

Научная статья

УДК 544.08: 315.322.365

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-71-76>

Измерение влажности зерна и зернопродуктов сверхвысокочастотным методом: влияние неоднородности по плотности зерна на массовое отношение влаги

Гани Икрамович Икрамов¹, Палван Искандарович Каландаров²✉

¹ Республиканский проектный институт «УзИнжиниринг» Ташкент, Республика Узбекистан, gani.ikramov2022@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства», Ташкент, Республика Узбекистан, eest_uz@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8199-7484>

Аннотация. Описаны применяющиеся на зерноперерабатывающих предприятиях различные методы измерения влажности сыпучих материалов (зерна и зернопродуктов), в том числе методы на основе такого показателя качества зерна, как массовое отношение влаги. Показано, что предпочтительнее применять метод сверхвысокочастотного измерения влажности. Представлена функциональная схема установки для измерения влажности зерна и зернопродуктов сверхвысокочастотным методом. Установку можно использовать в технологическом процессе производства зерновых материалов. Проанализировано влияние неоднородности зерна по плотности на информативный параметр (влажность) при сверхвысокочастотном методе измерения влажности с учётом сложности математического моделирования контроля влажности в технологическом процессе. Приведены результаты экспериментальных измерений влажности в лабораторных и производственных условиях зерноперерабатывающего предприятия, представлен анализ погрешностей измерений. Показано, что наиболее существенный вклад при амплитудных измерениях вносит неравномерность распределения влаги по формам связи и неоднородность образца по плотности, а при фазовых – изменение плотности, причём погрешность измерения влажности уменьшается с увеличением объёмной плотности. На основе сравнительного анализа погрешностей измерения влажности зерна установлено, что применение многопараметрического метода уменьшает указанную погрешность по сравнению с погрешностью однопараметрического метода, что объясняется минимизацией влияния различных мешающих факторов. Обоснована целесообразность применения многопараметрического метода измерения массового отношения влаги зерна на зерноперерабатывающих пунктах и предприятиях.

Ключевые слова: зерно, влажность, погрешность, плотность, однородный материал, неоднородный материал, ослабление электромагнитной волны, фазовый сдвиг, сверхвысокочастотный метод

Для цитирования: Икрамов Г. И., Каландаров П. И. Измерение влажности зерна и зернопродуктов сверхвысокочастотным методом: влияние неоднородности по плотности зерна на массовое отношение влаги // Измерительная техника. 2022. № 9. С. 71–76. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-71-76>

Measurement of grain and grain products moisture by ultrahigh-frequency method: the effect of grain density heterogeneity on the mass ratio of moisture

Gani I. Ikramov¹, Palvan I. Kalandarov²✉

¹ Republican Design Institute "UzEngineering", Tashkent, Republic of Uzbekistan, gani.ikramov2022@mail.ru

² National Research University "Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers", Tashkent, Republic of Uzbekistan, eest_uz@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-8199-7484>

Abstract. Various methods of measuring the moisture content of bulk materials (grain and grain products) used at grain processing enterprises are described, including a method using such an indicator of grain quality as the mass humidity ratio. It is shown that it is preferable to use the method of ultrahigh frequency humidity measurement. A functional diagram of an installation for measuring humidity, grain moisture and grain products in the technological process by the ultrahigh frequency method is presented. The influence of grain heterogeneity in density on the informative parameter of humidity with an ultrahigh-frequency method of measuring humidity is analyzed, considering the complexity of mathematical modeling of humidity control in the technological process of grain materials production. The results of experimental measurements of humidity in laboratory and production conditions of a grain processing enterprise are presented, an analysis of measurement errors is presented. It is shown that the most significant contribution in amplitude measurements is made by the unevenness of the moisture distribution in the bond forms and the inhomogeneity of the sample in density, and in phase measurements – a change in density, and the error in measuring humidity decreases with increasing volume density. Based on a comparative analysis of grain moisture measurement errors, it was found that the use of the multiparametric method reduces the specified error compared to the error of the one-parameter

method, which is explained by minimizing the influence of various interfering factors. The expediency of using a multiparametric method of measuring the mass ratio of grain moisture at grain processing plants and enterprises is substantiated.

