

УДК 621.926:34.16

## ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПУЛЬПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ НА БАЗЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ВОЛН ЛЭМБА

Моркун Владимир Станиславович<sup>1</sup>,  
morkunv@gmail.com

Моркун Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
nmorkun@gmail.com

Тронь Виталий Валериевич<sup>1</sup>,  
vtron@ukr.net

Грищенко Светлана Николаевна<sup>1</sup>,  
s-grischenko@ukr.net

Бровко Дмитрий Викторович<sup>2</sup>,  
brovko@i.ua

Паранюк Дмитрий Игоревич<sup>3</sup>,  
paranyuk@i.ua

Сердюк Александра Юрьевна<sup>1</sup>,  
o.serdiuk@i.ua

<sup>1</sup> Криворожский национальный университет,  
Украина, 50027, г. Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11.

<sup>2</sup> Академия горных наук Украины,  
Украина, 50002, г. Кривой Рог, ул. Пушкина, 37.

<sup>3</sup> ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»,  
Украина, 50000, г. Кривой Рог, ул. Криворожстали, 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью повышения точности средств ультразвукового оперативного контроля характеристик твердой фазы железорудной пульпы в процессе обогащения. Данное направление совершенствования средств контроля позволит повысить эффективность управления процессом обогащения и качество конечной продукции.

**Цель:** повышение точности измерений плотности частиц твердой фазы пульпы на основе закономерностей распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения.

**Объекты:** процессы распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами.

**Методы:** систематизация и анализ разработанных методов ультразвукового контроля характеристик твердой фазы гетерогенных неоднородных сред, методы математической статистики и теории вероятностей для обработки результатов экспериментов, компьютерные информационные и программные технологии для реализации разработанных подходов.

**Результаты.** Выявленные закономерности распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения позволяют определить плотность частиц твердой фазы, которая при известной их крупности и концентрации в контролируемом объеме характеризует степень раскрытия полезного компонента (минерала). Разработана схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензий на основе полученных закономерностей. Погрешность измерений плотности частиц твердой фазы пульпы составляет 1–3 %.

### Ключевые слова:

Обогащение руды, волн Лэмба, гамма-излучение, неразрушающий контроль, характеристики пульпы.

### Введение

Для контроля характеристик рудного материала в технологических потоках линии обогащения разработан ряд методов и способов. Среди существующих подходов достаточно широкое применение нашли методы, основанные на применении ультразвуковых волн [1–9]. Преимуществом данного подхода является относительно большая кон-

центрация энергии в волне вследствие малой величины слоя ее локализации, а также возможность получения ультразвукового сигнала из любой точки среды распространения [2].

Из известных типов ультразвуковых волн наиболее изученными являются волны Релея [1–3], распространяющиеся вдоль границы твердого пространства. Волны данного типа обладают наиболь-

шей концентрацией энергии, однако существенно зависят от состояния поверхности распространения. Аналогичны по своей природе волны Лява [4, 5]. Этот тип волн отличается сильной зависимостью от состояния неоднородности поверхностного слоя, что делает весьма нестабильными измерительные поверхности, по которым они распространяются. К основным типам ультразвуковых волн относят волны Стоунли [1]. Волны Стоунли распространяются как в жидком, так и твердом полупространствах. Поэтому их составляющая, распространяющаяся в жидком полупространстве, подвержена воздействию тех же возмущающих факторов, что и обычные объемные ультразвуковые колебания.

Поскольку стенки технологических емкостей, как правило, изготавливаются из листового металла, при реализации ультразвукового контроля параметров контактирующих с ними сред целесообразно использовать волны Лэмба [1, 6–9]. Данный тип волн характеризуется значительной концентрацией энергии, и в меньшей степени они подвержены воздействию возмущающих факторов. Вместе с тем при разработке методов и средств контроля параметров газосодержащих суспензий важной задачей является определение степени влияния параметров исследуемой среды на величину затухания волн Лэмба.

В значительном количестве случаев при разработке методов ультразвукового контроля характеристик технологических сред используют ультразвуковые волны Рэлея, Лява и Стоунли. Однако использование данных типов волн усложняется необходимостью выполнения ряда существенных ограничений. В частности, ограничения связаны с состоянием поверхности распространения волн и наличием газовых пузырьков в исследуемой среде. Применение волн Лэмба позволяет устранить указанные недостатки. При этом для расширения спектра контролируемых параметров перспективным и актуальным направлением исследования является комбинирование ультразвуковых методов контроля с радиометрическими.

#### **Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Результаты исследования оптимизации процесса обогащения железной руды, изложенные в работах [10–12], позволили сделать вывод о том, что показатели эффективности управления процессами обогащения рудного сырья существенно зависят от точности оперативной информации о параметрах технологических процессов.

В работе [13] представлены результаты исследований диссипации акустических колебаний в жидкостях в условиях наличия газовых пузырьков. Полученная модель позволяет прогнозировать параметры нелинейного затухания ультразвуковых волн. Следует отметить, что прогнозируемые значения демпфирования намного выше значений, оцененных аналогичными моделями.

Результаты исследований закономерностей распространения ультразвуковых колебаний в жидкости в условиях кавитационного режима представлены в работе [14]. С использованием численных методов определена рассеиваемая газовыми пузырьками энергия. В результате получена прямая зависимость между энергией, которую теряют пузырьки, и величиной затухания ультразвуковых волн, следствием чего является формирование бегущих волн. На основе представленных выше результатов в [15] осуществлен расчет силы Бьеркнеса и выполнено прогнозирование формируемых вследствие воздействия бегущих волн структуры пузырьков газа.

Исследования нелинейных процессов распространения ультразвуковых колебаний в воде при неоднородном распределении газовых пузырьков представлены в работе [16]. С помощью дифференциальных уравнений, которые описывают связь акустического поля и вибрации пузырьков, выполнен синтез математической модели. Сделано предположение о том, что затухание и нелинейные эффекты обусловлены исключительно наличием пузырьков. Следует отметить, что неоднородность распределения пузырьков представлена в виде скопления пузырьков газа, которые могут действовать как акустические экраны и влияют на поведение ультразвуковых волн.

В работе [17] для описания процесса распространения ультразвука в пузырьковых жидкостях использован численный подход. Полученная модель основана на методах конечного объема и конечных разностей. Данный подход позволяет решить дифференциальную систему, образованную волновым уравнением и уравнение Рэлея–Плессета, которая связывает поле звукового давления с колебаниями пузырьков газа. Результаты данного исследования позволяют наблюдать ряд физических эффектов, вызванных наличием газовых пузырьков в жидкости: дисперсия, затухание, нелинейность.

В работе [18] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распространения ультразвуковых колебаний в жидкостях при наличии газовых пузырьков. Рассмотренный подход к моделированию процесса распространения ультразвука предполагает неравномерный характер поля давления вне пузырьков. Количественная оценка нестабильности пузырьков оценена с применением аналитических методов.

В работе [19] как средство неразрушающего контроля использованы многомодовые волны Лэмба. На основе измерения характеристик различных мод в экспериментальных кривых дисперсии волн Лэмба и сопоставления их с теоретическими кривыми получены оценки ряда физических параметров исследуемой среды. Следует отметить, что кривые дисперсии волн Лэмба зависят только от параметров пластины, частоту и фазовую скорость можно нормировать относительно скорости сдвиговой волны и толщины слоя исследуемой среды.

В работе [20] также отмечено, что волны Лэмба являются наиболее широко используемыми ультразвуковыми волнами для контроля различных сред. Однако теоретический анализ распространения управляемой волны представляет собой сложную задачу. Рассмотрен метод моделирования локального взаимодействия при распространении волн в металлических структурах. Следует отметить, что использование предложенного метода усложняется сосуществованием, по крайней мере, двух высокодисперсионных мод на любой заданной частоте.

Преимущество волн Лэмба в сфере неразрушающего контроля, как отмечено в работе [21], среди множества ультразвуковых волн заключается в том, что они могут проверять большую площадь с минимальным количеством приемников. Поскольку волны Лэмба являются диспергирующими, рекомендуется использовать синусоидальный сигнал эмиссии. Моделирование волн Лэмба было выполнено с использованием программного обеспечения АТЛА.

Метод контроля параметров жидких сред с применением ультразвуковых волн Лэмба представлен в работе [22]. Показано, что изменение характеристик волн может быть использовано как функция, зависящая от уровня жидкости. Отмечается, что для определения оптимальных условий измерения параметров жидкой среды с использованием волн Лэмба необходимо провести дополнительные исследования.

