

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТАХ, МЕТОДАХ И СРЕДСТВАХ ВЛАГОМЕТРИИ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ВЛАЖНОСТИ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ

С.В. Медведевских

ORGANIZATION OF THE UNITED INFORMATION SPACE FOR COLLECTION AND PROCESSING OF DESIGN-TECHNOLOGY INFORMATION BASED ON SELF-MADE INFORMATION SYSTEMS

S.V. Medvedevskikh

Предложены алгоритмы обработки априорной и текущей входной измерительной информации об объектах, методах и средствах влагометрии при оценивании величины влажности твердых веществ. Приведен аналитический вид уравнений для вычисления статистических характеристик массовой доли влаги в твердом веществе заданного объема на основе статистической обработки измерительной информации, получаемой применением заданных методик и технических средств влагометрии.

Ключевые слова: случайные процессы, алгоритмы оценивания и контроля влажности твердых веществ, обработка входной измерительной информации во влагометрии, показатели точности информации.

The algorithms of processing of a priori and current input measurement information on objects, methods and instruments of water mass content measurements when estimating the moisture in solid substances are proposed. The analytical form of equations to calculate statistical characteristics of mass fraction of water in the solid substance of given volume in terms of the statistical treatment of measurement information which was obtained by the given procedures and the technical measurement instruments are reported.

Keywords: stochastic process, algorithms of estimating and control of moisture in solid substances, processing of input measurement information for water content measurements, accuracy parameters of information.

В настоящее время оценивание влажности твердых веществ заданного объема V и массой m от сотен тонн до нескольких килограммов производится на основе обработки конечной совокупности результатов измерений влажности, специальным образом отобранных и подготовленных в различные моменты времени t , проб вещества массой от нескольких килограммов до нескольких граммов, полученных в лабораторных условиях. Алгоритм оценивания влажности вещества объема V заключается в вычислении общего среднего результата измерений [1]. Показатель точности оценивания влажности вещества определяют в виде дисперсии, являющейся суммой дисперсий ошибок пробоотбора, пробоподготовки и измерений в лабораторных условиях с заданными весовыми коэффициентами [1]. Эти дисперсии оценивают по алгоритмам статистического контроля

показателей качества нештучной продукции, основанных на теории дисперсионного анализа, позволяющим получить оценки дисперсий путем статистической обработки соответствующих массивов экспериментальных результатов оценивания влажности, полученных в течение длительного времени на разных предприятиях при контроле разных партий данной продукции. При этом в период времени, затрачиваемый на конкретное оценивание, предполагается неизменность во времени количества влаги и других компонентов химического состава вещества в любых элементах его объема, а совокупность обрабатываемых результатов измерений рассматривается как случайная статистическая выборка, состоящая из независимых величин [1, 2].

В дальнейшем оценку дисперсии оценивания, проведенную для данного вещества, регламентируют в соответствующих стандартах на методы

Медведевских Сергей Викторович – канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе ФГУП «УНИИМ», г. Екатеринбург; msv@uniim.ru, lab251@uniim.ru

Medvedevskikh Sergey Victorovich – PhD, science deputy director of FGUP «UNIIM», Yekaterinburg; msv@uniim.ru, lab251@uniim.ru

испытаний и контроля качества продукции, содержащих методику оценивания ее влажности, и приписывают всем результатам оценивания влажности данного вещества на конкретных предприятиях. Оценку пригодности методик оценивания влажности для конкретного предприятия, как правило, не проводят. Пересмотр оценок дисперсии оценивания происходит примерно раз в 10 лет при пересмотре стандарта. Контроль точности результатов оценивания влажности вещества объема V обычно ограничивается только контролем дисперсии обрабатываемых результатов измерений. Так как реализация данного алгоритма оценивания в полном объеме требует больших временных и материальных затрат, в большинстве стандартов на методы испытаний и контроля продукции, предусматривающих процедуры отбора и подготовки проб вещества для оценивания влажности, в качестве показателя точности оценивания используют показатель точности измерений влажности.

