

## Твердоэлектродный датчик влажности зерна

### The gauge of humidity of grain on firm electrolyte

Халенов О.С.<sup>1</sup>, Колесников В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт высоких технологий, Алматы (E-mail: otangaly@mail.ru);

<sup>2</sup>ОАО «Казчерметавтоматика», Караганда (E-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com)

Калий сульфаты негізіндегі қатты электролитті керамикалар синтезделді. Органың ылғалдылығы өзгергендегі олардың вольт-амперлік қасиеттері өлшенді. Синтезделген керамика негізінде ылғал аспабы, ылғалды өлшейтін бағдарламалық-аппараттық кешен жасалды. Ылғал өзгергенде керамиканың кедергісі өзгертіндігі еске алынып, RC-генератордың тактасының өзгеруін анықтау арқылы ылғалдың мөлшерін анықтауға болады. Аспап далалық жағдайда сынаудан өтті.

There are synthesized ceramics on the basis of firm solutions of potassium sulphate. The measurement of volt-ampere characteristics is done at change of humidity of environment. The gauge of humidity of grain on the basis of the synthesized ceramics is developed. The hardware-software complex is developed for humidity definition. The principle of measurement of duration of a step is put in a basis of measurement of a signal in the RC-generator where the loading role carries out changing at change of humidity resistance of ceramics. Field tests of the gauge are conducted.

#### Введение

Сегодня роль и значение гигрометрии как вида измерений общеизвестны — практически нет отрасли народного хозяйства, раздела науки и техники, где бы не требовалось измерить влажность того или иного материала [1]. Для гигрометров характерны разнообразные объекты измерения, широкий диапазон измеряемой величины и основных влияющих факторов.

Влажность зерна существенно влияет на его структурно-механические свойства и в первую очередь на прочность, а значит, и на эффективность его измельчения. Влияние влажности на структурно-механические свойства зерна и эффективность его измельчения исследовали многие ученые: В.Я.Гиршсон, Я.Н.Куприц, С.Д.Хусид, И.А.Наумов, Г.А.Егоров, А.Л.Шполянская и другие. В результате проведенных исследований установлено, что с повышением влажности зерна возрастает его сопротивляемость разрушению, снижается микротвердость и повышается удельный расход энергии на единицу вновь образованной поверхности. Это явление объясняют увеличением пластичности зерна в целом и его анатомических частей с повышением влажности. Особенно заметно пластические деформации возрастают в оболочках, значительно сопротивляющихся разрушению. Поэтому при измельчении увлажненного зерна нужно затратить больше энергии, чем при измельчении сухого зерна.

Измерения влажности зерна можно осуществлять разными методами. Наиболее перспективный и удобный метод основан на измерении электропроводности некоторых материалов. В качестве эталонных измерителей влажности национальным Бюро стандартов США приняты два электрических гигрометра — хлористо-литиевый гигрометр, разработанный Данмором еще в 1938–1940 гг., и разработанный в течение последующих 20-ти лет усилиями различных фирм карбоновый гигрометр. Поиск новых технологий и материалов для электрических датчиков влажности продолжается и в настоящее время в развитых странах Запада и Востока. Обусловлено это тем, что совокупности требований, предъявляемых к датчикам влажности, не удовлетворяет ни один из ныне существующих датчиков, т.е. нет универсальных гигрометров, пригодных для измерений влажности во всех случаях жизни. Главные среди этих требований следующие: высокая чувствительность, широкий диапазон измерения влажности, широкий диапазон рабочих температур, высокая селективность, стабильность, долговечность, малый гистерезис и высокая точность, хорошая воспроизводимость результатов, высокая скорость срабатывания, малые размеры, вес и стоимость, устойчивость к механическим нагрузкам и агрессивным газовым примесям в атмосфере. Эти требования сильно сузили круг рассматриваемых материалов. В частности, требования миниатюрности, малой стоимости и быстродействия заставили разработчиков ограничиться материалами, имеющими сравнительно небольшое электрическое сопротивление, по причине сложности создания соответствующих высокоомных электронных приборов для считывания показаний датчика с большим электрическим сопротивлением. В настоя-

щей работе приводятся результаты по созданию твердоэлектролитного датчика зерна на основе керамик твердых растворов сульфата калия и электронной схемы измерения и программно-аппаратного комплекса. При этом мы использовали результаты наших работ [2–7].

