

УДК 5.50.504:6

Обеспечение безопасности переработки металлургического сырья и отходов, содержащих радиоактивные источники

И.Ю. Сергеев¹, к.т.н.; Н.П. Валуйев², д.т.н.; О.В. Лысова²

¹ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

²ФГБОУ ВО Академия гражданской защиты МЧС России

Аннотация:

Статья посвящена обоснованию условий достижения необходимого уровня безопасности при промышленной переработке металлургических отходов и сырья. Приведена методология обеспечения приемлемых величин риска аварийных ситуаций при промышленной переработке отходов и сырья, в которых могут находиться радиоактивные источники.

Ключевые слова: радиационный контроль, обнаружение радиоактивных источников, переработка сырья, радиационный инцидент, высокочувствительные средства.

Ensuring the safety of processing of metallurgical raw materials and waste containing radioactive source

I.Y. Sergeev¹, Ph.D. of Engineering Sciences; N.P. Valuev², Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Engineering Sciences; O.V. Lysova²

¹FSBEI HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

²FSBMEI HE Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia

Annotation:

The article is devoted to the substantiation of the conditions for achieving the necessary level of safety during the industrial processing of metallurgical waste and raw materials. The methodology of providing acceptable values of the risk of emergencies in the industrial processing of waste and raw materials containing radioactive source is given.

Keywords: radiation monitoring, detection of radioactive sources, processing of raw materials, radiation incident, highly sensitive means.

В странах с развитой атомной энергетикой накоплены огромные объемы (несколько млн. тонн) радиоактивных отходов, представляющих большую опасность для экологии и населения. Попадание радиоактивных отходов в оборот промышленного сырья приводит к крупным радиационным авариям при переработке сырья и отходов [1,2]. За последнее время число подобных инцидентов превысило 300. По сведениям комиссии по ядерному регулированию затраты на ликвидацию последствий аварий оцениваются более чем в 100 млн. долларов. Снижение рисков возникновения аварий во многом связано с проведением эффективного радиационного контроля перерабатываемого сырья и отходов производства. В настоящее время для контроля поступающего на переработку сырья применяются высокочувствительные средства радиационного контроля [3-16]. При проведении контроля сырья, поступающего на предприятие в крупногабаритном транспорте, возникает ряд затруднений, связанных со значительным перепадом интенсивности излучения источников (в сотни – тысячи раз), что обусловлено значительным поглощением излучения (в особенности низкоэнергетического) в загруженном транспортном средстве.

Эти обстоятельства приводят к тому, что до сих пор фиксируется множество радиационных инцидентов, связанных с радиоактивным загрязнением сырья и отходов. Существующий научно-методический аппарат [6] управления рисками при обосновании условий обеспечения безопасности промышленной переработки радиоактивных отходов и сырья не является достаточным для надежного предупреждения ЧС радиационного характера. Указанный аппарат не содержит методик оценки мощности источников, которые приводят к возникновению ЧС радиационного характера при переработке сырья, и определения требуемых величин стандартного отклонения и порога срабатывания систем контроля. В известных научных разработках не содержится анализа влияния флуктуаций радиационного фона на результаты контроля, сравнимых и зачастую превышающих порог чувствительности систем контроля, и методик обработки сигналов детекторов, компенсирующих возмущения радиационного фона. Отсутствуют также методики определения параметров детекторов в широком энергетическом диапазоне, обоснования рациональных схем детектирования при контроле движущихся объектов, методики регистрации сигналов с варьируемым временем усреднения в процессе контроля, методики определения условий достижения требуемого (приемлемого) значения риска возникновения радиационной аварии на предприятии при переработке отходов и др.

Данная статья посвящена обоснованию условий достижения необходимого уровня безопасности при промышленной переработке радиоактивных отходов и сырья. Методология обеспечения приемлемых величин риска аварийных ситуаций при промышленной переработке отходов и сырья, содержащих радиоактивные вещества, включает определение следующих величин: максимально допустимую мощность P_0 (аГр/с) радиоактивного источника на расстоянии l (м), попадающего с перерабатываемым сырьем в плавку металла, приращение мощности дозы излучения ΔP (аГр/с) источника на поверхности детектора системы контроля, требуемую величину стандартного отклонения σ (аГр/с) и порога срабатывания Π (аГр/с) системы контроля, и риск R возникновения аварийной ситуации при попадании радиоактивности в плавку. Указанные величины определяются следующим образом:

$$P_0 = \frac{\kappa_\gamma q m}{l^2} \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{\kappa_\gamma q m B}{l^2 \exp(\mu \rho \ell_1)} \quad (2)$$

$$\sigma \leq \frac{\kappa_\gamma q m B}{(n+2)l^2 \exp(\mu \rho \ell_1)} \quad (3)$$

$$\sigma \leq \Delta P / (n+k) \quad (4)$$

$$R = \frac{W_n}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(P+n\sigma)} \exp\left\{-\frac{[x-(P+\Delta P)]^2}{2\sigma^2}\right\} dx = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \frac{n\sigma - \Delta P}{\sqrt{2}\sigma} \right] \quad (5)$$

