

15 октября 2025г.

ОТЧЕТ

Исследование возможности измерения влажности сульфата аммония с помощью анализаторов влажности (влажномеров) FIZEPR-SW100

Цель исследований: подбор оптимального варианта исполнения влагомера для измерения влажности сульфата аммония. Диапазон влажности - до 5%.

1. Описание влагомеров, используемых в эксперименте

Для проведения эксперимента с измерением влажности сульфата аммония применялись влагомеры 3-х вариантов исполнения:

- вариант FIZEPR-SW100.30.2;
- вариант FIZEPR-SW100.30.26;
- вариант FIZEPR-SW100.17.12.

По принципу действия все влагомеры FIZEPR-SW100 представляют собой радиоволновые приборы – диэлькометры, но методы измерения диэлектрической проницаемости у указанных типов влагомеров несколько различаются. Общим для всех влагомеров FIZEPR-SW100 является то, что при измерениях определяются частоты резонанса измерительной структуры датчика в воздухе и в контролируемом материале. Измерения (зондирование среды радиоволнами) выполняется на частотах диапазона 2...750МГц. По найденным значениям частот резонанса вычисляется коэффициент **k**, равный отношению резонансной частоты на воздухе к резонансной частоте в контролируемом материале. Далее, по величине коэффициента **k** процессор электронного блока влагомера рассчитывает содержание воды, при этом учитывается также температура материала. Расчет производится на основе калибровочных таблиц, подготовленных для каждого типа контролируемого материала и записанных в память влагомера.

Особенностью влагомера **FIZEPR-SW100.30.2** является то, что измеренный коэффициент **k** (равный отношению резонансных частот) представляет собой коэффициент замедления распространения электромагнитной волны в контролируемом материале. Т.е. коэффициент замедления **k_{зам}** (называемый также коэффициентом преломления) - это отношение скорости распространения электромагнитной волны в воздухе к скорости ее распространения в контролируемом материале.

Связь между коэффициентом замедления **k_{зам}** и диэлектрической проницаемостью **ε_r** описывается следующим выражением:

$$\epsilon_r = (k_{зам})^2 . \quad (1)$$

Таким образом, примененный метод измерения для данных влагомеров является прямым и позволяет непосредственно измерять диэлектрическую проницаемость ϵ_r . Это обуславливает то обстоятельство, что сведено к минимуму влияние на измерения множества помеховых факторов, свойственных диэлькометрическим влагомерам, и в результате обеспечивается предельно высокая точность измерений.

Однако влагомеры варианта FIZEPR-SW100.30.2 работоспособны на материалах только с низкими диэлектрическими потерями (с низкой электропроводностью), но такие материалы составляют большинство (песок, щебень, зерновые культуры, ...) среди материалов, для которых производят промышленные влагомеры.

В отличие от влагомеров FIZEPR-SW100.30.2 влагомеры FIZEPR-SW100.30.26 позволяют контролировать материалы с высокой электропроводностью (с высокими диэлектрическими потерями). В этих влагомерах коэффициент k также определяется через отношение частот резонанса датчика на воздухе и заполненного материалом, но сами резонансные частоты фиксируются фазовым методом, т.е. не по амплитуде резонанса, а по величине набега фазы сигнала, распространяющегося в линии передачи датчика. Для материалов с высокой электропроводностью связь между коэффициентом k и диэлектрической проницаемостью описывается более сложным выражением по сравнению с формулой (1), т.к. на величину этого коэффициента влияет также и электропроводность контролируемого материала.

Датчики влагомеров FIZEPR-SW100.30.2 и FIZEPR-SW100.30.26 выполнены в виде кюветы с размерами 200 x 100 x 100мм (см. рис.1). Как указано выше, у данных влагомеров различаются методы определения резонансной частоты датчика. Во влагомере FIZEPR-SW100.30.2 производится оцифровка амплитудного резонанса (резонансной амплитудной характеристики датчика), а во влагомере FIZEPR-SW100.30.26 производится обработка резонансной характеристики, полученной с помощью измерения разности фаз сигналов.



Рис.1. Датчики влагомеров FIZEPR-SW100.30.26 и FIZEPR-SW100.30.2

Во влагомере FIZEPR-SW100.17.12 метод измерения диэлектрической проницаемости следует отнести к косвенным методам. Дело в том, что зондируемая этим влагомером область пространства содержит не только контролируемый материал, но и диэлектрическую (керамическую) пластину, через которую производится зондирование контролируемого материала. Поэтому на результат измерения влияют и свойства керамической пластины. Также, как и для других влагомеров FIZEPR-SW100, данный влагомер измеряет коэффициент k , который связан с диэлектрической проницаемостью контролируемого объекта и который вычисляется как отношение резонансной частоты датчика в воздухе к его резонансной частоте в

контролируемом материале. Благодаря тому, что керамическая пластина ослабляет влияние на измерения токов проводимости, влагомеры FIZEPR-SW100.17.12 можно применять на материалах с повышенной электропроводностью.

