

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ПЛОТНОСТЬ ПУЛЬПЫ, ИЗМЕРЯЕМОЙ МИКРОРАДИОВОЛНОВЫМ СПОСОБОМ

*С. И. Голота*

Микрорадиоволновой метод измерения плотности пульпы основан на поглощении и рассеивании исследуемым материалом электромагнитного излучения СВЧ-диапазона (3000—10 000 Мгц).

Поглощение и рассеивание энергии в этом диапазоне волн имеет линейную закономерность, которая выражается соотношением

$$W = W_1 e^{-md}, \quad (1)$$

где  $W$  — мощность СВЧ у антенны передатчика;

$W_1$  — мощность у антенны приемника;

$m$  — пропорциональный массовый коэффициент поглощения;

$d$  — толщина материала.

В данной работе рассматривается влияние гранулометрического состава пульпы на определение ее плотности микрорадиоволновым методом, так как этот метод более прост, надежен, безопасен по сравнению с радиоактивным, а само устройство портативно и удобно в эксплуатации.

Определение плотности пульпы является важнейшим параметром в ряде технологических процессов (угле- и рудообогатительных фабриках, в титано-магниево и германиево производстве и т. д.).

Наряду с положительными факторами, присущими микрорадиоволновому методу (бесконтактность, непрерывность и дистанционность измерения), он обладает большой погрешностью измерения плотности пульпы при различном гранулометрическом составе. Поскольку гранулометрический состав разных пульп различен, то представляет интерес учет этого возмущающего фактора, т. е. в конечном итоге приближение указанного метода по точности измерения к радиоактивному.

При теоретическом исследовании поглощения и рассеяния радиоволн частицами считают, что эти частицы имеют форму шара. Действие шара состоит в том, что часть энергии падающей волны поглощается, превращаясь в джоулево тепло, а часть рассеивается в окружающем пространстве, так как шар становится вторичным излучателем. Известно, что

ослабление электромагнитных волн определяется из уравнения

$$d\bar{W} = -\alpha\bar{W}_1 dz, \quad (2)$$

где  $\bar{W}_1$  — принятая мощность;

$d\bar{W}$  — убывание  $\bar{W}_1$ , обусловленное поглощением и рассеянием микро-радиоволн на участке пути  $dz$  между передатчиком и приемником;

$\alpha$  — линейный коэффициент ослабления.

Если проинтегрировать уравнение (2) по всему расстоянию от передатчика до приемника, т. е. от нуля до  $z$ , получим

$$\bar{W} = \bar{W}_1 e^{-\int_0^z \alpha dz}, \quad (3)$$

где  $\bar{W}_1$  — мощность, которая была бы принята, если бы не было ослабления.

Общее ослабление электромагнитных волн в пульсе является следствием поглощения и рассеяния «твердого». Последнее в свою очередь зависит от размеров и минералогического состава частиц.

Теоретическое исследование вопроса о рассеянии плоской волны сферой было показано Ми в 1908 г. [1, 2] и другими. Из теории Ми известно, что поперечное сечение обратного рассеяния  $\sigma$  для сферической частицы можно представить следующим выражением:

$$\sigma = \frac{\pi d^2}{\rho} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (a_n - b_n) \right|^2, \quad (4)$$

где  $d$  — радиус частицы;

$$\rho = \frac{2\pi d}{\lambda};$$

$a_n$  и  $b_n$  — парциальные компоненты рассеянного поля.

Член  $a_n$  описывает рассеяние, возникающее от индуцированного магнитного диполя, квадруполья и т. д., а член  $b_n$  выполняет ту же роль только для электрического диполя, квадруполья. Общее же сечение поглощения  $Q_t$  определяется как:

$$Q_t = \frac{\lambda^2}{2\pi} (-\text{Re}) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (a_n + b_n),$$

где  $(-\text{Re})$  — вещественная часть суммы.

Общие формулы Ми довольно сложны, однако их можно несколько упростить, пользуясь приближением Релея и рассматривая  $\rho$  меньшим единицы, иными словами, когда  $d \ll \lambda$ . После достаточно сложного преобразования были найдены составляющие  $Q_t$ , поперечное сечение погло-

щения  $Q_a$  и поперечное сечение рассеяния  $Q_s$ , (для частиц диаметром 0,5—3 мм):

$$Q_a = \frac{8\pi d^3}{\lambda} \operatorname{Im} \left( -\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right); \quad Q_s = \frac{128 \pi^5 d^6}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2,$$

где  $m$  — комплексный показатель преломления вещества частицы;

$\operatorname{Im}$  — мнимая часть  $\left( -\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)$ ;  $m^2 = \epsilon_k (\text{MgCO}_3) = 5,6$ ;  $m^2 = \epsilon_k (\text{TiCl}_4) = 2,8 \div 3,4$ . Тогда общее поперечное сечение поглощения  $Q_t = Q_a + Q_s$ .

