Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXII, вып. 1, 1972 г.

ВЛАГОМЕРЫ УГЛЯ ФИРМ «БРАБЕНДЕР МЕССТЕХНИК» (ФРГ) И «ФЕЙТРОН» (ГДР)

А. Ф. Авдеева

Влагосодержание — один из показателей качества угля и продуктов его переработки. Измерение влагосодержания материалов низкой добротности — задача трудная и окончательно не решенная.

Некоторые коксохимические предприятия за рубежом и в Советском Союзе (Нижне-Тагильский и Баглейский заводы) контролируют влажность системой фирмы «Брабендер Месстехник» ФРГ. Широко рекламируются для угля и других материалов влагомеры фирмы «Фейтрон» ГДР.

Влагометрическая система фирмы «Брабендер Месстехник» предназначена для непрерывного определения влажности бурого угля, идущего на брикетирование, и коксующихся углей в диапазоне 5—15%. Эта система обеспечивает подачу управляющих сигналов в узлы автоматического регулирования влажности [1, 2].

Система основана на емкостном принципе (рис. 1) и представляет собой *z*-метр [3]. Высокочастотный генератор 13,56 *мгц* составлен из трех каскадов: задающего генератора, буферного каскада, выполняющего также функцию удвоения частоты, и выходного резонансного усилителя, контур которого нагружен конденсаторным датчиком с испытуемой шихтой. Изменение режима работы выходного каскада по постоянному току в функции влажности шихты измеряется мостом постоянного тока, в диагональ которого включен электроизмерительный прибор — индикатор влажности. Необходимые режимы работы электронных схем на лампах и точность работы моста обеспечивает питание от электронного стабилизатора.

Важнейшим звеном системы является конденсаторный датчик. Фирма использовала несколько конструктивных вариантов датчика. У последнего, по-видимому, наиболее совершенного (рис. 2), три пластинчатых электрода образуют датчик рассеянного поля, два внешних — соединены между собой и заземлены [1, 2]. Внутренний электрод с помощью пружины может иметь различную, но постоянную, плотность прилегания к конвейерной ленте, под которой размещаются все электроды. Для предотвращения износа поверхность внутреннего электрода покрыта вулколаном. Коксовая шихта с содержащейся в ней водой, воздух и материал ленты представляют диэлектрическую среду конденсатора. Электрическое поле высокой частоты между средней и внешними пластинами конден-

сатора пронизывает коксовую шихту на глубину до 100 *мм* (необходимая минимальная высота слоя материала для данной конструкции датчика рассеянного поля, определяемая шириной его электродов и расстоянием между ними). Выше удвоенного междуэлектродного расстояния напряженность электрического поля равна нулю, поэтому изменения уровня материала над этим слоем не влияют на результаты измерений [3].