Keywords: grain, humidity, error, density, homogeneous, inhomogeneous material, electromagnetic wave attenuation, phase shift, ultrahigh frequency method

Введение. В зерноперерабатывающих отраслях промышленности на долю зерновых сыпучих материалов приходится значительный объём сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. В технологическом производстве по-прежнему велики убытки, обусловленные отсутствием высокоточных средств достоверного экспрессного определения электрофизических параметров зернистых материалов. Соответствие возросшим требованиям к качеству зерна и зернопродуктов и снижению удельных энергетических затрат при длительном хранении зерна и зернопродуктов, переработка и транспортировка невозможны без внедрения современных технологических и информационно-измерительных баз.

Один из основных показателей качества зерна – массовое отношение влаги. Этот показатель на зерноперерабатывающих

предприятиях в основном определяется термогравиметрическим методом [1]. Данный метод обычно называют прямым или стандартным, он эффективен для оценки погрешности при косвенных методах измерения, обладает достаточно высокой точностью, но не является экспрессным. Для повышения оперативности определения качества зерна на практике применяют косвенные способы измерения влажности зерна по диэлектрической проницаемости. Также для измерения массового отношения влаги зерна используют термогравиметрические, инфракрасные, оптические, кондуктометрические и диэлькометрические методы. Диэлькометрические методы включают высокочастотный (ВЧ) и сверхвысокочастотный (СВЧ) методы измерения влажности, реализуемые автоматизированными влагомерами.

Цель настоящего исследования – оценить влияние неоднородности зерна по плотности на массовое отношение влаги при измерениях влажности зерна СВЧ-методом.

СВЧ-измерение влажности зерна. Несмотря на разные спектры рабочих диапазонов (соответственно не более $5 \cdot 10^7$ и $5 \cdot 10^{10}$ Гц для ВЧ- и СВЧ-методов) влагомеров, при использовании обоих методов получают примерно одинаковые значения диэлектрических параметров обезвоженных материалов [2]. Однако уникальные свойства воды, обусловленные её высокой диэлектрической проницаемостью и максимумом потерь в СВЧ-диапазоне, стимулировали развитие СВЧ-метода измерения массового отношения влаги [3–10]. При практическом контроле влажности зерна как в лабораторном, так и в технологическом процессе подтверждено, что применительно к зерну и зернопродуктам точность СВЧ-метода выше, чем ВЧ-метода [11]. Это обусловлено уменьшением влияния мешающих факторов с увеличением частоты, поскольку параметры электромагнитной волны высокочувствительны к влаге, содержащейся в материале, и малочувствительны к другим параметрам зерна. Кроме того, использование СВЧ-метода и автоматизированных СВЧ-влажномеров позволяет мониторить сравнительно большую массу влажного материала в потоке [12–18].

На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментальной установки для измерения влажности зерна в технологическом процессе – автоматизированного СВЧ-влагомера. Принцип работы установки заключается в следующем. СВЧ-излучение генератора 1 через направляющие ответвители 2–4 поступает в ферритовый вентиль 5 и одновременно на входы двойного волноводного моста 7 и детектора 16. Из вентилья 5 сигнал проходит через фазовращатель 6, двойной волноводный мост 7, детектор 8 и попадает на один из входов усилителя 9, второй вход которого связан с выходом избирательного усилителя 10 и индикатором 18. Индикатор служит для определения фазового сдвига при прохождении СВЧ-волны через

