

## ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ АПК И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Н.П. Воробьев, О.К. Никольский

### 1. Проблемы контроля качества сена, сенажа и сенной муки

В последние годы в России заготавливается кормов в количестве 540-550 млн. т. кормовых единиц. Предусмотрено осуществить необходимые мероприятия по дальнейшей интенсификации полевого и лугопастбищного кормопроизводства. Важный резерв выполнения этой задачи – обеспечение правильности технологических процессов производства и хранения кормов, обеспечения высокого качества кормов. Проблема повышения качества является сейчас одной из наиболее насущных в кормопроизводстве.

Разработанные в нашей стране стандарты на основные виды кормов позволяют регламентировать нормы и требования к качеству, технологиям выращивания, производству и хранения кормов и на основе этого создать комплексную систему управления их качеством.

Качество сена – это: правильно подобранный севооборот, вовремя скошенная трава, технологически правильно заготовленный корм, тщательное хранение его.

Нарушение хотя бы в одном из звеньев этой цепи ведет к:

снижению качества корма, его питательности, поедаемости, к его порче [1].

Одной из важнейших характеристик, определяющих ход технологического процесса кормопроизводства и качества корма, является влажность. Поддержание ее на уровне регламентируется стандартами, задача сложная и ответственная.

От содержания воды зависит количество сухого вещества в кормах, а следовательно, и их питательность. Известно, что количество воды в кормах различно и колеблется в широких пределах от 5 до 95%. От количества воды в корме в значительной

степени зависит и возможность его хранения. Так при повышенной влажности:

он становится непрочным, подвергается действию бактерий, гниет, плесневеет, становится непригодным к употреблению.

Ежегодно в России из-за переувлажненности пропадает около 20% кормов. Много травяной и сенной муки гибнет из-за пересушки.

Сравнительно небольшой 1-2% избыток или недостаток влаги в корме:

существенно влияет на его качество, снижает содержание каротина, протеина, минеральных составляющих и других питательных веществ в корме.

Поэтому содержание влаги в кормах строго регламентируется ГОСТом, так, например:

для сена – 17%,  
силоса – 70%,  
сенажа – 40-55%,  
травяной муки – 10%,  
сенной муки – 8-12% [2, 3, 4].

Изложенное показывает, что очень важно определить влажность кормов на различных этапах технологического процесса для обеспечения:

требуемого качества, снижения затрат на кормопроизводство.

Неточность определения влажности в 1% по данным ВНИИМ им. Д.И. Менделеева 1966 г. вызывает неточность в определении стоимости (по стране) зерновых культур – 60, льноволокна - 14,5 мл. руб. [5]. Точное знание содержания воды в исходном сырье, промежуточном и готовом продукте – задача первостепенной важности. Контроль содержания воды – это зачастую одновременно и контроль технологического процесса.

В состав большинства сельскохозяйственных продуктов входит влага, определяющая:

их технологические свойства, потребительские свойства.

Полное отсутствие влаги и ее избыток ухудшают физико-химические и физико-механические свойства сельскохозяйственных продуктов, в то время как оптимальное ее содержание обеспечивает их высокое качество. Поэтому быстрые и точные измерения влажности сельскохозяйственных продуктов имеют огромное значение для контроля за технологическим процессом.

При недостатке воды, выполняющей важную роль в процессе обмена как растворитель питательных веществ, у животных затрудняется переваривание корма, замедляется желудочно-кишечное пищеварение и всасывание, в организме задерживаются продукты азотистого распада. В результате происходит снижение аппетита, замедление роста и снижение продуктивности животных.

В технологии заготовки сена влажность сена имеет ключевое значение. Так в зависимости от состава трав, применяемых машин, погодных условий и т.д., сгребание в валки производится при влажности трав 35-55%. При своевременном сгребании масса размещается в валке свободно, влажность травы при этом 50-55%. Из валков сено влажностью 22-30% погружают на транспортные средства и свозят к месту скирдования. Влажность сена при скирдовании по ГОСТ [1] должна быть 17-18%. Меньшие значения влажности приводят к большим потерям при скирдовании.

Помимо влажности необходимо регулярно наблюдать за температурой в скирде, штабеле, сенохранилище, особенно в случае, когда сено было недостаточно просушено. С этой целью в массу сена вставляют термоштанги с максимальными термометрами так, чтобы они доходили до середины скирды, штабеля.

В технологии приготовления сенажа влажность так же исключительно важна, так как сенаж – это корм из трав, убранных и подвяленных до влажности, исключающей возможность развития на них гнилостных, маслянокислых и других портящих корм бактерий, дрожжей, сохраненных в анаэробных условиях. Согласно ГОСТ 23637-79 [3] для получения сенажа травы должны быть провялены до 45-55%, злаковые до 40-55%.

В технологии производства травяной муки большее значение имеет влажность травы перед сушкой. Опыт показывает, что снижение влажности травы перед сушкой с 80 до 70% количество воды, которое

необходимо истратить для производства 1 т муки, уменьшается с 3500 до 2000 кг; производительность сушильных агрегатов возрастает на 60-80% и расход топлива резко сокращается. Кроме того, в искусственно высушенной и размолотой траве довольно быстро окисляется каротин.

Скорость окисления каротина в травяной муке в значительной степени зависит от ее влажности. Чем она ниже, тем быстрее окисляется каротин. Наличие некоторого числа влаги имеет положительное значение потому, что ограничивает контакт каротина, находящегося в травяной муке, с воздухом. Так по некоторым данным при влажности муки 12,9% при хранении сохраняется 63% каротина, а при влажности муки 4,5% - только 33% каротина сохраняется. Поэтому ГОСТ 18691-83 [10] рекомендует, чтобы влажность травяной муки была 8-12%.

Таким образом, в кормопроизводстве просматривается острая потребность в средствах измерения влажности сена, сенажа и сеновой муки, а так же в средствах измерения температуры сена.

Согласно имеющимся данным в настоящее время разработан электронно-цифровой влагомер кормовых материалов «Нива-2», предназначенный для экспрессного измерения естественной влажности кормов (сено-соломистые материалы). Однако прибор требует предварительной градуировки на выбранные культуры и довольно значительную погрешность измерения для различных материалов - 2-4%. Неизвестен так же изготовитель прибора.

Для целей экспресс - измерения влажности сена и сенажа может быть использован электронно-цифровой влагомер кормовых материалов типа ВЛК-01 (разработчики ВИМ и ЦНИМЭСХ, изготовитель неизвестен).