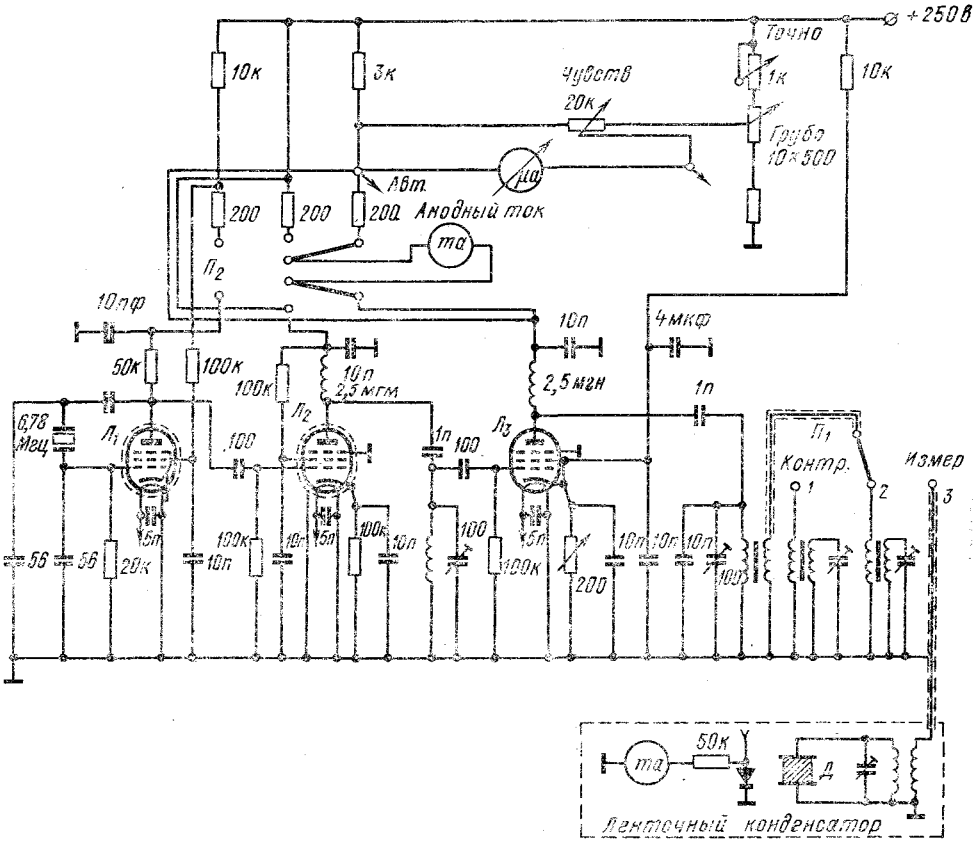


Рис. 1. Принципиальная схема влагомера фирмы «Брабендер»

Влагосодержание шихты определяет величину емкостной и активной составляющих сопротивления датчика. Для измерения его комплексного сопротивления фирма использует способ половины резонансной кривой колебательного контура генератора, элементом которого он является.

Высокочастотный генератор состоит из трех каскадов. Задающий генератор частоты 6,78 *мгц* выполнен на пентоде E83F и стабилизирован кварцем (см. рис. 1). Постоянство амплитуды выходного напряжения и частоты колебаний обеспечивает задающий генератор с низким коэффициентом полезного действия, 0,1—0,2 (почти вся мощность расходуется в цепи управляющей сетки и на потери в собственных элементах). Поэтому следующей ступенью должен быть буферный усилитель (на E83F), который дополнительно выполняет функцию удвоения частоты до 13,56 *мгц*. Умножение частоты позволяет существенно снизить влияние выходной ступени и нагрузки на режим задающего генератора, так как частоты выходного сигнала и сигнала возбуждения различны.

Выходной каскад измерительного генератора представляет собой узкополосный резонансный усилитель на EL34. В контуре резонансного усилителя с помощью индуктивной связи включается конденсаторный датчик с шихтой (рис. 1, $П_1$ в положении *2*). Оба связанных контура с помощью антенны настраиваются подстроечным конденсатором (помещенным в корпусе датчика вместе с магнитоэлектрическим миллиампермет-

