Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. /XX, вып. 1, 1976 г.

РАДИОИЗОТОПНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ГИДРОСМЕСИ[X]

К.Л.КОРБЕЛЬ

Ядерная техника создает особенно подходящие условия для реализации измерительной системы беспрерывного измерения средней плотности жидкости, не нарушающей структуры движения.[XX] В зависимости от параметров трубопровода, а также от типа жидкости такое измерение можно основывать или на явлении рассеяния, или на абсорбции ионизирующего излучения. Для гидравлического транспорта, в котором используются трубопроводы со сравнительно большой толщиной стенок, из радиоизотопных методов можно применять только метод, основанный на абсорбции ионизирующего излучения (см. рисунок).

Узко коллимированный пучок гамма-излучения 4, испускаемый источником 6, который помещен в защитном контейнере 5, проникает через стенки трубопровода I диаметром D в гидросмесь и попадает на детектор 2, измеряющий с помощью интенсиметра 3 интенсивность излучения. Вследствие абсорбции измеряемая интенсивность излучения в материале стенок трубопровода и в струе движущегося потока жидкости ослабляется согласно экспоненциальному закону поглощения, который в условиях полного питания и просвечивания трубопровода в плоскости, перпендикулярной его оси, принимает следующий вид:

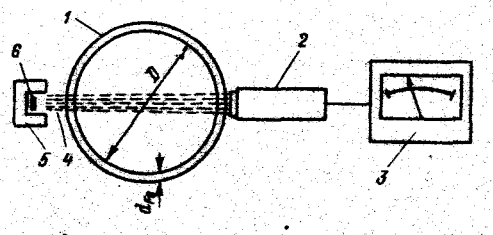
$$J = J_0 \exp\left[-(\mu_т \rho_т x_т + \mu_{ж} \rho_{ж} X_{ж} + 2\mu_{Fe} \rho_{Fe} d_{Fe})\right], \qquad (I)$$

где J и J_0 – интенсивность первичного излучения, регистрируемого детектором в данном объеме соответственно в присутствии и при отсутствии абсорбирующего материала; $\mu_т$, $\mu_{ж}$ и μ_{Fe} – массовый коэффициент поглощения

[X] В сборнике научных работ „Интенсификация процессов гидравлического транспортирования соконасыщенных гидросмесей" (изд. ЛГИ, 1976) эта статья ошибочно приписана К.С.Пжевлоцкому, П.В.Нижегородцеву, В.Н.Покровской.

[XX] В.Г.Сегалин. Применение радиоактивных изотопов для автоматизации в угольной промышленности. М., Госгортехиздат, 1960.

K. Korbel, A. Michalik, P. Nizegorodcew, P r z e w l o s k i. - Report according to the Research Agreement 55 CF for International Atomic Energy Agency. Cracow, 1970.



Структурная схема радиоизотопного измерения

твердого материала, транспортируемой жидкости и стенок трубы; $\rho_т$, $\rho_ж$ и $\rho_{ст}$ – плотность твердого материала, транспортируемой жидкости и стали; $X_т$ и $X_ж$ – эквивалентная толщина слоя твердой фазы и жидкости; d_{Fe} – толщина стенки трубопровода.

При полном питании трубопровода и близким к однородному распределении концентрации твердого материала в потоке жидкости

$$X_т + X_ж = D, \tag{2}$$

где D – внутренний диаметр транспортирующего трубопровода.

Предполагая равенство продольных составляющих скоростей обеих фаз гидросмеси $v_т = v_ж$ и учитывая, что соотношения эквивалентной толщины слоя твердого материала в жидкости в данных условиях определяют одновременно концентрацию гидросмеси, т.е. $X_т / X_ж = C$, уравнение абсорбции можно записать в виде

$$J = J_0 \alpha \exp\left(-\frac{\mu_т \rho_т C + \mu_ж \rho_ж}{C+1} D\right), \tag{3}$$

$$\alpha = \exp\left(-2\,\mu_{Fe}\rho_{Fe} d_{Fe}\right).$$

Дробный член в уравнении (3) представляет произведение эквивалентного массового коэффициента поглощения жидкости

$$\mu_э = \mu_ж + \frac{C_V \rho_т}{\rho_ж + C_V(\rho_т - \rho_ж)}(\mu_т - \mu_ж) \tag{4}$$

и ее средней плотности

$$\rho_{ср} = \rho_ж + C_V(\rho_т - \rho_ж), \tag{5}$$

где C_V – объемная концентрация твердого.