Абсолютная погрешность измерения зеленой массы этими приборами так же велика:  $\pm 4\%$ , а сена несколько меньше  $\pm 1,5 \div 2\%$ .

Для экспрессного определения влажности травяной муки при её производстве и хранении может быть использован влагомер травяной муки типа ВТМ-1М. Основная абсолютная погрешность этого прибора  $\pm 1\%$ , однако диапазон температур окружающего воздуха ограничен величиной 10-35<sup>0</sup>С, питание только от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц и довольно значительная

масса прибора 6 кг. Изготовитель прибора – опытный завод аналитических приборов г. Гори.

Ни один из перечисленных приборов не предназначен для измерения влажности сена, сенажа и сенной муки одновременно. Измерения производятся путем загрузки контролируемой массы в емкость первичного преобразователя, что исключает получение информации из центральной части скирды, штабеля или сенохранилища, где влажность кормов может оказаться существенно выше, чем на поверхности.

Ни один из перечисленных приборов не может быть использован для получения информации о температуре, в связи с чем, необходимо дополнительное использование термоштанг и соответствующей аппаратуры, что усложняет и удорожает контроль влажности кормов.

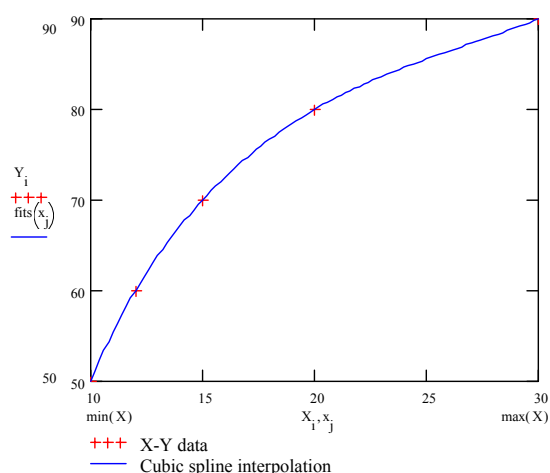
Кроме того, влажность, определяемая с помощью перечисленных приборов, не характеризует однозначно стойкость сельскохозяйственной продукции при хранении.

Дело в том, что энергия связи с материалом имеет большее значение, чем ее общее количество. Эта энергия находит отражение в таком показателе, как «активность влаги», которая представляет собой относительную упругость пара у поверхности материала и дает оценку содержания свободной и прочно связанной со структурой материала влаги. Поскольку активность влаги при данной температуре связана с равновесной относительной влажностью воздуха (РОВВ) простым соотношением:  $РОВВ=100$  (активность влаги) [6], то ее можно определить, измеряя РОВВ, например, по результатам измерения скорости ультразвука воздушной вытяжки (метод и устройство разработаны на кафедре ЭТОЭ АлтГТУ [7]). Иначе говоря, прямые измерения влажности сельскохозяйственной продукции можно заменить измерением влажности воздушной среды, находящейся в глубине контролируемого материала на том основании, что между влажностью тел (в данном случае - сена) и влажностью воздушной среды, находящейся в глубине контролируемого материала, устанавливается равновесие, которое описывается характерными для каждого вещества изотермами сорбции [8]. Каждому показателю относительной равновесной влажности воздуха соответствует определенная влажность сена [1] (табл. 1.1).

Таблица 1.1 - Относительная равновесная влажность воздуха при различной относительной влажности сена

Равновесная относительная влажность воздуха, $Y_i$ %	50	60	70	80	90
Относительная влажность сена, $X_i$ %	10	12	15	20	30

Представим графически данные по табл. 1.1 в виде рис. 1.1 с применением сплайн-аппроксимации по методике, изложенной в [9].



$Y_i (X_i)$  - точки, соответствующие табл. 1.1,  $f_{its}(x_j)$  - кубическая сплайн-аппроксимация данных по табл. 1.

Рисунок 1.1 - Зависимость относительной равновесной влажности воздуха  $Y_i$  % от относительной влажности сена  $X_i$  %.

Рис. 1.1 подтверждает, что равновесное содержание воды в сене определяется относительной влажностью воздуха, в то время как температура, абсолютная влажность воздуха и процессы десорбции оказывают слабое влияние на это равновесие [8].

При этом имеется возможность устранить все недостатки, характерные для упомянутой выше группы измерителей влажности кормов и производить одновременно одним и тем же прибором контроль влажности и температуры в сене, сенаже и сенной муке с погрешностью обусловленной требованиями ГОСТов.

## 2. Проблемы контроля параметров тепличного хозяйства в АПК

Развитие сельского хозяйства в России предусматривает широкое использование тепличного хозяйства для обеспечения населения страны качественным и свежим продовольствием. Намечается строительство не только специализированных теплиц в сельской местности, но и существенное расширение тепличного хозяйства большинства крупных промышленных предприятий.

Для эффективного ведения тепличного хозяйства в теплице необходимо измерять: температуру, влажность, скорость воздуха, концентрацию углекислого газа и аммиака. В теплицах при закрытых фрамугах или при малой кратности воздухообмена в яркие солнечные дни высокопродуктивные овощные культуры испытывают недостаток углекислого газа. В связи с интенсивным фотосинтезом растений в солнечные дни концентрация углекислого газа в теплицах может падать до 0,01% (при 0,03% CO<sub>2</sub> в атмосфере воздушной среды) и даже ниже. В облачные дни содержание углекислого газа в теплицах может составлять 0,025%.

Так если ранее максимальное увеличение потребления растениями углекислого газа рассматривалось как способ повышения их продуктивности, то в настоящее время установлено, что поглощение углекислого газа зависит от его концентрации, температуры воздуха и интенсивности освещения.

По данным специалистов по физиологии растений и овощеводству защищенного грунта, концентрацию углекислого газа в пределах 0,05÷0,1% необходимо поддерживать при освещенности в теплицах 2000-10000 лк. При освещенности свыше 10000 лк концентрация углекислого газа в теплице может находиться в пределах 0,1÷0,22%.

Поэтому задача эффективного ведения тепличного хозяйства включает в себя такой важный компонент, как обеспечение биологических потребностей растений на протяжении всего цикла их развития. Так весной в период роста и плодоношения огурец в теплицах за день потребляет для фотосинтеза (за счет чего образуются до 90% сухого вещества растений) до 700 кг CO<sub>2</sub> на 1 га. Из почвы же выделяется за сутки не более 1/3 этого количества.

Для поддержания оптимальной концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере теплиц часто

применяют следующие способы дополнительного обогащения воздуха CO<sub>2</sub>:

- Введение в почвенные смеси больших доз органических удобрений.

