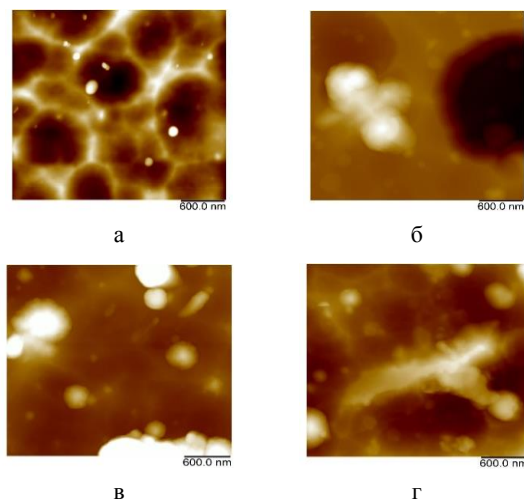


значений 184 и 13,8 ГПа соответственно по сравнению с покрытием CrN (рис. 2). С увеличением содержания Al в покрытии до 70% ( $Al_{70}Cr_{30}N$ )  $E$  и  $H$  возрастают до значений 234 и 19,8 ГПа соответственно. Дальнейшее увеличение содержания Al ( $Al_{80}Cr_{20}N$ ) приводит к снижению механических свойств.



$a - x = 0$ ;  $б - x = 0,5$ ;  $в - x = 0,7$ ;  $г - x = 0,8$

Рисунок 1 – АСМ-изображения ( $3 \text{ мкм}^2$ ) поверхности покрытий  $Al_xCr_{1-x}N$

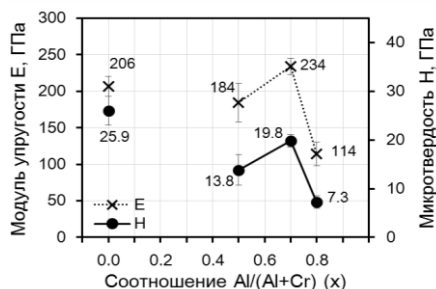


Рисунок 2 – Механические свойства покрытий AlCrN

**Заключение.** Проведены исследования морфологии поверхности и механических свойств покрытий AlCrN с различным содержанием Al. Установлено, что добавление Al в состав покрытия приводит к появлению на поверхности микрочастиц, которые способствуют увеличению шероховатости поверхности. По результатам определения механических свойств установлено, что наибольшие значения  $E$  и  $H$  у покрытия с содержанием Al 70% ( $Al_{70}Cr_{30}N$ ).

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № T21MC-029.

### Литература

1. Microstructural evolution and thermal stability of AlCr(Si)N hard coatings revealed by in-situ high-temperature high-energy grazing incidence transmission X-ray diffraction / N. Jager [et al.] // Acta Materialia. – 2020. – Vol. 186. – P. 545–554.
2. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al–Cr–B–N thin films / C. Trittemmel [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2012. – Vol. 213. – P. 1–7.
3. Franz, R. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review / R. Franz, Ch. Mitterer // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228. – P. 1–13.
4. Investigation of the properties of  $Al_{1-x}Cr_xN$  coatings prepared by cathodic arc evaporation / A. E. Reiter [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 2114–2122.
5. Influence of deposition parameters on hard Cr–Al–N coatings deposited by multi-arc ion plating / L. Wang [et al.] // Appl. Surf. Sci. – 2012. – Vol. 258. – P. 3629–3636.
6. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 2. – С. 209–217.

УДК 519.2:006

## РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

Кулуев Р.Р., Матякубова П.М.

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова  
Ташкент, Республика Узбекистан

**Аннотация.** На основе полученных данных и результатов обоснованы две физические модели емкостных преобразователей, как наиболее эффективные для контроля влажности зерна и зернопродуктов в результате которого разработано и изготовлена конструкция емкостных преобразователей и микропроцессорное устройство контроля влажности зерна, основанного на емкостном измерении. Проведен структурный синтез измерительного преобразователя влажности зерна, в результате которого построена ее оптимальная структура, отличающаяся компактностью размещения схемы.