Теоретически возможны различные комбинации значений $\rho_т$, $\rho_ж$, $\mu_т$ и $\mu_ж$ в зависимости от компонентов гидросмеси и рода энергии гамма-излучателя. Для значительного эффекта излучения необходимо, чтобы разности плотности компонентов гидросмеси $\rho_т - \rho_ж$ и их массовых коэффициентов абсорбции $\mu_т - \mu_ж$ имели одинаковый знак (положительный или отрицательный). Тогда увеличение концентрации твердого материала сопровождается однонаправленными изменениями $\mu_э$ и $\rho_{ср}$, что, согласно формуле (4), способствует усилению зависимости J от концентрации твердого C_V.

В гидравлическом транспорте твердой фазой являются различные материалы (табл.I).

Таблица 1

Массовые коэффициенты поглощения гамма-излучения для различных материалов в зависимости от энергии излучения, $см^2/г$

Энергия, мэВ	Вода	Цемент	Песок	Уголь	Железо
0,01	5,100	24,60	18,970	2,130	178,00
0,015	1,530	7,68	5,723	0,701	58,20
0,02	0,722	3,34	2,468	0,382	25,80
0,03	0,336	1,10	0,809	0,229	8,03
0.04	0,245	0,542	0,419	0,193	3,48
0.05	0,212	0,350	0,287	0,178	1,83
0,06	0,196	0,267	0,231	0,169	1,13
0,08	0,178	0,197	0,183	0,157	0,555
0,10	0,167	0,169	0,1607	0,149	0,344
0,15	0,149	0,139	0,1362	0,134	0,183
0,20	0,136	0,124	0,1239	0,122	0,138
0,30	0,118	0,107	0,1070	0,106	0,106
0,40	0,106	0,0954	0,0954	0,0953	0,919
0,50	0,0966	0,0870	0,0869	0,870	0,0828
0,60	0,0896	0,0804	0,0803	0,0805	0,0762
0,80	0,0786	0,0706	0,0707	0,0707	0,0664
1,00	0,0706	0,0635	0,636	0,0636	0,0595
1,50	0,0575	0,0517	0,0518	0,0518	0,0485
2,0	0,0493	0,0445	0,0446	0,0444	0,0424
3,0	0,0396	0,0363	0,0362	0,0356	0,0360
4,0	0,0339	0,0317	0,0315	0,0304	0,0330

В окончательном виде

$$J = J_0 \exp(-\mu_э \rho_{ср} D). \qquad (6)$$

Однако следует отметить, что в общем случае как средняя плотность гидросмеси $\rho_{ср}$, так и эквивалентный массовый коэффициент абсорбции $\mu_э$ являются функциями консистенции гидросмеси C_v. Крутизна кривой

$$S = \left| \frac{\Delta J}{\Delta C} \right| \qquad (7)$$

характеризует абсолютную чувствительность измерения плотности, которая является величиной непостоянной и в значительной степени зависит от измеряемых величин. Математический анализ функции (7) позволяет определить условия для получения максимально возможной чувствительности измерения. В общем случае, когда $\mu_т = \mu_{ж}$, максимум чувствительности соответствует

$$\mu_э \rho_{ср} = \frac{1}{D} - \frac{\mu_т - \mu_{ж}}{\rho_т - \rho_{ж}} \rho_т \rho_{ж}. \qquad (8)$$