Основной недостаток применения этого алгоритма во влагометрии связан с отсутствием учета при оценке величины влажности и показателей точности оценивания влияния в явном виде объекта, применяемых методов и технических средств, а также наличия возможных пространственно-временных корреляций оцениваемой величины, связанных с процессами внутреннего и внешнего влагообмена в твердых веществах – объектах влагометрии, что в конечном итоге часто не позволяет обеспечить оценку и контроль возможных систематических ошибок оценивания. Это отмечается в недавно появившихся международных стандартах, в которых предложен алгоритм учета временной нестабильности влажности вещества, связанный с оценкой временного тренда величины влажности и ее соответствующей ковариационной функции на заданном периоде оценивания [1, 2].

В настоящей работе для учета характерных особенностей влагометрии твердых веществ предлагается алгоритм обработки измерительной информации об объектах, методах и средствах влагометрии, в принципе позволяющий учитывать их влияние при каждом конкретном оценивании влажности вещества.

1. Постановка задачи

Оцениваемой величиной в заданные моменты времени t является влажность в виде массовой доли влаги [3] $x(V, m, t)$ в твердом веществе – объекте оценивания заданного объема V и массой m с матричными характеристиками

$$x_d(V) = (\varepsilon, \rho_d, c_d, V),$$

где ε – объемная пористость; ρ_d – плотность; c_d – обобщенный вектор, характеризующий химический состав сухой основы влажного твердого вещества. Доступны для измерений следующие величины: конечные совокупности величин массо-

вой доли влаги и матричных характеристик вещества массой m_0 и объемом V_0 ($m_0 \leq m$, $V_0 \leq V$ совпадает с зоной измерения влагомеров или объемом отбираемых для измерений проб вещества), вектора наблюдений – $x(V_0, t)$ и $x_d(V_0)$ соответственно; конечный набор параметров методики оценивания величины $x(V, m, t)$, включая параметры условий оценивания методик пробоотбора, пробоподготовки и измерений, образующих вектора $\xi(V, V_\gamma, V_\beta, V_0, t)$, $\gamma(V, V_\gamma, t)$, $\beta(V, V_\beta, t)$, $\eta(V, V_0, t)$ соответственно. Будем считать, что технические и метрологические характеристики, применяемые в методике оценивания величины $x(V, m, t)$, известны и образуют вектор $\chi(t)$. Определенные таким образом доступные для измерений вектора, характеризующие состояние объекта, применяемых методик и технических средств, образуют вектор входной информации $x_I(V, m, t)$ при оценивании величины $x(V, m, t)$. Тогда в общем случае, учитывая случайный характер векторов $x_I(V, m, t)$ и $x(V, m, t)$ в период времени оценивания T , задача оценивания величины $x(V, m, t)$ сводится к задаче построения функционала преобразований вида

$$F(x_I(V, t), x(V, m, t)) = 0, \quad t \in [0, T], \quad (1)$$

а также к разработке алгоритма получения статистических оценок величины $x(V, m, t)$ путем обработки результатов измерений компонентов вектора $x_I(V, m, t)$ с применением модели (1).

2. Функционал преобразования входной информации и алгоритм статистического оценивания влажности

В общем случае функционал преобразований (1) может быть представлен в виде модели, полученной в рамках теории случайных процессов диффузионного типа [4, 5]. Однако, если ограничиться только задачей оценивания влажности твердых веществ, не подвергающихся при $t \in [0, T]$ технологическим воздействиям, когда объект и условия, параметры методик и характеристик технических средств оценивания являются однородными в пространстве и стабильными во времени, т. е. когда величину $x(V, m, t)$ и вектор $x_I(V, m, t)$ при $t \in [0, T]$ можно считать случайными стационарными временными функциями, то функционал преобразований (1) можно построить в виде линейного преобразования вектора $x_I(V, m, t)$ типа [6]. В этом случае оптимальной в среднеквадратичном смысле оценкой величины $x(V, m, t)$ по результатам измерений компонентов вектора $x_I(V, m, t)$ будет оценка в виде условного математического ожидания случайной величины $x(V, m, t)$ относи-

тельно случайного вектора измерений входной информации $x_I(V, m, t)$. Если известны совместная плотность распределения случайных векторов $x(V, m, t)$ и $x_I(V, m, t)$, плотность распределения вектора $x_I(V, m, t)$, то оценку величины $x(V, m, t)$ можно получить по формуле Байеса [4].