**Ключевые слова:** емкостные преобразователи, физические модели, устройство, влажность.

## DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF CAPACITIVE CONVERTERS OF GRAIN MOISTURE

Kuluyev R., Matyakubova P.

Tashkent State Technical University named after I.A. Karimov  
Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** On the basis of the obtained data and results, two physical models of capacitive converters were substantiated as the most effective for controlling the moisture content of grain and grain products, as a result of which the design of capacitive converters and a microprocessor device for controlling grain moisture based on capacitive measurement were developed and manufactured. Structural synthesis of the measuring transducer of grain moisture has been carried out, as a result of which its optimal structure is constructed, which is distinguished by the compactness of the layout of the circuit.

**Key words:** capacitive transducers, physical models, device, humidity.

Адрес для переписки: Кулuyeв Р.Р., г. Ташкент, Республика Узбекистан  
e-mail: ruslan-kuluyev@mail.ru

В косвенных методах оценка влажности сыпучих материалов производится по изменению различных его свойств. В работе приведены основные характеристики косвенных методов, показаны достоинства и недостатки. В технологическом процессе из перечисленных методов способны применяться следующие: радиоактивный; метод ядерного магнитного резонанса; кондуктометрический; емкостной; СВЧ; инфракрасный и тепловой метод. Недостатками поточных преобразователей влажности сыпучих материалов на основе ядерно-магнитного резонанса – это дорогостоящая аппаратура и высокие требования к отсутствию внешних помех. Недостатками поточных инфракрасных преобразователей влажности это технология поверхностного измерения влажности и влияние увеличения размера частиц на результат измерения. Недостатками тепловых поточных преобразователей влажности это невысокая точность из-за больших потерь тепла нагрева тепловых элементов окружающую среду и большая динамическая погрешность из-за тепловой инерции теплопровода. Радиоактивный и кондуктометрический методы не обладают высокой точностью измерения. Вдобавок радиоактивный метод требует сложного, дорогого и потенциально опасного оборудования. На практике поточные влагомеры обычно используют либо емкостной, либо СВЧ датчики. СВЧ устройство сложнее и дороже. Емкостной метод вследствие высокой чувствительности широко использован в областях поточных преобразователей влажности [1–2]. Кроме того, использование микропроцессоров в измерительных схемах существенно расширяет функциональные возможности емкостных преобразователей. Так же, преимуществом данного метода является простота и сравнительно невысокая стоимость как измерительной схемы, так и самого емкостного датчика. Емкостной метод обладает достаточно высокой точностью измерения.

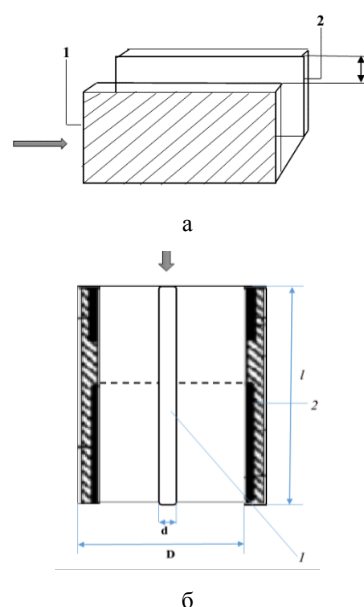
Для разработки первичного измерительного преобразователя выбраны две наиболее широко

применяемые типы емкостных конструкции: первый – плоскопараллельный, второй – коаксиальный.

Первый плоскопараллельный емкостной преобразователь весьма эффективно сочетается с конструкцией для сыпучих материалов с кюветой, которая транспортируется с помощью ленточного транспортера.

Вторая конструкция – коаксиальная, которая установленная вертикально с бункером и сыпучий материал транспортируется с помощью специального шнека с приводом.

