

05.13.01
М42

На правах рукописи



МЕДВЕДЕВСКИХ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**АЛГОРИТМЫ
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ
ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВЛАГОМЕТРИИ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск - 2001

Диссертационная работа выполнена в Уральском научно-исследовательском институте метрологии и на кафедре «Информационно-измерительная техника» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Шестаков А.Л.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Ширяев В.И.;
кандидат технических наук Степановских В.В.

Ведущее предприятие –
Уральский государственный технический университет (г. Екатеринбург).

Защита состоится 26 декабря 2001 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 в Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал ЮУрГУ (ауд. 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан " 23 " ноября 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.М. Коровин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Измерения влажности стандартизованными термогравиметрическими средствами влагометрии для тысяч веществ регулярно проводят при контроле промышленной и сельскохозяйственной продукции. Влагометрия твердых веществ характеризуется появлением экспрессных термогравиметрических средств, которые, по сравнению со стандартизованными средствами, позволяют в несколько раз сократить время измерений влажности термогравиметрическим методом. При повышении точности измерений влажности применением современных методов обработки информации можно повысить точность измерения экспрессными термогравиметрическими средствами влагометрии до уровня, предусмотренного стандартами на методы измерения влажности твердых веществ, обеспечив тем самым их эффективное внедрение и использование при технологическом и приемо-сдаточном контроле влажности продукции в сферах распространения государственного метрологического надзора.

В этой связи актуальным является вопрос разработки моделей процесса измерений влажности, учитывающих специфику объектов, термогравиметрического метода, средств влагометрии, и создания на их основе универсальных алгоритмов обработки информации и принятия решений при минимизации и контроле погрешности измерений влажности термогравиметрическим методом. Применение таких алгоритмов позволит упростить процесс разработки и обеспечить эффективность методик выполнения измерений влажности данного вещества и методик поверки экспрессных универсальных термогравиметрических влагомеров.

Объектом исследования являются термогравиметрические средства влагометрии.

Предметом исследования являются алгоритмы обработки информации и принятия решений при минимизации погрешности измерения влажности твердых веществ и модели процесса измерений влажности.

Цель работы заключается в повышении точности измерений влажности твердых веществ при функционировании термогравиметрических средств влагометрии применением алгоритмов обработки информации и принятия решений, разработанных на основе моделей процесса измерений влажности.

Методы исследования базируются на использовании статистических методов анализа информации и методов математической физики.

Достоверность и обоснованность. Математические модели, предложенные в работе, основаны на корректном использовании фундаментальных положений математической физики и математической статистики. Разработанные алгоритмы содержат статистические критерии для получения результатов с заданным уровнем достоверности. Экспериментальная проверка результатов работы проводилась с применением стандартизованного термогравиметрического метода, ее достоверность подтверждается совпадением результатов измерения влажности

Южно-Уральский
гос. университет
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

различных веществ, полученных с использованием разработанных алгоритмов и стандартизованным термогравиметрическим методом.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана и исследована физико-математическая модель убыли воды и других летучих компонентов состава вещества при произвольном режиме его нагрева от различных источников, позволяющая описать все стадии процесса измерений влажности пористых веществ термогравиметрическими средствами влагометрии с учетом их технических характеристик. Выявлены физические условия минимизации погрешности измерений влажности термогравиметрическим методом.

2. На основе моделей процесса измерений влажности, методов конфлюэнтного, дисперсионного анализа и прямого поиска разработаны и исследованы алгоритмы поиска оптимальных значений параметров процесса измерений влажности, обеспечивающие минимум погрешности измерений при наличии и при отсутствии априорной информации об однородности проб анализируемого вещества.

3. Разработан алгоритм оценки влажности вещества, основанный на моделях процесса измерений влажности и введении дополнительной информации о поведении процесса измерений однородных проб вещества с известными добавками воды при реализации избирательного нагрева разных летучих компонентов состава вещества, позволяющий минимизировать погрешность измерения путем оценки вклада в результат измерения влажности массы испарившейся из вещества воды.

4. На основе моделей процесса измерений влажности разработаны алгоритмы принятия решений о пригодности для измерений экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа без использования натурального вещества – объекта измерений влажности, эффективно работающие в случае измерений влажности веществ, для которых установлены оптимальные значения параметров процесса измерений влажности термогравиметрическими средствами данного типа.

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем:

1. Модели погрешности и процесса измерений влажности позволяют, при отсутствии стандартных образцов состава влажных твердых веществ и априорной информации об объектах и погрешностях термогравиметрического метода и средств влагометрии, оценить по отдельности вклады в погрешность измерений от объекта, метода и средств влагометрии, определить условия минимизации погрешности.

2. Алгоритмы поиска оптимальных значений параметров процесса измерений влажности обеспечивают статистическую незначимость вклада отличных от воды летучих компонентов состава вещества в результаты измерения влажности, что дает возможность разрабатывать на их основе наиболее простые методики выполнения измерений влажности. Алгоритмы предусматривают оценку минимального количества измерительной информации, необходимого для

обеспечения заданного уровня достоверности решений, принимаемых в результате ее обработки. Их использование позволяет осуществить поиск оптимального времени измерений влажности термогравиметрическим методом.

3. Алгоритмы оценки влажности вещества, минимизирующие погрешность измерения путем оценки вклада в результат измерения влажности массы испарившейся из вещества воды, могут быть использованы при измерениях влажности сложных органических веществ и при разработке методов измерений влажности повышенной точности.

4. Алгоритмы принятия решений о пригодности для измерений экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа без использования натурального вещества – объекта измерений влажности позволяют упростить и автоматизировать процесс поверки универсальных термогравиметрических средств влагометрии.

5. Алгоритм принятия решений об однородности проб вещества позволяет при отсутствии априорной информации о качестве методики подготовки проб вещества оценить качество входной информации, используемой в алгоритмах принятия решений и обработки данных.

Реализация результатов работы. Предложенные в работе модели процесса измерений влажности и алгоритмы обработки информации и принятия решений использованы при внедрении и эксплуатации экспрессных универсальных термогравиметрических средств типа МА-30 на стадии государственных испытаний для целей утверждения типа средств измерений и для их поверки, при разработке и аттестации методик выполнения измерений влажности, применяемых при приемо-сдаточном и технологическом контроле веществ и обязательных сертификационных испытаниях пищевой продукции и продовольственного сырья для 59 различных веществ (медицинских препаратов, угля, минеральных удобрений, пищевых продуктов и др.).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрение на научно-техническом совете УНИИМ в 1994 – 2001 г.г.

Результаты работы докладывались на VII Всесоюзной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Госстандарта СССР «Повышение роли стандартизации и метрологии в обеспечении интенсификации общественного производства» (г. Казань, 1987 г.); VIII Всесоюзной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Госстандарта СССР «Метрология и стандартизация в научно-технической революции» (Новосибирск, 1989 г.); II Сибирской конференции по метрологическому обеспечению аналитических методов в сельском хозяйстве (Новосибирск, 1990); VI Уральской научно-практической конференции по метрологии (Екатеринбург, 1998 г.)