*Высокотемпературный синтез керамических керамик  
на основе поликристаллических сульфатов калия*

Для приготовления керамик  $K_2SO_4$  и  $BaSO_4$  брались реактивы марки «ХЧ», размалывались по отдельности в агатовой ступке, затем в заданном соотношении ссыпались в пробирку и тщательно перемешивались. Из полученного порошка прессовались образцы диаметром 11 мм толщиной 2–3 мм в стальной пресс-форме при давлении 2 Т/см<sup>2</sup>. Керамики спекались при температуре 900 °С 24 часа на воздухе.

Смешанные керамики  $K_2SO_4$  и  $Li_2SO_4$  спрессовались и спекались при 600 °С. Были приготовлены керамики состава 97 %  $K_2SO_4$  + 3 %  $Li_2SO_4$  и чистые  $Li_2SO_4$ .

Керамики  $K_2SO_4$ -KBr готовились из реактива марки «ОСЧ» без перекристаллизации. Порошки  $K_2SO_4$  и KBr размалывались по отдельности в агатовой ступке вручную в течение 5–10 минут. Затем составлялась смесь этих порошков в заданной весовой пропорции, которая снова перемалывалась. После этого в стальной пресс-форме из полученного порошка прессовались таблетки при комнатной температуре при давлении 2 Т/см<sup>2</sup>. Керамики KBr спекались при температуре 600 °С, а керамики, состоящие из  $K_2SO_4$  с примесью KBr (содержание KBr 10 %), спекались при температуре 900 °С. Спекание керамик осуществлялось в муфельной печи на воздухе в течение 40 часов. Большая разность температур плавления материалов создает определенные трудности при спекании керамик. Спекание при высокой температуре приводит к выплавлению KBr из керамики, которая становится в результате очень пористой и непрочной. Спекание же при низкой температуре неэффективно, потому что очень мала скорость диффузии в  $K_2SO_4$  и таблетка не пропекается до необходимой степени механической прочности. Неспеченные керамики мало пригодны к практическому применению. Эксперимент показал, что при содержании KBr = 10 % (весовых) удастся найти компромиссный вариант технологии, приводящей к перспективным с точки зрения практического применения керамкам.

*Измерение электропроводности и построение градуировочных кривых*

При измерении электропроводности керамик нами использовались либо напыленные алюминиевые электроды, либо накладные алюминиевые, медно-никелевые и графито-силикатные.

На рисунках 1 и 2 приведена кинетика изменения сопротивления керамик  $K_{2(1-x)}Ba_xSO_4$  на постоянном сигнале при смене атмосферы в измерительной камере при разных значениях  $x$ . Приведенные результаты получены для образцов с алюминиевыми электродами. В измерительную камеру воздух нагнетался после того, как прогонялся через воду либо через ловушку с осушителем КОН. В первом случае влажность была максимальной, во втором — воздух «сухой».

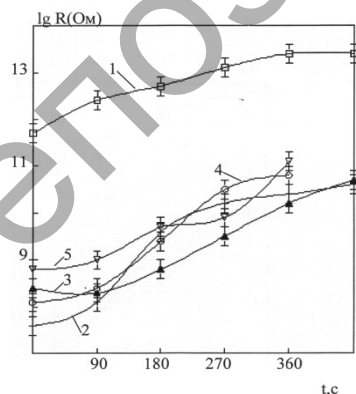


Рис. 1. Кинетика изменения сопротивления керамик  $K_{2(1-x)}Ba_xSO_4$  при напуске в измерительную камеру сухого воздуха: 1 —  $x = 1$ ; 2 —  $x = 0,05$ ; 3 —  $x = 0,2$ ; 4 —  $x = 0,4$ ; 5 —  $x = 0,62$ ; температура 20 °С

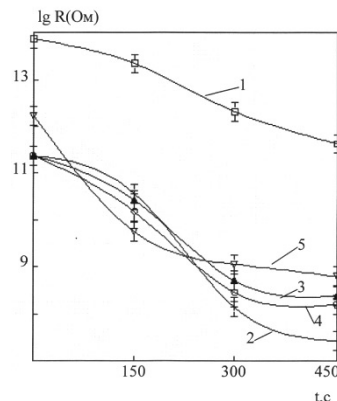


Рис. 2. Кинетика изменения сопротивления керамик  $K_{2(1-x)}Ba_xSO_4$  при напуске в измерительную камеру влажного воздуха: 1 —  $x = 1$ ; 2 —  $x = 0,05$ ; 3 —  $x = 0,2$ ; 4 —  $x = 0,4$ ; 5 —  $x = 0,62$ ; температура 20 °С

