

Ю. В. Крушевский, к.т.н., доцент; Я. А. Бородай, магистр

ВЛИЯНИЕ МАССООБМЕНА ВОДЫ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований электрофизических параметров зерна, на основе которых раскрываются причины, приводящие к снижению точности измерения влажности диэлькометрическими влагомерами. Предлагаются пути повышения точности измерения комплексной диэлектрической проницаемости зерновых культур.

Ключевые слова: диэлькометрический влагомер, влажность зерна, диэлектрическая проницаемость зерна.

Введение

Украина является одним из крупнейших мировых производителей зерна, производителем конкурентоспособных зерносушилок, но не имеет современных систем контроля и управления процессами сушки зерна – на рынке отсутствуют устройства отечественного производства, какие соответствовали бы необходимым требованиям по цене, точности, надежности и обеспечивали бы возможность контроля влажности зерна в режиме реального времени. Влагомеры, которые выпускались еще в СССР не используются на практике из-за их фактических низких точностей. Использование импортных влагомеров зерна для большинства предприятий агропромышленного комплекса (АПК) недоступно из-за высокой стоимости последних. Тем не менее процесс высушивания зерна – один из наиболее энергоемких и ответственных из всего цикла хранения и переработки зерна. Это связано как с прямыми убытками, обусловленными потерей качеств зерновых и невозможности их хранения при несоответствующей влажности, так и с увеличением энергетических расходов на процесс высушивания. Размеры убытков по этой причине только для отдельных комбинатов хлебопродуктов достигают десятков тысяч гривен за сезон [1]. Актуальность этого вопроса в целом для АПК не вызывает сомнения.

Анализ исследований и публикаций

При измерении влажности зерна различают прямые и непрямые методы. Прямые методы базируются на удалении из опытной пробы любым способом влаги и измерении массы образца до и после удаления влаги. Самыми распространенными в этой группе являются термогравиметрические влагомеры. Такие влагомеры обеспечивают высокую точность результатов (погрешность на уровне $\pm 0,1\%$), однако требуют много времени на измерение (от 20 мин. до нескольких суток) [2]. Со середины 90-х годов прошлого века на рынке Украины предлагаются импортные лабораторные влагомеры со встроенными весами и инфракрасными источниками излучения (иногда такие приборы комплектуются миниатюрными мельницами для размалывания опытной пробы зерна), которые благодаря объединению сушильного шкафа, весов и микропроцессорного устройства управления в одном приборе дают возможность уменьшить время измерения и повысить сходимость результатов, при этом обеспечивают границу допустимой погрешности анализатора на уровне $\pm 0,2...0,3\%$ [3]. Однако для использования таких приборов в лаборатории необходима адаптация их режимов работы к отечественным требованиям, для чего необходимо проводить метрологические поверки, что вызывает дополнительные расходы, к тому же практически все приборы, которые используют термогравиметрический метод относятся к группе приборов разрушающего контроля, то есть опытный образец зерна в процессе измерения его влажности становится непригодным для последующего использования, что не всегда приемлемо.

Непрямые методы измерения влажности базируются на зависимости физических свойств объекта контроля – опытной пробы зерна от степени (уровня) ее увлажненности. В приборах, построенных на таких методах, время измерения не превышает 1 – 5 мин. [3]. Наибольшее распространение в данной группе получили приборы, которые используют электрические способы определения влажности: кодуктометрические (или резистивные), основанные на измерении электрического сопротивления образца при прохождении через него постоянного тока и диэлькометрических (емкостные и микроволновые), действие которых основано на сильной зависимости диэлектрической проницаемости зерна от содержания влаги. Это обусловлено аномально большим значением ϵ воды (81 при 20°C) [4].

В таблице приводятся характеристики диэлькометрических влагомеров заявленных производителями, которые представлены (предлагаются к продаже) на территории стран СНГ [2, 5, 6 7, 8, 9].