- Мульчирование навозом.

- Газовое удобрение – подача CO<sub>2</sub> из баллонов или в виде сухого льда, дымовых газов очищенных от вредных примесей.

- Сжигание горючего газа в специальных горелках.

Подавать CO<sub>2</sub> необходимо с учетом освещения при закрытой вентиляции дважды в сутки утром и после полудня, выдерживая упомянутые выше оптимальные концентрации углекислого газа (ОКУГ). Подача CO<sub>2</sub> должна прекращаться, если из-за высокой температуры или влажности открываются вентиляционные фрамуги. В связи с чем возникает проблема контроля концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере теплиц.

Если рассматривать воздушную среду теплиц, как псевдобинарную газовую смесь, то проконтролировать ее можно либо использованием косвенных (физических и инструментальных) методов анализа, либо использованием прямых (химических) методов анализа.

Недостатки, общие для всех химических методов измерения, заключены в том, что осуществляется непрерывный распад поглотительных растворов и необходимы дополнительные затраты рабочего времени на приготовление растворов, их транспортировку и заливку в анализаторы. По этим причинам использование химических газоанализаторов нельзя признать целесообразным.

Из косвенных методов, методы механического анализа, например, не обладают высокими точностными характеристиками. Приборы, построенные по этому принципу, ненадежны в запыленных средах и предъявляют повышенные требования в эксплуатации.

Термокондуктометрические газоанализаторы (ТП2220, ТМ2221М, ДТ-1212, ДТ-2211, ДТ-2212) имеют значительную неравномерность характеристики чувствительности, ограничения по влажности газа (например, 0,5 г/м<sup>3</sup> для ТП2220, в то время как в воздухе теплиц могут наблюдаться концентрации влаги до 22,5 г/м<sup>3</sup>), ограничение на содержание агрессивных примесей (например, до 10 мг/м<sup>3</sup> для ТП2220, в то время, как только по предельно допустимым концентрациям

содержание аммиака в теплице может достичь 20 мг/м<sup>3</sup>).

Оптико-акустические газоанализаторы (АСГА-Ц, ОА-5501, ГОА-4, ОА-2209, ГИАМ-5М, ГИП-14-1) весьма чувствительны к изменению барометрического давления [при изменении барометрического давления на  $1,3 \cdot 10^3$  Па (10 мм. рт. ст.) показания оптико-акустических газоанализаторов изменяются в среднем на  $\pm 1\%$ ].

Применение для этих целей газоопределятеля ГИК-1 затруднено тем, что показания прибора соответствуют температуре окружающего воздуха 20 °С и давлению 760 мм. рт. ст.; при других параметрах показания должны пересчитываться.

В связи с тем, что в теплицах относительная влажность воздуха бывает высокой, оборудование подвержено увлажнению при поливе, воздействию пестицидов и удобрений, то есть среда является агрессивной, чувствительные элементы перечисленных газоанализаторов, как правило, быстро разрушаются.

В связи с изложенным на кафедре ЭТОЭ АлтГТУ разработан прибор, который позволяет контролировать содержание углекислого газа в атмосфере теплиц, а при необходимости – осуществлять управление режимом работы автоматических вентиляторов и обогатителей воздуха углекислым газом.

При этом мы исходим из того, что упомянутые ОКУГ достаточно малы и для их обнаружения следует использовать некоторую фундаментальную характеристику вещества, отражающую его свойства на молекулярном и атомарном уровне, в качестве которой представляется целесообразным использовать молекулярную массу газа.

Молекулярная масса газа, а следовательно, и концентрация углекислого газа, определяется в нашем приборе по скорости распространения ультразвуковых колебаний. Для измерения скорости ультразвука использован двухканальный способ определения скорости ультразвука. Устройство для его осуществления [11] позволяет обеспечить необходимый уровень инвариантности измерений концентрации углекислого газа в атмосфере теплиц. Прибор прост в реализации, чувствителен, легко поддается автоматизации, имея частотную форму представления информации, характеризуется большим

динамическим диапазоном ( $10^6$ ), высокой максимальной температурой (250 °С), малой постоянной времени и высокой коррозионной стойкостью.

### 3. Проблемы контроля сыпучих минеральных удобрений в АПК

Причины отставания в сельском хозяйстве страны сложны и разнообразны. Но одна из них, по нашему мнению, очевидна. В печати неоднократно указывалось, что в прошлые годы из-за неточностей при использовании интенсивных технологий не удалось получить примерно трети ожидаемой прибавки зерна. Одна из причин этого – отсутствие метрологических средств контроля. Отсюда наблюдается парадокс: на полях достаточно много сильных тракторов, на фермах – механизмов, а измерительных средств, позволяющих узнать, в какой подкормке нуждается земля, посевы пшеницы, сахарной свеклы, кукурузы или почему упали надои молока и среднесуточные привесы, очень мало.

В частности, интенсивная технология ведения сельского хозяйства одним из важнейших компонентов включает в себя правильное и своевременное внесение в почву минеральных удобрений. К сожалению, не во всех хозяйствах сельскохозяйственного производства уделяется должное внимание правильному хранению и транспортировке минеральных удобрений, отсутствуют методы контроля за правильным внесением удобрений в почву. Необорудованность складов, отсутствие эффективных методов контроля за качеством минеральных удобрений зачастую ведет к тому, что минеральные удобрения недопустимо увлажняются, в следствие чего:

- появляется слеживаемость удобрений;
- увеличивается их спекаемость;
- повышаются затраты на транспортировку минеральных удобрений повышенной влажности;
- внесение в почву удобрений с неконтролируемой влажностью приводит к неправильной дозировке минерального удобрения в почве и, как следствие, к нарушению технологии возделывания культур;
- ухудшается сыпучесть и рассеиваемость минудобрений;
- уменьшается прочность гранул минудобрений;

- требуются дополнительные затраты труда, чтобы привести слежавшееся минудобрение снова в раздельно-частичное состояние;

- влажные минудобрения склонны залеплять транспортные и высеивающие агрегаты;

- ухудшается гранулометрический состав минудобрений, из-за чего снижается рабочая ширина разбрасывателей и повышается неравномерность внесения туков.

Неравномерность внесения туков отражается на развитии корневых систем сельскохозяйственных культур. Известно, что корень растения направляется как бы при помощи зрения. Сущность этого явления, получившего название хемотропизма, заключается в раздражающем действии растворенных веществ на живую плазму, причем высокие концентрации оказывают столь сильное раздражение, что со стороны организма вызывают отрицательный хемотропизм – прекращение ветвления корней в этой зоне, а подходящие для корневой системы данного растения концентрации солей приводят к положительному хемотропизму, что и проявляется в усиленном развитии корней в соответствующей зоне почвы.