где

P_0 – максимально допустимая мощность источника, находящегося в объеме сырья, поступающего на переработку;

κ_γ - полная керма-постоянная радионуклида, (аГр·м²)/(с·Бк), представляет собой мощность воздушной кермы излучения источника (аГр/с) активностью 1 Бк на расстоянии 1 м;

q – максимально допустимая удельная активность металла (Бк/кг);

m – масса выплавляемого в агрегате металла (кг);

B – фактор накопления, обусловленный рассеянным излучением источника в объеме сырья, поступающего в транспортном средстве на контроль ($B > 1$);

ℓ - расстояние от источника до детектора, принимаемое за половину расстояния между детекторами, м (ширина зоны контроля, через которую следует транспортное средство с сырьем), что является максимально возможным расстоянием при контроле сырья;

μ – массовый коэффициент ослабления энергии излучения сырьем (м²/кг);

ρ – средняя плотность сырья (кг/м³);

σ – стандартное отклонение показаний системы контроля (аГр/с);

$n+k$ – безразмерная величина превышения сигналом детектора порога срабатывания, определяющая вероятность W_n обнаружения радиоактивного источника;

$$R = 1 - W_n;$$

W_n – вероятность появления радиоактивных веществ в поступающей на переработку партии сырья и отходов (около 10^{-3});

P – мощность кермы фона (аГр/с);

ΔP – приращение мощности кермы излучения от источника (аГр/с);

При $k = 0$, $W_n = 0,5$;

при $k = 2$, $W_n = 0,977$;

при $k = 4$, $W_n = 0,9998$.

при $k = 1$, $W_n = 0,84$;

при $k = 3$, $W_n = 0,9987$;

Риск аварии $R = 1 - W_n$, $n\sigma = \Pi$ – порог срабатывания системы контроля.

Как правило, вместо величины аГр/с используются величины: мкГр/ч, нГр/ч, причем $1\text{аГр/с} = 3,6 \cdot 10^{-9}\text{мкГр/ч} \approx 3,6 \cdot 10^{-6}\text{нГр/ч}$. Мощность поглощенной дозы 1нГр/ч приблизительно равна мощности эффективной дозы 1нЗв/ч .

Приведенные данные соответствуют вероятности возникновения аварийной ситуации при поступлении одной партии сырья. Суммарный риск аварии в течение года возрастает в f раз, где $f = M/m_{cp}$ – количество партий сырья, поступающих на перерабатывающее предприятие в течение года (M – масса перерабатываемого сырья в год, m_{cp} – средняя масса одной партии сырья). Если вероятность аварии на одну партию сырья составляет 10^{-6} , то риск инцидента на среднем предприятии с объемом переработки 10^5 тонн сырья в год (средняя масса партии $m_{cp} = 10$ тонн) составит приблизительно 10^{-2} , что является приемлемым результатом.

В связи с тем, что вероятности радиационных инцидентов зависят от объема перерабатываемого сырья, то риск аварии для крупных предприятий выше, чем на средних и малых предприятиях. Это обстоятельство приводит к тому, что требования к надежности систем обнаружения источников на крупных предприятиях становятся более жесткими, чем требования к системам, установленным на малых предприятиях. Для снижения вероятности инцидентов на крупных предприятиях необходимо повышать вероятность обнаружения, т.е. использовать более чувствительные системы контроля (4).

Для нуклида ^{60}Co $\kappa_{\gamma} = 84,2$ (аГр·м2)/(с·Бк); $q = 0,3$ кБк/кг, $\mu \cdot \rho = 4\text{ м}^{-1}$, $\ell = 2,5\text{ м}$, $\ell_1 = 1\text{ м}$; $B = 4$, и массы плавки 10 т величина $\Delta P \approx 12\text{ нГр/ч}$. Для тех же условий, при массе плавки 50 т $\Delta P \approx 60\text{ нГр/ч}$. Расчеты для нуклида ^{56}Mn дают $\Delta P \approx 5\text{ нГр/ч}$, соответственно 25 нГр/ч .