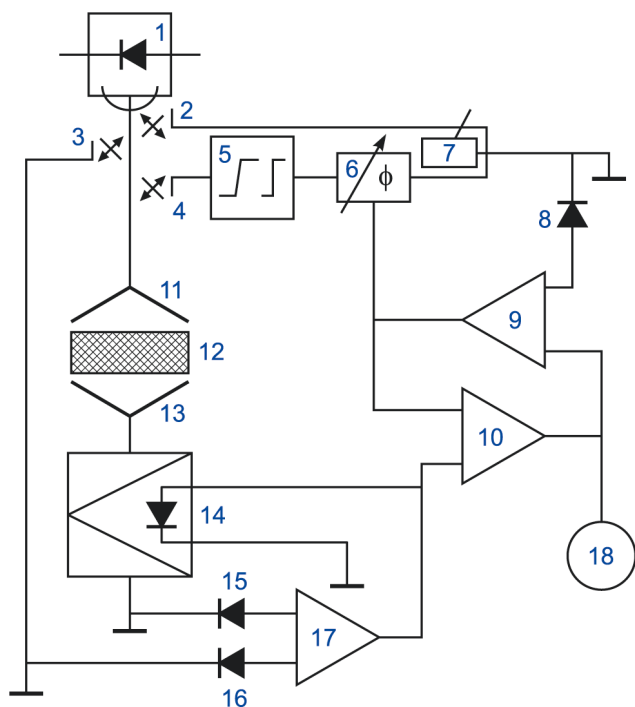


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для измерения влажности зерна в технологическом процессе:

1 – генератор; 2–4 – направляющие ответвители; 5 – ферритовый вентиль; 6 – фазовращатель; 7 – двойной волноводный мост; 8, 15, 16 – детекторы; 9, 10, 17 – избирательные усилители; 11, 13 – передающая и приёмная антенны соответственно; 12 – контролируемый материал; 14 – компенсирующий аттенуатор; 18 – индикатор

Fig. 1. Functional diagram of the experimental installation for measuring grain moisture in the technological process:

1 – generator; 2–4 – guide couplers; 5 – ferrite valve; 6 – phase shifter;
7 – double waveguide bridge; 8, 15, 16 – detectors; 9, 10, 17 – selective
amplifiers; 11, 13 – transmitting and receiving antennas, respectively;
12 – controlled material; 14 – compensating attenuator; 18 – indicator

контролируемый материал 12. При этом изменённый по фазе сигнал принимается антенной 13, проходит через компенсирующий аттенюатор 14, который ослабляет электромагнитный сигнал до уровня, необходимого для передачи на второй вход избирательно усилителя 10 и индикации сигнала. СВЧ-волна, пройдя через направляющий ответвитель 3 и детектор 16, поступает на второй вход избирательно усилителя 17, на его первый вход поступает сигнал, ослабленный аттенюатором и выявленный детектором 15. Входной и выходной сигналы избирательного усилителя 17 сравниваются, по результатам сравнения корректируется аттенюатор 14. Управление процессом прохождения СВЧ-волны через экспериментальную установку обеспечивает высокую точность измерения влажности автоматизированным СВЧ-влажномером, а использование современной микропроцессорной техники – сопряжение автоматизированного СВЧ-влажномера с элементами системы непрерывного регулирования влажности зерна в потоке.

На рис. 2 схематически показано взаимодействие потока СВЧ-энергии с материалом. Поток СВЧ-энергии $\Phi_{\text{пд}}$ попадает в материал, меньшая часть $\Phi_{\text{отр}}$ потока отражается, большая часть $\Phi_{\text{пр}}$ проходит через материал. По потерям СВЧ-энергии в материале определяют его влажность. На основании теоретических исследований авторами настоящей статьи сделан вывод, что в общем ходе логистической кривой взаимодействия потока СВЧ-энергии с материалом имеется некоторый участок с линейной зависимостью затухания электромагнитной волны от массового отношения влаги зерна, по которому можно оценить влияние характера мешающих факторов на определение информативного параметра (влажности зерна).

Сложность математического моделирования контроля влажности (информативного параметра) в технологическом процессе производства зерновых материалов во многом обусловлена влиянием большого числа различных мешающих факторов. Также есть трудности в обеспечении информационно-измерительной аппаратурой для эффективного анализа комплекса электрофизических параметров, которые достоверно характеризуют качество сельскохозяйственного сырья. Поэтому необходимо корректировать это влияние путём исключения случайной и систематической составляющей погрешности измерительно-информационной системы для контроля влажности.

В первичной информации в виде экспертного описания технологического процесса зачастую содержатся субъективные ошибки оператора, принимающего оперативное решение, и его вербальные оценки, вследствие чего эту информацию необходимо проверять на достоверность. Невысокая точность первичной информации приводит к выработке некорректных управляющих воздействий на технологический процесс, что уменьшает эффективность автоматизированного контроля влажности зерна и зернопродуктов.