Из приведенных результатов видно, что все таблетки имеют проводимость, чувствительную к влажности воздуха. По мере роста содержания сульфата калия чувствительность к влаге у таблеток возрастает. Для  $BaSO_4$  получено, что при смене атмосферы в измерительной камере за 6 минут сопротивление меняется на два порядка. Для таблеток состава  $K_{1,95}Ba_{0,05}SO_4$  за такой же период сопротивление меняется на 4 порядка. Сульфат бария в воде не растворяется. Поэтому можно предположить, что чувствительность  $BaSO_4$  к влажности обусловлена диссоциацией воды в порах таблетки аналогично полупроводниковым влажочувствительным керамикам.

При добавке сульфата калия появляется дополнительный канал возрастания тока с влажностью, связанный с растворением  $K_2SO_4$  в пленке воды, адсорбированной в порах таблетки. При этом  $K_2SO_4$  диссоциирует на ионы  $K^+$  и  $SO_4^{2-}$ . Эти ионы и дают основной вклад в проводимость таблетки во влажной атмосфере. Приведенные выше результаты позволяют отделить вклад в проводимость таблетки, связанный с протонной проводимостью воды, диссоциированной на ионах  $SO_4^{2-}$  в порах таблетки, от электропроводности жидкого электролита  $K_2SO_4-H_2O$ , образованного в пленке адсорбированной воды. Последний вклад, как можно видеть из рисунков 1–2, на два порядка выше.

### Схема универсального прибора измерения влажности

Схематехническое решение универсального прибора измерения влажности выполнено в виде двух обособленных модулей: модуля центрального процессора и модуля получения и первичной обработки данных датчика влажности. В качестве основного модуля выступает плата центрального процессора с расположенным на ней микроконтроллером. Электрическая принципиальная схема платы центрального процессора представлена на рисунке 3.

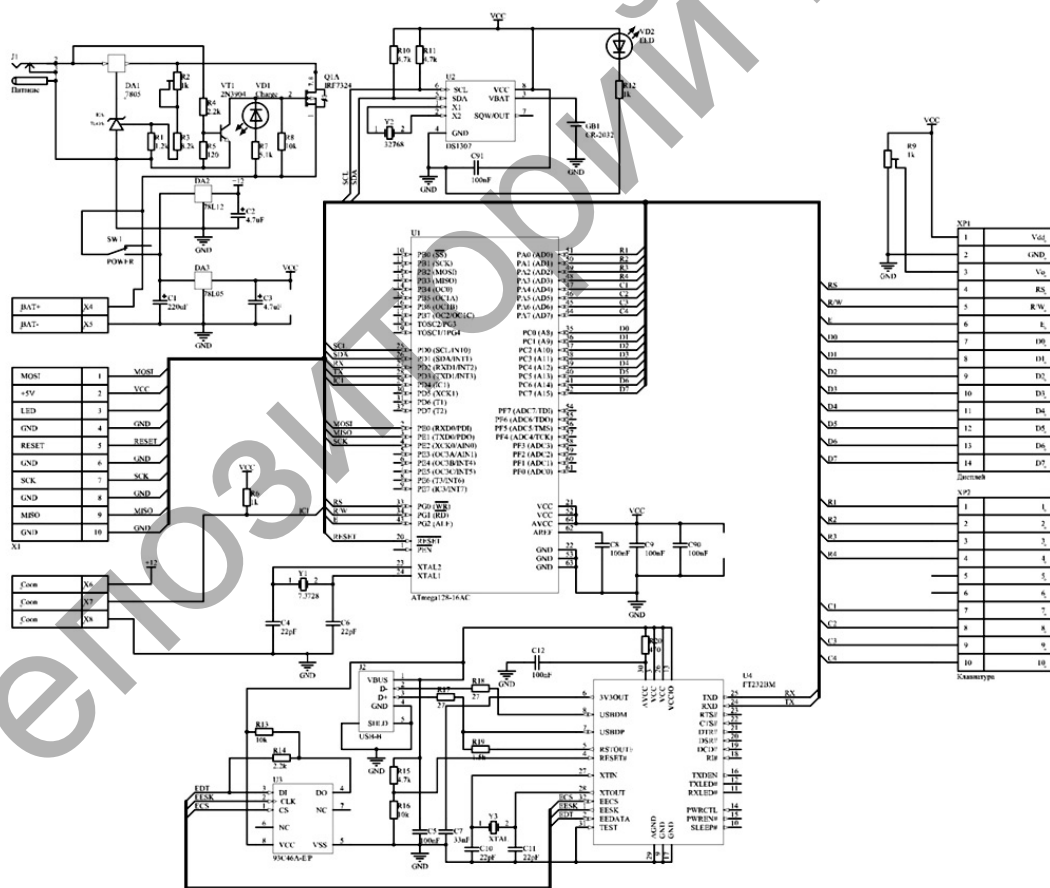


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема модуля платы центрального процессора прибора измерения влажности