Практически обычно применяют источники гамма-излучения, для которых $\mu_э$ принимают независимым от консистенции гидросмеси. Формула (8) в этом случае упрощается:

$$\mu_э \rho_{ср} D = 1, \qquad (9)$$

где

$$\mu_э = \mu_т = \mu_{ж}.$$

Получаемая при измерении форма дискретной информации пропорциональна измеряемой интенсивности гамма-излучения. Функцию дискретно-аналогового преобразователя обычно выполняет интегратор импульсов или простая интегрирующая ячейка. Сигнал напряжения (или тока) на выходе из схемы определяется зависимостью

$$U_{вых} = k \alpha J_0 \exp\left[-\left(\rho_т \mu_т D + 2 \mu_{Fe} \rho_{Fe} d_{Fe}\right)\right], \qquad (10)$$

где k – полный коэффициент трансформации и усиления сигнала.

Уравнение (10) позволяет аналитически определить точность измерения, которая зависит от ошибок, внесенных отдельными составными узлами измерительного устройства, геометрией измерения и специфических особенностей эмиссии излучения.

Ошибку, обусловленную непостоянством J_0 во времени, можно разделить на две: определяемую статистическим характером радиоактивного распада и связанную с постоянным уменьшением активности источника. Последнюю легко определить на основании экспоненциального закона радиоактивного распада

$$J_0(t) = J_0(0) \exp \xi t, \qquad (11)$$

где $J_0(0)$ – интенсивность первичного излучения в начальный период времени.

Показатель ξ является постоянной распада и определяет его скорость. Практически вместо него часто используют период полураспада $T_{1/2}$, т.е. время, после которого половина радиоактивных ядер данного вещества подвергается распаду. Эти показатели связаны зависимостью

$$T_{1/2} = \frac{0{,}693}{\xi}. \qquad (12)$$

Распад происходит в различные отрезки времени, распределение которых носит случайный характер. В результате в пределах довольно коротких интервалов времени наблюдается значительное отклонение от среднего значения частоты эмиссии гамма-квантов и, следовательно, выходного напряжения. Отклонение можно вычислить на основании теории вероятностей. Для данного типа распределения наиболее информативным является среднее стандартное отклонение

$$\sigma = \pm\sqrt{N}, \qquad (13)$$

е N – полное число квантов, зарегистрированных детектором в данный рисд времени.

Между интенсивностью излучения J и числом импульсов счетчика N за емя t существует зависимость

$$N = J\varepsilon t, \qquad (14)$$

е ε – коэффициент эффективности детектора.

Относительная статистическая ошибка, таким образом,

$$\delta(J) = \frac{\sigma(J)}{J} = \frac{\eta}{\sqrt{J\varepsilon t}}. \qquad (15)$$

Эмпирический коэффициент η, введенный в числитель уравнения (15), итывает дискретно-аналоговую конверсию сигнала. В случае применения емы, нормализующей амплитуду импульсов счетчика, этот коэффициент равен инице. Время измерения t в случае беспрерывного измерения интенсивно- и излучения при применении дискретно-аналогового преобразователя опре- ляется временной постоянной RC интегрирующей ячейки.

Погрешности, вызванные другими факторами, определяют так называемые паратурные ошибки. Согласно уравнению (10) к ним следует отнести ошибку счета выходного напряжения $\Delta U_{вых}$, изменение полного коэффициента уси- ния Δk, а также изменение толщины трубы Δd_{Fe}, численно соответствую- е изменению внутреннего диаметра трубопровода ΔD.

Полная ошибка измерения плотности

$$\delta_{полн} = \sqrt{\delta^2_{стат} + \delta^2_{апп}}, \qquad (16)$$

е $\delta_{стат}$ и $\delta_{апп}$ – относительные статистическая и аппаратурная ошибки.

Относительная статистическая ошибка измерения плотности гидросмеси

$$\delta_{стат} = \delta(\mu_э \rho_{ср})_{стат} = \frac{exp\left(-\mu_э \rho_{ср} \frac{D}{2}\right)}{\mu_э \rho_{ср} \sqrt{J_0 \varepsilon t}}. \qquad (17)$$

Аналогично относительная аппаратурная погрешность

$$\delta_{апп} = \delta(\mu_э \rho_{ср})_{апп} = \frac{\Delta J_{апп}\, exp(-\mu_э \rho_{ср} D)}{J_0 \mu_э \rho_{ср} D}, \qquad (18)$$

е $\Delta J_{апп}$ – общая абсолютная ошибка, вызванная аппаратурными погреш- стями.