Таблица

Основные технические характеристики диэлькометрических влагомеров, представленных на рынке стран СНГ

Название прибора	Страна производитель	Диапазон измерения %	Погрешность измерения/ сходимости %	Длительность измерения, мин. (сек.)	Масса, кг/ мощность потребления, Вт	Диапазон рабочих температур, °C
PM-300 “Kett”	Япония	1 – 40	±0,5		1	
PM-400 “Kett”	Япония	6 – 30	±0,5		1,5	
PM-600 “Kett”	Япония	1 – 40	±0,2...0,5/ 0,05...0,2		1,7	
Аквасерч-600 “Kett”	Япония	1 – 40	±0,5		1,7	
ИБЗ-М I ИБЗ-м I T	Россия	8 – 35	±1...1,5	1	9/55	
ЦВЗ-3А	Россия	8 – 35	±1...2,5	2	8/10	
WILE-65	Финляндия	8 – 35	±1...1,5		0,8	0 – 60
Sinar AP 6060	Швеция	1 – 35	±0,3	(6)		0 – 55
“Капля”	Россия	8 – 24	±0,8	(0,5)	2,5/20	
Grain Master	США	5 – 40	±0,25/0,25		0,6	0 – 40
ВСП-100	Россия	4 – 30	±0,5	1	0,3	5 – 35
ВСП-6П	Россия	4 – 24	±0,8	1	0,5	5 – 35
WILE-55	Финляндия	8 – 35	±0,5...1,0		0,8	
Multi-Grain	США	6 – 45	±0,5		1,5	
ФАУНА	Россия	6 – 30	±1,5			5 – 40
ФАУНА М	Россия	6 – 30	±1,0...2,0	(7)	0,33	5 – 40
Farmpoint	Дания	5 – 45	±0,5		2,0	
GAC500	США	5 – 45	±0,5/0,1		5,4	0 – 50
HE-50	Германия	8 – 35	±0,5		3,2	
Superpoint	Дания	5 – 45	±0,5		0,75	0 – 45

Такие влагомеры состоят из первичного (при необходимости промежуточного) измерительного преобразователя и измерительного устройства. На точность диэлькометрических влагомеров влияет много факторов, поскольку ϵ объекта контроля

является сложной функцией многих параметров [1].

$$\varepsilon = f(W, T, G, H, P),$$

где W, T, G, H, P – соответственно влажность, температура, гранулометрический состав пробы, химический состав пробы, электрохимический критерий границы| электрод – зерно.

В современных диэлькометрических влагомерах влияние температуры на результат определения влажности в большинстве случаев учтено в виде поправочных коэффициентов, которые автоматически или в ручном режиме вводятся в конечный результат измерений (влагомеры серии “Kett”, ЦВЗ-3А WILE-65/55, Sinar AP 6060, “Капля”, Grain Master ВПС-100, MultiGrain, Farmpoint GAC500, HE-50, Superpoint; см. данные табл.).

Гранулометрические характеристики зерна не идеальны, поэтому при каждом повторном засыпании плотность упаковки опытной пробы в конденсаторе-контейнере разная, и, как следствие, падает повторяемость (сходимость) результатов. Уменьшить влияние плотности упаковки в некоторых современных влагомерах пытаются применением пробоподготовки – предварительного уплотнения зерна в камере конденсатора-контейнера (влагомеры “Капля”, Grain Master, ВСП-100 WILE-65, Farmpoint, HE-50, Superpoint; см. данные табл.).

Химический состав опытной пробы зерна зависит от его селекционных особенностей, которые определенным образом учитываются введением калибровочных кривых для сортов максимально возможного количества наименований сельскохозяйственных культур в память микропроцессорного блока или комплектацией влагомеров соответствующими таблицами и (или) проведением перед измерением специальной калибровки (влагомеры серии “Kett”, ИВЗ-М1, ИВЗМ1Т, ЦВЗ-3А WILE-55/65, Smar AP 6060, “Капля”, Grain Master ВСН-100, ВСП-6П Multi Grain, ФАУНА, ФАУНА М, Farmpoint GAC500, HE-50, Superpoint; см. данные табл.). Кроме того на химический состав зерна влияют условия, в которых росла культура (почвы, количество удобрений, погодные факторы и др.), которые практически, не поддаются аналитическому прогнозированию и могут быть учтены лишь в единичных случаях при предварительной калибровке с использованием данных, полученных гравиметрическим методом для конкретного вида (сорта) культуры с конкретного поля.

Постановка задания

Информация о вопросах, связанных с влагообменом на границе стенка – зерно (электрохимический критерий границы зерно-электрод) в контейнере-конденсаторе первичного измерительного преобразователя, в рекламной информации производителей диэлькометрических влагомеров отсутствует, поэтому с высокой достоверностью можно утверждать, что в современных влагомерах влияние этого параметра на ε опытной пробы зерна не учитывается. Существуют лишь варианты, в которых предлагается после проведения нескольких повторов измерений первые полученные результаты влажности пробы отбросить, а другие – усреднить [12].