Влияние неоднородности по плотности зерна на информативный параметр влажности.

Теоретическое исследование. Представим образец материала в форме куба, внутри которого имеются пустоты,

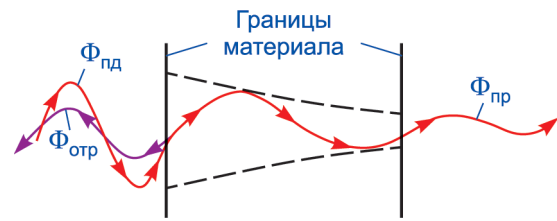


Рис. 2. Схема взаимодействия потока СВЧ-энергии с влажным материалом

Fig. 2. Diagram of the interaction of the microwave energy flow with wet material

и разобьём его на равные зоны. Для рассмотрения влияния неоднородности образца по плотности в исследуемом СВЧ-методе измерения влажности воспользуемся уравнением [2, 19]:

$$P_i = 4,343 \cdot 10^2 l Q \frac{3\pi^2}{\lambda} \frac{6\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + (\varepsilon'')^2}, \quad (1)$$

где P_i – потери СВЧ-энергии в материале образца; $i = 1, \dots, n$, n – количество зон в объёме кубического образца; l – толщина образца; Q – объёмная доля влаги; λ – длина электромагнитной волны; ε' , ε'' – активная и реактивная составляющие диэлектрической проницаемости.

Ввиду того, что зерновые материалы имеют различную плотность, внутри измерительной камеры СВЧ-влажномера потери СВЧ-энергии будут случайными. Будем считать, что при СВЧ-измерениях потери энергии зависят как от неоднородности образца зернового материала по плотности, так и от массового отношения влаги, тогда справедливо выражение

$$\rho W = \frac{m_3 - m_B}{V_0} \frac{m_B}{m_3 - m_B} = \frac{m_B}{V_0}, \quad (2)$$

где W – массовая доля влаги; ρ , m_3 , V_0 – объёмные плотность и масса, объём образца зернового материала соответственно; m_B – масса влаги в зерне.

Выразим предварительно массу воды, например в первой зоне, через её объём и плотность и с учётом (2) получим

$$\begin{aligned} \rho W &= v_1 \rho_1 / V_0; \\ v_1 &= K \rho_1 W_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично для других зон запишем

$$\left. \begin{aligned} v_2 &= K \rho_2 W_2; \\ &\dots\dots\dots \\ v_n &= K \rho_n W_n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Сложим почленно правые части уравнений (3), (4) и получим объёмную долю влаги неоднородного материала Q_n как сумму слагаемых:

$$Q_n = K (\rho_1 W_1 + \rho_2 W_2 + \dots + \rho_n W_n). \quad (5)$$

Из (5) выразим среднее значение объёмной доли влаги неоднородного материала

$$\overline{Q_n} = K_1 \sum_{i=1}^n i \frac{\rho_i W_i}{n_1}, \quad (6)$$

$$K_1 = K \rho_1 / v_0.$$

Аналогично можно записать среднее значение объёмной доли влаги однородного материала

$$\overline{Q_0} = K_1 \rho W. \quad (7)$$

Подставив в (1) вместо Q среднее значение (6), при значениях параметров $l=0,25$ м, $\lambda=0,032$ м получим объёмную плотность неоднородного материала

$$\overline{\rho_n} = 6 \cdot 10^5 K_1 \sum_{i=1}^n \left[\frac{\rho_i W_i}{n_1} \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + (\varepsilon'')^2} \right]. \quad (8)$$

Аналогично для однородного материала запишем

$$\overline{\rho_0} = 6 \cdot 10^5 K_1 \rho W \frac{\varepsilon''}{(\varepsilon' + 2)^2 + (\varepsilon'')^2}. \quad (9)$$

Для упрощения анализа будем считать, что объёмная плотность материала одной зоны может принимать только два значения $\rho=0$; $\rho=\rho_i$ и размеры зон постоянны, тогда из (6), (8) будет следовать, что в зоне плотностью $\rho=0$ потери СВЧ-энергии также равны нулю, а в зоне плотностью $\rho=\rho_i$ – равны P_i .