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 23 печатных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (142 наименования) и двух приложений. Основная часть работы содержит 159 с., 26 рис., 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе рассмотрены различные модификации термогравиметрического метода измерений влажности и характерные особенности объектов, метода и средств измерений. Проведен анализ применяемых во влагометрии, одной из областей количественного химического анализа (КХА), алгоритмов обработки информации и принятия решений. В настоящее время наибольшее распространение получили алгоритмы обработки информации и принятия решений при оценке и контроле погрешностей результатов КХА, которые наиболее полно отражены в работах В.И. Паневой. В их основе лежит разделение погрешности результатов КХА на систематическую и случайную составляющие. Для учета неоднородности вещества обычно используют алгоритм, разработанный Д.П. Налобиным для случая стандартных образцов (СО) состава веществ, предназначенный для оценки характеристик неоднородности и массы наименьшей представительной пробы и основанный на применении модели дисперсии результатов измерений в виде суммы дисперсий от неоднородности и от метода и средства измерений.

Во влагометрии твердых веществ в условиях отсутствия для большинства твердых веществ СО состава, аттестованных смесей и поверочных схем, при использовании разрушающего пробу вещества термогравиметрического метода анализа, при оценке систематической составляющей погрешности результатов измерения влажности исключить влияние неоднородности и других влияющих факторов вещества. Поэтому в настоящее время отсутствует приемлемое для практики влагометрии решение задачи повышения точности измерений влажности в рамках традиционных метрологических средств и методов.

В работах В.Г. Романова, В.П. Иванова, В.И. Корякова, А.С. Запорожец и других авторов, при исследовании структуры систематической составляющей погрешности результатов измерений влажности зерна и некоторых других веществ вакуумно-тепловым методом, была использована модель погрешности измерения влажности, позволяющая учитывать влияние вакуумно-теплового метода и средств влагометрии на погрешность измерения. Однако эмпирический характер модели, отсутствие учета неоднородности и наличия в составе вещества отличных от воды летучих компонентов не позволяет решить полностью задачу минимизации погрешности измерений влажности.

Перспективной является интерпретация модели погрешности измерений влажности на основе общей модели погрешности динамических измерений, учитывающей в общем виде влияние объекта, метода и средств измерений, предложенной в работе В.А. Грановского.

В работах Е.С. Кричевского, Р.М. Проскуракова и А.Г. Волченко для описания процесса измерений влажности термовакуумным методом использованы ряд теоретических результатов теории тепломассопереноса А.В.

Лыкова и система из двух уравнений: теплового баланса и эмпирической модели убыли массы вещества, что способствовало синтезу целого класса термовакуумных систем.

В этой связи актуальным является вопрос разработки моделей процесса измерений влажности, учитывающих специфику объектов, термогравиметрического метода и средств влагометрии, и создания на их основе универсальных алгоритмов обработки информации и принятия решений при минимизации и контроле погрешности измерений. Его решение позволит повысить точность измерения влажности на универсальных экспрессных термогравиметрических средствах влагометрии до уровня, предусмотренного стандартами на методы измерения влажности твердых веществ, за счет детального исследования процесса и погрешностей измерений влажности.

Во второй главе построены модели процесса измерений влажности, позволяющие учитывать влияние на результаты измерения объектов, термогравиметрического метода и средств влагометрии. Получены условия минимизации погрешности измерений влажности.

Интегральная физико-математическая модель измеряемой величины – убыли массы вещества при измерениях влажности вещества термогравиметрическим методом, с учетом наличия в составе вещества отличных от воды летучих компонентов и технических характеристик термогравиметрических средств влагометрии, была построена на основе локальных моделей тепломассопереноса А.В. Лыкова и положений об аддитивном и двухстадийном характере процесса массопереноса воды и других летучих компонентов состава вещества, описании процесса теплопереноса уравнением теплового баланса. При этом влажные твердые вещества моделировались как пористое тело, имеющее твердый, непроницаемый для влаги и летучих компонентов «скелет», в пустотах которого находится вода и другие летучие компоненты состава вещества.

В рамках этой модели начальное количество воды и летучих компонентов, находящихся в конденсированной фазе во влажном материале, выраженное в виде массовых отношений $X_i(0) = X_{i0}$, кг/кг, при нагреве вещества превращается в газ, количество которого равно $x_i(t)$, кг/кг, $i = \overline{0, l}$ в момент времени измерений – t . Индекс «0» соответствует воде, и в веществе содержится конечное количество различных отличных от воды летучих компонентов состава вещества равное « l ». Из образовавшегося газа получается второй продукт $y_i(t)$, кг/кг, который представляет собой убыль газообразной влаги и летучих с поверхности материала $y_i(t) = X_{i0} - X_i(t)$, где $X_i(t)$ – массовое отношение воды и летучих в веществе в зависимости от времени измерения – t . Уравнения убыли массы и изменения температуры вещества для этого случая можно записать в виде:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = K_{1i}(t)(X_{i0} - x_i(t)), \quad x_i(0) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = K_{2i}(t)(x_i(t) - y_i(t)), \quad y_i(0) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{\alpha}{\rho CR} (T_c - T(t)) - \frac{r}{C} \frac{dx_i(t)}{dt} + \frac{Q(t, \gamma, \{\gamma_i\}, X_{0i}, Q_0(t, h(t)))}{\rho C}, \quad (3)$$

$$i = \overline{0, l}, \quad T(0) = T_0, \quad Q_0(0, h(0)) = 0, \quad Q(0, \gamma, \{\gamma_i\}, U_0, Q_0(0, h(0))) = 0,$$

где $T(t)$ – средняя (интегральная) температура влажного вещества в момент времени сушки t , $K, T_0 \equiv T(0)$ – начальная температура влажного вещества, K, T_c – температура окружающей среды, K, α – коэффициент внешнего теплообмена, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})$, C – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, R – "гидравлический радиус", равный отношению объема тела к площади его поверхности, м, r – удельная энергия фазового перехода жидкость–газ, $\text{Дж}/\text{кг}$, $Q(t, \gamma, \{\gamma_i\}, U_0, Q_0(t, h(t)))$ – количество энергии, поглощенное веществом в момент времени t , зависящее в общем случае от количества энергии, подводимого к пробе анализируемого вещества в единицу времени – $Q_0(t, h(t))$, $\text{Дж}/\text{с}$, и от обобщенного набора теплофизических характеристик вещества, воды и летучих компонентов – γ и $\{\gamma_i\}$, выражаемого в общем случае конечным числом скаляров; $h(t)$ – обобщенный набор параметров процесса измерения, зависящий от технических характеристик термогравиметрических установок и влагомеров, выражаемый в общем случае конечным числом скаляров и функций; $K_{1i}(t)$ и $K_{2i}(t)$ – некоторые коэффициенты, зависящие от времени измерений t . Блок-схема термогравиметрических средств влагометрии приведена на рис. 1.

