

Во-вторых, если по интегральному методу предполагается, что процесс стационарен, то дифференциальный метод исходит из противоположного предположения, что процесс всегда нестационарен (в особенности локально нестационарен). В-третьих, дифференциальный метод не «верит слепо», что измеряемый процесс является пуассоновским (да еще и стационарным), а по выполнению соотношения (3) позволяет в реальном времени проверить, действительно ли мы имеем дело с пуассоновским процессом (и проверить на стационарность). Или, наоборот, если точно известно, что регистрируемый процесс пуассоновский, то по сходимости результатов при различных Δt , а также в сочетании с интегральным измерением можно тестировать нормальность функционирования аппаратуры.

В качестве важнейшего вывода следует отметить, что дифференциальный метод не является альтернативой интегральному, наиболее справедливо будет рассматривать эти методы как органически взаимодополняющие, поэтому использование на практике дифференциального метода не входит в противоречие со сложившейся методологией измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muller J. Some Remarks on the Galushka Method. Rapt B/PM-93/2 Bureau Intern. des Poids et Mesures, 1993, p. 1—7.
2. Westphal G. On the performance of loss-free counting a method for real-time compensation of dead-time and pile-up losses in nuclear spectroscopy. — Nucl. Instrum. Meth., 1979, v. 163, p. 189.
3. Point J., Blave A. Methodes originales de correction continue des pertes de comptage dues aux temps de paralysie des detecteurs et de leur electronique associee. — In: Proc. Conf. «Nuclear Electronics II». Vienna: IAEA, 1962, p. 345.
4. Акимов Ю.К., Игнатьев О.В., Калинин А.И., Кушнирук В.Ф. Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989, с. 312.
5. International Commission on Radiation Units and Measurements. Particle Counting in Radioactivity Measurements, ICRU Rept 52, 1994.

Поступила в Редакцию 19.09.95

УДК 621.039

ОБРАЩЕНИЕ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ, ОБРАЗУЮЩИМИСЯ ВНЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

*Соболев И.А., Дмитриев С.А., Баринов А.С., Польский О.Г., Турлак Е.А.,
Ожован М.И. (МосНПО «Радон»)*

К настоящему времени в России накоплено ~ 200 тыс. м³ радиоактивных отходов суммарной активностью около 2 млн Ки, образовавшихся вне ядерного топливного цикла [1]. Для обращения с ними создана система специализированных предприятий «Радон». Цель настоящей статьи — дать ее краткую характеристику.

Управление и правовая регламентация. Органом федерального управления деятельностью специализированных комбинатов «Радон» является Минстрой РФ. Исключением является МосНПО «Радон», входящее в структуру Департамента инженерного обеспечения правительства Москвы. Кроме того, специализированные комбинаты имеют территориальную подчиненность органам исполнительной власти. Их деятельность финансируется за счет местных бюджетов, а также средств федерального бюджета и поставщиков радиоактивных отходов.

Деятельность специализированных комбинатов «Радон» контролируется территориальными органами (отделениями) Госатомнадзора РФ, Госсанэпиднадзора РФ, министерств экологии и внутренних дел, научно-методическое руководство осуществляется МосНПО «Радон».

Правовая регламентация обращения с радиоактивными отходами содержится в нормативных актах Министерства здравоохранения РФ. Ими в первую очередь являются Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующего излучения (ОСП-72/87) и Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87. Еще один нормативный документ — Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-85). Все эти нормативные требования и положения в части обращения с радиоактивными отходами распространяются на предприятия, учреждения, лаборатории и другие организации, применяющие радиоактивные вещества и другие источники ионизирующего излучения, а также их транспортирующие, перерабатывающие и захоранивающие, независимо от ведомственной принадлежности. Отходы перевозят согласно Правилам безопасности при транспортировании радиоактивных веществ (ПБТРВ-73).

В настоящее время приняты законы «Об использовании атомной энергии» и «Об обращении с радиоактивными отходами», на стадии принятия — закон, регламентирующий радиационную безопасность населения.

Региональные специализированные комбинаты. Проекты действующих специализированных комбинатов разработаны Государственным специализированным проектным институтом (ГСПИ) Минатома РФ. Технология обращения с отходами создана несколькими организациями, среди которых ведущее место занимают ГНЦ РФ ВНИИНМ им. А.А. Бочвара и МосНПО «Радон». Необходимое оборудование изготавливается организациями, имеющими лицензии на данный вид деятельности, по индивидуальным заказам.

Региональные специализированные комбинаты построены по типовому проекту ГСПИ, который периодически обновляется. В зависимости от объема и вида отходов, образующихся в регионе, природно-климатических и геолого-гидрогеологических условий, характеристик эксплуатации в каждом конкретном случае в проект вносятся дополнения и изменения. При этом основные технические решения проекта сохраняются.

По индивидуальному проекту построены основные технические сооружения МосНПО «Радон» и Ленинградского специализированного комбината «Радон».

За каждым комбинатом закреплена зона обслуживания. В целом такое зонирование при проектной мощности позволяет обезвреживать радиоактивные отходы. К середине 70-х годов некоторые комбинаты были частично реконструированы в целях увеличения их мощности и совершенствования материально-технической базы.