При этом следует также учесть, что ионы, находящиеся в почвенном растворе, молодой корешок извлекает из объема почвы вокруг себя в радиусе около 20 мм. Более ограничено пространство, из которого он может усвоить обменно-поглощенные почвой ионы: фосфатный анион – 2,5 мм, катионы кальция и магния – 5 мм, калия и натрия – 7,5 мм.

Таким образом, влажность сыпучих минеральных удобрений в конечном счете оказывает значительное воздействие на урожайность сельскохозяйственных культур.

Влажность сыпучих минеральных удобрений - это весовой процент механически примешанной воды к материалу, поэтому объектом нашего исследования является весовое содержание влаги.

О процентном содержании влаги в сыпучих минеральных удобрениях можно судить, не определяя физико-химических и механических свойств собственно удобрений. Для этого необходимо анализировать воздушную среду, насыщенную парами воды, содержащимися в минеральных удобрениях. При этом принимается во внимание, что состав сухого атмосферного воздуха

достаточно стабилен (естественные флуктуации объемного содержания его составляющих не превышают  $\pm 0,01\%$  [12]). Установлено, что пары воды, содержащиеся в воздухе, уменьшают среднюю молекулярную массу паровоздушной смеси. Это приводит к тому, что, регистрируя определенным образом молекулярную массу паровоздушной смеси, можно по ней определить процентное содержание влаги в куче минерального удобрения [16].

Сыпучие минеральные удобрения, как правило, не имеют в своем составе растворимых легко улетучивающихся веществ (состав сухого атмосферного воздуха приведен в табл. 3.1).

Таблица 3.1. Состав сухого атмосферного воздуха [12]

Вещество	Молекулярная масса	Объемное содержание, %
Азот	28,0134	78,084 $\pm$ 0.004
Кислород	31,998	20,946 $\pm$ 0,002
Аргон	39,948	0,934 $\pm$ 0,001
Углекислый газ	44,009	0,03 $\pm$ 0,003
Неон	20,179	(1,818 $\pm$ 0,004) • 10 <sup>-3</sup>
Гелий	4,0026	(5,24 $\pm$ 0.004) • 10 <sup>-4</sup>

Продолжение табл. 3.1

Метан	16,043	2,2 • 10 <sup>-4</sup>
Криптон	83,8	(1,41 $\pm$ 0,001) • 10 <sup>-4</sup>
Двуокись азота	46,005	(0,5 $\pm$ 0.001) • 10 <sup>-4</sup>
Водород	2,0158	0,5 • 10 <sup>-4</sup>
Ксенон	131,3	( 8,7 $\pm$ 0,1 ) • 10 <sup>-4</sup>
Озон	—	(0 - 0,07) • 10 <sup>-4</sup>

Предполагается, что воздух в своем составе не имеет других примесей, кроме воды, которые могут оказать существенное влияние на его физико-химические свойства (основные физико-химические свойства атмосферного воздуха приведены в табл. 3.2 [12].)

Таблица 3.2. Физико-химические свойства сухого атмосферного воздуха [12]

Скорость звука, м / с	Плотность, г/см <sup>3</sup> • 10 <sup>3</sup>	Теплоемкость, кал/г•град.	Вязкость, г/см • с • 10 <sup>-6</sup>
331,3	0,0013079	0,2402	171,0

Но абсолютно сухого воздуха в природе не существует, и в атмосферном воздухе всегда содержится то или иное количество паров воды.

О содержании воды в паро-воздушной смеси можно судить по парциальному давлению паров воды в минеральном удобрении. На рис. 3.1 дана типичная зависимость парциального давления паров воды от весовой влажности сыпучего минерального удобрения.

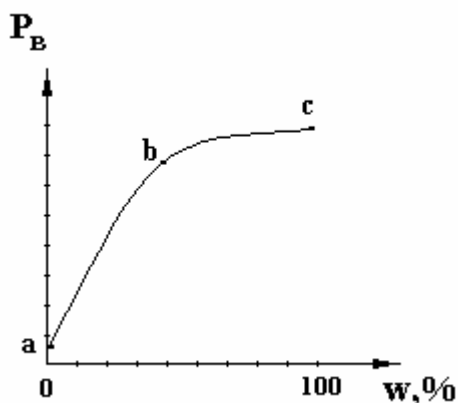


Рис. 3.1. Типичная зависимость парциального давления  $P_B$  паров воды от весовой влажности сыпучего минерального удобрения, выраженной в процентах:  $W$ .

Данная зависимость выведена теоретически на основании анализа аналогичных зависимостей [13], [5] для сыпучих минеральных удобрений.

На графике можно выделить два участка. На участке а, b парциальное давление возрастает по линейному закону, причем кривая более крутая, в зависимости от содержания молекул воды в сыпучем минеральном удобрении. Затем следует участок b, c, на котором парциальное давление зависит в основном только от температуры, сыпучего минерального удобрения. На этом участке происходит полное насыщение сыпучего минерального удобрения водой.

В свою очередь парциальное давление пара связано с весовым содержанием пара в паро-воздушной смеси формулой

$$a = 289 \cdot \frac{P_B}{T}, \quad (3.1)$$

где  $a$  - весовое содержание воды, г/м<sup>3</sup>;  
 $P_B$  - парциальное давление паров воды (мм. рт. ст.);  $T$  - абсолютная температура, К.

Прежде чем перейти к выбору конкретного метода анализа влажности сыпучего минерального удобрения, необходимо проанализировать существующие методы определения влажности твердых и газообразных сред, поскольку возможно как прямое, так и косвенное (по влажности паров воздуха над сыпучим минеральным удобрением или внутри его) определение влажности удобрения.

Сравнительный анализ методов и средств контроля сыпучих минеральных удобрений.

Существующие методы контроля и определения влажности можно сыпучих минеральных удобрений разбить на две группы:

1) Прямые методы, основанные на непосредственном измерении при разделении материала на сухое вещество и воду, например сушкой или химической реакцией.

2) Косвенные методы, основанные на измерении величины, функционально связанной с влажностью материала. Косвенные методы требуют предварительной калибровки с целью установления зависимости влажности материала от измеряемой величины.

В основу всех химических методов положена та или иная химическая реакция с участием воды. О содержании воды судят по количеству реактива, израсходованного на полное химическое превращение воды, или по количеству образующихся при этом продуктов реакции.