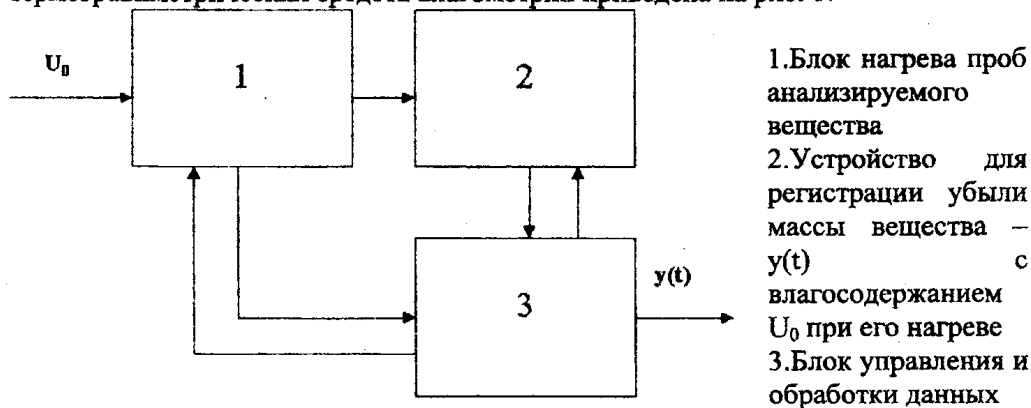


Рис.1. Блок-схема термогравиметрического средства влагометрии

Системы уравнений (1) – (3) представляют из себя «l + 1» замкнутых систем из трех дифференциальных уравнений каждая, которые позволяют описать процессы тепло- и массопереноса воды и летучих компонентов в веществе на всех стадиях процесса измерений влажности и найти аналитическое выражение для измеряемой величины – убыли массы воды и летучих в процессе измерения влажности термогравиметрическим методом – $\mathcal{X}(t)$ в виде

$$\mathcal{X}(t) = \sum_{i=0}^l y_i(t) \approx U_0 \varphi(t, Q_0(t, h(t)), \gamma, \gamma_0) + V(t, Q_0(t, h(t)), \gamma, \{\gamma_i\}) \quad (4)$$

где $U_0 \varphi(t, Q_0(t, h(t)), \gamma, \gamma_0) \equiv y_0(t)$ – некоторая непрерывная неубывающая функция; $V(t, Q_0(t, h(t)), \gamma, \{\gamma_i\}) \equiv \sum_{i=1}^l y_i(t)$ – некоторая непрерывная неубывающая функция, описывающая количество отличных от воды летучих компонентов, испарившихся из вещества к моменту времени сушки – t .

Модель убыли массы вещества (1) – (4) дает возможность с учетом технических характеристик термогравиметрических средств измерений влажности описать все стадии процесса измерений влажности при наличии в составе веществ отличных от воды летучих компонентов.

Для построения статистической модели процесса измерений влажности (модели погрешности измерений) были использованы результаты работ В.А. Грановского. При этом было учтено, что погрешности результатов измерений влажности твердых веществ термогравиметрическим методом обусловлены следующими причинами:

- отличиями друг от друга экземпляров однотипных термогравиметрических средств влагометрии, порождающих отклонения их функционалов преобразования – $\tilde{F}(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) \equiv \tilde{F}(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}, \gamma, \{\gamma_i\}) = \mathcal{X}(t)$ от номинального функционала преобразований $F_h(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) \equiv M\tilde{F}(t, \tilde{h}(t), \tilde{U})$, M – знак математического ожидания, взятого по совокупности их экземпляров;

- случайными погрешностями поддержания параметров функционала преобразований $\tilde{h}(t) = h(t) + \chi(t)$, $h(t)$ – некоторое номинальное значение параметров, $\chi(t)$ – случайная величина, характеризующая отклонения реального значения параметра – $\tilde{h}(t)$ от его номинального значения – $h(t)$;

- случайными погрешностями преобразования входных и регистрации выходных величин, связанными со случайными погрешностями конкретных экземпляров измерительных устройств – $\xi(\tilde{U}, \chi(t))$;

- отклонениями номинального функционала преобразований – $F_h(t, \tilde{h}(t), \tilde{U})$ от идеального – $F_0(U_0) \equiv F_0(t, \tilde{h}(t), U_0, \gamma, \{\gamma_i\}) = U_0$, связанными с наличием в составе влажных твердых веществ отличных от воды летучих компонентов и неполным извлечением всей имеющейся в веществе воды при измерениях влажности термогравиметрическим методом;

– случайным характером входных величин $\tilde{U} = U_0 + \eta$, где U_0 – влагосодержание идеально однородного вещества, для каждого элемента объема которого справедливо соотношение $U_0 = U(\vec{r})$, $\forall \vec{r} \in V$, \vec{r} – вектор координат, V – объем вещества, η – случайная величина, моделирующая случайный разброс влагосодержания одинаковых проб вещества, обусловленный его неоднородностью.

Считая, что выполняются следующие условия $\tilde{F}(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) = F(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) + \xi(\tilde{U}, \chi(t))$; $\xi(\tilde{U}, \chi(t)) = \alpha \xi'(\tilde{U}, \chi(t))$; $\eta = \varepsilon \eta'$; $\chi(t) = \delta \chi'(t)$; $F(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) = F_n(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) + \beta \psi(t, \tilde{h}(t), \tilde{U})$, $\alpha, \beta, \delta, \varepsilon$ – малые положительные числа ($\alpha \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0, \delta \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 0$), характеризующие величину погрешностей, и, ограничиваясь первым порядком малости разложения в ряд Тейлора функционалов $F(t, \tilde{h}(t), \tilde{U})$, $F_n(t, \tilde{h}(t), \tilde{U})$ и $\xi(\tilde{U}, \chi(t))$ для погрешности измерений влажности – Δu , получены следующие выражения:

$$\Delta u = \tilde{F}(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}) - U_0 = [F(t, \tilde{h}(t), U_0) - F_n(t, \tilde{h}(t), U_0)] + [F_n(t, \tilde{h}(t), U_0) - F_0(U_0)] + \langle \partial F(t, \tilde{h}(t), U_0), \eta \rangle + \xi(U_0, \chi(t)), \quad (5)$$

$$\Delta u = [F(t, h(t), U_0) - F_n(t, h(t), U_0)] + [F_n(t, h(t), U_0) - F_0(U_0)] + \langle \partial F(t, h(t), U_0), \eta \rangle + \langle \partial F(t, h(t), U_0), \chi(t) \rangle + \xi(U_0), \quad (6)$$

где $\langle \partial F(U_0), \eta \rangle$ – знак слабого дифференциала (дифференциала Гато) функционала $F(\tilde{U})$ в точке U_0 при приращении η' .

Из модели (5) следует, что в погрешность измерений влажности данного вещества всегда, даже для случая идеального функционала преобразований, вносит вклад неоднородность вещества по составу и свойствам. Из-за этого невозможна минимизация случайной составляющей погрешности измерений путем подавления случайной составляющей за счет многократных измерений входной величины.