Мы обосновали, что среди емкостных преобразователей для автоматического контроля влажности зерна и зернопродуктов весьма эффективные по точности и чувствительности две простые конструкции емкостного плоскопараллельного типа и емкостных датчиков коаксиального типа, которые представлены на рис. 1 а и б.



а – плоскопараллельного типа;  
б – коаксиального типа; 1, 2 – электроды

Рисунок 1 – Физические модели емкостного преобразователя

Математическая модель емкостного преобразователя плоскопараллельного типа может быть представлена в следующем виде

$$C_0 = [\sum_l^r \varepsilon_r g_r + \sum_l^a \varepsilon_a g_a] F, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость вещества основного зазора;  $\varepsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость вещества вне зазора;  $g_r$  – пространственная характеристика поля зазора, м;  $g_a$  – пространственная характеристика элемента внешнего поля, м.

Емкость датчика коаксиального типа, образованного двумя цилиндрами  $d$  и  $D$ , имеющими длину взаимного перекрытия  $l \gg \frac{D-d}{2}$ , без учета краевых эффектов может быть определена следующим образом.

При заборе между внутренними поверхностями, во многом раз большем половины диаметра внутреннего цилиндра, т.е. при  $(D-d) \gg d$ , емкость системы определяется по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_i g_V = \varepsilon_0 \varepsilon_i \frac{2\pi l}{\ln \frac{D}{d}} = 55,6 \varepsilon_i \frac{l}{\ln \frac{D}{d}} 10^{-12} F, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i$  – диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего зазор;  $g_V$  – пространственная характеристика поля, м;  $l$  – длина взаимного перекрытия цилиндров, м;  $d$  – внешний диаметр внутреннего цилиндра, м;  $D$  – внутренний диаметр внешнего цилиндра, м.

За последние годы в развитии информационно-измерительной техники произошел существенный прорыв, обусловленный в первую очередь гигантским прогрессом микроэлектроники и компьютеризацией. Широкое применение микропроцессоров привело к созданию «интеллектуальных» первичных преобразователей.

На основе полученных данных и результатов обоснован емкостной метод как наиболее эффективный для контроля влажности зерна и зернопродуктов в результате которого разработано и изготовлено микропроцессорное устройство контроля влажности зерна, основанного на емкостном измерении. Проведен структурный синтез измерительного преобразователя влажности зерна, в результате которого построена ее оптимальная структура, отличающаяся компактностью размещения схемы, наглядностью отображение информации, удобством эксплуатации и минимальной потребляемой мощностью (рис. 2).

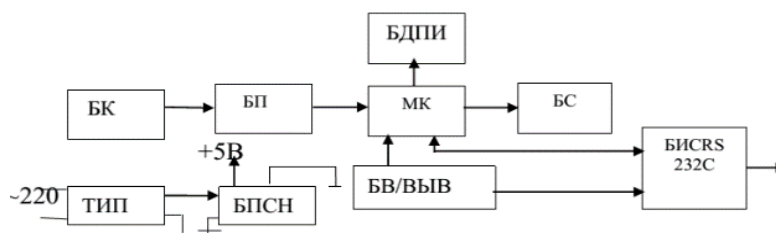


Рисунок 2 – Структурная схема устройства контроля влажности зерновых продуктов

Структурная схема микропроцессорного устройства контроля влажности зерна состоит из следующих блоков:

- блок кювета (БК);
- блока преобразователя (БП);
- микроконтроллера (МК);
- блока ввода и вывода информации (БВ/Выв);
- дисплея (Дисп);
- блока сигнализации (БС) блока типового источника питания (ТИП);
- блока интерфейсной связи, блока питания и стабилизации напряжения (БПСН).

#### Литература

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
2. Кострикина, И. А. Методы и средства измерений электрических параметров материалов для оценивания влажности. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пенза, 2004. – 140 с.
3. Каландаров, П. И. Особенности измерения влажности зерновых культур в полевых условиях. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 60–63.