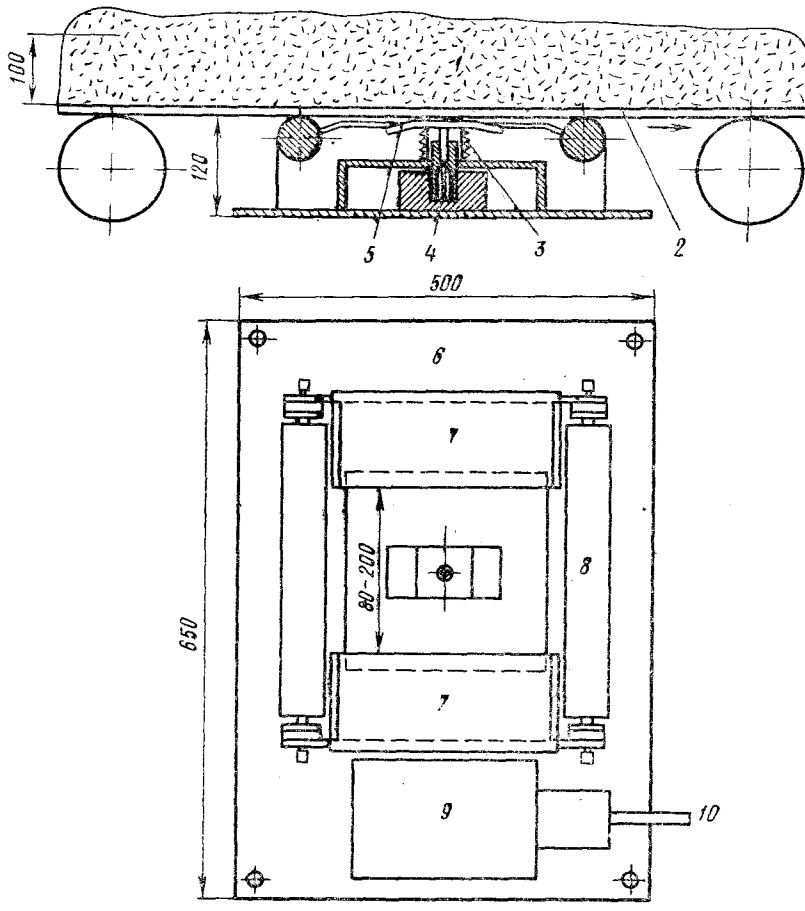


Рис. 2. Конденсаторный датчик:

1 — коксовая шихта; *2* — лента; *3* — уплотнение; *4* — пружина; *5* — верхняя пластина датчика; *6* — основание; *7* — нижняя пластина датчика; *8* — несущий ролик; *9* — настроечный элемент; *10* — кабель высокой частоты

ром) на 13,56 *мгц*. При этом настройка не связана с подбором оптимального сопротивления нагрузки лампы, что обеспечивает высокий к. п. д. схемы. При высокой добротности анодного контура и слабой связи между контурами изменение частоты колебаний из-за реакции нагрузки незначительно, поэтому контуры работают с малыми отклонениями от резонансной частоты. Кроме того, индуктивная связь позволяет легко согласовывать эквивалентное сопротивление контура $r_э$ с эквивалентным сопротивлением нагрузки в анодной цепи для получения оптимального режима работы генератора и допускает значительную длину высокочастотного кабеля, соединяющего датчик с измерительным устройством.

Можно сказать, что анодный ток выходного узкополосного усилителя функционально связан с влажностью материала, поскольку емкостное и активное сопротивления резонансного контура имеют составляющие, вносимые датчиком влажности. Действительно, при увеличении влажности коксовой шихты увеличиваются емкостная и активная составляющие проводимости датчика, что приводит к некоторой расстройке колебательного контура и изменению режима работы выходного каскада. Эквивалентное сопротивление контура r_a с ростом влажности материала уменьшается. При этом снижается напряжение на контуре, вследствие чего увеличиваются напряжение на аноде лампы U_a и анодный ток I_a, режим становится недонапряженным, уменьшается сеточный ток [4]. Соответственно возрастает постоянная составляющая анодного тока I_{a0} и подводимая мощность

$$P_0 = E_a I_{a\ 0},$$

что равноценно уменьшению активного сопротивления выходного каскада и приводит к разбалансу моста постоянного тока, плечом которого он является.

На практике чаще используют зависимость постоянной составляющей анодного тока генератора I_{a0}, а не первой гармоники I_{a1}, так как измерять приращение постоянного тока ΔI_{a0} можно точнее и проще, чем переменного ΔI_{a1}.

Фирма «Брабендер Месстехник» использует для измерения ΔI_{a0} неуравновешенный мост постоянного тока, плечами которого являются выходная усилительная лампа Л3(EL34), в резонансный контур которой включен датчик, ее анодное сопротивление 3 *к*, сопротивление 5 *к* и настроечные сопротивления. Мост просто разделяет цепи датчика и питания, что снижает влияние внешних факторов на результаты измерения.