Датчик влагомера FIZEPR-SW100.17.12 выполнен в цилиндрическом корпусе диаметром 108мм, на торце корпуса размещен плоский чувствительный элемент (сенсор). Сенсорная головка датчика закрыта керамической диском (пластиной) из нитрида кремния (см. рис.2).



Рис.2. Датчик влагомера FIZEPR-SW100.17.12

Влагомеры FIZEPR-SW100.17.12 широко применяются для измерений в смесителях бетона, а также для контроля мелкодисперсных сыпучих материалов на ленте конвейера, при этом датчик закрепляется на лыже. Механизм подвеса лыжи (см. рис.3) обеспечивает оптимальный наклон и плотное прилегание лыжи и сенсора датчика к поверхности контролируемого материала на ленте конвейера.

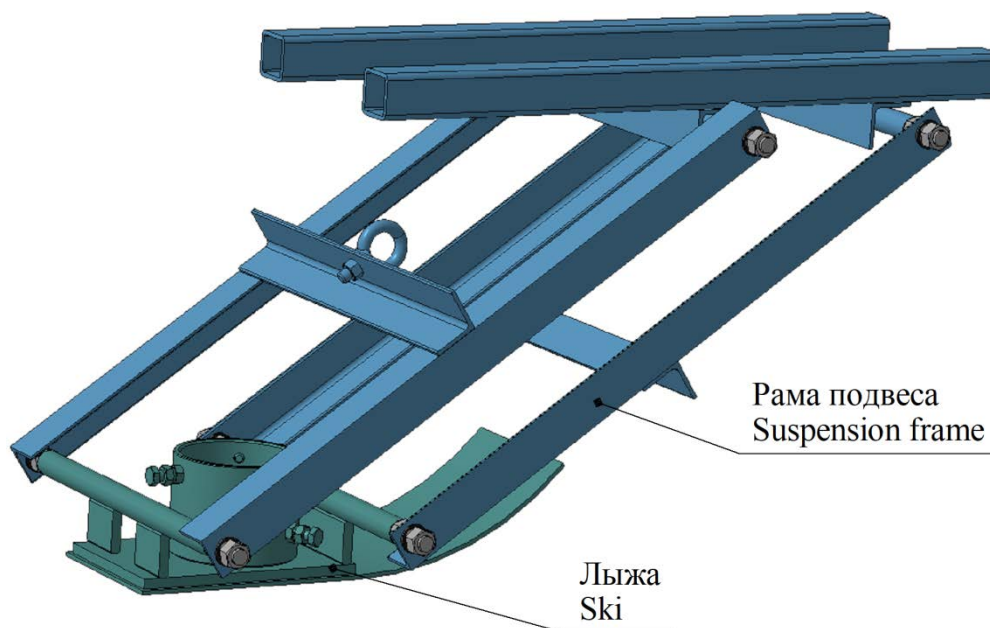


Рис.3. Крепление датчика FIZEPR-SW100.17.12 на лыже

2. Проведение измерений начальной влажности образца материала

Сульфат аммония (аммоний сернокислый $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) – неорганическое соединение, в состав которого входит до 21% азота и около 23% серы. Для проведения эксперимента было приобретено 2кг гранулированного сульфата аммония, который используется в качестве удобрения в сельском хозяйстве (см. рис. 4). Внешне описываемое вещество представляет собой гранулы, средний размер которых варьируется от 3 до 5 мм (см. рис. 5).



Рис. 4



Рис. 5

До начала испытаний была измерена влажность полученного материала при помощи термогравиметрического анализатора влажности AND ML-50. Влажность составила 0,4% (см. рис 6).