В свою очередь плата центрального процессора делится на 3 основных модуля: модуля зарядки аккумулятора, модуля стабилизации напряжения питания и модуля обработки и отображения информации.

*Модуль зарядки аккумуляторов.* Напряжение 24 В поступает с разъема *J1* на микросхему — стабилизатор *DA1*. Управляемый стабилитрон *IC1* поддерживает напряжение 19,6 В на аккумуляторах во время зарядки. Резистор *R2* обеспечивает возможность точной подстройки напряжения зарядки. Ключ на транзисторе *VT1* управляет полевым транзистором *Q1A*, который подключает зарядное устройство к аккумулятору, когда на разъеме *J1* появляется напряжение больше, чем 20 В, в противном случае аккумулятор отключен от зарядного устройства транзистором *Q1A*, что предотвращает его разряд через цепи зарядного устройства. Во время процесса зарядки светится светодиод *VD1*.

*Модуль стабилизации напряжения питания* состоит из двух интегральных стабилизаторов напряжения. Стабилизатор *DA2* типа 78L12 обеспечивает стабильное напряжение 12 В для питания датчика влажности, а стабилизатор *DA3* типа 78L05 обеспечивает стабильное напряжение 5 В для питания цифровой части схемы.

*Модуль обработки и отображения информации* построен на основе микроконтроллера *U1* типа ATMega128. Импульсный сигнал с датчика через разъем *X7* поступает на вход *IC1* микроконтроллера. Микроконтроллер измеряет период следования импульсов и обрабатывает результаты измерений. Для вывода информации и результатов измерений используется двухстрочный ЖКИ дисплей фирмы Winstar типа WH1602. Дисплей способен выводить текстовую информацию в две строки по 16 символов. Микросхема *U2* представляет собой таймер реального времени с автономным питанием. Микросхема *U4* обеспечивает интерфейс между микроконтроллером и ПК по шине USB. Для управления прибором и ввода данных предусмотрена клавиатура на 16 кнопок. Клавиатура подключается непосредственно к микроконтроллеру через разъем *XP2*.

Электрическая принципиальная схема модуля представлена на рисунке 4.

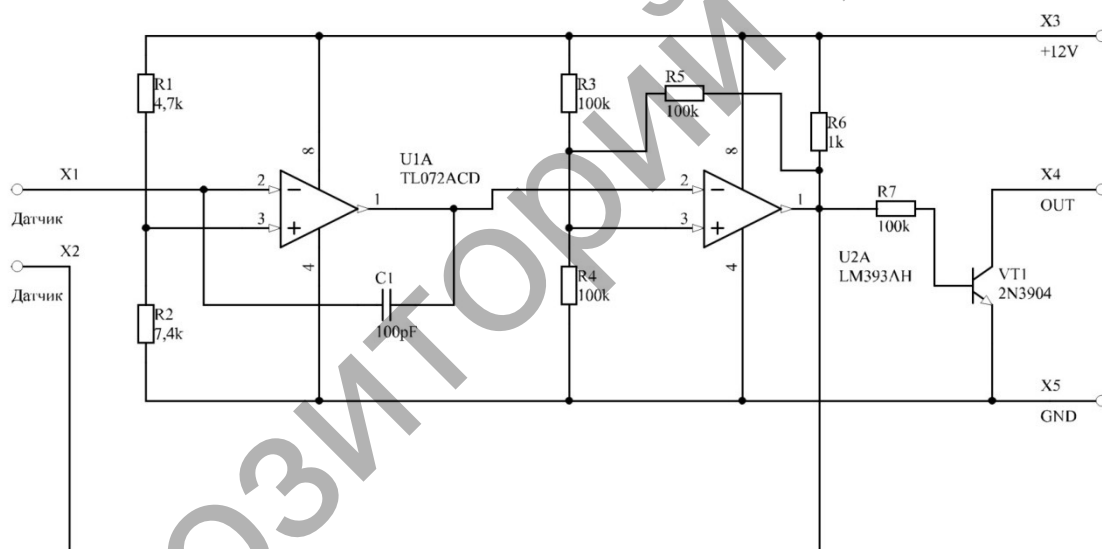


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема модуля получения и обработки данных датчика при-бора измерения влажности

Модуль получения и первичной обработки данных датчика влажности представляет собой линейный преобразователь проводимость — частота.