Общее ослабление на частицах  $\gamma$  равно величине затухания распространяющейся волны на пройденном расстоянии. Так как величина  $Q_t$ , получаемая из этих уравнений, относится к одной сферической частице, то для расчета общего ослабления на единице пути следует просуммировать величину  $Q_t$  всех частиц, находящихся в объеме с единичной длиной и единичным поперечным сечением.

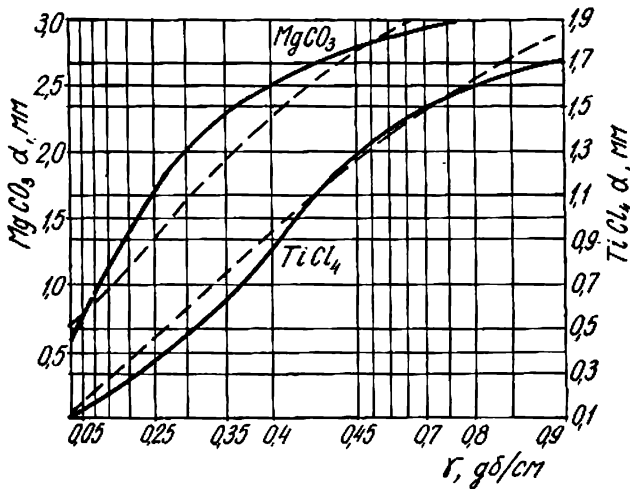


Рис. 1. Зависимости поглощения  $\gamma_{гр}$  от гранулометрического состава пульпы  $d$ , при  $\lambda = 3,2$  см, на основе титана и магния.

----- аналитическим методом  
 ————— экспериментальным методом

Тогда  $\gamma = \sum Q_t$  (4), а уменьшение принимаемой приемником мощности по (3) может быть выражено как

$$\bar{W} = \bar{W}_1 e^{-\int_0^z (\sum Q_t) dz} \tag{5}$$

Уравнение (5) можно записать в более удобном виде для использования его в практических расчетах:

$$10 \lg \frac{\bar{W}}{\bar{W}_1} = -\int_0^z (\sum Q_t) dz \quad \text{или} \quad \bar{W} = \bar{W}_1 10^{-\int_0^z (\sum Q_t) dz} \tag{6}$$

где ослабление  $\bar{W}$  выражено в децибеллах.

Теперь, если  $Q_i$  измеряется в квадратных сантиметрах, а суммирование производится в объеме  $1 \text{ дм}^3$ , то общее ослабление  $\gamma_{\text{гр}}$  в децибеллах на сантиметр по (4)

$$\gamma_{\text{гр}} = 0,4343 \cdot 10^{-6} \sum Q_i \text{ дБ/см}; \quad (7)$$

следовательно, подставляя в (6) значение (7), получим

$$\bar{W} = \bar{W} \cdot 10^{-\int_0^z \gamma_{\text{гр}} dz}, \quad (8)$$

что с достаточной степенью точности и при простом решении позволяет определить значение ослабления  $\bar{W}$  исследуемым материалом с учетом гранулометрического состава пульпы. Полное ослабление микроволн от передающей антенны до приемной будет складываться из ослабления в материале  $\gamma_{\text{м}}$ , в водной среде  $\gamma_{\text{в}}$ , частично от гранулометрического  $\gamma_{\text{гр}}$  и минералогического  $\gamma_{\text{мр}}$  составов атмосферного состояния газа  $\gamma_{\text{а.г}}$ , которое по (6) определяется выражением

$$q = 10 \lg \frac{\bar{W}}{\bar{W}_1} = - \int_0^z (\gamma_{\text{м}} + \gamma_{\text{в}} + \gamma_{\text{гр}} + \gamma_{\text{мр}} + \gamma_{\text{а.г}}) dz. \quad (9)$$

Согласно (7, 8) построены графические зависимости ослабления  $\gamma_{\text{гр}}$  от различного гранулометрического состава  $d$  (рис. 1). Приведенная зависимость может быть использована как поправочный график погрешности для преобладающих по размеру частиц твердой пульпы.