Метод моделирования распространения ультразвуковых волн в условиях неоднородных гетерогенных сред рассмотрен в работах [23, 24]. Для формирования управляемых ультразвуковых волн при контроле характеристик рудной пульпы предложено использовать фазированные решетки. Развитие данного подхода и использование полученных результатов измерений для формирования оптимального управления обогатительными процессами представлено в работах [25–28].

Для исследования вещества с целью получения его элементного состава предложен спектроскопический метод, основанный на определении и последующем анализе спектра, возникающего при облучении исследуемого материала рентгеновским излучением. Применение данного метода к анализу состава железных руд представлено в работах [29, 30]. Приведенные результаты показали возможность измерения содержания железа в пробах сухой руды в диапазоне от 28 до 70 абс. %. Однако применение данного метода для оперативного контроля характеристик рудного материала по всей протяженности линии обогащения усложняется необходимостью выполнения специальной подготовки проб руды и значительным временем измерений. Например, рентгенофлуоресцентный анализатор последовательно-параллельного типа Axi-os-Minerals с набором синтетических стандартов WROXI (Wide Range Oxides) [31] позволяет анализировать пробы, состоящие из частиц, меньших,

чем измеряемые длины волн, имеющие ровную поверхность и определенную толщину. При этом длительность измерения содержания  $Fe_2O_3$  составляет 16 с. Описанный метод не позволяет оценить распределение анализируемого компонента по гранулометрической характеристике измельченной руды.

Для практической реализации этого метода контроля в работе необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением параметров источника излучения. К таким параметрам относят следующие: энергия источника излучения, размеры коллиматоров источника и детектора излучения, оценку влияния рассеянного излучения фона, выбор режима работы детектора и др. Выбор энергии источника излучения целесообразно основывать на количественных критериях, связанных с определением диапазона изменения сигнала, обусловленного возможными вариациями плотности и состава твердой фазы пульпы, а также чувствительности метода к таким изменениям. В работе [32] получены зависимости линейного коэффициента поглощения гамма-квантов от содержания железа при различных значениях энергии излучения, которые определяют конструктивные особенности радиометрического измерительного канала.

Выполненный анализ литературных источников показал, что в большинстве случаев при разработке методов неразрушающего контроля характеристик неоднородных гетерогенных сред используются ультразвуковые и радиометрические методы. Наиболее часто для этих целей используются поверхностные ультразвуковые волны Лява, Стоунли, Рэлея и Лэмба. Выбор конкретного типа волн для решения поставленных задач требует учета ряда строгих требований и ограничений, налагаемых как на характеристики поверхности распространения, так и на свойства контролируемой среды. Для определения характеристик газосодержащих суспензий перспективным является использование волн Лэмба. Вместе с тем измерение характеристик частиц измельченной руды различных минералого-технологических разновидностей в технологических потоках рудообогатительной фабрики целесообразно осуществлять с применением радиометрических методов.

#### Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение точности измерений плотности частиц твердой фазы пульпы на основе закономерностей распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по поверхностям, контактирующим с этими средами, в процессе их естественного и специально организованного перемещения.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

- установить закономерности распространения гамма-излучения в случайно неоднородных гетерогенных средах, а также волн Лэмба по по-

верхностям, контактирующим с этими средами;

- разработать схему и выполнить расчет параметров основных компонентов устройства контроля плотности твердой фазы суспензии с использованием радиометрического измерительного канала.

### Материалы и методы исследования

Одним из важнейших параметров, оказывающих определяющее влияние на качественно-количественные показатели разделительных обогатительных технологий, является степень раскрытия минералов на каждом этапе технологического процесса.

На рис. 1 в качестве примера приведена зависимость результатов разделения рудных частиц от их размера, рассчитанная по методу П.В. Лященко [33, 34], для магнетитовой пульпы, содержащей смесь минеральных зерен и их сростков, условно разделенных на четыре категории: зерна чистого магнетита (1) – 72 % Fe; богатые сростки (2) – 52,6 % Fe; сростки (3) – 33,1 % и бедные сростки (4) – 13,4 % Fe. Каждая из этих категорий разбита на десять классов по крупности  $r$  от 10 до 100 мкм.

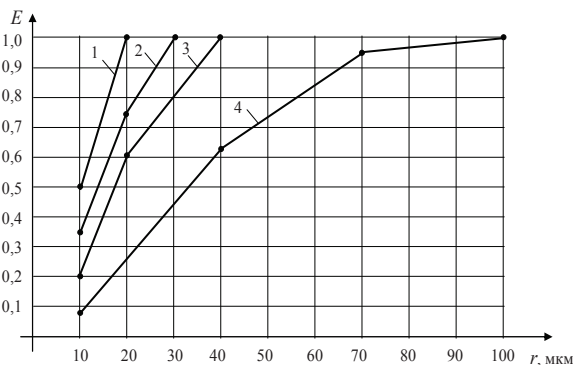


Рис. 1. Зависимость результатов разделения рудных частиц от их размера: 1 – зерна чистого магнетита; 2 – богатые сростки; 3 – сростки; 4 – бедные сростки

Fig. 1. Dependence of separation results on particle size: 1 are the pure magnetite grains; 2 are the rich splices; 3 are the splices; 4 are the poor splices

Из приведенных зависимостей видно, что разделительная способность обогатительного аппарата напрямую зависит от степени раскрытия минералов, что и определяет задачу оперативной оценки этого параметра. Эта задача осложняется тем фактом, что в реальных условиях на обогатительную фабрику поступает руда нескольких минеральных разновидностей. Без решения этой задачи невозможно эффективное управление технологическим процессом обогащения руды. Перспективным направлением при разработке средств оперативного контроля характеристик измельченной руды в пульпе являются ультразвуковые методы.

Степень раскрытия минералов (полезного компонента) тесно связана с плотностью частиц измельченного материала определенного класса

крупности, т. е. контроль степени раскрытия минералов может быть осуществлен путем измерения плотности частиц известного размера.

Рассмотрим способ оценки плотности частиц твердой фазы пульпы, основанный на использовании измерительных каналов на базе гамма-излучения и ультразвуковых поверхностных волн Лэмба.

На рис. 1 приведена схема, поясняющая конструкцию канала на базе гамма-излучения.

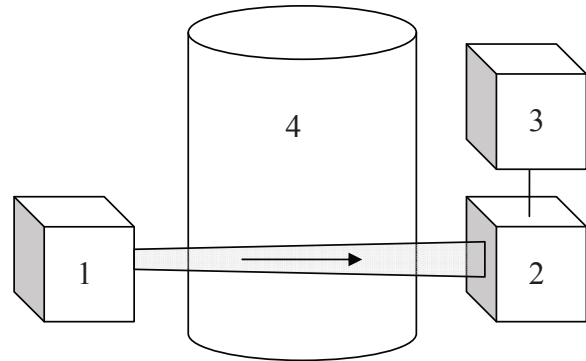


Рис. 2. Блок-схема измерительного канала на базе гамма-излучения: 1 – источник гамма-излучения; 2 – детектор гамма-излучения (ионизационная камера); 3 – логарифмический усилитель тока; 4 – измерительный модуль (пульпопровод)

Fig. 2. Block diagram of the measuring channel based on gamma radiation: 1 is the source of gamma radiation; 2 is the gamma-ray detector (ionization chamber); 3 is the logarithmic current amplifier; 4 is the measuring module (slurry line)

Введем обозначения:  $I$  – интенсивность гамма-излучения за измерительным модулем;  $I_0$  – интенсивность гамма-излучения в отсутствие пульпы (жидкости) в измерительном модуле (пульпопроводе).

Коэффициент ослабления гамма-излучения пульпой можно представить в виде следующего выражения

$$\mu = (1 - W)\rho_t\mu_t + W\rho_b\mu_b,$$

где  $\mu_b$  и  $\mu_t$  – массовые коэффициенты ослабления воды и твердого компонента пульпы;  $\rho_b$  и  $\rho_t$  – плотность воды и твердых частиц пульпы;  $W$  – объемная доля твердых частиц в пульпе.

Если источник излучения коллимирован, то детектор – 2 будет в основном регистрировать нерассеянное излучение, интенсивность которого можно представить в виде

$$I = I_0 \exp\{-(1 - W)\rho_t\mu_t + W\rho_b\mu_b\}l, \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность гамма-излучения при отсутствии пульпы (жидкости) в измерительном модуле (пульпопроводе).