Мост постоянного тока исключает сложности, связанные с учетом не только амплитудных, но и фазовых соотношений. Переменные составляющие анодного тока выходного каскада фильтруются ($L=2{,}5$ *мгн*, $C=10$ *пф*).

Настройка контура в резонанс осуществляется подстроечной емкостью по максимуму тока в контуре датчика и по минимуму анодного тока I_{a0} в выходном каскаде. Эквивалентное сопротивление контура при резонансе $r_{э.\,рез}$ зависит от добротности контура

$$r_{э.\,рез} = \frac{\rho^2}{r} = \frac{L_{рез}}{C_{рез} r} = \rho Q,$$

где ρ — волновое сопротивление контура; $L_{рез}$, $C_{рез}$ — индуктивность и емкость контура при резонансе.

Из этого выражения очевидно, что при разной влажности материала контур имеет различные добротности и соответствующие им резонансные кривые $I_{a0}=\varphi(W)$, которые определяют значения токов. Относительное изменение эквивалентного сопротивления $\frac{\Delta r_э}{r_э}$ обычно не превосходит 10%.

Изменение параметров контура в функции влажности контролируемого материала приводит к изменению сопротивления лампы Л3, а следовательно, разбалансу моста и появлению в его диагонали тока I, измеряемого магнитоэлектрическим микроамперметром. В соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе

$$I = \frac{U_д'}{r_д + \frac{r_а (r_i + r_к + 200)}{r_а + r_i + r_к + 200} + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}},$$

где $U_д$ — напряжение на разомкнутой диагонали, $U_д = \Delta I_{а0}\, r_э$; r_1, r_2 — сопротивления настроечных плеч моста; $r_д$ — полное сопротивление диагонали; $r_к$ — сопротивление катодной цепи выходного каскада; r_i — динамическое сопротивление лампы, $r_i = \frac{\Delta U}{\Delta_i}$, приблизительно равное ее внутреннему сопротивлению, так как постоянным падением напряжения на контуре можно пренебречь, вследствие чего напряжение на сетке будет постоянным.

Известна зависимость [4]

$$\frac{\Delta I_{а0}}{I_{а0}} = -k_p' \frac{\Delta r_э}{r_э},$$

где коэффициенты, зависящие от $r_э$, т. е. от режима работы генератора,

$$k_p' = 1 - k_p;\ k_p = \frac{dU_к}{dr_э} \cdot \frac{r_э}{U_к}.$$

Следовательно, ток разбаланса зависит от изменения эквивалентного сопротивления контура $r_э$

$$I = \frac{I_{а0} \cdot r_а \cdot k_p'}{r_д + \frac{r_а (r_i + r_к + 200)}{r_а + r_i + r_к + 200} + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}} \cdot \frac{\Delta r_э}{r_э}.$$

Равновесию моста соответствует нормальное содержание влаги в шихте, при котором осуществляется настройка.

Использовать рассмотренный метод можно лишь при предварительной градуировке, так как сложность процессов не позволяет получить точной расчетной формулы, учитывающей влияние на величину тока непосредственно величины емкости датчика с материалом и его активной проводимости.

Зависимость тока от активной проводимости влажного материала снижена высокой частотой и слабой связью между контурами. Шкала прибора нелинейна из-за нескольких ступеней преобразования при двух способах измерения параметров датчика в функции влажности — половины резонансной кривой и мостового.

Чувствительность системы зависит от добротности контура и не может быть большой, так как увеличение крутизны резонансной кривой приводит к нестабильности показаний индикатора и увеличивает влияние посторонних факторов.

Емкостный метод требует дополнительных решений для коррекции погрешностей, связанных с влиянием гранулометрического состава угля, химического состава угля и воды, пространственного распределения компонентов смеси шихта — вода — воздух, их температуры, количества транспортируемого материала, качества конвейерной ленты, конструкций датчиков и т. п. [1, 2, 3].

Слабая индуктивная связь при подключении датчика к контуру наряду с уменьшением влияния активной составляющей его сопротивления снижает чувствительность системы и к изменениям его емкости.