### Экспериментальная часть

Эксперимент был проведен на объекте при помощи установки, показанной на рис. 2 и представляющей собой приемно-передаточное устройство, работающее на частоте  $f = 9375 \text{ Мгц}$  ( $\lambda = 3,2 \text{ см}$ ).

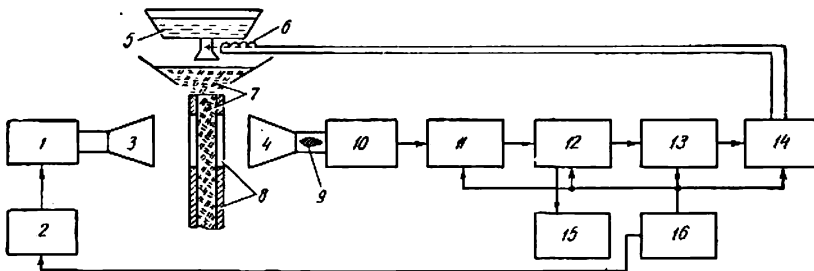


Рис. 2. Блок — схема микрорадиоволнового плотнметра

Блок передатчика состоит из генератора 1, модулятора 2 и рупорной секториальной антенны. Несущая частота генератора, модулированная звуковой частотой, равной 10 кГц, направляется узким лучом на исследуемый материал 7, проходящий по трубопроводу 8, имеющему полистироловое окно.

Блок приемника является регистрирующим и регулирующим устройством плотности пульпы. Он состоит из антенны 4 и аттенюатора 9, детекторной СВЧ секции 10, высокоомного входного каскада 11, селек-

тивного линейного усилителя 12, усилителя мощности 13 и исполнительного устройства 14 и 6. В приемник также входит стрелочный индикатор плотности 15 и блок питания 16. Передатчик собран на клистроне и транзисторах  $T_1$  и  $T_2$ , несущая частота которого фиксирована, а моду-

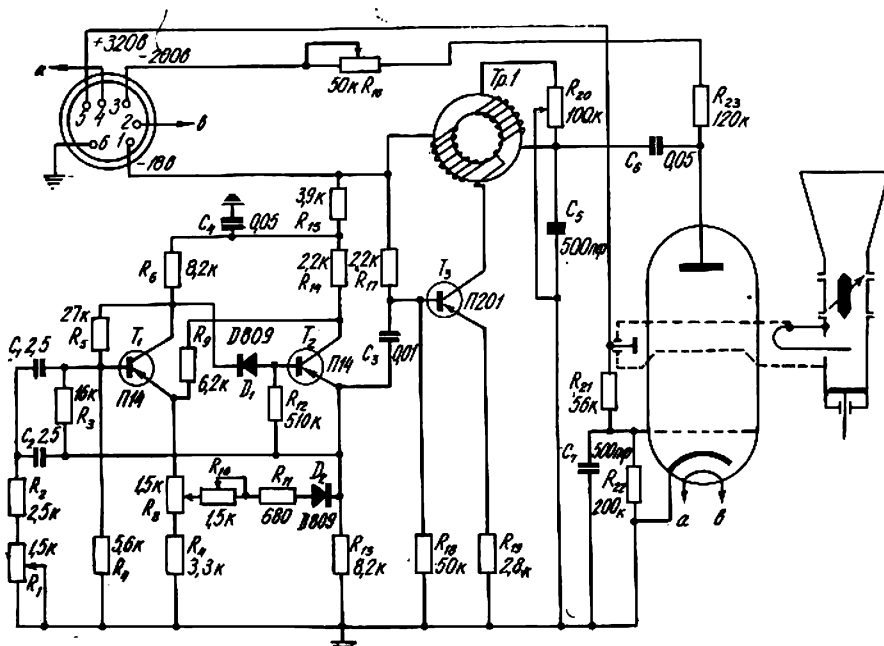


Рис. 3. Принципиальная схема передатчика

лирующая частота может подстраиваться (рис. 3). Питание подается через 6-ой штырьковый кабельный разъем от блока приемника. Приемник совместно с блоком питания выполнен на одном шасси.