К отмеченному выше необходимо прибавить, что результаты измерений ε зависят от соотношения между количеством свободной и связанной влаги в исследуемом материале [10]. Кроме того существующие диэлькометрические влагомеры дают оценку влажности опытной пробы по значению модуля ее комплексной относительной диэлектрической проницаемости, значение которой находится по формуле:

$$|\dot{\varepsilon}| = \frac{C'_{изм}}{C_0},$$

где $C'_{изм}$ – измеренное влагомером значение емкости контейнера с зерном,

C_0 – емкость пустого контейнера.

Значение $C'_{изм}$ можно рассчитать по формуле:

$$C'_{изм} = C_0 \times \varepsilon \sqrt{1 + tg^2 \delta},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость опытного материала,
 $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в опытной пробе зерна.

То есть результат измерения будет зависеть не только от емкости заполненного зерном контейнера (влажности пробы), но и от тангенса угла диэлектрических потерь в исследуемом материале (влажности и минерального состава зерновки). Способ измерения влажности зерна, предложенный в [11], позволяет повысить точность диэлькометрических влагомеров за счет одновременного измерения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости пробы зерна. Однако процесс массообмена воды в объеме зерновой массы и на границе стенка контейнера – зерно во время измерений приводит к тому, что степень связи молекул воды со структурой зерновки изменяется, и, как следствие, не остаются постоянными на протяжении проведения эксперимента активная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Задание этой статьи – показать результаты экспериментальных исследований влияния процессов влагообмена в контейнере-конденсаторе, заполненном зерном пшеницы, на значение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пробы опытного материала.

Основные материалы статьи

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований электрофизических параметров пробы одного и того же зерна с разной степенью увлажнения при разных условиях проведения экспериментов в чувствительном элементе конденсаторного типа первичного измерительного преобразователя влагомера.

На рис. 1 приведены графики зависимости изменения ε и $\operatorname{tg} \delta$ во времени при разном увлажнении опытной пробы зерна. Как видно из графиков, ε и $\operatorname{tg} \delta$ изменяются на протяжении проведения эксперимента тем быстрее, чем выше влажность зерновой массы. Так, за 20 минут значения относительной диэлектрической проницаемости пробы зерна сравнительно с начальным результатом увеличивается более чем на 10%, а потерь – более чем на 25% для влажного зерна и только на 0,3%/об и соответственно на 1,5% для сухого зерна. Таким образом изменение ε и $\operatorname{tg} \delta$ во времени можно использовать как дополнительный информативный параметр при определении влажности зерна.

На рис. 2 приведены зависимости относительной диэлектрической проницаемости и потерь во времени для пробы влажного зерна, полученные с помощью одного чувствительного элемента конденсаторного типа со стенками (обкладками), изготовленными из разных материалов.