В простейшем, но практически важном для влагометрии твердых веществ гауссовском случае рассматриваемых распределений при $t \in [0, T]$ и условии $R_{x_I}(t)$ – невырожденная ковариационная матрица, согласно теореме о нормальной корреляции оценку $x(V, m, t)$ можно получить в явном виде

$$\hat{x}(t) = M(x(t)) + R_{xx_I}(t)R_{x_I}^{-1}(t)(x_I(t) - M(x_I(t))), \quad (2)$$

где $M(\cdot)$ – знак математического ожидания; $R_{xx_I}(t)$ – взаимная ковариационная матрица векторов $x(V, m, t) \equiv x(t)$ и $x_I(m, V, t) \equiv x_I(t)$. При этом величины $x(t)$ и $\Delta x(t) \equiv x(t) - \hat{x}(t)$ независимы, $\hat{x}(t)$ – случайная величина с нормальным распределением $N(M(x(t)); R_{xx_I}(t)R_{x_I}^{-1}(t)R'_{xx_I}(t))$, $R'_{xx_I}(t)$ – транспонированная матрица $R_{xx_I}(t)$; величина $\Delta x(t)$ имеет математическое ожидание $M(\Delta x(t)) = 0$ и ковариацию $R_{\Delta x}(t) = R_x(t) - R_{xx_I}(t)R_{x_I}^{-1}(t)R'_{xx_I}(t)$. В рамках этого алгоритма критерием качества оценки $\Delta x(t)$ считают величину

$$M((x(t) - \hat{x}(t))^2) = Sp[R_{\Delta x}(t)] \leq M((x(t) - \tilde{x}(t))^2),$$

где $Sp[\cdot]$ обозначает след матрицы; $\tilde{x}(t)$ – произвольно допустимая оценка $x(t)$ по $x_I(t)$. Предложенный алгоритм будет доступен для реализации, если в заданные моменты времени $t \in [0, T]$ измерений $x_I(t)$ известна априорная информация о величинах математических ожиданий и ковариационных функций случайных векторов $x(t)$ и $x_I(t)$ либо возможно многократное воспроизведение процедуры оценивания $x(t)$ и $x_I(t)$ одного и того же вещества заданного объема V в одни и те же моменты времени $t \in [0, T]$, в одних и тех же элементах объема вещества V_0 , т. е. несколько реализаций случайных процессов $x(t)$ и $x_I(t)$. Последнее можно реализовать при оценивании $x(t)$ в отсутствие процедур пробоотбора и пробоподготовки при использовании неразрушающих веществ методов измерения компонентов вектора $x(V_0, t)$. Однако в реальной практике влагометрии, как правило, при конкретном оценивании доступна для измерений только одна реализация процесса $x(t)$, и ее оценивание производят по конечному

числу результатов измерений $x_I(t)$, полученных в дискретные моменты времени $t \in [0, T]$ в ограниченной совокупности объемов вещества V_0 , возможно не перекрывающих полностью заданный объем V . В этом случае в алгоритме, реализуемом согласно (2), можно сочетать обработку имеющейся априорной и текущей измерительной информации о статистических характеристиках процессов $x(t)$ и $x_I(t)$. Тогда оценивание величины $x(t)$ можно проводить в рамках последовательных итерационных алгоритмов, например, по типу рекуррентной фильтрации Калмана. В качестве начальных оценок статистических характеристик $x(t)$ можно использовать оценки, полученные численными методами, например, методом Монте-Карло.

Можно построить следующий алгоритм получения априорной информации о статистических характеристиках процессов $x(t)$ и $x_I(t)$ при решении задач влагометрии, когда математические ожидания величин $x(t)$ и $x_I(t)$ считают независимыми от времени $t \in [0, T]$, а в качестве показателя точности оценивания $x(t)$ и $x_I(t)$ принимаются величины $\bar{\Delta}x(t, T) \equiv \hat{x}(t) - M(x, T)$ и $\bar{\Delta}x_I(t, T) \equiv \hat{x}_I(t) - M(x_I, T)$ соответственно. Тогда из (2) следует

$$\bar{\Delta}x(t, T) = R_{xx_I}(t)R_{x_I}^{-1}(t)\bar{\Delta}x_I(t, T). \quad (3)$$