Если в измерительном модуле находится чистая вода, тогда интенсивность гамма-излучения будет определяться по формуле

$$I^* = I_0 \exp\{-\rho_b\mu_b l\}. \quad (2)$$

Как видно из формул (1) и (2), интенсивность излучения можно представить в виде



$$I = I^* \exp\{-W[\rho_T \mu_T - \rho_B \mu_B]l\}. \quad (3)$$

Величина тока детектора гамма-излучения пропорциональна интенсивности излучения, поэтому величина сигнала  $S$  на выходе логарифмического усилителя будет пропорциональна  $\ln I$ . Из формулы (3) видно, что разность сигналов  $S$  и  $S^*$  ( $S^*$  – сигнал по чистой воде) будет определяться по формуле

$$S_\gamma = S^* - S = \ln(I^*/I) = AW[\rho_T \mu_T - \rho_B \mu_B]l,$$

где  $A$  – коэффициент пропорциональности.

Как показано в [35], такая разность сигналов, полученных на основании измерений величины затухания волн Лэмба дает величину, которая также пропорциональна объемной доле  $W$ , т. е.

$$S_L = BW[\rho_T - \rho_B]Z.$$

Найдем отношение сигналов  $S_L$  и  $S_\gamma$

$$S = \frac{S_L}{S_\gamma} = \frac{BZ(\rho_T - \rho_B)}{Al(\rho_T \mu_T - \rho_B \mu_B)}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4), полученный таким образом сигнал будет зависеть только от средней плотности твердого  $\rho_T$ .

Для практической реализации этого способа контроля необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением энергии источника излучения, размеров коллиматоров источника и детектора излучения, оценкой влияния рассеянного излучения фона, выбором режима работы детектора и т. д. Выбор энергии источника излучения должен быть основан на количественных критериях, связанных с определением диапазона изменения сигнала, обусловленного возможными вариациями плотности и состава твердой фазы пульпы, а также чувствительности метода к таким изменениям.

Для анализа указанного вопроса рассмотрим двухкомпонентный состав твердой фазы пульпы, состоящей, например, из  $\eta$ -й доли магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и  $(1-\eta)$ -й доли окиси кремния ( $\text{SiO}_2$ ). В этом случае плотности твердой фазы пульпы находится по формуле

$$\rho_T = \rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta),$$

а формируемый сигнал  $S$  определяется выражением

$$S = A \frac{[\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)][\eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2] - \rho_{\%} \mu_{\%}}{\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta) - \rho_{\%}}. \quad (5)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – массовые коэффициенты ослабления  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{SiO}_2$  соответственно.

Критерием чувствительности метода может

служить величина  $\frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial \rho_T} \right|$ , показывающая отно-

сительное изменение сигнала при единичном изменении плотности твердого, которая для случая (9) вычисляется по формуле

$$\frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial \rho_T} \right| = \frac{\left( [\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)][\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta) - \rho_a] \times \right. \\ \left. \times (\mu_1 - \mu_2) + (\rho_1 - \rho_2) \rho_a \right) \times \\ \left( (\rho_1 - \rho_2) \times \right. \\ \left. \times \{ [\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)][\eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2] - \rho_B \mu_B \} \right) \\ \times \frac{[\mu_{\%} - \eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2]}{[\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta) - \rho_{\%}]}. \quad (6)$$

Рассчитанные по формулам (5) и (6) зависимости сигнала  $S$  и величины  $\frac{1}{S} \left| \frac{\partial S}{\partial \rho_T} \right|$  от объемной до-

ли магнетита в твердом  $\eta$  для различных энергий источника излучения приведены на рис. 3, 4. Из рис. 3 видно, что с уменьшением энергии источника излучения увеличивается диапазон изменения сигнала  $S$ , а также повышается чувствительность метода. Если диапазон изменения сигнала существенно изменяется с уменьшением энергии гамма-квантов, то чувствительность метода не столь заметно реагирует на изменение энергии фотонов. Тем не менее энергию фотонов нежелательно выбирать более 80–100 кэВ из-за сокращения диапазона изменения сигнала  $S$ , а при энергии фотонов  $E \geq 275$  кэВ применение этого метода невозможно, так как зависимость  $S$  от плотности твердого становится неоднозначной.

$S$ , отн. ед.

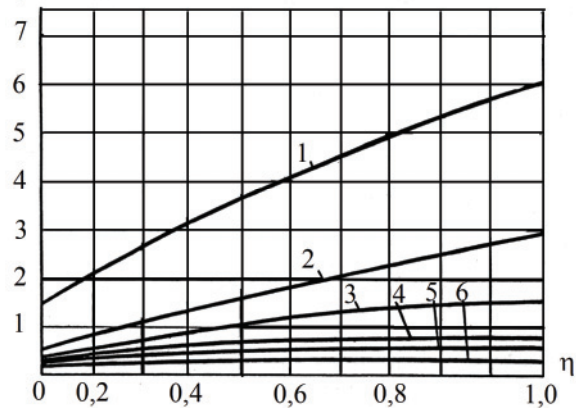


Рис. 3. Зависимость формируемого сигнала  $S$  от соотношения компонент твердого  $\eta$  для различных энергий источника излучения: 1 –  $E=30$  кэВ; 2 –  $E=40$  кэВ; 3 –  $E=50$  кэВ; 4 –  $E=60$  кэВ; 5 –  $E=70$  кэВ; 6 –  $E=80$  кэВ

Fig. 3. Dependence of the generated signal  $S$  on the ratio of the components of solid  $\eta$  for different energies of the radiation source: 1 –  $E=30$  keV; 2 –  $E=40$  keV; 3 –  $E=50$  keV; 4 –  $E=60$  keV; 5 –  $E=70$  keV; 6 –  $E=80$  keV

Из известных изотопов, энергия излучения которых лежит в указанном диапазоне, наиболее подходящим является источник изотопа  $^{241}_{95}\text{Am}$ ,

имеющий пиковое значение энергии 60 кэВ. Другим возможным источником может служить  $^{170}\text{Ti}$  с энергией фотонов 84 кэВ, однако данный изотоп имеет небольшой период полураспада – 129 дней, что недостаточно для эксплуатации в промышленных условиях.

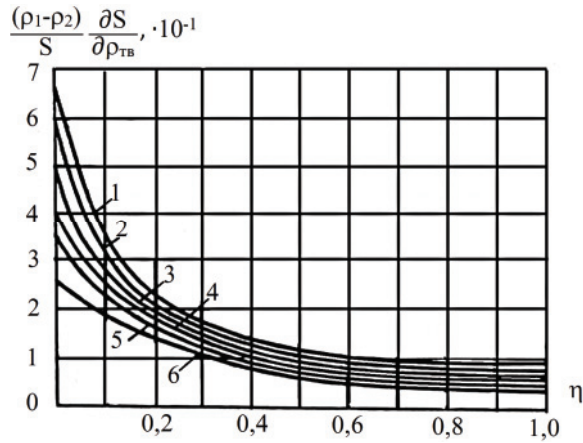


Рис. 4. Зависимость функции чувствительности от долевого содержания компонент твердой фазы при различных энергиях  $\gamma$ -излучения: 1 –  $E=30$  кэВ; 2 –  $E=40$  кэВ; 3 –  $E=50$  кэВ; 4 –  $E=60$  кэВ; 5 –  $E=70$  кэВ; 6 –  $E=80$  кэВ

Fig. 4. Dependence of sensitivity function on fractional content of the components of the solid phase at different  $\gamma$ -radiation energies: 1 –  $E=30$  keV; 2 –  $E=40$  keV; 3 –  $E=50$  keV; 4 –  $E=60$  keV; 5 –  $E=70$  keV; 6 –  $E=80$  keV

Измерительный модуль представляет собой цилиндрическую трубу и должен быть изготовлен из материала с малым атомным номером, например из полимерных материалов, таких как полиуретан и т. п. Такой выбор материала обусловлен тем, чтобы поглощение фотонов в стенках измерительного модуля было невелико.

При определении размеров модуля (диаметр трубы) нужно исходить из того, чтобы ослабление излучения при переходе от воды к пульпе, с предельно допустимым содержанием твердого, не превышало 10-кратной величины. Это соответствовало бы ослаблению сигнала радиометрического канала не более 20 дБ. В этом случае расчет линейных размеров измерительного модуля должен осуществляться по формуле

$$D = \frac{\ln 10}{W \{ [\rho_1 \eta + \rho_2 (1 - \eta)] [\eta \mu_1 + (1 - \eta) \mu_2] - \rho_{\%} \mu_{\%} \}}, \quad (7)$$

где  $W$  – объемная доля твердого в пульпе.

В соответствии с расчетами, выполненными по формуле (7), средний размер диаметра трубы измерительного модуля был выбран равным 70 мм. Последующие расчеты производились для измерительного модуля этого размера.