Испытания показали, что система фирмы «Брабендер Месстехник» не свободна от влияния ряда названных мешающих факторов. Удовле-

творительные результаты были получены только на одном коксовом предприятии ФРГ: отклонения от значений лабораторных анализов не превысили в среднем за месяц ±0,2% влажности. Объясняются такие результаты тем, что уголь на этом предприятии имеет однородный состав и 80% массы крупностью не превышает 2 *мм*.

Влагометрическая система фирмы «Фейтрон» ГДР предназначена для непрерывного измерения влажности буроугольных брикетов. Система относится к классу *Z*-метров [3], так как основана на измерении полного сопротивления материала в конденсаторном датчике (рис. 3). Выходное напряжение высокочастотного генератора (60 *кгц*) через емкостный делитель подается на две симметричные ветви схемы сравнения. В одну из ветвей схемы включаются постоянные сопротивления и конденсаторы (Z_0), в другую — конденсаторный датчик и интегрирующая цепь, используемая для усреднения показаний прибора. Сопротивление датчика, а следовательно, этой ветви, и падение напряжения на нем функционально связаны с влажностью материала в датчике. Напряжение со схемы сравнения снимается через усилительные каскады на измерительный, регистрирующий или сигнальные индикаторы.

В качестве датчика использован конденсатор рассеянного поля. Конструктивно он представляет собой плиту из изолирующего материала, на которой смесью эпоксидной смолы с окисью металла (диэлектрическая прокладка) приклеены две профильные проволоки из нержавеющей стали — электроды. Задняя стенка датчика экранирована и защищена пылебрызгонепроницаемым кожухом. Эквивалентную схему такого датчика можно представить в виде параллельного соединения измеряемых емкости C_x и активного сопротивления r_x и последовательной емкости изоляционной прокладки C_0. В электрическом поле датчика, расположенном на транспортере, проходит контролируемая буроугольная масса. Влагосодержание ее определяет диэлектрическую проницаемость ε и активную проводимость g_x диэлектрической среды конденсаторного датчика, представляющей собой смесь угля, воды и воздуха. Комплексную проводимость датчика с материалом можно определить для указанной эквивалентной схемы соотношением

$$\frac{1}{Y_э} = \frac{1}{j\omega C_0} + \frac{1}{g_x + j\omega C_x},$$

где $g_x = \frac{1}{r_x}$ — активная составляющая проводимости датчика с материалом.

После преобразования комплексная проводимость

$$Y_э = \frac{-\omega^2 C_0 C_x + j g_x \omega C_0}{g_x + j\omega (C_0 + C_x)} = \frac{g_x \omega^2 \cdot C_0^2}{g_x^2 + \omega^2 (C_0 + C_x)^2} +$$

$$+ j \frac{g_x^2 \omega C_0 + \omega^3 C_0 C_x (C_0 + C_x)}{g_x^2 + \omega^2 (C_0 + C_x)^2}.$$

Считают, что введение последовательной с датчиком емкости уменьшает зависимость $Y_э$ от активной проводимости материала в датчике, по сравнению с зависимостью от C_x. В действительности изоляционная прокладка C_0 позволяет только увеличить диапазон измеряемых влажностей при значительном уменьшении чувствительности [3]. Чтобы при широком диапазоне влажностей иметь достаточно высокую чувствительность, фирма использует для измерений дифференциальную схему сравнения напряжений двух электрических цепей (см. рис. 3). Одна из цепей содер-