Выражение (3) определяет взаимосвязь между точностью информации о влажностном состоянии твердого вещества $\bar{\Delta}x(t, T)$ и точностью получения входной измерительной информации $\bar{\Delta}x_I(t, T)$. Алгоритм оценивания величины $\bar{\Delta}x(t, T)$ по $\bar{\Delta}x_I(t, T)$ аналогичен рассмотренным ранее алгоритмам. В качестве значений ковариационных матриц можно принимать их статистические оценки, получаемые на этапах разработки и внедрения методик оценивания $x(t)$ на основе (2), а в качестве значений математических ожиданий $M(x, T)$ и $M(x_I, T)$ их референтные значения, полученные методами повышенной точности или с помощью эталонов [7]. Отметим, что решение как прямого, так и обратного уравнения вида (3) позволяет оценить предельно допустимые для данной измерительной задачи статистические характеристики величин $\bar{\Delta}x(t, T)$ и $\bar{\Delta}x_I(t, T)$, а также оценить оптимальные значения (или их ограниченную область) компонентов, образующих вектора $\xi(V, V_\gamma, V_\beta, V_0, t)$, $\gamma(V, V_\gamma, t)$, $\beta(V, V_\beta, t)$, $\eta(V, V_0, t)$, при которых модуль математического ожидания и дисперсия величины $\bar{\Delta}x(t, T)$ будут минимальны. В дальнейшем эти оценки можно будет использовать в качестве априорной информации в алгорит-

мах оценки пригодности и контроля по показателям точности применяемых для оценивания величины $x(t)$ методик и технических средств.

Учитывая, что в области влагометрии твердых веществ явный вид функционала (1) можно установить лишь эмпирически на основе обработки соответствующего массива экспериментальных данных о зависимости между случайными векторами $x(t)$ и $x_I(t)$, необходимо для каждого конкретного вещества в условиях конкретной задачи проводить проверку адекватности его представления линейной моделью и выполнения условий применимости уравнений типа (2), (3).

Заключение

Предложенные алгоритмы обработки входной информации позволяют получить в заданные моменты времени $t \in [0, T]$ совокупность оценок влажности $x(t)$ твердого вещества, заданного объема V , показателей их точности $\Delta x(t)$, включая оценку возможных систематических ошибок, путем статистической обработки входной информации об объектах, методах и средствах влагометрии $x_I(t)$. В зависимости от назначения в дальнейшем эти оценки могут использоваться в качестве входной априорной измерительной информации при решении задач разработки, внедрения, функционирования и контроля работоспособности систем технических средств влагометрии твердых веществ. Выражения (1)–(3) можно положить в основу построения алгоритмов обработки информации и принятия решений при оценке изменчивости, неоднородности по физико-химическим свойствам и временной стабильности объектов; опре-

делении пригодности и эффективности, контроле по показателям точности применяемых методик и технических средств влагометрии твердых веществ; испытаний, опробования и контроля по показателю влажности промышленных партий продукции, в том числе в условиях ее промышленного производства и переработки.

Литература

1. ГОСТ Р ИСО 11648-1-2009. *Статистические методы. Выборочный контроль нештучной продукции. Часть 1. Общие принципы.*
2. ГОСТ Р ИСО 11648-2-2009. *Статистические методы. Выборочный контроль нештучной продукции. Часть 2. Отбор выборки сыпучих материалов.*
3. РМГ 75-2004. ГСИ. *Измерения влажности веществ. Термины и определения.*
4. Королюк, В.С. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике* / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
5. Лыков, А.В. *Тепломассообмен: справ.* / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
6. Медведевских, С.В. *Модели процесса измерений влажности твердых веществ термogravиметрическим методом* / С.В. Медведевских // *Темат. сб. науч. тр.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – С. 42–53.
7. *Государственный первичный эталон единиц массовой доли и массовой концентрации влаги в твердых веществах и материалах* / В.В. Горшков, В.И. Коряков, М.Ю. Медведевских, С.В. Медведевских // *Измерительная техника.* – 2010. – № 4. – С. 24.

Поступила в редакцию 17 мая 2011 г.