Уравнения (17) и (18) можно представить как функцию типа $\frac{1}{x} e^x$, имею- о минимум для переменной при $x = 1$. В результате относительная ста- стическая погрешность измерения принимает минимальную величину для ус- вия

$$\mu_э \rho_{ср} D = 2, \qquad (19)$$

а относительная аппаратурная ошибка является наименьшей, если

$$\mu_э \rho_{ср} D = 1, \qquad (20)$$

что, в свою очередь, соответствует условию максимальной чувствительности измерения.

Зависимости (I9) и (20) составляют основной критерий для выбора типа источника излучения. При конкретных условиях, определенных диаметре трубопровода и диапазоне изменения плотности гидросмеси они позволяют по табл.I и 2 вычислить массовые коэффициенты абсорбции $\mu_э$ и подобрать гамма-излучатель, наиболее удовлетворяющий этим условиям.

Таблица 2

Характеристики радиоактивных источников, получивших применение в измерительных приборах

Радиоактивный изотоп	Массовое число	Тип излучения	Энергия излучения, мэВ	Период полураспада, годы	Сопутствующее излучение и его энергия, мэВ
$38^{Sr} + 39^{Y}$	90	β	2,2	20	Нет
81^{Tl}	204	β	0,77	4	Нет
61^{Pm}	147	β	0,22	2,6	Нет
27^{Co}	60	γ	1,17 и 1,33	5,3	β (0,31)
55^{Cs}	137	γ	0,66	33	β (0,67)

Степень требуемой точности измерения и необходимая скорость отсчета измерительного устройства определяют значение интенсивности первичного излучения J_0 по отношению к активности источника. Как видно из зависимостей (I7) и (I8), относительная статистическая ошибка меньше зависит от J_0, чем относительная аппаратурная. Это позволяет с учетом допустимой статистической ошибки определить необходимую активность источника

$$A = \frac{3{,}4 \cdot 10^{-7} L^2 \eta^2 \exp\left[-(\mu_э \rho_{ср} D + 2\mu_{Fe}\rho_{Fe} d_{Fe})\right]}{f n (\mu_э \rho_{ср} D)^2 \delta (\mu_э \rho_{ср})^2 \varepsilon t}, \qquad (2I)$$

где L – расстояние между источником и детектором, см; f – активная поверхность детектора, $см^2$; n – число гамма-квантов, эмиттированных в одном акте распада.

Относительные статистическая и аппаратурная ошибки достаточно удовлетворительно определяют погрешность измерения плотности однородных жидкостей. При измерении резко неоднородных двухфазных жидкостей (к ним относится большинство гидросмесей), когда каждая фаза потока движется по трубопроводу с различной средней скоростью, определение погрешностей становится более сложным.

Скольжение твердой частицы относительно транспортирующей ее жидкости происходит вследствие воздействия многих сил, обусловленных взаимодействием твердых частиц между собой, с несущей жидкостью и со стенками трубопровода. В результате этого относительная скорость движения твердого материала в жидкости является функцией многих параметров, важнейшие из которых абсолютная скорость движения несущей жидкости, ее вязкость и плотность; поперечное сечение трубы и ее шероховатость; крупность частиц транспортируемого материала, его плотность и концентрация в потоке жидкости. Если гидросмесь многофракционная, то скольжение твердой фазы зависит также от гранулометрического состава транспортируемого материала.

Различие скоростей движения обеих фаз гидросмеси создает необходимость определять два вида плотностей: так называемой истинной плотности, измеренной приборами, и плотности, определенной на выходе из трубопровода объемным способом, называемой расходной плотностью.