Поэтому наилучшим условием минимизации погрешности измерений влажности термогравиметрическим методом будет условие минимума систематической составляющей погрешности в виде $M\Delta u = 0$, где M – математическое ожидание берется относительно всей совокупности экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа, относительно случайных отклонений значений параметров процесса измерений от их заданных значений и относительно случайной входной величины влажности однородных проб вещества – \tilde{U} .

Тогда задача минимизации погрешности сводится к задаче поиска условного экстремума погрешности как функции времени и ограниченного набора параметров процесса измерения, определяющего характер подвода энергии к пробам анализируемого вещества – $Q_0(t, h(t))$.

При этом достоверность получаемых оценок может быть обеспечена путем проверки однородности проб анализируемого вещества в пределах случайного разброса их влажности — Δ_n и контроля одинаковости всей совокупности экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа в пределах случайного разброса их функционалов преобразований.

В третьей главе на основе модельных представлений о погрешности и процессе измерений влажности, методов прямого поиска, конъюнктного и дисперсионного анализа и теории проверки статистических гипотез разработаны алгоритмы обработки информации и принятия решений, применяемые при минимизации погрешности измерений влажности путем учета неоднородности вещества и наличия в его составе отличных от воды летучих компонентов. Получены алгоритмы контроля термогравиметрических средств влагометрии без использования натурального вещества — объекта измерений и определены условия их эффективного применения.

В отсутствие априорной информации о степени однородности проб данного вещества, подготовленных по данной методике, проверку однородности групп проб вещества можно провести путем обработки результатов измерения их влажности стандартизованными термогравиметрическими средствами влагометрии, функционал преобразования которых был принят за идеальный функционал.

Принятие решений об однородности m -групп из n -проб вещества в каждой группе означает выполнение условия:

$$C_{11} = C_{22} = \dots = C_{mm}, \quad (7)$$

где C_{ij} — диагональные элементы ковариационной матрицы результатов измерений, характеризующие разброс значений влагосодержания проб вещества внутри i — группы проб вещества;

условия одинаковости по влагосодержанию проб вещества между группами

$$M\langle \partial F_0(U_{0i}), \eta_{ij} \rangle = 0, \quad \forall i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (8)$$

где M — математическое ожидание берется относительно случайной величины $\tilde{U}_{ij} = U_{0i} + \eta_{ij}$ — реального значения влагосодержания j -пробы вещества из i — группы; U_{0i} — истинное значение влагосодержания i -группы проб вещества.

Предложенный алгоритм принятия решений об однородности m -групп из n -проб вещества в каждой группе основан на статистической теории принятия решений и, в случае нормального распределения результатов измерений и независимости случайных величин η_{ij} , заключается в проверке условия (7) по критерию Кохрена и условия (8) — по критерию Фишера. Особенность алгоритма заключается в использовании предварительно экспериментально полученной для каждого данного вещества и данной методики подготовки его однородных проб оценки величины — Δ_n , позволяющей определить зону безразличия (неопределенности принимаемых решений) при проверке статистических гипотез по критерию Неймана — Пирсона и оценить минимальный объем измерительной

информации, необходимый для обеспечения заданного уровня достоверности принимаемых решений, определяемого величинами вероятностей ошибок первого и второго рода по рассчитанным в процессе выполнения работы таблицам и графикам в зависимости от величины $-\Delta_H$.

При минимизации погрешностей измерений влажности данного вещества термогравиметрическими средствами влагомерии путем учета наличия в его составе отличных от воды летучих компонентов в работе предложены для использования алгоритмы обработки информации и принятия решений, разработанные на основе моделей процесса измерений (1) – (6). Зависимости погрешности измерений влажности от времени и эффективной температуры нагрева вещества при наличии и при отсутствии в составе анализируемого вещества отличных от воды летучих компонентов представлены на рис. 2, 3.

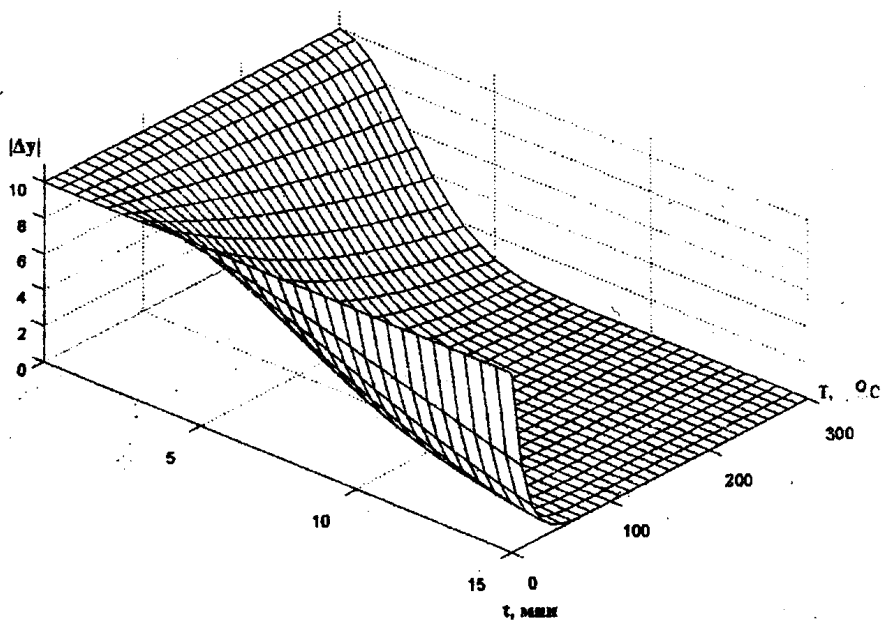


Рис. 2. Зависимость модуля погрешности измерений влажности от времени и эффективной температуры сушки вещества, не содержащего в составе отличных от воды летучих компонентов

Алгоритмы, связанные с обеспечением статистической незначимости вклада в результат измерения влажности отличных от воды летучих компонентов состава анализируемого вещества, основаны на поиске оптимальных значений параметров процесса измерений, при которых коэффициенты скорости превращения в газ летучих в веществе в уравнении (1): $K_{10}(t) \gg K_{1i}(t)$ или $K_{10}(t) \ll K_{1i}(t)$ и извлечения летучих из вещества в уравнении (2): $K_{20}(t) \gg \gg K_{2i}(t)$ или

$K_{20}(t) \ll K_{2i}(t)$, при $t > 0$ и $i > 0$, $i = \overline{0, l}$. При этом считалось, что режим подвода энергии к пробам вещества – $Q_0(t, \tilde{h}(t))$ полностью определяется техническими