Химические методы определения влажности подразделяются на газометрические, титрометрические, термометрические [5].

- Газо-метрические методы основаны на измерении объема газа, выделяемого при взаимодействии образца воды с некоторыми веществами. К последним методам относятся магнийорганические соединения (реактивы Гриньяра), разлагающиеся водой до газообразных углеводородов.

- Титрометрические методы используют зависимость объема расходуемого вещества, принятого в качестве титранта, от количества воды. Эти методы в свою очередь можно разделить на прямые и косвенные методы. В первых - титрант непосредственно вступает в химическое взаимодействие с водой образца.

В косвенных методах титрант реагирует с веществом, образуемым при добавлении избытка реагента к водному раствору. В основе прямых методов чаще всего лежит какая-нибудь окислительно-восстановительная реакция с участием воды, а косвенный метод основан в большинстве случаев на реакции гидролиза.

- Термометрические методы определения содержания воды заключаются в измерении тепла, выделяемого в ходе упомянутых реакций.

Несмотря на то, что химические методы широко применяются на практике, в целом они обладают рядом недостатков. Во первых - для их проведения требуются специальные реактивы, которые не всегда могут быть в наличии, во вторых - требуется специальное рабочее лабораторное оборудование, исключающее всякую связь с внешней средой, в третьих - на протекание реакций требуется время, что не позволяет мгновенно оценить результат при прохождении реакции, что вносит большую погрешность в результат измерений, при проведении реакции зачастую параллельно идут побочные реакции, которые вносят большую погрешность в результат измерения. Все это ограничивает применение химических методов в сельском хозяйстве.

Электрохимические методы по распространенности стоят на втором месте после химических методов. В их основу положено измерение таких электрохимических параметров, как электропроводность, количество электричества и потенциала в зависимости от содержания воды [5]. Электрохимические методы подразделяются в свою очередь на:

- кулонометрический;
- потенциометрический;
- полярографический;
- кондуктометрический.

Кулонометрический метод - если чувствительные к воде реактивы способны образоваться на электроде электрохимической ячейки или продукты реакции могут быть количественно подвергнуты электролизу, то содержание воды можно оценить по количеству электричества, израсходованного на эти электрохимические процессы.

В настоящее время существует ряд приборов, основанных на кулонометрическом методе. Так, Ангарский филиал ОКБА, г. Ангарск 21, создал целую серию приборов, для измерения влажности газов типа "Корунд", "Темп", "Кедр",

"Кристалл" и другие. Принцип действия этих приборов основан на непрерывном извлечении влаги из контролируемого газового потока пленкой гигроскопического вещества (фосфорного ангидрида) и одновременном разложении воды на водород и кислород в толще пленки путем электролиза.

В установившемся режиме величина тока электролиза служит мерой абсолютного количества влаги, поступающего в прибор в единицу времени. Эти приборы применяются в нефтеперерабатывающей и газовой промышленности для контроля за процессами сушки. Недостатком приборов, основанных на кулонометрическом методе, является высокая погрешность измерений, вызванная влиянием побочных электрохимических процессов на электрод, возможностью попадания посторонних электроактивных примесей извне или из вспомогательного электронного пространства.

Кулонометрические гигрометры дают правильные показания лишь в потоке анализируемого газа, скорость и давление которого постоянны. Не могут быть объектом анализа те газы, которые вступают во взаимодействие с поглотителем или претерпевают химическое превращение.

Потенциометрический метод основан на изменении потенциала инертного электрода (например, платинового) в зависимости от количества воды в растворе. Однако этот метод требует предварительного получения калибровочных данных, их периодической проверки, обладает большой погрешностью измерений и поэтому не получил распространения.

В основу полярографического метода положена зависимость между силой предельного диффузионного тока электрохимического окисления или восстановления вещества и его концентрацией. Этот метод мало изучен и представляет собой ценность скорее в теоретическом аспекте, нежели на практике.

Кондуктометрический метод основан на измерении концентрации примеси по изменению электропроводности анализируемого вещества. Если электропроводность анализируемого вещества и воды различны, можно предположить, что электропроводность их смеси будет промежуточной и пропорциональна концентрации компонента,



обладающего большей электропроводностью.

Существенным недостатком кондуктометрического метода является большая зависимость электропроводности исследуемого материала от посторонних примесей, кроме того, на электропроводность значительно влияет неодинаковая плотность вещества. Все это делает ограниченным применение приборов, основанных на кондуктометрическом методе анализа влажности.

Физико-химические методы связаны с изменением равновесия в системе газ - жидкость, газ - твердое тело, причем обязательным участником равновесия является вода. В свою очередь физико-химические методы подразделяются [9]:

- на газовую хроматографию;
- анизотропную дистилляцию;
- фазовое титрование;
- метод точки росы;
- другие методы.

Рассматривать каждый из перечисленных методов нет необходимости, а соответствующие приборы, основанные на физико-химическом методе, представляют интерес. В настоящее время серийно выпускается гидрометр общепромышленного назначения АГК-210. Принцип действия гидрометра основан на автоматическом поддержании температуры поверхности металлической пластины равной температуре точки росы анализируемого воздуха.

Поток анализируемого воздуха омывает пластину из металла, которая находится в контакте с электронагревателем и термоэлектрическим охлаждающим элементом. Если температура пластины ниже температуры точки росы окружающего воздуха, то на ее поверхности образуется пленка конденсата, толщина которой тем больше, чем ниже температура пластины. На поверхности пластины установлены два изолированных от нее параллельных палладиево-серебряных электрода, которые выполняют роль чувствительного элемента толщины пленки конденсата. Если поверхность пластины сухая, то цепь электродов разорвана, чем толще пленка конденсата, тем меньше сопротивление между электродами.

Гидрометр измеряет относительную влажность в пределах 30 - 80 %. Изготовитель - НПО "Аналитприбор" г. Кутаиси. Недостатком прибора является ограниченный диапазон измерения

влажности, что не позволяет применять прибор в широких пределах изменения влажности.

В физических методах определения влажности твердых и газообразных тел о содержании воды судят по измерению таких физических величин как масса, плотность, вязкость, диэлектрическая проницаемость и т. д. Физические методы по сравнению с другими методами имеют большое преимущество. Они являются наиболее быстродействующими из всех существующих методов определения влажности.