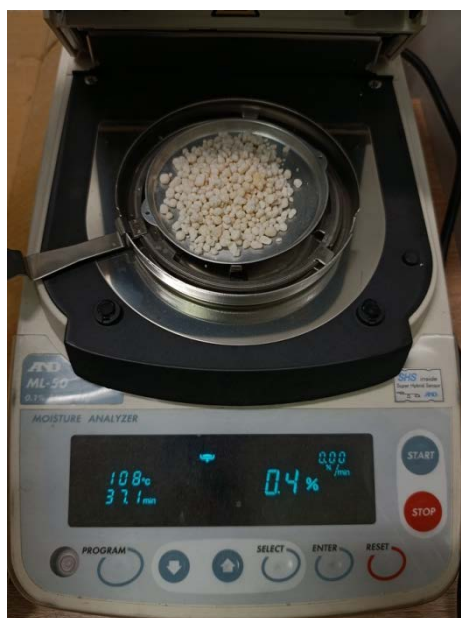


Рис. 6. Термогравиметрический анализатор влажности AND ML-50

В рамках эксперимента необходимо было добиться, чтобы влажность образца перед началом измерений была близка к нулевому значению. Для этого была произведена сушка исследуемого образца при температуре $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сушильном шкафу. В результате удалось довести значение влажности до 0,2%. Это значение учитывалось в дальнейших измерениях.

3. Измерение зависимости коэффициента k сульфата аммония от содержания воды

При проведении исследований в пробы материала добавляли отмеренные дозы воды, полученную смесь тщательно перемешивали и таким способом получали образцы сульфата аммония с разными значениями влажности.

Процесс исследований по своей сути совпадает с процессом калибровки (градуировки), выполняемой для любых влагомеров.

Калибровка влагомера по каждому материалу состоит в получении экспериментальной зависимости измеряемого влагомером коэффициента k от содержания в этом материале воды. Для получения этой зависимости снимается частотный спектр сигнала датчика и определяется частота резонанса (положение минимума резонансной кривой на оси частот).

Для пустой кюветы датчика FIZEPR-SW100.30.2 получена частота резонанса $F_{\text{калиб}} = 633,2$ МГц. При заполнении кюветы сульфатом аммония с влажностью $W = 0,2\%$ было получено значение частоты резонанса $F_{\text{рез}} = 344,6$ МГц.

Коэффициент k определяется по формуле:

$$k = F_{\text{калиб}} / F_{\text{рез}} = 1,84.$$

С помощью программы SWPro на экране компьютера отображается спектр сигнала датчика влагомера FIZEPR-SW100.30.2. На рис.7 показан спектр (резонансная кривая) для значения влажности $0,2\%$.



Рис.7. Спектр сигнала влагомера FIZEPR-SW100.30.2 при заполнении кюветы образцом сульфата аммония с влажностью $W = 0,2\%$

После измерения образца с исходной влажностью $W = 0,2\%$ он был извлечен из кюветы. Затем аналогичные измерения проводились с помощью влагомеров FIZEPR-SW100.30.26 и FIZEPR-SW100.17.12.

Расчет коэффициента k проводился аналогичным образом с разницей лишь в том, что в датчиках отличались резонансные частоты $F_{\text{калиб}}$ и $F_{\text{рез}}$.

Результаты серии таких экспериментов для каждого типа датчика сведены в табл. 1.

Таблица 1

Вариант исполнения датчика				17.12	30.2	30.26	17.12	30.2	30.26
№ п/п	Масса добавки воды (г)	Масса содержащейся воды (г)	Влажность (%)	Измеренная резонансная частота (МГц)			Полученный расчетом коэффициент k		
1	0	3,54	0,20	186,20	344,60	306,16	1,06	1,84	1,66
2	15	18,54	1,04	180,27	309,46	250,27	1,10	2,05	2,03
3	30	48,54	2,68	172,95	257,00	198,34	1,14	2,46	2,56
4	25	73,54	4,00	163,04	434,10	161,60	1,21	1,46	3,14
5	25	98,54	5,29	144,76	436,00	112,18	1,37	1,45	4,53

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что влагомеры FIZEPR-SW100.30.2 и FIZEPR-SW100.30.26 имеют высокую чувствительность к изменению влажности сульфата аммония, но работа их возможна только на начальном участке диапазона. Для влажности 2,68% и выше измерения этими влагомерами становятся невозможными из-за ухудшения спектров. Примеры спектров показаны на рис. 7 и 8.



Рис.8. Спектр сигнала влагомера FIZEPR-SW100.30.2 при заполнении кюветы сульфатом аммония с влажностью $W= 2,68\%$