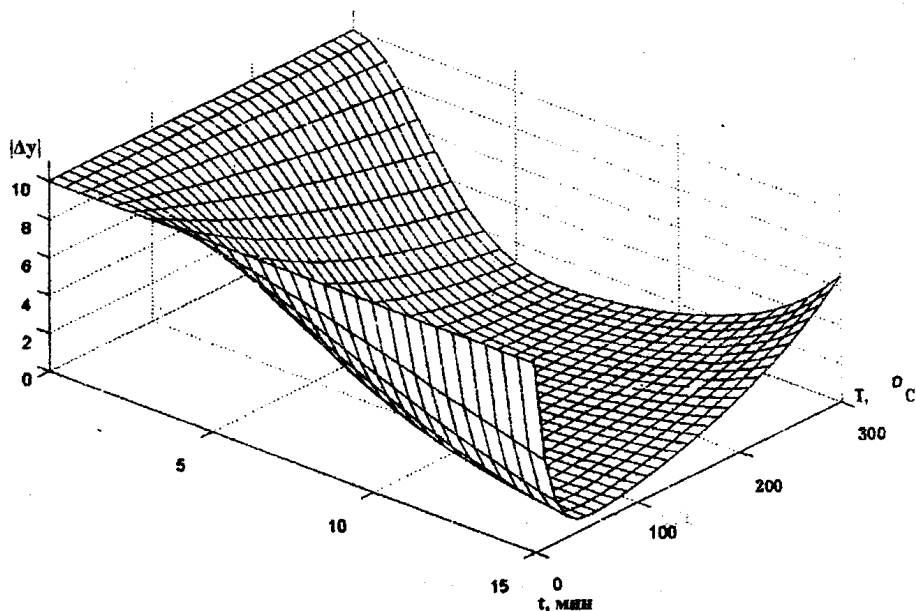


Рис. 3. Зависимость модуля погрешности измерений влажности от времени и эффективной температуры сушки вещества, содержащего в составе отличные от воды летучие компоненты

характеристиками термогравиметрических средств влагометрии следующим образом.

Функция $Q_0(t, \tilde{h}(t))$ такова, что $Q_0(t, \tilde{h}(t)) = Q_0(h_y, h_n(t)) + \Delta Q_0(\chi_y(t), \chi_n(t))$, $\forall t \in [0, t_c]$,

$\forall Q_0(t, \tilde{h}(t)) \in [Q_{0\min}, Q_{0\max}]$; $Q_0(h_y, h_n(t)) = Q_0(h_y)$, $\forall t \in [0, t_c]$, $t_c > t_{c0}$; $Q_0(h_y)$

– количество энергии, подводимое к анализируемому веществу в единицу времени, зависящее от значений параметра процесса измерений, установленных оператором; $\Delta Q_0(\chi_y(t), \chi_n(t))$ – случайная величина, характеризующая

отклонения величины мощности, подводимой к веществу, от ее номинальных значений, которые при повторных измерениях некоррелированы и по абсолютному значению не превышают положительную величину ΔQ_0 ;

$[Q_{0\min}, Q_{0\max}]$ – диапазон значений энергии, подводимой к анализируемому веществу в единицу времени; $\tilde{h}(t) = \{\tilde{h}_y, \tilde{h}_n(t)\}$, $\forall t \in [0, t_c]$; $\tilde{h}_y = h_y + \chi_y(t)$ – параметры процесса измерений, устанавливаемые оператором; $h_y \in [h_{\min}, h_{\max}]$

– номинальные значения параметров процесса измерений, которые не меняются в течение времени измерения – t_c ; $\chi_y(t)$ – случайные отклонения от номинального значения параметра, которые при повторных измерениях некоррелированы и по абсолютному значению не превышают положительную величину $\Delta\chi_y$; $\tilde{h}_H = h_H + \chi_H(t)$ – параметры процесса измерений, не устанавливаемые оператором, со случайными отклонениями от номинального значения параметров, которые при повторных измерениях некоррелированы и по абсолютному значению не превышают положительную величину $\Delta\chi_H$; t_{c0} – время измерений, за которое из вещества испаряется вся имеющаяся в нем влага.

Тогда оптимальное значение h_{y0} , параметра процесса измерений – h_y , устанавливаемого оператором, находится из следующих условий:

$$\left| M\Delta y(t_c, h_{y0k}, \tilde{U}, \chi(t)) \right| = \min \left\{ M\Delta y(t_c, \tilde{U}, Q_0(h_y), \chi(t)) \right\} \quad (9)$$

$$\forall h_y \in [h_{y0k} - \Delta\chi_y, h_{y0k} + \Delta\chi_y],$$

$$h_{y0} : Q_0(h_{y0}) = \max \{ Q_0(h_{y0k}) \}, \quad (10)$$

где M – математическое ожидание берется относительно случайных отклонений значений параметров процесса измерений от их заданных значений – $\chi(t)$ и относительно случайной входной величины влажности однородных проб вещества – \tilde{U} ; h_{y0k} – всевозможные значения параметра $h_y \in [h_{\min}, h_{\max}]$, $k=1, 2, \dots$

Значения h_{y0k} , при которых выполняется (9), находились методом прямого поиска путем обработки результатов измерений влажности групп однородных проб анализируемого вещества, полученных стандартизованным методом для оценки величины U_0 , на данном типе термогравиметрических средств влагометрии при разных значениях параметров h_y и одинаковых прочих условиях измерений, и оценки неопределенных постоянных коэффициентов моделей (5) и (6) в виде $\Delta y = b_0 + h_y^T b + \Delta$, $\forall h_y \in [h_{y0} - \Delta\chi_y, h_{y0} + \Delta\chi_y]$, где h_y^T – транспонированный вектор параметров процесса измерений; b – вектор неопределенных постоянных коэффициентов; Δ – случайная составляющая погрешности результата измерений влажности. Оценивание величин b по алгоритму конфлюэнтного анализа позволяет учесть случайный характер отклонений параметров процесса измерений от их установленных значений и погрешности средства измерений. Определить направление изменения значения параметра h_y на каждом последующем шаге поиска (для избежания эффектов «овражности») можно путем построения с помощью моделей (1) – (6) зависимости величины погрешности от времени измерений и величины $Q_0(h_y)$.

Существенным моментом предложенных алгоритмов является то, что найти оптимальные значения параметров h_y можно лишь в некоторой области их значений, обусловленной неоднородностью вещества и случайными отклонениями параметров h_y от их установленных значений. Эта область определялась по результатам дисперсионного анализа экспериментальных данных. При наличии априорной информации о степени однородности проб вещества, полученной путем проверки выполнения условий (7) – (8) по алгоритму принятия решений об однородности проб вещества, разработан алгоритм обработки информации и принятия решений при поиске области оптимальных значений h_y по условиям (9) – (10) с использованием модели (5). При отсутствии такой информации разработан алгоритм обработки информации и принятия решений при поиске области оптимальных значений h_y по условиям (9) – (10) с использованием модели (6), в котором проверка однородности проб вещества по условиям (7) – (8) предусмотрена при принятии решений об оптимальности каждого данного значения параметра h_y .