Из (1–5) следует, что для обеспечения необходимого значения риска аварийной ситуации требуется, чтобы стандартное отклонение σ показаний системы контроля было в $(n+k)$ раз меньше приращения сигнала ΔP от радиоактивности максимально допустимого уровня в сырье.

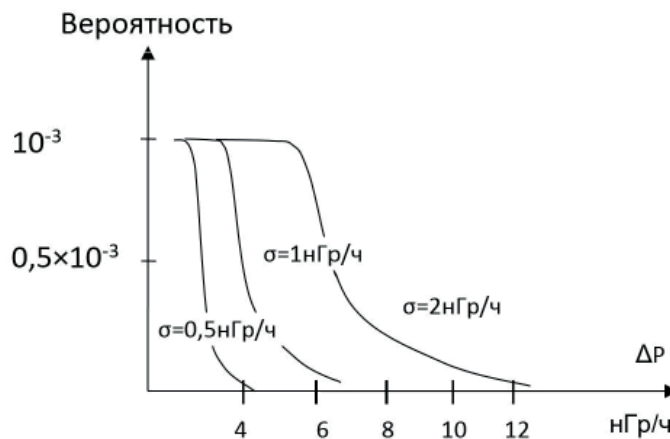


Рис. 1. Вероятность возникновения аварийной ситуации в зависимости от мощности дозы ΔP излучения источника на поверхности детектора для разных значений стандартного отклонения σ .

Анализ зависимостей на рис. 1 показывает, что система контроля со стандартным отклонением $\sigma=0,5$ нГр/ч обеспечивает практическое отсутствие вероятности радиационного инцидента в случае, когда надфоновая мощность дозы излучения источника на поверхности детектора превышает 3 нГр/ч.

Практика радиационного контроля транспорта с металлом свидетельствует о том, что основная часть выявления источников связана со случаями обнаружения источников, излучение которых создает на поверхности детектора мощность дозы от 3 до 5 нГр/ч. Такие низкие значения мощности дозы связаны со значительным ослаблением излучения источников контролируемым сырьем, транспортным средством и удаленностью их от детекторов. В этой связи надежный контроль возможен только при использовании высокочувствительных дозиметрических систем со стандартным отклонением менее 1 нГр/ч.

Риск радиационной аварии при переработке сырья и отходов, содержащих радиоактивные вещества, определяется в первую очередь качеством систем контроля, которые должны своевременно выявить наличие в сырье радиоактивности, превышающей допустимый уровень. Для этого необходимо обеспечить крайне низкие (менее 1 нГр/ч) значения стандартного отклонения показаний, компенсацию влияния возмущений фона в зоне контроля, сравнимых и превышающих порог срабатывания системы контроля, обосновать рациональную схему проведения контроля движущегося транспорта с сырьем и др.

В работе получены зависимости стандартного отклонения σ показаний системы контроля от энергии E квантов излучения, величины фона P , размеров детектора (площади S), эффективности ϵ регистрации, массового коэффициента поглощения энергии квантов μ воздухом, длительности t усреднения сигнала детектора и аналитические соотношения для определения параметров систем контроля, обеспечивающих необходимые значения стандартного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{PE\mu}{S\epsilon t}} \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что стандартное отклонение показаний дозиметрической системы растет с увеличением уровня радиационного фона и энергии γ -квантов. Величина статистической погрешности уменьшается с увеличением площади детектора, эффективности регистрации и времени усреднения при условии, что длительность интервала усреднения не превышает длительности сигнала источника при проезде транспорта с сырьем через зону контроля.

На рисунке 2 представлены полученные из выражения (6) зависимости стандартного отклонения σ от энергии γ -квантов для случая использования детектора, площадь S которого составляет $0,1 \text{ м}^2$, время усреднения 1 с и различных значений фона P_ϕ . Эффективность регистрации ϵ определена из опытных данных для пластикового сцинтиллятора толщиной 50 мм и составляет для $E=0,03 \text{ МэВ}$ – 0,1; для $E=0,06 \text{ МэВ}$ – 0,3; для $E=0,1 \text{ МэВ}$ – 0,33; для $E=0,2 \text{ МэВ}$ – 0,5; для $E=0,66 \text{ МэВ}$ – 0,35; для $E=1,25 \text{ МэВ}$ – 0,3. В расчетах учитывалось, что $1 \text{ Гр/с} = 1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{с}) = 3,6\cdot 10^{12} \text{ нГр/ч}$; $1 \text{ МэВ} = 1,62\cdot 10^{-13} \text{ Дж}$. Значения μ имеют размерность $\text{м}^2/\text{кг}$.