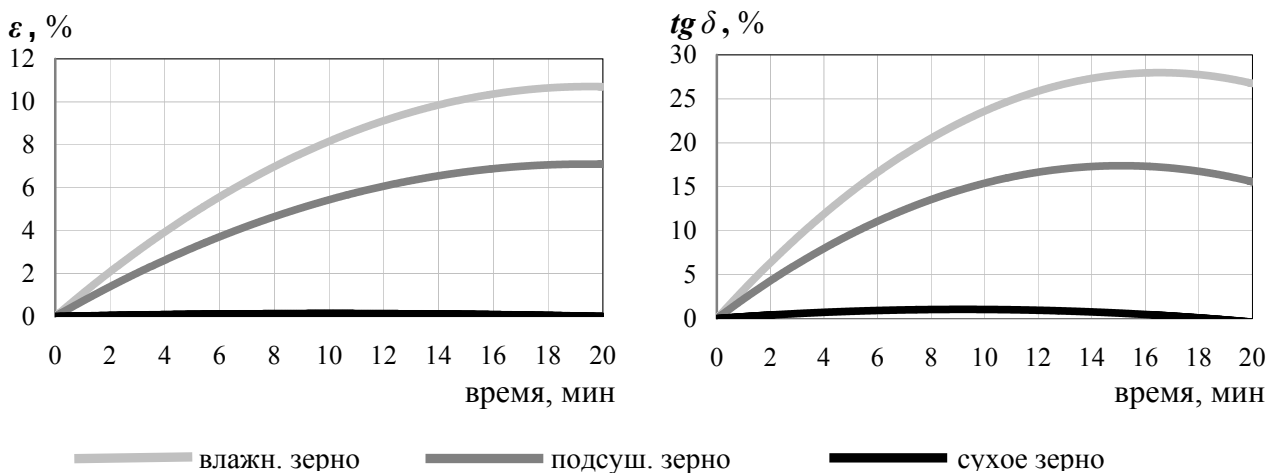


Рис. 1. Зависимость во времени изменения относительной диэлектрической проницаемости и потерь опытной пробы зерна разной увлажненности

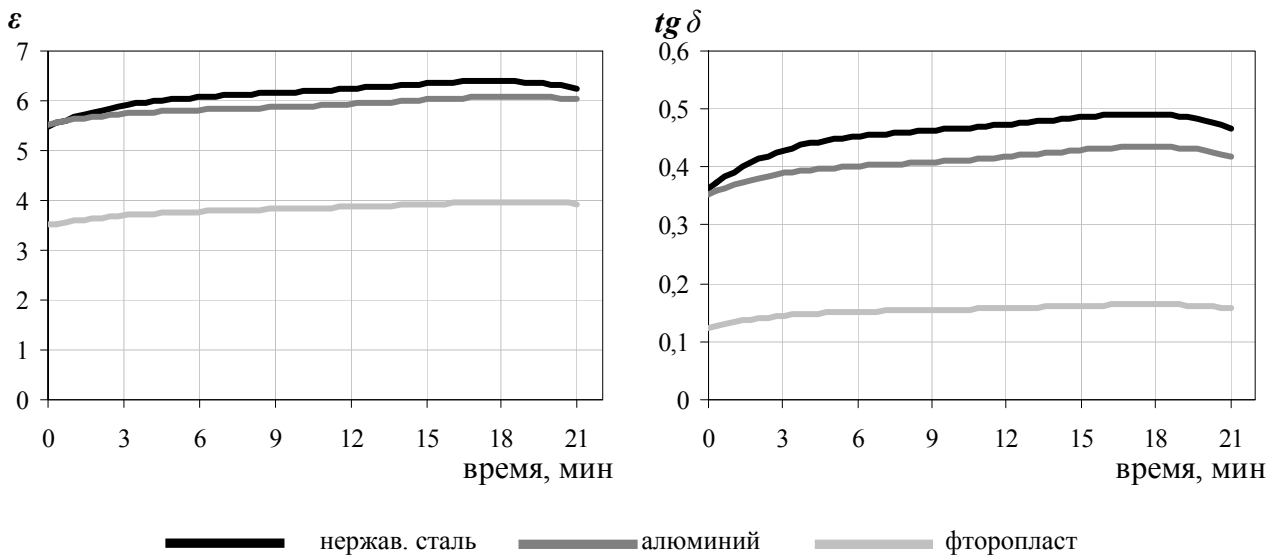


Рис. 2. Зависимость во времени диэлектрической проницаемости и потерь опытной пробы зерна от материала стенок контейнера при одинаковой увлажненности

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что после засыпания опытной пробы зерна в контейнер чувствительного элемента конденсаторного типа (как в объеме зерновой массы, так и на границе стенка контейнера – зерно) происходят процессы влагообмена (как в направлении “высвобождения”, так и в направлении “связывания” влаги), которые приводят к тому, что значение ϵ и $tg\delta$ изменяются на протяжении проведения эксперимента. Процессы, которые происходят в объеме опытной пробы зерна после засыпания ее в контейнер-конденсатор первичного измерительного преобразователя можно объяснить таким образом. Когда зерновая масса опытной пробы в контейнере находится в состоянии покоя, на связь молекул воды со структурой зерновки влияют два фактора – “связывания” активными центрами сорбции поверхности зерна [10] и “высвобождения” в объеме менисков, которые образуются в местах прикосновения зерен к стенкам контейнера и между собой в объеме опытной пробы. В момент засыпания зерна в контейнер все мениски разрушаются, при этом происходит высвобождение энергии, в результате чего молекулы воды становятся более связанными, что приводит к уменьшению ϵ и $tg\delta$. После завершения засыпания наступает новое состояние покоя для зерна и происходит обратный процесс поглощения энергии из объема пробы, что приводит к уменьшению степени связи между молекулами воды и структурой зерновки и увеличению ϵ и $tg\delta$. Через определенное время, которое зависит от соотношения свободной и связанной влаги (содержания влаги) в зерне, процессы высвобождения и связывания молекул воды уравниваются.