Из сопоставления уравнений (8), (9) следует, что значения средних величин $\overline{\rho_n}$, $\overline{\rho_0}$ также неодинаковы. При однократном измерении разность $\overline{\rho_n} - \overline{\rho_0}$ будет характеризовать

дополнительную абсолютную погрешность измерения массового отношения влаги зерна, неоднородного по плотности. Относительную погрешность измерения массового отношения влаги зерна при доверительной вероятности $P=0,95$ определим как

$$\delta_n = \frac{2(\overline{\rho_n} - \overline{\rho_0})}{\overline{\rho_n}} \cdot 100. \quad (10)$$

Методы и средства измерений влажности могут быть одно- и многопараметрическими. Поддержание постоянной объёмной плотности материала в однопараметрическом влагомере малоэффективно, что следует из сопоставления уравнений (8), (9).

Для устранения влияния различных неинформативных параметров (например, засорённости, и др.) целесообразнее измерять два параметра электромагнитной волны, связанных с массовым отношением влаги и объёмной плотностью зерна: ослабление по амплитуде A и сдвиг фазы φ . Для неоднородного материала эти параметры связаны с объёмной плотностью обобщённым эмпирическим уравнением

$$A = [K_0 + K_1(\rho_{гр} - \rho)] \exp \left[-\frac{K_2 W - K_3(\rho_{гр} - \rho)}{W^2 - (\rho_{гр} - \rho)} \right]; \quad (11)$$

$$\rho = K_0 \varphi \exp \left(-\frac{\sqrt{A_i - K_i}}{K_i} \right),$$

где A_i – ослабление по амплитуде СВЧ-энергии с учётом поправки на плотность; ρ – текущее значение плотности материала; $\rho_{гр}$ – плотность материала при градуировке измерительного прибора; $K_0, K_1, \dots, K_i$ – константы для зерна.

Для измерительного прибора контроля влажности зерна, как и для любой информационно-аналитической системы, требуется наибольшее выделение полезного сигнала $\partial A / \partial W$ при максимальном подавлении мешающих факторов $\partial A / \partial \rho$.

Экспериментальное исследование. Эксперименты проводили в производственных условиях АО «ГАЛЛА-АЛТЕГ» (Узбекистан) [20–23]. Образцы зернового материала отбирали в шнековых уплотнителях, пробоотборниках, весовых дозаторах и на транспортёрных лентах. Плотность контролируемого материала колебалась в пределах 2–5 % из-за гранулометрического состава зёрен (зависимость плотности зёрен от их влажности учитывали при градуировке измерительных приборов). При изменении плотности (на ± 5 %) и влажности зерна (на 12 %) относительные погрешности измерения ослабления δA и фазового сдвига $\delta \varphi$ для доверительной вероятности 0,95 не превышают 0,3 дБ и 18° соответственно. Влияние неоднородности образца, инструментальной и других, не учтённых выше, погрешностей определили дисперсией воспроизводимости и получили $\delta A = \pm 0,7$ дБ, $\delta \varphi = \pm 6,4^\circ$. Суммарное влияние рассмотренных факторов на результаты измерений ослабления и фазового сдвига образцов зернового материала при влажности 12 % составило соответственно $\delta A = \pm 0,9$ дБ и $\delta \varphi = \pm 16,1^\circ$. В пересчёте по градуировочным зависимостям абсолютные погрешности измерений влажности амплитудным и фазовым методами составили соответственно $\pm 0,8$ и $\pm 1,8$ %. Анализ составляющих

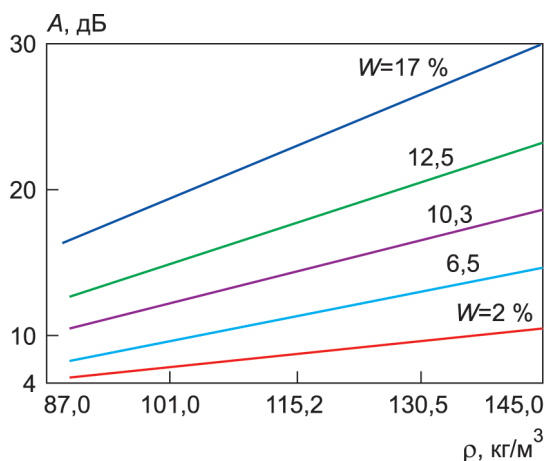


Рис. 3. Зависимость затухания A электромагнитной волны от объёмной плотности ρ зерна пшеницы при различной массовой доле W влаги