Определение влажности методом сушки длится от многих часов (высушивание до постоянного веса) до 1 часа (ускоренные методы высушивания), или, в лучшем случае, до десятков или нескольких минут (сушка инфракрасными лучами или токами высокой частоты). В то же время длительность определения влажности электрическим не автоматическим влагомером равна от одной до нескольких минут, а применение некоторых типов автоматических влагомеров непрерывного действия измерения можно считать практически безинерционным.

Физические методы позволяют автоматизировать измерение влажности и находят применение в информационно-измерительных системах и управлении для многих технологических процессов. Большинство влагомеров позволяют проводить измерения без разрушения образца, чем достигается экономия материала, а так же возможность построения измерений на одном и том же образце при проверке результата измерений. Это приводит к дополнительному сокращению длительности измерений [5]. Физические методы подразделяются:

- на гравиметрию;
- десинтометрию;
- диэлькометрию.

В основе гравиметрического метода определения влажности лежит сушка или поглощение воды некоторыми эффективными ее поглотителями. При сушке о содержании воды судят по уменьшению массы (при низкой, нормальной или повышенной температуре, под вакуумом или при обычном давлении, с применением осушителей или без таковых). Этот метод определения влажности является старейшим и, несмотря на существенные недостатки, такие как низкая точность, большая длительность времени эксперимента, требование наличия эталонных образцов,

еще широко применяется, особенно в сельскохозяйственном производстве, благодаря своей простоте и отсутствию специального оборудования.

При определении влажности газа при помощи поглотителей идея заключается в том, что анализируемый продукт пропускается через определенной формы сосуд, заполненный веществом, активно поглощающим воду. Сосуд взвешивают до и после пропускания газа и по разности находят количество поглощаемой воды, откуда легко можно рассчитать искомую влажность.

Десинтометрический метод основан на измерении плотности вещества. Если вещество хорошо растворяется в воде или смешивается с ней во всех отношениях и имеет плотность, отличную от плотности воды, то можно ожидать, что плотность смеси будет иметь промежуточное значение, причем каждому составу будет отвечать строго постоянное значение плотности. Метод не получил распространения главным образом из-за низкой чувствительности.

В основе диэлькометрического метода определения содержания воды путем измерения диэлектрической проницаемости лежит тот факт, что диэлектрическая проницаемость большинства веществ намного меньше соответствующего значения воды.

На физическом методе контроля основан диэлькометрический лабораторный влагомер «Калий», предназначенный для измерения влажности хлористого калия. Выпускается Ангарским филиалом ОКБА. Недостаток его в том, что устройство уплотнения пробы – пневматическое с питанием от воздушной линии. Велики также габариты, масса прибора (16 и 9 кг) и мал диапазон измерения – 0-5%.

Диэлькометрическим является также измеритель влажности гранулированной аммиачной селитры «Азот», выпускаемый там же. Недостатки его аналогичны «Калию», но диапазон измерений еще меньше – 0-0,6%.

СВЧ диэлькометрический влагомер типа «Фосфор-К» предназначен для измерения массовой доли влаги (в %) в техническом хлористом калии марок К и Ф с размером гранул до 2 мм, что является его недостатком. Верхний предел измерений также мал – 2,2 %. Остальные недостатки аналогичны недостаткам «Калия» и «Азота».

Распространение диэлектрический метод получил при определении влажности зерна, муки и других продуктов сельскохозяйственного производства, изделий целлюлозно-бумажной, кожевенной, текстильной и других отраслей.

К недостаткам данного метода можно отнести большую погрешность в измерениях, связанную с неоднородной плотностью измеряемых веществ.

Разновидностью диэлектрического метода является измерение влажности твердых материалов и жидкостей на СВЧ (сверхвысокие частоты), в котором измерение диэлектрических свойств материала оценивается по его взаимодействию с радиоволнами дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазона.

В последнем десятилетии применение влагомеров СВЧ в различных областях науки и техники непрерывно растет. Важнейшими достоинствами влагомеров СВЧ являются: возможность бесконтактных измерений (в свободном пространстве), высокая чувствительность, неограниченный верхний предел измерений, малое влияние на результаты измерений химического состава материала и некоторых других факторов.

Для измерения влажности других сыпучих материалов изобретено много приборов, работающих на СВЧ. Целью изобретений является повышение точности измерений, например, устройства для измерения влажности сыпучих материалов [14]. Повышенная точность измерений в данном приборе достигается за счет уменьшения влияния плотности исследуемого материала, введением дополнительного генератора.

К недостатку СВЧ влагомеров относится сильная температурная зависимость параметра преобразования. В связи с этим приходится применять довольно сложные схемы температурной коррекции влияния плотности на погрешность измерения.

На ядерно-физическом принципе основан нейтронный влагомер «Нейтрон-3», предназначенный для непрерывного измерения относительной массовой влажности сыпучих неводородосодержащих минеральных удобрений. Его недостаток – необходимость непрерывного прохождения контролируемого продукта при неизменном количестве (массе) его в заданном объеме. Прибор стационарный, небезопасный в

эксплуатации, состоит из отдельных блоков массой от 5 до 56 кг.

Таким образом, выпускаемые промышленностью влагомеры сыпучих минеральных удобрений по условиям применения и техническим характеристикам более подходят промышленности, выпускающей сыпучие минеральные удобрения, но не к сельскохозяйственному производству.

Кроме рассмотренных выше методов определения влажности существует ряд методов основанных на акустике, которые могут быть применены для определения влажности в твердых и газообразных средах.

Ультразвуковые методы исследования и контроля состава и свойств вещества получили за последние годы более широкое распространение, объясняется это тем, что между различными физико-химическими свойствами вещества и его акустическими параметрами существует тесная взаимосвязь. Ультразвуковые приборы для исследования состава базируются, в основном, на методах измерения скорости распространения или затухания ультразвука в исследуемой среде.

Выбирая подходящий метод измерения, необходимо обратить внимание на две особенности акустики:

1) Различие между акустическими сопротивлениями газов и твердых тел составляет четыре порядка. Это означает, что при преобразовании электрической энергии в акустическую энергию и наоборот имеют место большие потери мощности, практически полное отражение звуковых волн от стенок измерительной камеры и образование при этом стоячих волн, которые очень трудно подавить.

2) Газы имеют частотно-зависимое затухание, которое обуславливает полное поглощение при высоких частотах и малых длинах волн.

Рассмотрим более подробно методы абсолютного отсчета времени распространения ультразвуковых волн [15].