Для отсека рассеянного излучения, возникающего в основном за счет комптоновского взаимодействия фотонов в контролируемом объеме, используют коллиматоры и детектор излучения. Размеры коллиматоров, с одной стороны, определяются по влиянию рассеянного излу-

чения фона, с другой стороны – по эффективности регистрации излучения. Оба фактора по-разному сказываются на выборе размера коллиматоров

### Результаты исследования

Увеличение диаметров цилиндрических коллиматоров повышает эффективность регистрации излучения, но сокращает время экспозиции, при этом увеличивается влияние рассеянного излучения.

На рис. 5 изображена геометрия коллиматоров, источника и измерительного модуля. Определение размеров коллиматоров сводится к определению толщины  $L$  и диаметра отверстия коллиматора  $D$  (рис. 5). Выбор этих величин осуществляется в два этапа. На первом этапе расчеты по выявлению роли рассеянного излучения проводились при заполнении измерительного модуля водой, так как при таком заполнении формируется опорный сигнал, который используется в дальнейшем при определении плотности твердого. Поэтому точность определения этого сигнала может существенно образом сказываться на дальнейших измерениях.

На втором этапе расчеты проводились для исследуемой среды, находящейся в измерительном модуле, соответствующей пульпе с различным объемным содержанием твердого и различным составом твердого материала.

В качестве критерия влияния роли рассеянного излучения выбирался дозовый фактор накопления  $B_D$ , который определяется по формуле

$$B_D = \frac{D_0 + D_s}{D_0} = 1 + \frac{D_s}{D_0}, \quad (8)$$

где  $D_0$  и  $D_s$  – мощность экспозиционной дозы нерассеянного и рассеянного излучений.

Из формулы (8) видно, что величина  $B_D - 1$  определяет долю рассеянного по отношению к нерассеянному излучению, зарегистрированному детектором.

Расчеты по определению величины  $B_D$  осуществлялись методом Монте-Карло. Этот метод основан на определении характеристик полей излучения или показаний детекторов в поле излучения путем статистического моделирования процесса переноса излучений. Основной характеристикой поля излучения является дифференциальная по углам и энергиям плотность потока частиц  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ , которая находится из решения кинетического уравнения Больцмана, имеющего в интегральном представлении вид [36]

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) = & \int d\vec{r}' \int d\vec{\Omega}' \int dE' \frac{\exp(-\tau(\vec{r}', \vec{r}, E))}{|\vec{r} - \vec{r}'|^2} \times \\ & \times \sum_s (\vec{r}', \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E \rightarrow E) \times \\ & \times \Phi(\vec{r}', \vec{\Omega}', E') \delta\left(\vec{\Omega} - \frac{\vec{r} - \vec{r}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Показание детектора с функцией чувствительности  $D(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$  в поле излучения, описываемое функцией  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E)$ , определяется функционалом

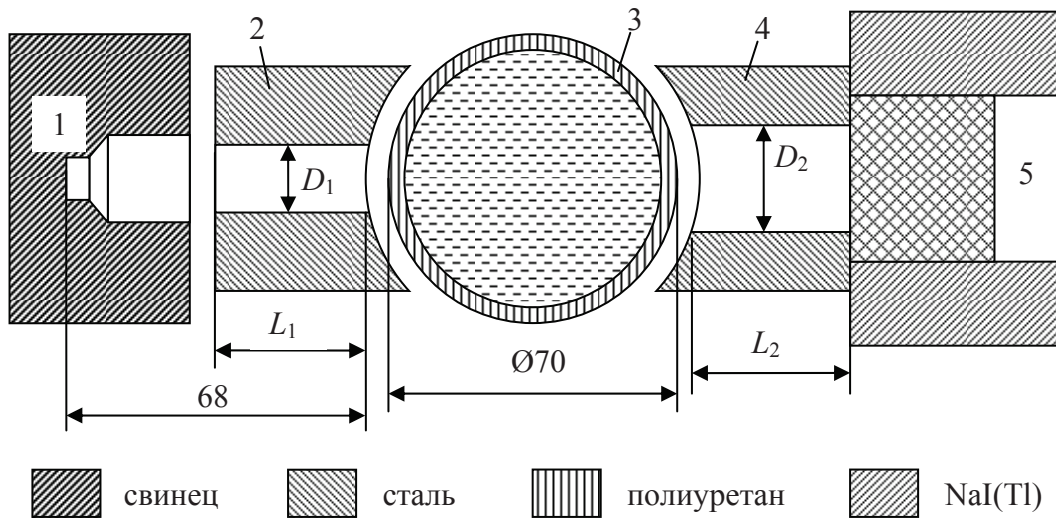


Рис. 5. Зависимость геометрии измерительного тракта радиометрического канала: 1 – источник; 2 – коллиматор источника; 3 – измерительный модуль; 4 – коллиматор детектора; 5 – сцинтиляционный детектор

Fig. 5. Dependence of measuring channel geometry in the radiometric channel: 1 is the source; 2 is the source collimator; 3 is the measuring module; 4 is the detector collimator; 5 is the scintillation detector

$$I = \int d\vec{r} \int d\Omega \int dE \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) D(\vec{r}, \vec{\Omega}, E). \quad (10)$$

Таким образом, задачи, связанные с распространением излучения в веществе, сводятся к оценке функционала (10) от решения уравнения переноса (9).

Способ расчета функционала (10) методом Монте-Карло заключается в вычислении на марковской цепи случайной величины  $\xi$ , математическое ожидание (среднее значение) которой равно искомому функционалу, т. е.

$$M\xi = I = \int d\vec{r} \int d\Omega \int dE \Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) D(\vec{r}, \vec{\Omega}, E).$$

Для вычисления случайной величины  $\xi$  строится Марковская цепь  $x_0, x_1, \dots, x_v$  с начальной плотностью распределения  $\pi(x_0)$  и переходной плотностью  $P(x, x')$ .

На этой цепи оценивается случайная величина  $\xi$

$$\xi = \sum_{i=0}^v q_i D(x_i),$$

где  $v$  – случайный номер обрыва Марковской цепи;  $q_i$  – веса, определяемые по формулам

$$q_i = \omega(x_i, x_{i+1}) q_{i-1};$$

$$\omega(x_i, x_{i+1}) = \frac{K(x_i, x_{i+1})}{P(x_i, x_{i+1})}; \quad q_0 = \frac{S(x_0)}{\pi(x_0)},$$

где  $S(x)$  – функция плотности источников излучения;  $K(x_i, x_{i+1})$  – ядро интегрального уравнения (9);  $P(x_i, x_{i+1})$  – функция плотности перехода, с помощью которой моделируется Марковская цепь.

Для повышения эффективности расчета методом Монте-Карло использовались неаналоговые методы моделирования с применением локальной оценки [36].

Как уже отмечалось, на первом этапе расчеты проводились по чистой воде в измерительном модуле. Изменениям подвергался диаметр коллиматоров источника  $D_1$ , а также диаметр и толщина коллиматора детектора  $D_2$  и  $L_2$ . В таблице приведены значения факторов накопления для вариантов с различными геометрическими размерами указанных величин.

Таблица. Значения факторов накопления

Table. Values of accumulation factors

Номер варианта Variant number	$D_1$	$D_2$	$L_2$	$B_D$
	мм (mm)			
1	4,2	10	40	1,0007
2	8,5	20	40	1,0032
3	7,0	20	80	1,0011
4	3,5	10	80	1,0003

Как видно из таблицы, для любого из вариантов доля рассеянного излучения фона при формировании опорного сигнала не превышает 0,5 %, поэтому выбор геометрических размеров коллиматоров можно осуществлять по эффективности регистрации излучения, что соответствует наиболее благоприятному случаю варианта 2.

На втором этапе вычислений определялась зависимость  $B_D$  при заполнении измерительного модуля пульпой с различным объемным содержанием и составом твердого. Объемная доля твердой фазы пульпы изменялась от 0 до 0,25, а содержание полезного компонента в твердом от 20 до 60 %. На рис. 6 приведена зависимость фактора накопления  $B_D$  от объемной доли твердого при различном содержании полезного компонента в твердой фазе.