Упомянутые процессы существенно влияют на точность диэлькометрических влагомеров и имеют сложный характер, который зависит от материала стенок (обкладок) чувствительного элемента, а интенсивность влагообмена зависит от степени увлажненности опытной пробы зерна.

Необходимо отметить, что влагообмен в объеме опытной пробы зерна существенно влияет на результат измерения лишь в приборах насыпного (лабораторного) типа, для поточных влагомеров, где объект исследования постоянно находится в движении, высвобождение молекул воды в мениски практически не происходит, поскольку они постоянно разрушаются при транспортировке зерна в потоке.

Следовательно, для повышения точности результатов диэлькометрических влагомеров необходимо учитывать влияние влагообмена, который происходит как в объеме опытной пробы, так и на границе “стенка контейнера – зерно”.

Выводы

1. Точность измерения комплексной диэлектрической проницаемости объектов контроля биологического происхождения, например, зерновых культур, которые являются основными продуктами сельскохозяйственного производства, после засыпания зерна в контейнер чувствительного элемента конденсаторного типа, снижается существенным влиянием влагообмена как в объеме зерновой массы, так и на границе “стенка – зерно”.

2. Процесс влагообмена носит сложный характер и зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать при проектировании диэлькометрических влагомеров.

3. Для повышения точности измерения комплексной диэлектрической проницаемости зерновых культур в качестве дополнительного информативного параметра целесообразно использовать зависимость во времени изменения относительной диэлектрической проницаемости и потерь опытной пробы зерна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влагомер зерна в потоке – мал золотник, да дорог. Просяняк А.В., к. т. н., директор; Клабуков В.Ф., гл. конструктор АСУТП ГНПП “Эльдорадо”; Соснин К.В., аспирант НГУ г. Днепропетровск. <http://dnvpeldorado.dp.ua/doc/article3.doc>.
2. ТД “Автоматика” – контрольно-измерительные приборы (КИПИА), г. Смоленск, <http://www.tdautomatiku.ru/showme.php?rasdel=5-2>.
3. Влагомеры, г. Воронеж. Zernolab.ru. <http://www.zernolab.ru>.
4. Диэлькометрические влагомеры и гигрометры. Словарь научных терминов. Портал Естественных Наук. <http://e-science.ru/index/?id=776>.
5. Анализаторы влажности, г. Воронеж. Zernolab.ru. <http://www.zernolab.ru/index.php?m=178&page=101>.
6. Оборудование для определения влагосодержания зерна и продуктов его переработки. ЗАО “ЗЕРНОТЕХНИКА”, г. Москва. http://www.zernotechnika.ru/equip/lab/vl_zerno.htm.
7. Влагомеры, плотномеры, вискозиметры, прочие приборы. Laborant.ru. <http://www.measurement.ru/gk/sostav/06/044.htm/>
8. Влагомеры. ООО АкваСенсор. Украина. г. Харьков. http://aquasensor.com.ua/vlagomer/v_grainmaster.php.
9. Влагомер зерна, семян трав и муки. Новинка 2005 г. ООО “Агрола”, г. Москва (Институт Зерна). <http://agrola.narod.ru/superpoint.htm>.
10. Егоров Г. Термодинамическое взаимодействие зерна с водой //Хлебопродукты. – 2004. – №2. – С. 22–23.
11. А. С. 4775221 СССР Способ измерения влажности /Крушевский Ю.В., Куцевол М.А., Супьян В.Я. //Бюллетень. – 1992. – №9.
12. Влагомер зерна «ЭВЛАС-5». Руководство по эксплуатации САП 030.00.00.000 РЭ. СИБАГРОПРИБОР http://www.sibagropribor.ru/ru/content/doc/evlas/evlas5/manual_evlas5.pdf.

Крушевский Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехник;

Бородай Ярослав Александрович – магистр радиотехники.

Винницкий национальный технический университет