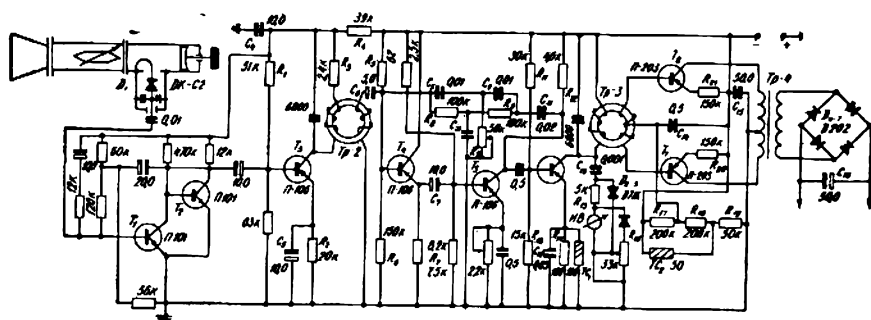


Рис. 4. Принципиальная схема приемника.

Антенна с аттенуатором и детекторная секция изготовлены подобно входным каскадам радиолокационных приемников диапазона 3,2 см (рис. 4). Остальные каскады выполнены на транзисторах, обеспечиваю-

ших необходимый коэффициент усиления. Блок питания имеет электронную стабилизацию напряжения и транзисторный преобразователь низковольтного напряжения в высоковольтное для цепей питания клистрона (рис. 5). В таком виде все устройство портативно и удобно.

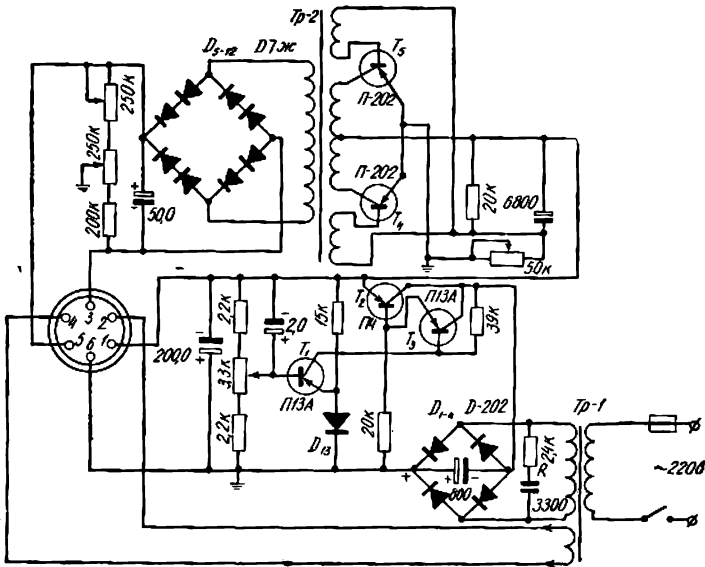


Рис. 5. Принципиальная схема блока питания.

В различных технологических процессах (титановый, магниевый, германиевый) разный гранулометрический состав «твердого» в пульпе. Всякое изменение диаметра частицы «твердого» влечет изменение коэффициента поглощения, что связано с изменением плотности. Для выявления зависимости между антеннами вводится «эталонная» среда, являющаяся контрольной точкой отсчета, так как она соответствует номинальному значению по  $d$  для данного технологического процесса. Введя дополнительно несколько характерных точек по гранулометрическому составу, построим поправочный график, пользуясь которым можно измерить плотность пульпы с точностью до  $\pm 1,5-2\%$  (рис. 1). Такая точность измерения практически не уступает радиоактивному методу и вполне удовлетворяет технологическим требованиям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поглощение можно вычислить как функцию гранулометрического состава пульпы или, что более просто, определить экспериментальным путем. Итак, создается реальная возможность при помощи нескольких способов определить плотность пульпы различных физико-химических составов микрорадиоволновым методом на промышленных объектах с достаточной степенью точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. I. A. Stratton. The effects of Rain and Upon the Propagation of Very Short Radio Waves, Proc. Inst. Elect. Engineers, XVIII, 1064, 1930.
  2. B. E. Kerr. Propagation of Short Waves, New York. Mc Graw—Hill Book Co., 1951.
  3. Распространение ультракоротких радиоволн. М., изд-во «Сов. радио», 1954.
  4. А. Г. Аренберг. Распространение дециметровых и сантиметровых волн, М., изд-во «Сов. радио», 1957.
-