Средняя плотность двухфазной жидкости

$$\rho_{ср} = \frac{\rho_т V_т + \rho_{жс} V_{жс}}{V_т + V_{жс}} \qquad (22)$$

или, выражая объемы твердого $V_т$ и жидкого $V_{жс}$ как произведение соответствующих скоростей движения $v_т$ и $v_{жс}$ и частичных сечений трубопровода $F_т$ и $F_{жс}$,

$$\rho_{ср} = \frac{\rho_т v_т F_т + \rho_{жс} v_{жс} F_{жс}}{v_т F_т + v_{жс} F_{жс}}. \qquad (23)$$

В более общем случае, при транспортировании многофракционного материала, следует принимать во внимание влияние отдельных фракций, движущихся с различными продольными скоростями. Обозначив K_i процентную долю i-й фракции и $v_{тi}$ их осредненную скорость, можно уравнение (23) преобразовать:

$$\rho_{ср} = \frac{\rho_т F_т \Sigma K_i v_{тi} + \rho_{жс} v_{жс} F_{жс}}{F_т \Sigma K_i v_{тi} + F_{жс} v_{жс}}. \qquad (24)$$

Средняя плотность гидросмеси, определенная при помощи формулы (24), соответствует расходной плотности.

Радиоизотопные плотномеры, как и другие измерительные устройства, не требующие отбора проб, нечувствительны к особенностям движения измеряемой гидросмеси и отдельных ее компонентов. Измерительный прибор дает информацию о плотности смеси, находящейся на пути пучка излучения в определенном участке сечения трубопровода. Эта плотность действительно существует в измерительной зоне, определить ее можно прямо из уравнения (24), полагая $v_т = v_{жс}$. В таком случае отношение частичных сечений потока $F_т/F_{жс}$ является равным отношению частичных объемов, занятых обеими фазами жидкости $V_т/V_{жс}$, которые представляют действительную величину консистенции гидросмеси C. Истинная и расходная плотности гидросмеси

$$\rho_{ист} = \frac{(C\rho_т + \rho_{жс})}{C+1}; \qquad (25)$$

$$\rho_{расх} = \frac{c\rho_т \Sigma K_i V_{тi} + \rho_{ж} V_{ж}}{c \Sigma K_i V_{тi} + V_{ж}}, \qquad (26)$$

где $V_{тi}$ – объем твердого i-й фракции.

Для практических целей более пригодна расходная плотность, которая связана с истинной зависимостью

$$\rho_{расх} = \frac{\rho_{ист}(\Sigma K_i a_i \rho_т - \rho_{ж}) + \rho_т \rho_{ж}(1 - \Sigma K_i a_i)}{\rho_{ист}(\Sigma K_i a_i + 1) + \rho_т - \Sigma K_i a_i \rho_{ж}}, \qquad (27)$$

$$a_i = \frac{V_{тi}}{V_{ж}}.$$

При использовании показаний радиоизотопного плотномера, отградуированного в статических условиях, необходимо учитывать кроме рассмотренных ошибок так называемую кинематическую ошибку, определяемую различием расходной и истинной плотности,

$$\delta\rho_{ср} = \frac{\rho_{расх} - \rho_{ист}}{\rho_{расх}}. \qquad (28)$$

Относительная кинематическая погрешность измерения расходной плотности является функцией измеряемой величины, т.е. истинной плотности гидросмеси:

$$\delta(\rho_{ср})_{кин} = \frac{(\Sigma K_i a_i - 1)\left[\rho_т \rho_{ист} - \rho_т \rho_{ж} + \rho_{ист}\rho_{ж} - \rho^2_{ист}\right]}{\Sigma K_i a_i \rho_т (\rho_{ист} - \rho_{ж}) + \rho_{ж}(\rho_т - \rho_{ист})}. \qquad (29)$$

В особых случаях, когда гранулометрический состав твердого материала постоянен и изменения условий движения весьма малы, можно принять, что $\Sigma K_i a_i = const$. В таком случае можно градуировать шкалу измерителя плотности в значениях расходной плотности.