Схема датчика состоит из интегратора и компаратора с гистерезисом. Интегратор собран на операционном усилителе *U1A* типа TL072 и конденсатора *C1* емкостью 100 пФ. Компаратор собран на основе микросхемы компаратора *U2A*. Гистерезис обеспечивается положительной обратной связью через резистор *R5*. Выход генератора подключен к входу компаратора, а выход компаратора — к входу интегратора через датчик, проводимость которого зависит от влажности. Схема представляет собой классический релаксационный RC-генератор, где  $C = C1$ , а  $R$  — сопротивление датчика влажности. Таким образом, на выходе компаратора имеем импульсы, частота которых пропорциональна проводимости датчика влажности.

## Программно-аппаратный комплекс для определения влажности

Структурная схема программно-аппаратного комплекса для определения влажности на основе твердоэлектrolитического датчика представлена на рисунке 5.

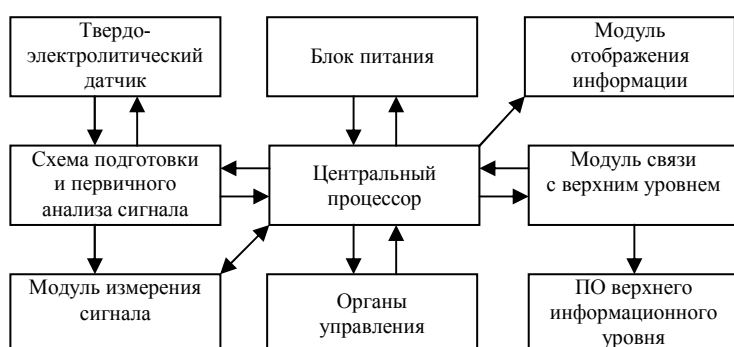


Рис. 5. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для определения влажности на основе твердоэлектrolитического датчика

Как видно из рисунка, комплекс состоит из твердоэлектrolитического датчика, схемы первичной подготовки и анализа сигнала, модуля измерения сигнала, модуля центрального процессора, органов управления и отображения информации, а также порта связи с верхним информационным уровнем и программного обеспечения.

Основными элементами комплекса являются твердоэлектrolитический датчик, схема подготовки и измерения сигнала и центральный процессор, под управлением которого осуществляется измерение и производится обработка сигнала от датчика.

В основу измерения сигнала положен принцип измерения длительности такта в RC-генераторе, где роль нагрузки выполняет изменяющееся при изменении концентрации метана сопротивление твердоэлектrolитического датчика.

Комплекс обладает высокой чувствительностью и помехоустойчивостью к различного рода помехам, а также ярко выраженной избирательностью по влажности.

Структурная блок-схема программного обеспечения центрального процессора представлена на рисунке 6. Вначале происходит инициализация периферийных устройств микроконтроллера, таких как порты ввода-вывода, порты работы с органами управления и отображения информации, модуля связи с верхним информационным уровнем и внутренних прерываний и таймеров.

Затем осуществляется считывание заложенных во внутреннюю энергонезависимую память микроконтроллера калибровочных коэффициентов, предназначенных для настройки схемы измерения сигнала твердоэлектrolитического датчика и перевода показаний.

После этого происходит инициализация процесса измерения времени такта генератора. Для повышения точности и помехоустойчивости измерение производится несколько раз (количество можно менять через органы управления), после чего осуществляется усреднение и проводится анализ на истинность показаний. В случае, если выявляются ошибки, произ-