Fig. 3. Graph of the dependence of the attenuation A of the electromagnetic wave on the bulk density ρ of grain-wheat at different mass fraction W of moisture

суммарных погрешностей показывает, что наиболее существенный вклад при амплитудных измерениях вносит неравномерность распределения влаги по формам связи и неоднородность образца по плотности, а при фазовых – изменение плотности.

Вначале проводили эксперименты с целью установления диапазона измерения, в котором функция преобразования «затухание – массовое отношение влаги» подчинялась бы линейному закону, и выбора диапазона измерения для дальнейших исследований. Затем проводили основные эксперименты. В измерительную камеру влагомера помещали очищенные от сора образцы зернового материала (пшеницы с разным содержанием влаги) и определяли затухания СВЧ-волны. Масса навески составляла (800 ± 8) г, что соответствовало объёмной плотности 116 кг/м^3 . Погрешность измерения массового отношения влаги зерна однопараметрическим методом в диапазоне температур $10\text{--}35^\circ\text{C}$ и при засорённости не более 5 % не превысила 10 % отн.

Из сравнения полученных результатов с данными лабораторных исследований [24] следует, что погрешность измерения массового отношения влаги в производственных условиях в среднем на 1,3 % выше, чем в лабораторных условиях. Это указывает на более высокую неоднородность подвизимого непосредственно с полей зерна пшеницы по массовому отношению влаги и по плотности, неоднородность по плотности возникает в результате изменения механических свойств зерна. Коэффициент неоднородности, выявленный в результате эксперимента методом переукладок, находится в пределах 2,0–8,5 % [25] и его необходимо учитывать.

Обсуждение результатов. Важнейшей метрологической характеристикой средств измерений является их точность, её повышение, как правило, влечёт за собой экспоненциальное повышение стоимости одного измерения [26, 27]. Для расчёта погрешности измерения влажности амплитудным и фазовым методами необходимо вначале выявить степень изменения влияющих факторов в конкретных условиях измерения [28, 29].

Относительная погрешность многопараметрического метода измерения влажности в среднем на 2 % меньше погрешности однопараметрического метода, что объясняется уменьшением влияния $\partial A/\partial \rho$. Таким образом, на зерноперерабатывающих пунктах и предприятиях целесообразнее применять многопараметрический метод измерения массового отношения влаги зерна [30].

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости затухания A электромагнитной волны от объёмной плотности ρ зерна пшеницы при различной массовой доле W влаги, из которого следует, что с увеличением объёмной плотности при постоянном значении массовой доли влаги уменьшается приращение $\partial A/\partial \rho$. Согласно рис. 3 при $\rho = 165\text{--}200 \text{ кг/м}^3$ влияние мешающих факторов $\partial A/\partial \rho$ будет минимальным. Погрешность измерения влажности зерна также уменьшается с увеличением объёмной плотности ρ . Как отмечалось выше, с увеличением массы навески при $W = \text{const}$ уменьшается коэффициент неоднородности по плотности образца, что также указывает на необходимость увеличения ρ с целью повышения точности измерения массового отношения влаги зерна.

Закключение. Согласно проведённому анализу основная составляющая суммарной погрешности СВЧ-влагомеров

(амплитудных и фазовых) связана с влиянием мешающих факторов и в основном зависит от переменной толщины и плотности контролируемого материала.

Результаты выполненных исследований подтверждают правильность теоретических предпосылок и указывают на целесообразность разработки многопараметрического метода количественного анализа, при котором помимо затухания A амплитуды СВЧ-энергии необходимо измерять фазовый сдвиг ϕ и отражения электромагнитной волны от границы раздела сред. Измерение массового отношения влаги на основе трёх указанных параметров позволит учесть влияние мешающих факторов и повысить точность измерения на 3 % отн. по сравнению с точностью однопараметрического метода. Установлено влияние следующих мешающих факторов:

неоднородности электромагнитного поля в зоне измерения (в пределах ± 2 дБ);

неоднородности материала по свойствам и составу (погрешность в пределах 1,4–8,5 % отн.);

рассогласования волновых сопротивлений на границе раздела сред «воздух – зерно», приводящего к потере мощности P излучения в пределах $\pm 0,05P$.