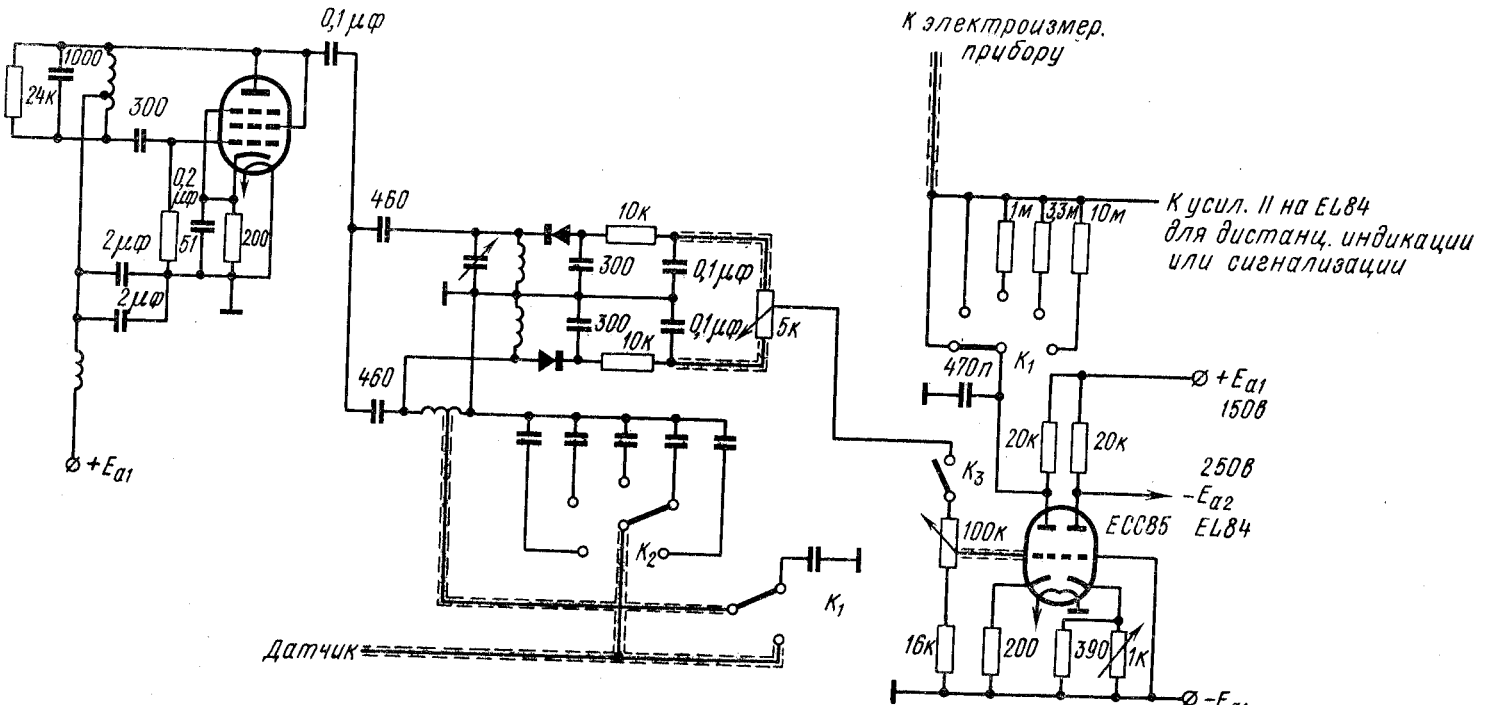


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема влагомера «Фейтрон»

жит полное сопротивление датчика, а вторая состоит из определенного постоянного сочетания конденсаторов и индуктивностей. Генератор частотой 60 *кгц* питает обе части схемы сравнения через симметричный емкостный делитель. Разность падений напряжений на обеих частях схемы

$$\dot{U}_x - \dot{U}_0 = \dot{U}\frac{Z_x - Z_0}{Z_x + Z_0},$$

где Z_x — полное сопротивление плеча с датчиком; $\dot{U}_x$ — падение напряжения на нем; Z_0 — полное сопротивление эталонного плеча, с которого снимается опорное напряжение $\dot{U}_0$; $\dot{U}$ — напряжение на выходе генератора высокой частоты.

Напряжения обеих цепей выпрямляются полупроводниковыми диодами. Разность напряжений с общего сопротивления подается на вход балансного усилителя постоянного тока и через него на чувствительный измерительный прибор. После еще одной ступени усиления сигнал, пропорциональный влажности материала, фиксируется миллиамперметром (0—10 *ма*) или вольтметром (0—60 *в*). Кроме показывающего прибора, входящего в измерительное устройство и отстоящего от датчика не более чем на 25 *м*, выходной сигнал может подаваться на самопишущий прибор, дистанционный указатель или сигнальный датчик. При контроле нуля индикатора и установке его с помощью потенциометров нуля и чувствительности вместо датчика подключается эталонная емкость.