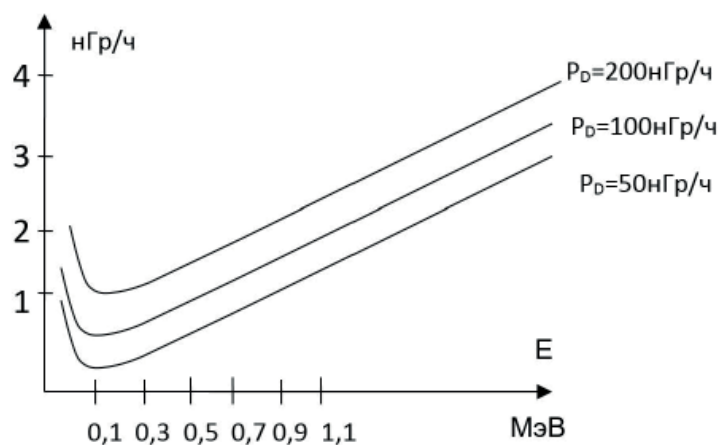


Рис. 2. Зависимость стандартного отклонения системы контроля от энергии γ -квантов регистрируемого излучения

Для обеспечения измерения мощности дозы излучения системой контроля со стандартным отклонением σ необходимо использовать детектор, площадь чувствительной поверхности которого S_{min} должно удовлетворять условию:

$$S_{min} \geq \frac{n_0 E^2 \mu_{MЭ}^2}{\sigma^2 \varepsilon t} = \frac{P_D E \mu_{MЭ}}{\sigma^2 t \varepsilon} \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет определить необходимые параметры детектора и длительность усреднения сигнала для обеспечения требуемой величины вероятности аварийной ситуации (5) при переработке радиоактивных сырья и отходов.

Для того чтобы обеспечить величину стандартного отклонения около 1 нЗв/ч при времени измерения 1 с для средних энергий γ -квантов (0,5-0,7 МэВ) при уровне радиационного фона 100 нГр/ч требуется детектор, площадь чувствительности поверхности которого составляет 0,2 м², эффективность регистрации 0,3-0,35. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют пластиковые сцинтилляционные детекторы объемом 7-10 л.

Литература

1. Валуев Н.П., Лысова О.В., Дегтярев С.В., Юданов П.М. Анализ чрезвычайных ситуаций, вызванных переработкой металлолома, содержащего радиоактивные вещества. Научные и образовательные проблемы гражданской защиты, Научный журнал. – 2018, №4, С.46–50.
2. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2015. №3. С.47–50.
3. Валуев Н.П., Мойш Ю.В., Качалов В.М., Никоненков Н.В. Автоматизированные системы радиационного контроля сырья и металлолома. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2009, №3, С. 107-110.
4. Валуев Н.П., Лысова О.В., Никоненков Н.В., Пушкин И.А. Радиационный контроль движущихся транспортных средств с помощью высокочувствительных дозиметрических систем. // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты, Научный журнал – 2011, №4, С. 36–40.
5. Валуев Н.П., Пушкин И.А., Стасишин Л.А. Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем. // Грузовик – 2013. №8. С. 44–48.
6. Валуев Н.П., Никоненков Н.В., Сергеев И.Ю., Стасишин Л.А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем. // Грузовик – 2015, №9, С. 35–39.
7. Сергеев И.Ю. Выбор методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 1 (12). С. 8-11.
8. Сергеев И.Ю. Выбор параметров динамического радиационного мониторинга территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 2 (13). С. 45-48.
9. Сергеев И.Ю. Повышение эффективности радиационного мониторинга закрытого административного территориального образования с объектами атомной промышленности и прилегающих территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 3 (10). С. 9-12.
10. Сергеев И.Ю. Способы контроля радиационной обстановки для систем комплексной безопасности территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2018. № 4 (11). С. 8-10.
11. Сергеев И.Ю. Предложения по способам контроля радиационной обстановки для системы комплексной безопасности закрытого административного территориального образования с объектами атомной промышленности // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. № 1 (28). С. 63-71.
12. Сергеев И.Ю., Валуев Н.П. Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. № 2 (29). С. 71-75.

13. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // В книге: Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Тезисы докладов. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ). 2015. С. 169-171.
14. Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов // В сборнике: Безопасность и живучесть технических систем Материалы и доклады: в 3-х томах. 2015. С. 95-99.
15. Сергеев И.Ю. Определение параметров динамического радиационного контроля грузов в транспортных средствах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2019. № 2 (41). С. 94-98.
16. Сергеев И.Ю., Гарелина С.А., Латышенко К.П., Валуев Н.П. Математическое моделирование дозиметрических систем контроля // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 1 (16). С. 64-68.