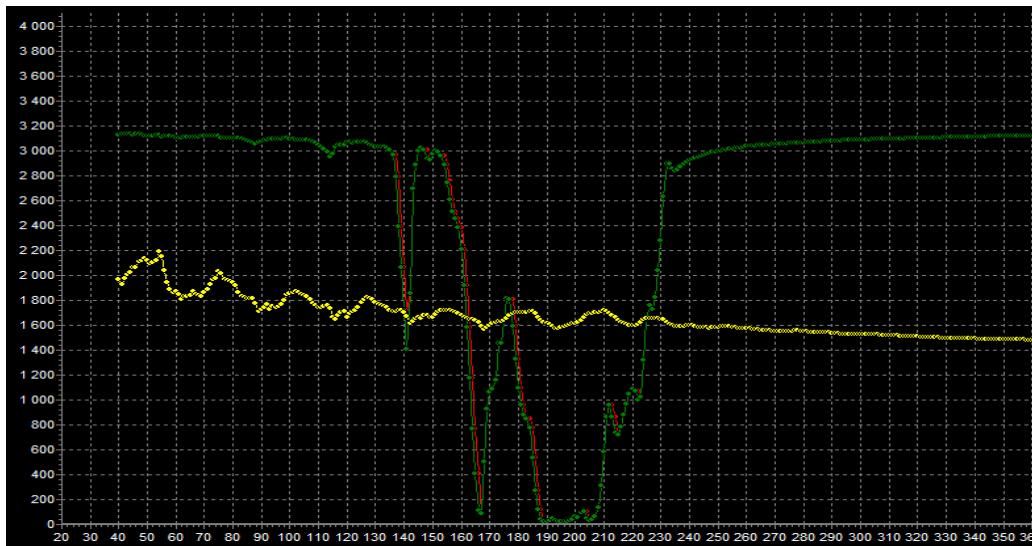


Рис 9. Спектр сигнала влагомера FIZEPR-SW100.30.26 при заполнении кюветы сульфатом аммония с влажностью $W = 2,68\%$

Влагомер FIZEPR-SW100.17.12 имеет наименьшую из всех влагомеров чувствительность в диапазоне до $2,68\%$, но при этом спектр этого влагомера стабилен во всем диапазоне проведенных замеров. На рис. 10 приведена градуировочная характеристика влагомера FIZEPR-SW100.17.12 для сульфата аммония.

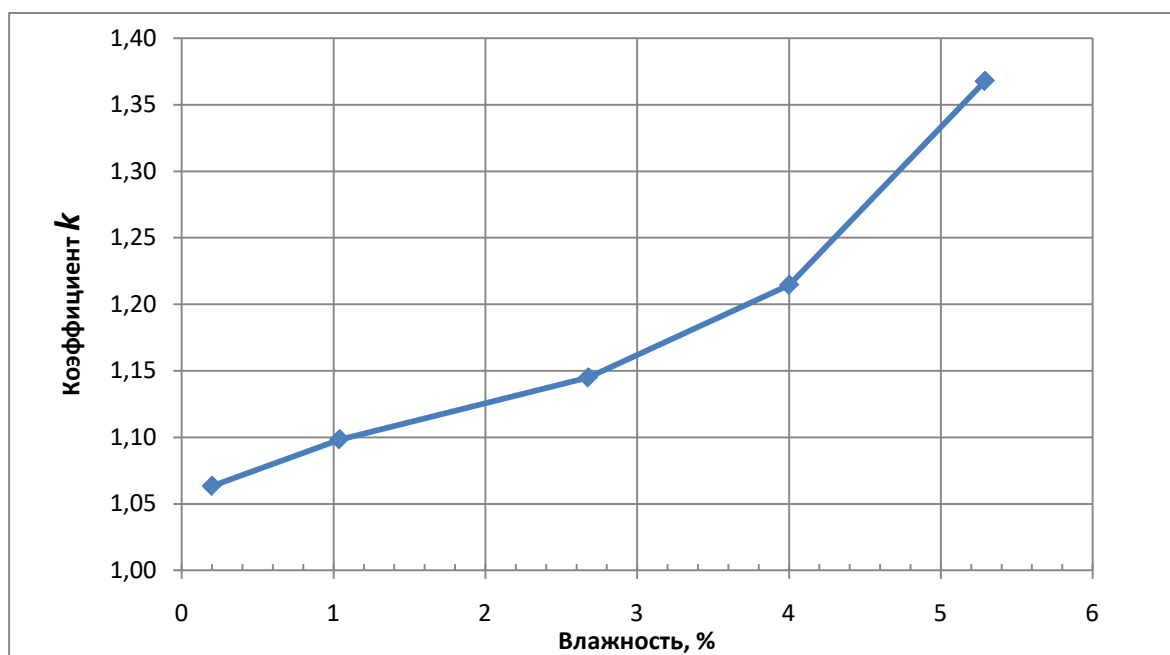


Рис. 10. График зависимости коэффициента k от влажности сульфата аммония для влагомера FIZEPR-SW100.17.12

Исследования выполнил 15.10.2025г.

старший инженер КБ «Физэлектронприбор» _____

Калинин Р.В.