Параллельно датчику подключаются интегрирующие звенья с постоянными времени от 0,04 до 40 *сек* (в зависимости от требований технологического процесса) для усреднения показаний при возможных колебаниях измеряемой влажности. Диапазон измеряемых влажностей 0—60% при температуре, не превышающей 100°С.

Градуировка прибора выполняется для перерабатываемого угля одного месторождения и приблизительно постоянного гранулометрического состава. Производственные испытания при таких условиях не зафиксировали погрешностей, превышающих ±1% по сравнению с анализами, выполненными высушиванием. Точность измерения, кроме того, зависит от постоянства выходного напряжения генератора, его частоты, постоянства сопротивления Z_0, неизменяемых элементов схемы в плече с датчиком и стабильности режима усилителя постоянного тока. Нелинейность шкалы прибора в значительной степени, по-видимому, определяется неудачным выбором частоты: 60 *кгц* для угля. При такой частоте Z_x преимущественно определяется величиной активного сопротивления материала в датчике R_x, а следовательно, и точность измерения ставится в зависимость от химического и физического состава материала.

К сожалению, в литературе нет сведений об эксплуатации этой системы ни за рубежом, ни в СССР.

Точность измерения влажности угольной шихты и брикетов рассмотренными влагомерами, несмотря на весьма сложные схемы, зависит, как уже указывалось, от многих факторов. Прежде всего, диэлектрическая проницаемость влажного угля зависит не только от количественного соотношения угля, воды и воздуха, но и от их пространственного распределения. Диэлектрическая проницаемость и активное сопротивление угля сильно зависят от температуры, химического состава угля и воды и гранулометрического состава угольной массы. Поэтому обе системы могут обеспечить допустимую точность только на материалах однородного состава при рациональных конструкциях датчиков, обеспечивающих максимальную чувствительность и чистоту поверхности электродов. Для положительных результатов измерения необходимо тщательное исполне-

ние и эксплуатация транспортерной ленты и обеспечение с помощью специальных устройств (башмаков, утюгов) равномерного потока и уровня насыпки шихты.

Трудно объяснить выбор использования в системах частот. Высокая частота для измерения влажности углей в диапазоне 5—15% в системе «Брабендер» значительно усложнила схему. Сравнительно низкая частота измерений в системе «Фейтрон» определила большую чувствительность к активной составляющей сопротивления угля и нелинейность шкалы прибора для большинства марок угля.

Исследования электрофизических свойств углей в лабораториях ЛГИ и УКРНииуглеобогащения показали, что кривая зависимости диэлектрической проницаемости углей от их влагосодержания до 15% наиболее близка к линейной и имеет значительную крутизну при частоте около 1 *мгц*. Во многих процессах, особенно при гидрообогащении углей, влажность достигает 20—25%. Тогда для реализации влагомера *Z*-метра необходима частота порядка 50 *мгц* [3] для обеспечения добротности

$$Q = \omega r C \geqslant 5.$$

Только с учетом этого емкостный влагометр, построенный по принципу *Z*-метра, при рациональной конструкции датчика и однородности контролируемого материала может обеспечить необходимую чувствительность и точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорниг З. Непрерывное определение влажности коксовой шихты. Глюкауф, 1965, № 11.

2. Klempt W. Brennst.-Chem., 1953, N 34.

3. Кричевский Е. С. Теоретические основы и анализ систем высокочастотного контроля влажности при обогащении полезных ископаемых. Автореф. докт. дисс., ЛГИ, 1967.

4. Полулях К. С. Электронные измерительные приборы. Высшая школа, 1966.

5. Влагоизмерительная установка типа FMД1 для бурого угля и торфа. Проспект фирмы «Feutron».