Фазовый метод. Непрерывные ультразвуковые колебания вводятся излучающим пьезоэлементом в контролируемую среду. Пройдя путь  $l$ , эти колебания принимаются приемным пьезоэлементом. Изменение фазы, измеряемое электронной схемой, характеризует состав и свойства контролируемой среды. В промышленных приборах фаза измеряется фазометрами с

выходами на автоматическую регистрацию. Точность измерений абсолютного значения скорости распространения ультразвука в широких пределах не велика, она составляет не более 0,5 %. При измерении в узких пределах скоростей распространения ультразвука точность повышается. В связи с этим фазовые методы целесообразно применять при разработке приборов целевого назначения. При этом может быть достигнута высокая точность контроля времени распространения ультразвуковых волн. Скорость распространения ультразвука в среде зависит от физико-химических свойств и температуры среды. Следовательно, сдвиг фаз в измерительном устройстве с фиксированным расстоянием между пьезоэлементами зависит от состава и температуры среды. Помещенные в измерительную среду излучающий и приемный пьезоэлементы защищаются от воздействий контролируемой среды промежуточными мембранами (звуководами). В связи с наличием в технологических средах взвесей на поверхностях мембраны могут оказаться осадки и кристаллы компонентов контролируемой среды. Количество осадка не остается постоянным. С учетом этих факторов измерение фазы ультразвуковых колебаний на приемном пьезоэлементе по сравнению с фазой на излучающем пьезоэлементе можно определить выражением

$$\Delta \varphi = 2 \pi f \left[ \frac{l}{C_0} + \frac{2h_1}{C'_0} - a(g - g_0) \frac{l}{C_0} - \left( \frac{bl}{C_0} + 2 \frac{b'l}{C'_0} \right) (t - t_0) - \frac{C_2 - C_0}{C_0 C_2} d - \frac{l}{V \sin \alpha} \right] + \Delta \varphi_{\text{ПЭВ}}, \quad (3.2)$$

где  $f$  - частота;  $l$  - расстояние между мембранами пьезоэлементов;  $h_1$  - толщина мембраны;  $C_0, C'_0, C_2$  - скорость звука при средней рабочей температуре соответственно в контролируемой среде, мембране, кристаллизирующемся слое;  $a$  - основной коэффициент кристаллизации;  $g$  и  $g_0$  - концентрация основного компонента в среде соответственно в момент измерения и начальная;  $b$  и  $b'$  - температурный коэффициент скорости соответственно в измеряемой среде и мембране;  $t$  и  $t_0$  - температура среды соответственно в момент

измерения и начальная;  $d$  - толщина осадка кристаллизующегося слоя;  $V$  - скорость движения измеряемой среды;  $\alpha$  - угол наклона пьезоэлемента к потоку измеряемой среды;  $\Delta\varphi$  - сдвиг фазы, обусловленный реверберацией ультразвуковой волны.

Первое и второе слагаемые в квадратных скобках уравнения выражают сдвиг фазы, зависящий от начальной концентрации среды при средних значениях температуры и концентрации примесей при отсутствии осадков на мембранах. Третье слагаемое соответствует сдвигу фазы в связи с изменением концентрации основного компонента среды и примесей, четвертое слагаемое - сдвигу фазы из-за изменения температуры; пятое слагаемое - сдвигу фазы вследствие изменения осадка; шестое слагаемое - сдвигу фазы, определяемому скоростью движения среды.

Из уравнения (3.1) видно, что изменение фазы в основном зависит от концентрации и температуры измеряемой среды.

Для предотвращения влияния осадков на точность измерений необходимо использовать амплитудно-модулированные ультразвуковые колебания синусоидальной формы с частотой  $f$ . В этом случае измеряется сдвиг фазы напряжения модулированной волны относительно напряжения модулирующего генератора. При таком измерении снижение  $f$  и увеличение  $l$  не ограничиваются.

Импульсный метод [15].

Определение абсолютной величины скорости ультразвука импульсным методом основано на зависимости между скоростью распространения акустического импульса, длиной пути, проходимого этим импульсом, и временем, необходимым для прохождения этого пути. Время прохождения между излучающим и приемным пьезоэлементами или двойного пробега импульса от приемоизлучающего пьезоэлемента к отражателю и обратно определяет скорость ультразвука в исследуемой среде. Степень затухания ультразвука в исследуемой среде существенно влияет на выбор длины пробега импульса. Если в исследуемой среде наряду с изменением скорости ультразвука происходит его поглощение, то во избежание ошибки предпочтительней применять импульсный метод измерения. При этом следует защищать пьезоэлементы от влияния кристаллических осадков. Толщина слоя осадков может в значительной степени

меняться в зависимости от скорости потока контролируемой среды. Это вносит ошибку в измерения. Измерение времени распространения ультразвукового импульса между излучающим и приемным пьезоэлементами

$$\Delta T = \left[ \frac{l}{C_0} + \frac{2h_1}{C'_0} - a(g - g_0) \frac{l}{C_0} - \left( \frac{bl}{C_0} + 2 \frac{b'h_1}{C'_0} \right) (t - t_0) - \frac{C_2 - C_0}{C_0 C_2} d - \frac{l}{V \sin \alpha} \right] + \Delta T_{\text{РЕВ}}, \quad (3.3)$$

где  $\Delta T_{\text{РЕВ}}$  - ошибка во времени, обусловленная реверберацией, остальные значения, что и в уравнении (3.2).

Из этого выражения видно, что величина  $\Delta T$  зависит от концентрации измеряемой среды и температуры. При равенстве нулю четвертого слагаемого в квадратных скобках и пренебрежении влияния концентрацией примесей изменение  $\Delta T$  времени прохождения ультразвука по сравнению с начальным значением зависит лишь от концентрации основного компонента

$$\Delta T = a(g - g_0) \frac{l}{C_0}. \quad (3.4)$$

Скорость ультразвука в исследуемой среде при этом равна

$$C = \frac{l}{\tau_{\text{и}} - \tau_{\text{эл}}}, \quad (3.5)$$

где  $l$  - расстояние между пьезоэлементами;  $\tau_{\text{и}}$  - время распространения импульса между пьезоэлементами;  $\tau_{\text{эл}}$  - время прохождения импульса в электрических цепях прибора.

*Частотно - импульсный метод.*

Метод основан на принципе измерения скорости распространения ультразвука в измеряемой среде по частоте автоциркуляции импульса в синхрокольце, состоящем из генератора, исследуемой среды, усилителя. Задающий параметр (частота автоциркуляции импульса) определяется исследуемой средой.

Частота автоциркуляции импульсов в синхрокольце:

$$F = \frac{C}{l}, \quad (3.6)$$

где  $l$  - расстояние между излучающим и приемным пьезоэлементами;

$C$  - скорость ультразвука в исследуемой среде.