При использовании термогравиметрических средств влагометрии для измерений влажности сложных органических веществ или для измерений влажности с повышенной точностью, когда выполнение условия $M\Delta y = 0$ может быть обеспечено только непосредственной оценкой влагосодержания вещества с учетом наличия в его составе отличных от воды летучих компонентов, в работе предложен алгоритм обработки экспериментальных данных, связанный с введением и обработкой дополнительной информации о поведении процесса измерений влагосодержания. В этом случае при $t > 0$ существуют такие $i > 0$, при которых $K_{10}(t) > K_{1i}(t)$ и $K_{20}(t) > K_{2i}(t)$. Если параметр процесса измерений – h_y ,

таков, что $\forall \tilde{h}_y \in [h_{y\min}, h_{y\max}]$, выполняются

$$\text{условия: } MV(t, Q_0(t, \tilde{h}(t)), \gamma, \{\gamma_i\}) = MV(t, Q_0(t, \tilde{h}_n(t)), \gamma, \{\gamma_i\}), \quad i = \overline{1, l},$$

$$M\phi(t, Q_0(t, \tilde{h}(t)), \gamma, \gamma_0) = M\phi(t, Q_0(t, \tilde{h}_y(t), \tilde{h}_n(t)), \gamma, \gamma_0), \quad \text{где } M - \text{математическое}$$

ожидание берется относительно случайных отклонений значений параметров процесса измерений от их заданных значений и относительно случайной входной величины влажности однородных проб вещества – \tilde{U} , то на основе выражения (4) можно получить оценку величины влагосодержания путем обработки результатов измерений убыли массы групп однородных проб вещества с разными известными добавками воды при разных значениях параметров процесса измерений – h_y и одинаковых прочих условиях. Отличительной особенностью предложенного алгоритма обработки информации является то, что без использования дополнительных технических устройств, за счет обработки дополнительной информации, удается существенно повысить точность измерения обычными термогравиметрическими средствами влагометрии.

При выполнении условия $M\Delta y = 0$ на основе моделей (1) – (6) получены алгоритмы принятия решений о пригодности для измерений экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа. Эти алгоритмы основываются на построенных для данного типа термогравиметрических средств влагометрии моделях функционала преобразований. Алгоритмы принятия решения о пригодности для измерений данного экземпляра термогравиметрического средства в этом случае заключаются в экспериментальном оценивании контролируемых характеристик функционала преобразований и сравнении с их предельными значениями исходя из выполнения следующего условия:

$$M\Delta F \equiv M [F(t, \tilde{h}(t), U_0) - F_n(t, \tilde{h}(t), U_0)] = 0, \quad (11)$$

где M – математическое ожидание берется относительно всей совокупности экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа.

В работе предложены три алгоритма принятия решений о пригодности для измерений экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа.

Первый алгоритм связан с выбором ограниченного набора параметров – $h(t)$, статистически значимо влияющих на величину ΔF ; построением экспериментальной зависимости вида $\Delta F = g(\chi(t))$, где $g(\chi(t))$ – некоторая функция, устанавливающая взаимосвязь между погрешностью измерения влагосодержания и погрешностью поддержания значения набора параметров процесса измерений влажности для данного вещества и данного типа термогравиметрических средств; нахождением при предельно допустимом значении величины ΔF соответствующих предельно допустимых значений величины $\chi(t)$, которая контролируется при проверке пригодности для измерений данного экземпляра термогравиметрического средства по условию (11).

Второй алгоритм основан на использовании модельного функционала преобразований – $F_m(t, \tilde{h}(t), \tilde{U}, \gamma_m)$, предельные значения которого оцениваются экспериментально с использованием нескольких экземпляров термогравиметрических средств данного типа. Алгоритм принятия решения о пригодности для измерений данного экземпляра термогравиметрического средства по условию (11) заключается в экспериментальном оценивании его функционала преобразований при измерении влагосодержания модельного вещества и сравнении с предельными значениями модельного функционала преобразований.

Третий алгоритм позволяет контролировать работоспособность термогравиметрического средства влагометрии путем контроля пригодности для измерений его блоков (рис. 1). Погрешность взвешивания проб анализируемого вещества контролируется с помощью мер массы; правильность автоматической обработки результатов взвешивания контролируется путем самотестирования термогравиметрического средства; режим подвода энергии к пробе вещества контролируется с помощью специального технического средства для измерения

величины $Q_0(t, \tilde{h}(t))$ по условию $M\Delta Q_0(\chi(t))=0$, где M – математическое ожидание берется по всей совокупности термогравиметрических средств данного типа. Алгоритм принятия решения о пригодности для измерений данного экземпляра термогравиметрического средства по условию (11) состоит в экспериментальном оценивании погрешности взвешивающего устройства и величины $Q_0(t, \tilde{h}(t))$ и сравнении полученных значений этих величин с их предельными значениями.

Эти алгоритмы характерны тем, что позволяют без использования анализируемых веществ – объектов измерения принимать решения о пригодности для измерений любых термогравиметрических средств влагометрии, что важно при их выпуске из производства и внедрении.

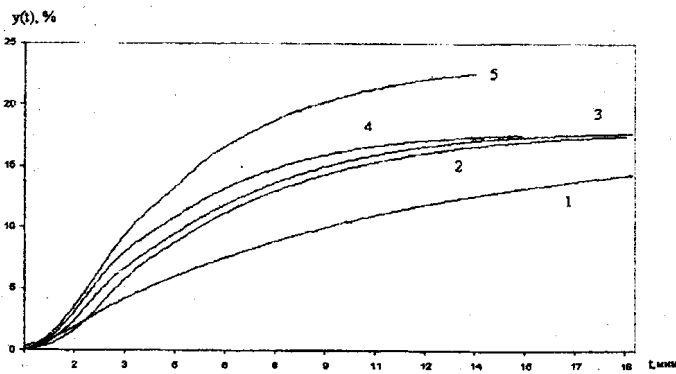
В четвертой главе представлены результаты исследований предложенных в работе моделей процесса измерений и алгоритмов обработки информации, проведенных для случаев различных веществ и термогравиметрических средств влагометрии разных типов.

Для термогравиметрических средств с СВЧ–источником нагрева проведено сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей убыли массы кварцевого песка – $y(t)$, построенных для модели (1) – (3) в разных степенях приближений, показавшее адекватность моделей на уровне среднего разброса экспериментальных и теоретических значений $y(t)$ – 1.1 % влажности при 25 % начальной влажности.

С применением стандартизованного воздушно-теплого способа измерений влажности кварцевого песка, зернопродуктов и сухих молочных продуктов в диапазоне измерений от 3 до 20 % влажности с погрешностью от 0.1 до 0.5 % влажности показана чувствительность предложенной экспериментальной оценки случайного разброса значений влажности однородных проб вещества – Δ_n к способу их подготовки и виду вещества.

Для экспрессного термогравиметрического средства с ИК–источником нагрева типа МА – 30 методом прямого поиска с применением дисперсионного анализа найдена область оптимальных значений задаваемого оператором параметра процесса (эффективной температуры нагрева – T_c) измерений влажности калийных смешанных солей, имеющих в своем составе отличные от воды летучие компоненты – окислы азота и аммиачные соединения. Экспериментальные зависимости убыли массы – $y(t)$ при разных значениях T_c показаны на рис. 4. Полученные в результате обработки данных оптимальные значения T_c лежат в диапазоне от 115 до 125 °С. Для этого типа средств экспериментально оценены предельные значения модельного функционала преобразований. В качестве модельного вещества использовалась металлическая емкость с дистиллированной водой.