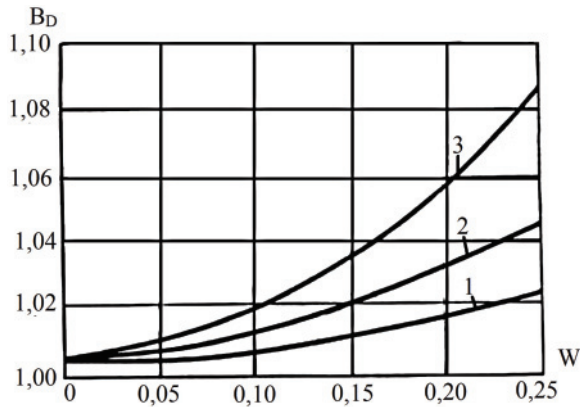


Рис. 6. Зависимость фактора накопления  $B_D$  от объемного содержания твердого в пульпе

Fig. 6. Dependence of factor  $B_D$  accumulation on the volume of solid content in the pulp

Как видно из рис. 6, вклад рассеянного излучения в показания детектора возрастает до 8,5 %. Однако даже в этом самом неблагоприятном случае рассеянное излучение не влияет заметным образом на величину формируемого сигнала  $S$ . Это видно из рис. 7, где приведена зависимость идеального сигнала  $S$ , рассчитанного без учета рассеянного излучения фона, и реального – с учетом последнего. Разница между этими сигналами не превышает 1,5 %, однако даже эта величина не является истинным критерием, так как экспериментальная градуировочная кривая определяется не в идеальных условиях, а при наличии рассеянного излучения фона, она должна лежать где-то между этими кривыми и поэтому реальная погрешность, вносимая рассеянным излучением фона, не превысит 1 %, что является вполне приемлемым, так как другие факторы, например изменение элементного состава твердого, могут оказывать большее влияние на точность измерений.

В заключение приведем идеальные градуировочные зависимости формируемого сигнала измерений  $S$  от плотности твердого компонента  $\rho$  для различных энергий источника излучения (рис. 8). В реальном диапазоне изменения плотности твердой фазы ( $\rho_s=2,5-4,5$  г/см<sup>3</sup>) для энергии источника 50 кэВ приведена градуировочная кривая для другого элементного состава твердого, с существенным различием плотности составляющих компонентов. Даже в этом случае, при вариации элементного состава твердого в указанных пределах, определение плотности твердого по усредненной градуировочной кривой будет содержать погрешность, не превышающую 5 %.

В качестве детектора излучения используется сцинтилляционный метод регистрации. Сцинтилляционные детекторы состоят из комбинации сцинтиллятора с фотоэлектрическим множителем (ФЭУ). При попадании света на фотокатод из него выбиваются фотоэлектроны и усиленный ФЭУ ток попадает на анод фотоумножителя. Дальнейшая схема может либо измерять среднюю силу

анодного тока ФЭУ (токовый режим работы), либо регистрировать отдельные импульсы света (счетный режим работы).

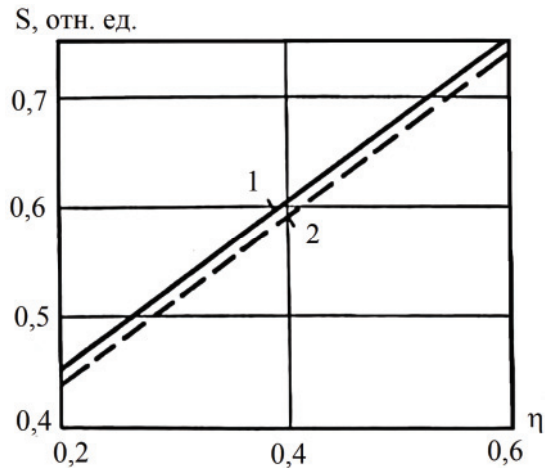


Рис. 7. Зависимость формируемого сигнала  $S$  твердой фазы пульпы  $\eta$ : 1 – без учета рассеянного излучения; 2 – с учетом рассеянного излучения фона при объемном содержании твердого  $W=0,25$

Fig. 7. Dependence of the generated signal  $S$  of the pulp solids  $\eta$ : 1 – without taking into account the scattered radiation; 2 – taking into account the scattered background radiation at a solid content  $W=0,25$

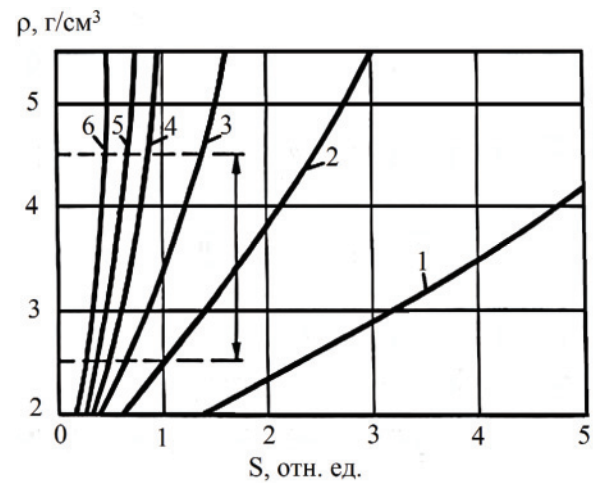


Рис. 8. Градуировочные кривые для различных энергий  $\gamma$ -излучения: 1 –  $E=30$  кэВ; 2 –  $E=40$  кэВ; 3 –  $E=50$  кэВ; 4 –  $E=60$  кэВ; 5 –  $E=70$  кэВ; 6 –  $E=80$  кэВ

Fig. 8. Grading curves for various  $\gamma$ -radiation energies: 1 –  $E=30$  keV; 2 –  $E=40$  keV; 3 –  $E=50$  keV; 4 –  $E=60$  keV; 5 –  $E=70$  keV; 6 –  $E=80$  keV

В токовом режиме работы сила анодного тока ФЭУ при постоянной энергии фотонов пропорциональна мощности дозы. При толщине сцинтиллятора  $d$  отношение силы анодного тока  $I$  ФЭУ к мощности дозы  $D$  определяется следующим образом

$$\frac{I}{D} = C \frac{\mu_{\text{сц}}}{\mu_{\text{воз}}} \frac{1 - \exp(-\mu_{\text{сц}} \rho_{\text{сц}} d)}{\mu_{\text{сц}} \rho_{\text{сц}} d},$$

где  $\mu_{\text{сц}}$  и  $\mu_{\text{воз}}$  – массовые коэффициенты поглощения энергии для сцинтиллятора и воздуха;  $C$  – ко-



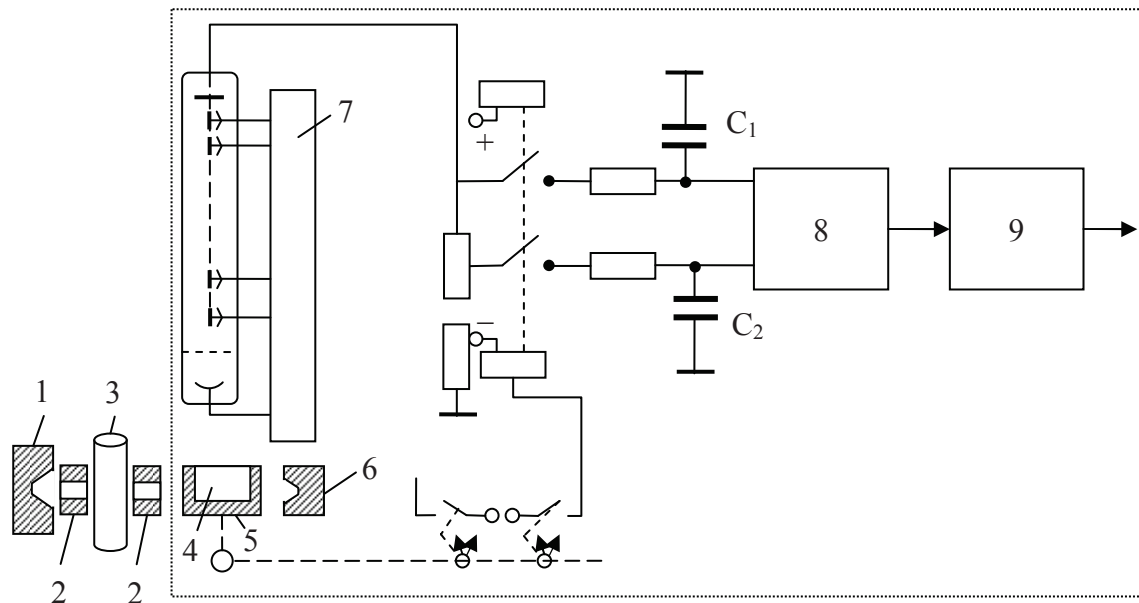


Рис. 9. Функциональная схема радиометрического канала при работе датчика в токовом режиме: 1 – основной источник; 2 – коллиматоры; 3 – измерительный модуль; 4 – датчик; 5 – obtюратор; 6 – контрольный источник; 7 – фотоэлектрический умножитель; 8 – эмиттерный повторитель; 9 – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 9. Functional diagram of the radiometric channel when the sensor is operating in current mode: 1 is the main source; 2 are the collimators; 3 is the measuring module; 4 is the sensor; 5 is the obturator; 6 is the control source; 7 is the photoelectric multiplier; 8 is the emitter follower; 9 is the analog-to-digital converter

эффицент пропорциональности;  $\rho_{\text{сц}}$  – плотность материала сцинтиллятора.