Список источников / References

1. Каландаров П. И. Термогравиметрический метод измерения влажности: оценка точности и эффективность применения в агропромышленном комплексе // Метрология. 2021. № 2. С. 44–62 [Kalandarov P. I., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 522–528. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01963-9>].
2. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влагометрии. Минск.: Высшая школа. 1974. 349 с. [Benzar V. K., *Tekhnika SVCH-vlagometrii*, Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1974, 349 p. (In Russ.)].
3. Kalandarov P. I., Mukimov Z., Abdullaev K., et al, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012091. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_96
4. Теория и практика экспрессного контроля влажности твёрдых и жидких материалов / Под ред. Е. С. Кричевского. М.: Энергия, 1980. 240 с. [*Teoriya i praktika ekspressnogo kontrolya vlazhnosti tvyordyh i zhidkih materialov*, ed. E. S. Krichivskiy, Moscow, Energiya Publ., 1980, 240 p. (In Russ.)].
5. Берлинер М. А. Измерение влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с. [Berliner M. A., *Izmerenie vlazhnosti*, Moscow, Energiya Publ., 1973, 400 p. (In Russ.)].
6. Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск: УОБГАТУ, 2005. 292 с. [Lisovsky V. V., *Teoriya i praktika sverh-vysokochastotnogo kontrolya vlazhnosti sel'skohozyajstvennykh materialov*, Minsk, UOBGATU, 2005, 292 p. (In Russ.)].
7. Матякубова П. М., Исмагуллаев П. Р., Кулуев Р. Р. Сравнительный анализ амплитудного и фазового методов для случая измерения влажности материалов в технологическом потоке при сушке зерна // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94. № 2. С. 424–430 [Matyakubova P. M., Ismatullaev P. R., Kuluyev R. R., *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2021, vol. 94, no. 2, pp. 408–414. <https://doi.org/10.1007/s10891-021-02311-y>].