На рис. 5 приведены результаты контроля функционала преобразований пяти случайным образом выбранных влагомеров МА – 30.



- 1 – $T_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- 2 – $T_c = 115 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3 – $T_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$
- 4 – $T_c = 125 \text{ }^\circ\text{C}$
- 5 – $T_c = 135 \text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 4. Зависимость убыли массы калийных смешанных солей при их ИК-нагреве на влагомере МА – 30 при разных значениях эффективной температуры.

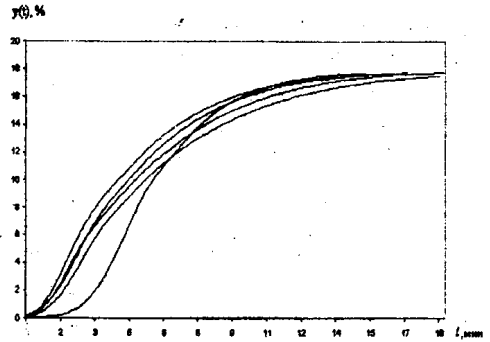
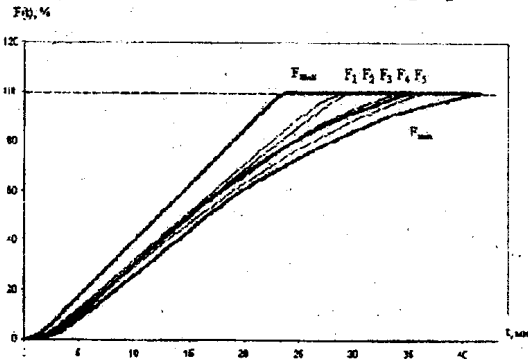


Рис. 5. Экспериментальные значения модельных функционалов преобразований влагомеров МА – 30 при $T_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
 F_{\max} , F_{\min} – максимальные и минимальные значения модельных функционалов. F_1, \dots, F_5 – реальные функционалы преобразований

Рис. 6. Зависимость убыли массы калийных смешанных солей при измерении их влажности на пяти различных экземплярах влагомеров МА – 30 с реальными функционалами преобразований – F_1, \dots, F_5

На рис. 6 представлены результаты измерений при $t_c = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ на пяти экземплярах таким образом проконтролированных влагомеров МА – 30. Достоверность полученных результатов доказывается тем, что оценки влажности однородных проб калийных смешанных солей, полученные стандартизованным воздушно-тепловым методом (время измерений – 60 мин.) и на влагомерах МА-30 (время измерений – 10 мин.) различаются статистически незначимо в пределах погрешности – 0.2 % влажности, предусмотренной стандартом.

Эффективность алгоритма принятия решений о пригодности для измерений термогравиметрических средств влагометрии путем контроля ограниченного набора параметров процесса измерений влажности экспериментально показана для случая термогравиметрической установки ВХС-М1. С использованием

стандартизованного метода измерений влажности хлопка-сырца установлено, что если у ВХС-М1 температура греющих пластин составляет 195 ± 2 °С; зазор между греющими пластинами - от 3,5 до 4,2 мм при напряжении питания $220 \pm 4,4$ В, то погрешность результатов измерения влажности хлопка-сырца на ВХС-М1 не превышает своего аттестованного значения.

Для случая вакуумно-тепловых средств влагометрии в явном виде получено выражение для оценки влагосодержания вещества, имеющего отличные от воды летучие компоненты. Для этого необходимо иметь экспериментальные данные о суммарной (воды и летучих компонентов) убыли массы вещества за некоторое время его сушки в вакуумно-тепловой установке при двух разных по величине остаточных давлениях в измерительной камере и разном начальном влагосодержании, и не требуется знание ни одного из теплофизических параметров вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассмотрена задача обработки информации и принятия решений при функционировании термогравиметрических средств влагометрии на основе учета неоднородности вещества и наличия в его составе отличных от воды летучих компонентов. Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные при выполнении диссертационной работы, позволяют сформулировать следующие выводы и результаты:

1. Повышение точности измерений влажности, при отсутствии стандартных образцов состава влажных твердых веществ и априорной информации об объектах и погрешностях термогравиметрического метода и средств влагометрии, может быть обеспечено применением алгоритмов обработки информации и принятия решений, разработанных на основе модельных представлений о процессе и погрешности измерений влажности.

2. Модели процесса измерений, разработанные в предположениях о непрерывном, аддитивном и двухстадийном характере процесса массопереноса воды и других летучих компонентов в пористом веществе – объекте измерений, позволяют при произвольном режиме его нагрева от различных источников по отдельности оценить составляющие погрешности измерений, обусловленные влиянием объекта, термогравиметрического метода и средства влагометрии.

3. Минимизация погрешности измерения влажности на основе учета неоднородности вещества и наличия в его составе отличных от воды летучих компонентов достигается путем поиска минимума погрешности измерений влажности однородных проб вещества, рассматриваемой как функция времени, и ограниченного набора параметров процесса измерений, определяющего характер подвода энергии к анализируемому веществу.

4. Разработаны алгоритмы поиска оптимальных значений параметров процесса измерений влажности на основе методов конфлюэнтного, дисперсионного анализа и прямого поиска, обеспечивающие минимум погрешности измерений при наличии и при отсутствии априорной информации об

однородности проб анализируемого вещества. При этом в качестве численной характеристики степени однородности проб данного вещества используется экспериментальная оценка разброса значений их влажности, позволяющая оценить минимальный объем измерительной информации, необходимый для обеспечения заданного уровня достоверности решений, принимаемых в результате ее обработки. Априорную информацию об однородности проб вещества можно получить путем применения алгоритма принятия решений об однородности проб вещества.

5. Введение в алгоритмы оценки влажности дополнительной информации о поведении процесса измерений однородных проб вещества с известными добавками воды при реализации избирательного нагрева разных летучих компонентов состава вещества позволяет в явном виде получить выражение для оценки их вклада в результат измерения влажности.

6. Разработаны алгоритмы принятия решений о пригодности для измерений экземпляров термогравиметрических средств влагометрии данного типа без использования натурального вещества – объекта измерений влажности. Алгоритмы эффективно работают в случае измерений влажности веществ, для которых установлены оптимальные значения параметров процесса измерений влажности термогравиметрическими средствами данного типа.