В счетном режиме работы сцинтиллятора с ФЭУ производится подсчет импульсов  $N$  тока за единичный интервал времени.

Чувствительность сцинтилляционного детектора в счетном режиме определяется по формуле

$$\frac{N}{D} = \frac{B(1 - \exp(-\mu_{\text{сц}}\rho_{\text{сц}}d))}{\mu_{\text{воз}}}$$

Выбор режима работы сцинтилляционного детектора определяет структурную схему радиометрического канала.

#### Обсуждение результатов

Функциональная схема радиометрического канала при токовом режиме работы сцинтилляционного детектора изображена на рис. 9.

Для устранения нестабильности характеристик детектора (изменение усиления ФЭУ, температурная зависимость сцинтиллятора и др.) используются основной – 1 и контрольной – 6 источники гамма-излучения. Сцинтиллятор  $\text{NaI}(\text{Tl})$  – 4 помещен в свинцовый полуцилиндр-обтюратор – 5, который попеременно перекрывает поток излучения так, что за время одного полупериода регистрируются фотоны основного источника, прошедшие через контролируемую среду – 3, за время второго полупериода – фотоны контрольного источника. Анодный ток фотоумножителя, возникающий при регистрации основного источника, заряжает

через контактные группы конденсатор  $C_1$ , а при регистрации излучения контрольного источника – конденсатор  $C_2$ .

Время зарядки должно быть меньше половины периода вращения свинцового обтюратора. Настройка прибора осуществляется с помощью движка реохорда. При этом добиваются равенства напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ , когда измерительный модуль заполнен водой. При появлении пульпы в измерительном модуле произойдет ослабление потока гамма-излучения, что приведет к разбалансу напряжений на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ . С помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) напряжение на конденсаторах преобразуется в цифровую информацию, которая поступает на микропроцессор для последующей обработки в соответствии с разработанным алгоритмом определения плотности твердой фазы пульпы.

Счетный режим работы сцинтилляционного датчика более предпочтителен по сравнению с токовым, так как менее подвержен влиянию шумов на результаты измерений. На рис. 10 приведена структурная схема радиометрического канала при работе датчика (детектора) в счетном режиме. Импульсы, поступающие от датчика, после усиления подаются на интегральный дискриминатор и далее на измеритель скорости счета. В этом блоке частота следования импульсов преобразуется в сигнал постоянного тока, который в дальнейшем с помощью АЦП представляется в виде цифровой информации для обработки микропроцессором.

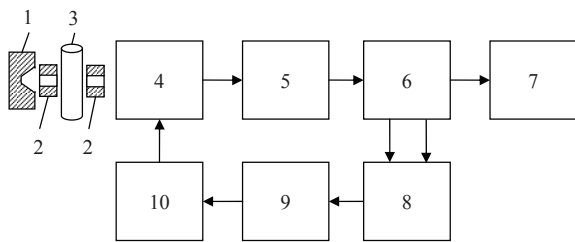


Рис. 10. Структурная схема радиометрического канала при работе датчика в счетном режиме: 1 – источник излучения; 2 – коллиматоры; 3 – измерительный модуль; 4 – датчик; 5 – усилитель импульсов; 6 – интегральный дискриминатор; 7 – измеритель скорости счета; 8 – генератор сигнала ошибки; 9 – усилитель постоянного тока; 10 – источник высоковольтного питания

Fig. 10. Structural diagram of the radiometric channel when the sensor is operating in the counting mode: 1 is the radiation source; 2 are the collimators; 3 is the measuring module; 4 is the sensor; 5 is the pulse amplifier; 6 is the integral discriminator; 7 is the meter of counting speed; 8 is the error signal generator; 9 is the constant current amplifier; 10 is the source of high-voltage power supply

Для устранения нестабильности характеристик детектора необходимо использовать стабилизацию, при которой цепью обратной связи охвачен сам ФЭУ. При подобной стабилизации двухканальный интегральный дискриминатор должен иметь одинаковую ширину каналов. Величина напряжений на выходе генератора сигнала ошибки будет равна нулю, если скорости счета в каналах дискриминатора одинаковы, т. е.  $N_1=N_2$ , где  $N_1$  и  $N_2$  – число импульсов в первом и втором каналах дискриминатора соответственно.

При отличии скорости счета в каналах знак и величина  $\Delta N=N_1-N_2$  определяют знак и величину напряжения на выходе генератора сигнала ошибки. Это напряжение регулирует величину анодного напряжения ФЭУ, при этом обратная связь охватывает весь измерительный тракт.

В заключение следует отметить, что для повышения точности измерения необходимо осуществлять коррекцию на время нечувствительности детектора, которая для наблюдаемой скорости счета  $N$  оценивается с помощью уравнения

$$N_c = N / (1 - d_a N),$$

где  $N_c$  – конечное корректируемое значение скорости счета, используемое в дальнейшем в алгоритме формирования сигнала  $S$ ;  $d_a$  – время нечувствительности детектора на один импульс счета для фотонов источника.

Время нечувствительности, определенное в работе [37] с точностью (0,1 мкс для фотонов источника  $^{141}\text{Am}$ , составляет величину 6,2 мкс. Наибольшее влияние на точность измерения времени нечувствительности сказывается при большой скорости счета, т. е. когда формируется опорный сигнал по чистой воде.

На рис. 11 приведена схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензий, реализующего способ измерений, изложенный выше.

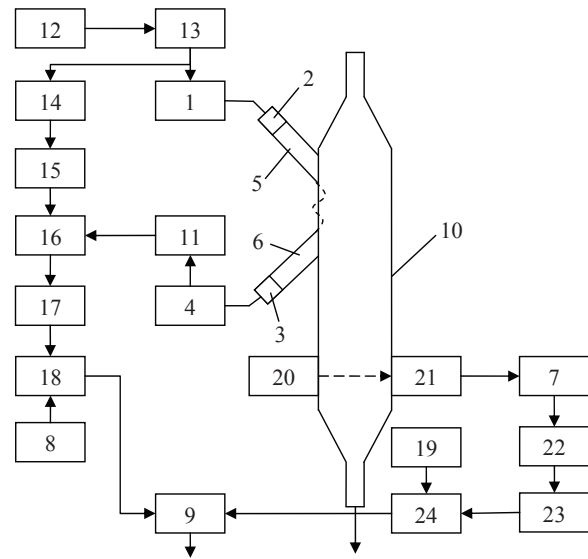


Рис. 11. Схема устройства контроля плотности твердой фазы суспензии: 1 – генератор импульсов; 2 – излучающий преобразователь; 3 – приемный преобразователь; 4, 7 – усилители; 5, 6 – формирующие призмы; 8, 19 – блоки задания; 9 – блок деления; 10 – измерительный сосуд; 11 – амплитудный детектор; 12 – мультивибратор; 13 – одно-вибратор; 14 – линия задержки; 15 – формирователь импульсов; 16 – блок селекции; 17, 22 – фильтры; 18, 24 – блок вычитания; 20 – источник гамма-излучения; 21 – приемник гамма-излучения; 23 – логарифмический преобразователь

Fig. 11. Scheme of the device for controlling the density of the solid phase of the suspension: 1, 5 are the pulse generators; 2, 6 are the emitting transducers; 3 is the receiving transducer; 4, 7 are the amplifiers; 8, 19 are the task blocks; 9 is the division unit; 10 is the measuring vessel; 11 is the amplitude detector; 12 is the multivibrator; 13 is the single-vibrator; 14 is the delay line; 15 is the pulse driver; 16 is the selection block; 17, 22 are the filters; 18, 24 is the subtraction unit; 20 is the source of gamma radiation; 21 is the gamma-ray receiver; 23 is the logarithmic converter

Волны Лэмба, пройдя фиксированное расстояние по стенке измерительного сосуда – 10, поступают на приемный преобразователь – 3, который осуществляет преобразование упругих ультразвуковых колебаний в электрический сигнал. Величина затухания волн Лэмба определяется только концентрацией твердой фазы контролируемой суспензии, протекающей в измерительном сосуде – 10.

Источник – 20 формирует гамма-излучение, которое проходит через исследуемую среду и принимается приемником – 21. Величина ослабления интенсивности гамма-излучения зависит от концентрации твердой фазы и плотности частиц, ее составляющих.

В блоке деления – 9 вычисляется величина  $S$ , которая пропорциональна плотности частиц твердой фазы исследуемой среды.