8. Саитов Р. И. СВЧ-влажнометрия сельскохозяйственных продуктов. Уфа: Гилем, 2009. 158 с. [Saitov R. I., *SVCH-vlagometriya sel'skhozoyajstvennykh produktov*, Ufa, Gilem Publ., 2009, 158 p. (In Russ.).]
9. Семенова Т. И., Прокофьев В. Л. Особенности измерения влажности зерна в диапазоне сверхвысоких частот // Хлебопродукты. 2002. № 1. С. 25–26 [Semenova T. I., Prokofiev V. L., *Osobennosti izmereniya vlazhnosti zerna v diapazone sverhvysokih chastot, Hleboprodukty*, 2002, no. 1, pp. 25–26. (In Russ.).]
10. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., Nigmatov A. M., *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*, 2022, pp. 810–817. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_96
11. Искандаров Б. П., Каландаров П. И. Анализ воздействия влияющих факторов на результаты измерений влажности материала на высоких частотах // Измерительная техника. 2013. № 7. С. 64–66. [Iskandarov B. P., Kalandarov P. I., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 827–830. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0290-2>.]
12. Morozov S. M., Kuzmin K. A., *Microwave problems of modern science and education*, 2017, no. 11 (93), pp. 16–20. <https://doi.org/10.20861/2304-2338-2017-93>
13. Narkevich Yu. M., Logunova O. S., Kalandarov P. I., et al, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012031>
14. Narkevich Yu. M., Logunova O. S., Kalandarov P. I., et al, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 939(1), 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/939/1/012030>
15. Морозов М. С., Морозов С. М., Реут В. А. Микроволновая установка для сушки зерна // Молодой учёный. 2016. № 30(134). С. 83–86 [Morozov M. S., Morozov S. M., Reut V. A., *Mikrovolnovaya ustanovka dlya sushki zerna, Molodoy uchyonyj*, 2016, no. 30(134), pp. 83–86. (In Russ.).]
16. Álvarez A., Fayos-Fernández J., Monzó-Cabrera J., Cocero M. J., Mato R. B., *Journal of Food Engineering*, 2017, vol. 197, pp. 98–106. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2016.11.009>
17. Каландаров П. И., Искандаров Б. П. Измерения влажности бурого угля Ангренского месторождения и проблемы метрологического обеспечения // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 70–72. [Kalandarov P. I., Iskandarov B. P., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 7, pp. 845–848. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0049-1>.]
18. Hinz D. C., *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2007, vol. 43, pp. 779–783. <https://doi.org/10.1016/J.JPBA.2006.08.002>
19. Микроволновая термовлажометрия / Под общ. ред. П. А. Федюнина. М.: Машиностроение-1, 2004. 208 с. [Fedyunin P. A., Dmitriev D. A., Vorobyev A. A., Chernyshov V. N., *Microwave thermoplagometry*, ed. P. A. Fedyunin, Moscow, Publishing House Mashinostroenie-1, 2004, 208 p.].
20. Kalandarov P. I., Mukimov Z. M., *Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2022), Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham., 2023, pp. 966–981. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_94
21. Бородин И. Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве. М.: Книжный мир, 2012. 56 с. [Borodin I. F., *Primenenie SVCH-energii v sel'skom hozyajstve*, Moscow, Knizhny mir Publ., 2012. 56 p. (In Russ.).]
22. Morozov S. M., Kuzmin K. A., Kochetkova L. I., Balmashnova E. V., *Agrarian Scientific Journal*, 2019, no. 4, pp. 87–89. <https://doi.org/10.28983/asj.y2019i4pp87-89>
23. Каландаров П. И., Логунова О. С., Андреев С. М. Научные основы влажометрии. Монография. Ташкент, 2021. 174 с. [Kalandarov P. I., Logunova O. S., Andreev S. M., *Scientific foundations of moisture measurement*, Monograph, Tashkent, 2021, 174 p. (In Russ.).]
24. Каландаров П. И. Высокочастотный влагомер для измерения влажности зерна и зернопродуктов // Измерительная техника. 2022. № 4. С. 65–71. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-4-65-71> [Kalandarov P. I., High-frequency moisture meter for measuring the moisture content of grain and grain products, *Izmeritel'naya tekhnika*, 2022, no. 4, pp. 65–71. (In Russ.).]
25. Васильев С. И., Нугманов С. С., Гриднева Т. С. СВЧ-влажномер // Сельский механизатор. 2014. № 10(68). С. 28–29 [Vasiliev S. I., Nugmanov S. S., Gridneva T. S., *Microwave moisture meter, Selskiy Mehanizator*, 2014, no. 10(68), pp. 28–29 (In Russ.).]
26. Kalandarov P. I., Abdullayev K. K., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1043(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012011>
27. Kalandarov P. I., Abdullaeva D. A., *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1043(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012012>
28. Крамаренко В. В., Никитенков А. Н., Молоков В. Ю. О применимости СВЧ-Метода для определения влажности песчаных грунтов // Современные проблемы науки и образования [сетевое издание]. 2015. № 1(1) [Kramarenko V. V., Nikitenkov A. N., Molokov V. Yu., *About application of microwave method for determining the moisture content of soils, Modern problems of science and education*, 2015, № 1(1). (In Russ.).]
29. Jomeh Z. E., Askari G. R., Air/microwave drying, as against combined method of drying sliced apple, *Iran journal of agricultural sciences*, 2004, vol. 35, no. 3, pp. 777–785.
30. Павлов С. А., Пехальский И. А., Кынев Н. Г. Исследования комбинированных режимов СВЧ-сушки зерна // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. № 6. С. 25–30. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-6-25-30> [Pavlov S. A., Pehalsky I. A., Kynev N. G., *Studies of combined modes of microwave grain drying, Agricultural machines and technologies*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 25–30. (In Russ.).]

Статья поступила в редакцию 23.05.2022; одобрена после рецензирования 23.06.2022; принята к публикации 25.06.2022.
The article was submitted 23.05.2022; approved after reviewing 23.06.2022; accepted for publication 25.06.2022.