Скорость ультразвука в исследуемой среде при этом методе определяется выражением

$$C = \frac{IF}{1 - F(\tau_{и} + \tau_{эл})}, \quad (3.7)$$

где  $\tau_{и}$  - время прохождения ультразвукового импульса в исследуемой среде и мембранах.

При точных измерениях скорости ультразвука необходимо учитывать запаздывание импульса, вносимое мембранами, звуководами и электрическими цепями. В противном случае величина относительной погрешности может быть соизмерима с временем распространения ультразвука в контролируемой среде. Это вызывает ряд затруднений при разработке приборов для измерения скоростей ультразвука.

Выделим преимущества и достоинства ультраакустических методов контроля по сравнению с другими известными методами.

Измеряемая величина (скорость звука, время прохождения электроакустического импульса) вычисляются достаточно просто и точно, что возможно при не многих методах газового анализа, так как физические свойства, как правило, трудно рассчитать при учете влияния других свойств на измерительную камеру. Поэтому появляется возможность абсолютных измерений и отказа от экспериментальных проверочных кривых. Второе важное преимущество в благоприятном времени измерений - время анализа на 1 - 2 порядка меньше, чем при других методах, и как следствие - весьма высокая производительность измерений. Третье самое главное достоинство состоит в том, что высока разрешающая способность и связанная с ней точность. Это возможно, главным образом, ввиду легкой квантуемости измеряемой величины и применения дискретной техники. Отрицательные свойства данного метода определяются недостатками излучателей. Они особенно заметны при импульсной форме возбуждения. К этим недостаткам относятся малая начальная мощность, слабая помехозащищенность сигнала, относительно высокие затраты на схемную реализацию.

На кафедре ЭТОЭ АлтГТУ разработан ультразвуковой измеритель влажности сыпучих минеральных удобрений, работа которого основана на описанном выше принципе, так как молекулярная масса воздуха определяется по скорости

распространения ультразвуковых колебаний в паровоздушной среде. Прибор защищен двумя авторскими свидетельствами СССР. Технические характеристики прибора позволяют с необходимой точностью контролировать влажность сыпучих минеральных удобрений вплоть до значений, при которых начинается растворение сыпучих минеральных удобрений в воде.

Исходя из выше изложенного, можно сделать выводы:

1) Анализ проблем контроля качества сена показал, что равновесное содержание воды в сене определяется относительной влажностью воздуха, в то время как температура, абсолютная влажность воздуха и процессы десорбции оказывают слабое влияние на это равновесие.

2) Равновесную относительную влажность воздуха (РОВВ) можно определить, измеряя РОВВ, например, по результатам измерения скорости ультразвука воздушной вытяжки, то есть прямые измерения влажности сельскохозяйственной продукции можно заменить измерением влажности воздушной среды, находящейся в глубине контролируемого материала.

3) Теоретически возможно производить одновременно одним и тем же прибором контроль влажности и температуры в сене, сенаже и сенной муке.

4) Если рассматривать воздушную среду теплиц, как псевдобинарную газовую смесь, то проконтролировать ее можно использованием косвенных (физических и инструментальных) методов анализа, используя некоторую фундаментальную характеристику вещества, отражающую его свойства на молекулярном и атомарном уровне, в качестве которой представляется целесообразным использовать молекулярную массу газа.

5) Молекулярную массу газа, а следовательно, и концентрацию углекислого газа, целесообразно определять по скорости распространения ультразвуковых колебаний. Для измерения скорости ультразвука целесообразно использовать двухканальный способ определения скорости ультразвука и устройство для его осуществления, позволяющий обеспечить необходимый уровень инвариантности измерений концентрации углекислого газа в атмосфере теплиц.

6) Анализ объекта исследования показал, что о содержании влаги в сыпучем минеральном удобрении можно судить, исследуя паро-воздушную смесь,

находящуюся в сыпучем минеральном удобрении.

7) Из анализа существующих методов контроля влажности паровоздушной смеси следует, что наиболее целесообразен в данном случае ультразвуковой метод. Оперативный ультразвуковой контроль непосредственно в производственных условиях не требует отбора проб сыпучего минерального удобрения, а данные результатов анализа могут быть получены практически в момент измерений. Высокая чувствительность и большая разрешающая способность ультразвуковых анализаторов обеспечивает их высокое быстродействие и повышенную точность измерений.

8) Из ультразвуковых методов контроля влажности в газообразных средах наиболее полно отвечают задаче контроля влажности формовочной смеси частотно-импульсные методы. Их недостатки в основном устранены в технических решениях, разработанных авторами. Преимущества этих методов - точность измерений, малое время анализа, они обладают высокой производительностью, возможностью проведения абсолютных и относительных измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по кормопроизводству. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 413 с.
2. ГОСТ 4808-75. Корма растительного происхождения.
3. ГОСТ 23637-75.
4. ГОСТ 23638-79.
5. Определение влажности химических веществ. Г.Ф. Ничуговский. – Л. О.: Химия, 1977. – 200 с.
6. Кокс С.У.Р. Микроэлектроника в сельском хозяйстве / Пер. с англ. И предисл. В.М. Лурье, Р.Н. Танкелевича. – М.: Агропромиздат, 1986. – 280 с.
7. А.С. 1068801 СССР, МКИ G 01 N 29/00. Измеритель скорости ультразвука / Н.П. Воробьев, В.И. Янковский. - Оpubл. в Б.И., 1984. № 3.
8. Измерения в промышленности. Справочник. Пер. с нем. / Под ред. Профоса П. – М.: Металлургия, 1980. – 648 с.
9. Дьяконов В.П. Справочник по MathCad Plus 7.0 Pro. – М.: СК Пресс, 1998. – 336 с.
10. ГОСТ 18691-83.
11. А.С. 879439 СССР, МКИ G 01 N 29/00. Способ измерения скорости ультразвука и устройство для его реализации / Н.П. Воробьев. - №2788782/18-28; Заявл. 03.07.79; Оpubл. в Б.И., 1981. № 41.
12. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. Академика И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
13. В.М. Викторов. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. - Л.: Химия 1977. С. 152.
14. А. С. 306410 СССР.
15. Носов В.А. Проектирование ультразвуковой измерительной аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1972. С. 88, 93, 98.
16. Воробьев Н.П. Анализ проблем и методов определения влажности формовочной смеси // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Приложение к журналу «Ползуновский Альманах». № 3/2000. - Барнаул. 2000. Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - 10 с.