Испытания прибора контроля плотности твердой фазы пульпы с использованием радиометрического измерительного канала проводились применительно к сырью Криворожского железорудного бассейна. При этом использовался измерительный

канал на основе поверхностных волн Лэмба ультразвукового гранулометра «Пульсар» [35]. В качестве источника излучения использовался изотоп  $^{241}\text{Am}$ . Детектор излучения работал в токовом режиме. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе использовались образцы, специально сформированные из измельченного рудного материала с заранее определенными характеристиками. На основании проводимых измерений по ультразвуковому и радиометрическому каналам вычислялся сигнал по формуле (4) и строилась градуировочная кривая. На втором этапе по результатам измерений с помощью градуировочной кривой определялось содержание полезного минерала в разных фракциях материала пробы.

Погрешность измерений в этом варианте конструкции прибора составляла 1–3 %. Отмечено, что погрешность измерений увеличивалась с уменьшением концентрации твердой фазы в зоне контроля, что связано с особенностями измерений по каналу на основе волн Лэмба.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. – М.: Наука, 1981. – 286 с.
2. Lamb H. On waves in an elastic plate // Proc. of the Royal Society of London. Series A. – 1917. – № 93. – P. 114–128.
3. Обогащаемость железных руд / И.П. Богданова, Н.А. Нестерова, В.С. Федорченко, Ю.Л. Грицай. – М.: Недра, 1989. – 158 с.
4. Ржевский В.В., Ямщиков В.С. Ультразвуковой контроль и исследования в горном деле. – М.: Недра, 1968. – 120 с.
5. Noninvasive real-time multipoint temperature control for ultrasound phased array treatments / R. Seip, P. VanBaren, C. Cain, E. Ebbini // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 1996. – № 6. – P. 1063–1073.
6. Использование волн Лэмба для сигнализации уровня жидких сред / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина, А.П. Гордеев, В.С. Скрипалёв // Приборы и системы управления. – 1975. – № 9. – С. 31–32.
7. Гуманюк М.Н. Ультразвук в горной автоматике. – К.: Техніка, 1970. – 192 с.
8. Ямщиков В.С., Коробейников Н.С. Применение ультразвука в горной промышленности: обзор. – М.: Недра, 1967. – 52 с.
9. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы. – М.: Энергия, 1975. – 91 с.
10. Development of the method of quasioptimal robust control for periodic operational processes / I. Lutsenko, E. Fomovskaya, S. Koval, O. Serdiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 4. – № 2 (88). – P. 52–60.
11. Development of the method for determining optimal parameters of the process of displacement of technological objects / I. Lutsenko, V. Tytiuk, I. Oksanych, Zh. Rozhnenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 6. – № 3 (90). – P. 41–48.
12. Development of a method for the accelerated two-stage search for an optimal control trajectory in periodical processes / I. Lutsenko, O. Fomovskaya, I. Konokh, I. Oksanych // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 1 (87). – P. 47–55.
13. Jamshidi R., Brenner G. Dissipation of ultrasonic wave propagation in bubbly liquids considering the effect of compressibility to the first order of acoustical Mach number // Ultrasonics. – 2013. – V. 53. – Iss. 4. – P. 842–848.
14. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. P. I: Theory, nonlinear attenuation and traveling wave generation // Ultrasonics Sonochemistry. – 2012. – V. 19. – Iss. 1. – P. 56–65.
15. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. P. II: Primary Bjerknes force and bubble structures // Ultrasonics Sonochemistry. – 2012. – V. 19. – Iss. 1. – P. 66–76.
16. Vanhille C., Campos-Pozuelo C. Nonlinear ultrasonic waves in bubbly liquids with nonhomogeneous bubble distribution: Numerical // Ultrasonics Sonochemistry. – 2009. V. 16. – Iss. 5. – P. 669–685.
17. Tejedor Sastre M.T., Vanhille C. A numerical model for the study of the difference frequency generated from nonlinear mixing of standing ultrasonic waves in bubbly liquids // Ultrasonics Sonochemistry. – 2017. – V. 34. – P. 881–888.
18. Zhang Y., Du X. Influences of non-uniform pressure field outside bubbles on the propagation of acoustic waves in dilute bubbly liquids // Ultrasonics Sonochemistry. – 2015. – V. 26. – P. 119–127.
19. Lamb wave analysis for non-destructive testing of concrete plate structures / N. Ryden, C.B. Park, P. Ulriksen, R.D. Miller // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003). – San Antonio, Texas, April 6–10, 2003. – P. 782–793.
20. Lee C., Staszewski W.J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: Part I. Wave propagation // Smart Materials and Structures. – 2009. – V. 12. № 5. – P. 804–814.
21. Debarnot M., Le Letty R., Lhermet N. Ultrasonic NDT based on Lamb waves: development of a dedicated drive and monitoring electronic // Proc. of the 3<sup>rd</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring. – Granada, Spain, 2006. – P. 1207–1213.
22. Subhash N., Krishnan B. Modelling and experiments for the development of a guided wave liquid level sensor // Proc. of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation. – Thiruvananthapuram, India, 2011. – P. 240–244.
23. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The gas bubble size distribution control formation in the flotation process // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 4. – P. 42–45.
24. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 36–42.

25. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 5. – P. 7–11.
26. Synthesis of robust controllers of technological units control systems of ore-dressing factory / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron, S. Hryshchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – V. 1. – № 9 (91). – P. 48–57.
27. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 49–52.
28. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 3. – P. 38–41.
29. Arikian P., Aytemiz O., Zararsiz A. X-ray fluorescence analysis of iron in ore dressing processes // Spectroscopy Letters. – 1998. – V. 31. – P. 275–282.
30. Yamada Y. X-ray fluorescence analysis by fusion bead method for ores and rocks // The Rigaku Journal. – 2010. – V. 26 (2). – P. 15–23.
31. Анализ минералов с помощью рентгенофлуоресцентных спектрометров Axios Minerals (PANalytical) с применением пакета стандартов WROXI. URL: <http://www.nalkho.com/equipment/Axios%20Minerals%20WROXI.pdf> (дата обращения 03.05.2018).
32. Idres A., Bounouala M. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer du gisement de l'ouenza par radiometrie // Journal de Physique IV. – 2005. – V. 124. – P. 177–181.
33. Кармазин В.И., Кармазин В.В. Магнитные методы обогащения. – М.: Недра, 1978. – 384 с.
34. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. – М.: МГТУ, 2005. – 426 с.
35. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Ultrasonic facilities for the ground materials characteristics control // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2. – P. 31–35.
36. Кейз К., Цфайфель П. Линейная теория переноса. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
37. Фано У., Спенсер Л., Бергер М. Перенос гамма-излучения. – М.: Госатомиздат, 1963. – 284 с.

Поступила 11.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Моркун В.С.**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Криворожского национального университета.

**Моркун Н.В.**, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

**Тронь В.В.**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.

**Грищенко С.Н.**, кандидат педагогических наук, заведующая отделом научно-технической информации научно-исследовательской части Криворожского национального университета.

**Бровко Д.В.**, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник Академии горных наук Украины.

**Паранюк Д.И.**, инженер департамента по безопасности ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

**Сердюк А.Ю.**, ассистент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета.



UDC 621.926:34.16

## EVALUATION OF PARTICLE DENSITY OF PULP SOLID PHASE USING GAMMA-RAY AND LAMB WAVES MEASURING CHANNELS

**Vladimir S. Morkun**<sup>1</sup>,  
morkunv@gmail.com

**Natalia V. Morkun**<sup>1</sup>,  
nmorkun@gmail.com

**Vitaliy V. Tron**<sup>1</sup>,  
vtron@ukr.net

**Svitlana M. Hryshchenko**<sup>1</sup>,  
s-grischenko@ukr.net

**Dmytry V. Brovko**<sup>2</sup>,  
brovko@i.ua

**Dmitriy I. Paranyuk**<sup>3</sup>,  
paranyuk@i.ua

**Aleksandra Yu. Serdyuk**<sup>1</sup>,  
o.serdiuk@i.ua

<sup>1</sup> Krivoy Rog National University,  
11, Vitaliy Matusevych street, Krivoy Rog, 50027, Ukraine.

<sup>2</sup> Academy of Mining Sciences of Ukraine,  
37, Pushkin street, Krivoy Rog, 50002, Ukraine.

<sup>3</sup> ArcelorMittal Krivoy Rog,  
1, Krivorozhstali street, Krivoy Rog, 50000, Ukraine.

**The relevance** of the research is caused by the need to improve the accuracy of the means for ultrasonic operational monitoring of the characteristics of iron ore pulp solid phase in enrichment process. This area of means for improving will allow increasing the efficiency of controlling the enrichment and the quality of the final products.

