенной влажности.

6. «Компенсационные» влагомеры типа ОТИ, свободные от приведенных выше ограничений, предназначаются для определения влажности зерна при особо неблагоприятных условиях измерения. Для измерений повышенной точности в лабораторных условиях предназначен влагомер типа ОТИ не автоматический.

Оба эти прибора, действующие на «компенсационном» принципе определения влажности, являются конкурентноспособными в точности измерения с наиболее сложными приборами, действующими на основе явления ЯМР, так как

предъявляют менее жесткие требования к объему образцов и их расположению в рабочем поле.

—о—

Результаты исследований опубликованы в следующих работах:

1. Прибор для определения влажности зерна, «Радио», № 9, 1960.
2. Установка совмещенного контроля температуры и влажности, «Мукомольно-элеваторная промышленность», №7, 1962.
3. Автоматический электронный влагомер, «Радио», № 8, 1962.
4. Выбор параметров зерновых влагомеров, «Вестник Высшей школы — Пищевая технология», № 2, 1963.
5. Автоматический электронный влагомер для контроля и регулирования влажности зерна при сушке, Автоматизация процессов сушки, Машгиз, 1963.
6. Электронный влагомер. Авторское свидетельство № 538091.
7. Компенсационный метод определения влажности. Авторское свидетельство № 815351.

По материалам диссертации сделаны доклады:

1. Автоматический электронный влагомер для контроля и регулирования влажности зерна при сушке (Всесоюзное научно-техническое совещание по автоматизации процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве, Москва, 22—24 мая, 1962 г.).
2. Автоматические влагомеры ОТИ-2 и ОТИ (Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова, XXVI научная конференция, 25 марта — 20 апреля, 1964 г.).
3. «Компенсационный» влагомер ОТИ (Комиссия по измерению влажности при Госкомитете по средствам автоматизации и приборостроению, Москва, июнь, 1965 г.).
4. «Компенсационный» метод определения влажности. Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов сушки в химической и смежных с ней отраслях промышленности. Москва, 20—22 октября, 1965 г.

—————