7. Проведенные экспериментальные исследования и внедрение результатов диссертационной работы в практику влагометрии показали эффективность разработанных моделей и алгоритмов. При минимизации погрешности измерений влажности различных органических и неорганических твердых веществ в диапазоне от 0.5 до 90% влажности на универсальных экспрессных инфракрасных термогравиметрических влагомерах типа МА-30 применение разработанных алгоритмов позволило обеспечить погрешность измерения, в зависимости от диапазона измерений, на уровне от 0.1 до 1% влажности. Эти значения погрешности соответствует требованиям, предъявляемым в стандартах на измерения влажности проанализированных веществ воздушно-тепловым методом. Время измерений влажности проанализированных веществ на влагомере МА-30 составило от 5 до 15 минут, что в 5 – 7 раз меньше времени измерений влажности стандартизованным воздушно-тепловым методом.

8. Наибольшее внедрение получили алгоритмы поиска оптимальных значений параметров процесса измерений и алгоритмы принятия решений об однородности проб вещества. На их основе разработаны многочисленные методики выполнения измерений влажности различных веществ и материалов на универсальных термогравиметрических влагомерах, которые применяются на десятках предприятий пищевой, горнодобывающей и химической промышленности.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аронов П.М. К теоретическому обоснованию использования имитаторов (эквивалентных мер) для поверки средств измерений влажности твердых веществ/

П.М. Аронов, В.П. Иванов, С.В. Медведевских; Ур.НИИ Метрологии. — Екатеринбург: 1994. — 18 с. — Деп. во ВНИИКИ 06.04.94.; № 825-В94.

2. Математические модели тепло- и массообмена при воздушно-тепловой и контактной сушке влажных материалов: Методические указания/ В.С. Жуков, В.П. Иванов, С.В. Медведевских.—Свердловск: Уральский лесотехнический институт, 1989. —14 с.

3. Математические модели тепло- и массообмена при сушке токами высокой частоты: Методические указания/ В.С. Жуков, С.В. Медведевских.—Свердловск: Уральский лесотехнический институт, 1989.— 16 с.

4. Золкина Л.А. Математическая модель вакуумно-тепловой сушки двухслойных одномерных структур/ Л.А. Золкина, С.В. Медведевских., Э.С. Синельникова ;Ур. лес.-тех. ин-т. —Екатеринбург, 1990. —12 с. —Деп. во ВНИИКИ 17.11.90.; № 684-1390.

5. Иванов В.П. Алгоритм конфлюэнтного анализа/ В.П. Иванов, С.В. Медведевских; УрНИИМетрологии. — Екатеринбург, 1994. —24 с. —Деп. во ВНИИКИ 20.01.94.; № 152-В94.

6. Иванов В.П. О выборе числа наблюдений при метрологической аттестации МВИ влажности твердых веществ и материалов термогравиметрическим методом./ В.П. Иванов, С.В. Медведевских; УрНИИМетрологии. — Екатеринбург, 1994. — 26 с. —Деп. во ВНИИКИ 20.01.94.; № 153-В94.

7. Иванов В.П. Оценка оптимального времени измерения влажности твердых веществ термогравиметрическим методом с использованием статистической теории распознавания образов/ В.П.Иванов, С.В. Медведевских, Н.Д. Дулепов; УрНИИМетрологии. —Екатеринбург, 1994. —15 с. —Деп. во ВНИИКИ 06.04.94.; № 824-В94.

8. Иванов В. П. Методика выполнения измерений влажности ячеистого бетона и золы-уноса на инфракрасном сушильном устройстве/ В.П. Иванов, С.В. Медведевских. // Измерительная техника.— 1993.—№10.— С. 55 —57.

9. Иванов В.П. Метрологическое обеспечение влагометрии твердых веществ: обзорная информация/ В.П. Иванов, С.В. Медведевских, А.М. Меньшиков // Сер. «Метрологическое обеспечение измерений». —М.:ВНИИКИИ —1990.—№4.—40 с.

10. Иванов В.П. Обработка результатов измерений содержания воды в твердых веществах. Методические рекомендации/ В.П. Иванов, С.В. Медведевских.—Свердловск: УрО АН СССР, 1988. —200 с.

11. Иванов В.П. Средства автоматизации и метрологического обеспечения контроля влажности неметаллорудных материалов/ В.П. Иванов, С.В. Медведевских //Строительные материалы.—1986. —N 8. — С.27 — 28.

12. Иванов В.П. О воспроизведении единицы влажности твердых веществ/ В.П. Иванов, С.В. Медведевских // Измерительная техника. — 1990. — № 5. — С.59 —60.

13. Иванов В.П. Экспериментальная оценка метрологических характеристик методик выполнения измерений влажности твердых веществ термогравиметрическим методом / В.П. Иванов, С.В. Медведевских, Э.С. Синельникова // Измерительная техника. —1988. —N7.— С.59 — 60.

14. Медведевских С.В. Математические модели теплообмена при измерении влажности твердых материалов воздушно-тепловым и вакуумно-тепловым методами / С.В. Медведевских, В.П. Иванов; Урал. лес.-техн. ин - т. — Свердловск, 1989. — 38 с. — Деп. в ВИНТИ 17.03.89.; № 5216-89.

15. Медведевских С.В. К вопросу о метрологической аттестации методик выполнения измерений влажности термогравиметрическим методом. // Аналитика и контроль. — 1997. — №2. — С. 35 — 40.

16. Медведевских С.В. Об оценке систематической составляющей погрешности средств измерений влажности твердых веществ. /VII всесоюзная науч.-практич. конференция молодых ученых и специалистов Госстандарта «Повышение роли стандартизации и метрологии в обеспечении интенсификации общественного производства»: Тез. докл. — Казань, 1987. — С. 115.

17. Медведевских С.В. Учет влияния неоднородности при разработке МВИ влажности твердых веществ термогравиметрическим методом /VI Уральская научно-практическая конференция по метрологии: Тез. докл. — Екатеринбург, — 1998. — С. 85 — 86.

18. Медведевских С.В., Математические модели теплообмена при измерении влажности твердых материалов методом СВЧ-сушки / С.В. Медведевских, В.П. Иванов; Урал. лес. техн. ин-т. — Свердловск, 1989. — 29 с. — Деп. в ВИНТИ 17.03.89.; N5215-89.

19. Медведевских С.В. Измерение влажности зернопродуктов методом ИК-сушки/ С.В. Медведевских, В.В. Толмачев // Зерно и зернопродукты. — 1996. — №4 — С. 24 — 25.

20. Медведевских С.В. Прибор для измерения влажности мясных продуктов/ С.В. Медведевских, В.В. Толмачев // Журнал мясной промышленности. — 1995. — №4. — С. 19 — 20.

21. Медведевских С.В. Эффективный анализатор влажности/ С.В. Медведевских, В.В. Толмачев // Журнал комбикормовой промышленности. — 1995. — №4. — С. 29 — 30.

22. Осмоловский А.М. Методика выполнения измерений влажности песка/ А.М. Осмоловский, В.К. Шемякин, В.П. Иванов, С.В. Медведевских // Строительные материалы. — 1986. — №8. — С. 21 — 22.

23. Шепенин В.А. Рекомендации по методам обработки результатов наблюдений/ В.А. Шепенин, Б.Г. Бочков, С.В. Медведевских —М.: Московский текстильный институт им. А.Н. Косыгина, 1986. — 48 с.