**The main aim** of the research is to increase the accuracy when measuring the particles density in pulp solid phase based on the laws of gamma radiation propagation in randomly non-uniform heterogeneous environments, as well as Lamb waves along the surfaces in contact with these fluids, in their natural or specially organized movement.

**Objects:** processes of gamma radiation propagation in randomly inhomogeneous heterogeneous media, as well as Lamb waves on surfaces contacting these media.

**Methods:** systematization and analysis of the methods developed for ultrasonic controlling the characteristics of solid phase of heterogeneous environments, methods of mathematical statistics and probability theory for processing the results of experiments, computer information technologies and software technologies designed to implement the techniques developed.

**Results.** Investigated distribution patterns of gamma radiation in randomly non-uniform heterogeneous environments, as well as Lamb waves along the surfaces in contact with these fluids, in their natural or specially organized movement allow determining particle density of solid phase, which characterizes the degree of disclosure of a useful component (mineral) at known particle size and concentration in the test volume. The authors have developed the scheme for monitoring the suspensions solid phase density based on the obtained regularities. The error in measuring particle density in pulp solid phase by this method is 1–3 %.

### Key words:

Ore enrichment, Lamb waves, gamma radiation, non-destructive testing, pulp characteristics.

### REFERENCES

1. Viktorov I. *Zvukovyye poverkhnostnyye volny v tverdykh telakh* [Sound Surface Waves in Solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 286 p.
2. Lamb H. On waves in an elastic plate. *Proc. of the Royal Society of London. Series A*, 1917, no. 93, pp. 114–128.
3. Bogdanova I.P., Nesterova N.A., Fedorchenko V.S., Gritsay Yu.L. *Obogatimost zheleznykh rud* [Concentration of iron ores]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 158 p.
4. Rzhavskiy V., Yamshchikov V. *Ultrazvukovoy kontrol i issledovaniya v gornom dele* [Ultrasonic inspection and research in mining]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 120 p.
5. Seip R., VanBaren P., Cain C., Ebbini E. Noninvasive real-time multipoint temperature control for ultrasound phased array treatments. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1996, vol. 43, 6, pp. 1063–1073.
6. Brazhnikov N., Shavykina N., Gordeev A., Skripalev V. *Ispolzovanie voln Lemba dlya signalizatsii urovnya zhidkikh sred* [Use of

- Lamb waves to signal the level of liquid media]. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1975, vol. 9, pp. 31–32.
7. Gumanyuk M. *Ultrazvuk v gornoy avtomatike* [Ultrasound in mining automation]. Kyiv, Tekhnika Publ., 1970. 192 p.
  8. Yamschikov V., Korobeynikov N. *Primeneniye ultrazvuka v gornoy promyshlennosti: obzor* [Use of ultrasound in mining industry: a review]. Moscow, Nedra Publ., 1967. 52 p.
  9. Brazhnikov N. *Ultrazvukovye metody* [Ultrasonic methods]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 91 p.
  10. Lutsenko I., Fomovskaya E., Koval S., Serdiuk O. Development of the method of quasioptimal robust control for periodic operational processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 4, no. 2 (88), pp. 52–60.
  11. Lutsenko I., Tytiuk V., Oksanych I., Rozhnenko Zh. Development of the method for determining optimal parameters of the process of displacement of technological objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 6, no. 3 (90), pp. 41–48.
  12. Lutsenko I., Fomovskaya O., Konokh I., Oksanych I. Development of a method for the accelerated two-stage search for an optimal control trajectory in periodical processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3, no. 1 (87), pp. 47–55.
  13. Jamshidi R., Brenner G. Dissipation of ultrasonic wave propagation in bubbly liquids considering the effect of compressibility to the first order of acoustical Mach number. *Ultrasonics*, 2013, vol. 53, no. 4, pp. 842–848.
  14. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. P. I: Theory, nonlinear attenuation and traveling wave generation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 56–65.
  15. Louisnard O. A simple model of ultrasound propagation in a cavitating liquid. Part II: Primary Bjerknes force and bubble structures. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 66–76.
  16. Vanhille C., Campos-Pozuelo C. Nonlinear ultrasonic waves in bubbly liquids with nonhomogeneous bubble distribution: Numerical experiments. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, vol. 16, no. 5, pp. 669–685.
  17. Tejedor Sastre M.T., Vanhille C. A numerical model for the study of the difference frequency generated from nonlinear mixing of standing ultrasonic waves in bubbly liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 34, pp. 881–888.
  18. Zhang Y., Du X. Influences of non-uniform pressure field outside bubbles on the propagation of acoustic waves in dilute bubbly liquids. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2015, vol. 26, pp. 119–127.
  19. Ryden N., Park C.B., Ulriksen P., Miller R.D. Lamb wave analysis for non-destructive testing of concrete plate structures. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2003)*. San Antonio, Texas, April 6–10, 2003. pp. 782–793.
  20. Lee C., Staszewski W.J. Modelling of Lamb waves for damage detection in metallic structures: P. I. Wave propagation. *Smart Materials and Structures*, 2009, vol. 12, no. 5, pp. 804–814.
  21. Debarnot M., Le Letty R., Lhermet N. Ultrasonic NDT based on Lamb waves: Development of a dedicated drive and monitoring electronic. *Proc. of the 3<sup>rd</sup> European Workshop on Structural Health Monitoring*. Granada, Spain, 2006. pp. 1207–1213.
  22. Subhash N.N., Krishnan B. Modelling and experiments for the development of a guided wave liquid level sensor. *Proc. of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*. Thiruvananthapuram, India, 2011. pp. 240–244.
  23. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The gas bubble size distribution control formation in the flotation process. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 4, pp. 42–45.
  24. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 2, pp. 36–42.
  25. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 5, pp. 7–11.
  26. Morkun V., Morkun N., Tron V., Hryshchenko S. Synthesis of robust controllers of technological units control systems of ore-dressing factory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 1, no. 9 (91), pp. 48–57.
  27. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 3, pp. 49–52.
  28. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 3, pp. 38–41.
  29. Arikani P., Aytemiz O., Zararsiz A. X-ray fluorescence analysis of iron in ore dressing processes. *Spectroscopy Letters*, 1998, vol. 31, pp. 275–282.
  30. Yamada Y. X-ray fluorescence analysis by fusion bead method for ores and rocks. *The Rigaku Journal*, 2010, vol. 26 (2), pp. 15–23.
  31. *Analiz mineralov s pomoshchyu renigenofluorescentnykh spektrometrov Axios Minerals (PANalytical) s primeneniem paketa standartov WROXI* [Analysis of minerals using X-ray fluorescence spectrometers Axios Minerals (PANalytical) using the WROXI standards package]. Available at: <http://www.nalkho.com/equipment/Axios%20Minerals%20WROXI.pdf> (accessed 3 May 2018).
  32. Idres A., Bounouala M. Possibilité d'une nouvelle technologie de traitement des minerais de fer du gisement de l'ouenza par radiometrie [Possibility of a new technology for the treatment of iron ore from the Ouenza deposit by radiometry]. *Journal de Physique IV*, 2005, vol. 124, pp. 177–181. In Fr.
  33. Karmazin V.I., Karmazin V.V. *Magnitnye metody obogashcheniya* [Magnetic methods of enrichment]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 384 p.
  34. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnitnyye, elektricheskiye i spetsialnyye metody obogashcheniya poleznykh iskopyayemykh* [Magnetic, electrical and special methods of mineral processing]. Moscow, MG TU Publ., 2005. 426 p.
  35. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Ultrasonic facilities for the ground materials characteristics control. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, vol. 2, pp. 31–35.
  36. Keyz K., Tsfayfel P. *Lineynaya teoriya perenosa* [Linear transport theory]. Moscow, Mir Publ., 1972. 384 p.
  37. Fano U., Spenser L., Berger M. *Perenos gamma-izlucheniya* [Transfer of gamma radiation]. Moscow, Gosatomizdat Publ., 1963. 284 p.

Received: 11 May 2018.

**Information about the authors**

*Vladimir S. Morkun*, Dr. Sc., professor, Vice rector, Krivoy Rog National University.

*Natalia V. Morkun*, Dr. Sc., associate professor, head of the department, Krivoy Rog National University.

*Vitaliy V. Tron*, Cand. Sc., associate professor, Krivoy Rog National University.

*Svitlana M. Hryshchenko*, Cand. Sc., head of the department, Krivoy Rog National University.

*Dmytry V. Brovko*, Cand. Sc., associate professor, researcher, Academy of Mining Sciences of Ukraine.

*Dmitriy I. Paranyuk*, engineer, ArcelorMittal Krivoy Rog.

*Aleksandra Yu. Serdyuk*, assistant, Krivoy Rog National University.