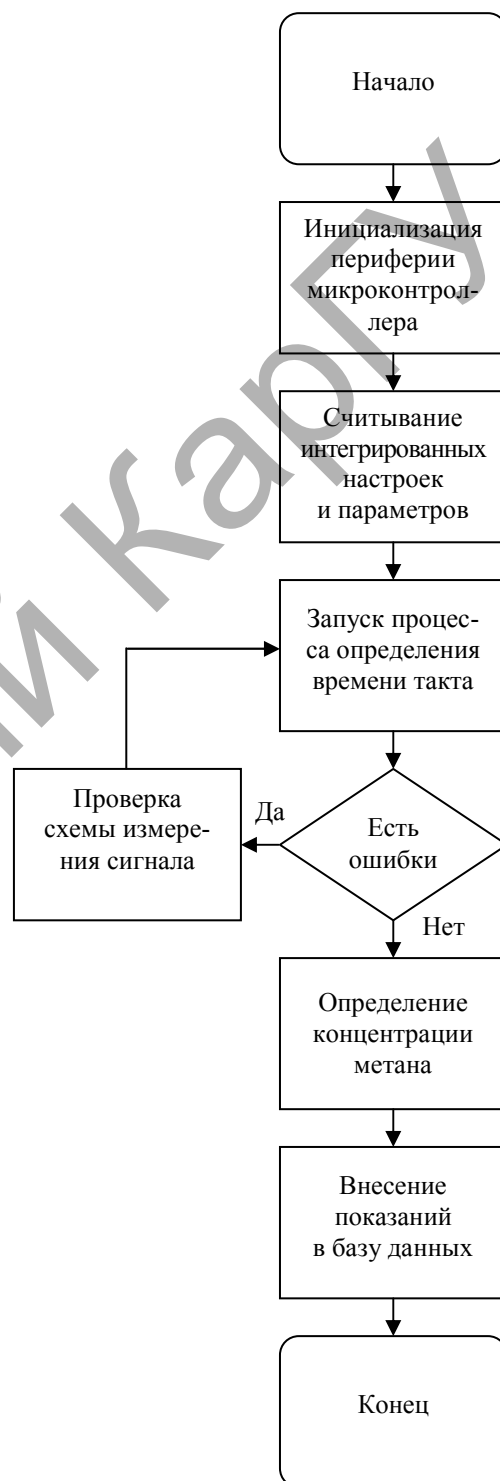


Рис. 6. Структурная блок-схема алгоритма измерения сигнала твердоэлектrolитического датчика

водится повторная проверка схемы измерения и осуществляются повторное считывание и анализ данных. Если данные прошли анализ, они записываются в оперативное запоминающее устройство и по запросу передаются программному обеспечению верхнего информационного уровня.

При постоянной работе (измерение 1 раз в секунду) программно-аппаратный комплекс позволяет сохранять, а затем по запросу получить последние несколько сот измерений, привязанные к реальному времени, в энергонезависимую память, а при выборочном измерении это число значительно увеличивается. Вместе с этим комплекс рассчитан на работу с ОПС сервером.

#### *Заключение*

Целесообразность той или иной разработки в первую очередь определяется его экономической целесообразностью. Предлагаемый нами датчик влажности зерна, не уступая по своим характеристикам датчикам Финляндии, Германии и др., имеет ряд преимуществ — он изготовлен из отечественного сырья и его цена в 8–12 раз дешевле упомянутых выше датчиков.

*Настоящая публикация сделана в рамках подпроекта, финансируемого в рамках СКГ, поддерживаемого Всемирным Банком и Правительством Республики Казахстан. Контракт № 7212/08/02/5.*

#### References

1. *Usol'tsev V.A.* Measurement of humidity. — L., 1959. — P. 256.
2. *Hulen O.S., Yurov V.M.* The electrical conductivity of potassium sulfate and solid solutions based on it // Herald of science and education. — M.: Science, 2007. — № 6. — P. 3–6.
3. *Hulen, O.S., Yurov V.M.* Effects of environment on the electrical properties of composites based on potassium sulfate / Scientific Review. — M.: Science, 2007. — № 6. — P. 15–19.
4. *Hulen O.S., Yurov V.M.* Electrical conductivity of solid solutions of potassium sulfate and barium // Vestnik of KarSU. — 2008. — № 3 (51). — P. 42–51.
5. *Hulen O.S., Yurov V.M.* The electrical processes in the composite compounds of potassium sulphate // Vestnik of KarSU. Ser. Physics, 2009. — № 4 (56). — P. 26–38.
6. *Hulen O.S., Yurov V.M.* Measuring devices to study the impedance of solid electrolytes // Scientific Review. — M.: Science, 2010. — № 2. — P. 7–11.
7. *Yurov V., Hulen O.S., Zakamolkin V.A.* Thermodynamic model of electric conductivity of solid electrolytes // Vestnik of Gumi-lev ENU. Ser. Natural and technical sciences. — 2010. — № 2 (75). — P. 365–371.