Основные технические характеристики региональных специализированных комбинатов и регионы их обслуживания приведены в таблице [2—4]. Необходимо отметить, что примерно 80% отходов, образующихся вне ядерного топливного цикла, собираются в Центральном регионе России в МосНПО «Радон», еще около 18% — в Северо-Западном регионе Ленинградским спецкомбинатом «Радон».

Специализированные комбинаты России

Комбинат	Площадь территории, га	Поступление отходов, до м ³ /год	Переработка	Объем хранилища, м ³	Регион обслуживания
1	2	3	4	5	6
МосНПО «Радон»	35	6000	Сж Пр Бит Цем Очс Мет	Т-188000 Ж-600 И-3,6	Москва, область Московская, Брянская, Владимирская, Тверская, Калужская, Рязанская, Смоленская, Тульская, Ярославская, Костромская.

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6
Ленинградский	22,1	3000	Вып Сж Бит	Т-60460 Ж-4050 И-3	Санкт-Петербург, область Ленинградская, Вологодская, Новгородская, Псковская, Калининградская, Республика Карелия
Мурманский	6	50	Нет	Т-800 Ж-400	Архангельская, Мурманская области
Нижегородский	1,4	25	Очс* Мет*	Т-1280 Ж-400 И-0,2	Республики Коми, Мордва, область Ивановская, Костромская, Кировская, Нижегородская
Грозненский	5	30	Нет	Т-2100 Ж-400 Б-72	Республики Дагестан, Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Чечня
Ростовский	6	20	Нет	Т-650 Ж-200 И-0,4	Край Краснодарский, Ставропольский, область Ростовская
Волгоградский	2	10	Цем* Очс* Мет*	Т-1200 Ж-600 И-0,4	Область Астраханская, Волгоградская, Республика Калмыкия
Саратовский	4	50	Нет	Т-1540 Ж-200 И-0,6	Область Орловская, Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Тамбовская, Пензенская, Саратовская
Казанский	4	20	Цем	Т-400 Ж-200	Республики Марий Эл, Чувашия, Татарстан, Удмуртия
Самарский	1	10	Нет	Т-600 Ж-600 И-0,4	Область Самарская, Ульяновская, Оренбургская
Уфимский	7	10	Нет	Т-400, Ж-200 И-0,2	Республики Удмуртия, Башкортостан
Екатеринбургский	2	150	Цем Мет	Т-5700 Ж-200 И-0,4	Область Пермская, Тюменская, Екатеринбургская
Челябинский	4	50	Нет	Т-1990 Ж-200 И-0,4	Область Курганская, Оренбургская, Челябинская
Новосибирский	20	40	Цем*	Т-1200 Ж-1200 И-0,6	Край Алтайский, Красноярский, область Кемеровская, Омская, Томская, Новосибирская
Иркутский	2,7	10	Нет	Т-600 Ж-600 Б-200 И-0,2	Республики Бурятия, Тува, Саха, область Иркутская, Читинская
Хабаровский	5	60	Нет	Т-1340 Ж-600 И-1,2	Край Приморский, Хабаровский, область Амурская, Камчатская

Примечания. Сж — сжигание; пр — прессование; бит — битумирование; цем — цементирование; очс — очистка жидких отходов; мет — включение источников ионизирующего излучения в металлические матрицы; вып — выпаривание; т — твердые, ж — жидкие, б — биологические отходы; и — радионуклидные источники ионизирующего излучения.

*Работы, выполненные мобильными установками МосНПО «Радон».

МосНПО «Радон». В настоящее время оно обладает всеми современными методами обращения с радиоактивными отходами от сбора и транспортировки до кондиционирования и захоронения, включая мониторинг технологических процессов и окружающей среды. Объем переработки составляет в среднем $6000 \text{ м}^3/\text{год}$ твердых и жидких отходов.

Радиоактивные отходы перевозят транспортного подразделения специальными автомобилями: твердые — автомобилями ОТ-20, снабженными контейнером объемом 3 м^3 , жидкие удельной активностью до 10 мКи/л — автомобилями ОЖ-2М в герметичных емкостях объемом $0,8 \text{ м}^3$, удельной активностью ниже 27 мКи/л — автомобилями ОЖ-10 в герметичных емкостях объемом 3 м^3 . Высокоактивные источники ионизирующего излучения суммарной активностью до 2200 Ки перевозят в защитных контейнерах. Высокоактивные твердые отходы перевозят автомобилем ОТ-31 с прицепом-контейнером из нержавеющей стали, рассчитанным на безопасное транспортирование отходов суммарной активностью до 4 Ки .

Радиоактивные отходы в МосНПО «Радон» сжигают, прессуют, водные растворы очищают.

Начиная с 1983 г. горючие отходы удельной активностью до 1 мКи/кг сжигают в двухкамерной керамической печи «Факел» производительностью 80 кг/ч твердых и 65 кг/ч жидких. Температура в зоне горения печи изменяется в диапазоне $800\text{—}1000^\circ\text{C}$. Коэффициент сокращения объема отходов равен $50\text{—}60$. Печь оснащена многоступенчатой газоочистной системой сухого типа на основе металлотканевого фильтра. Коэффициент очистки в среднем составляет $(1\text{—}5) 10^4$. Конечный продукт сжигания — радиоактивная зола включается в цементную матрицу. В дальнейшем для кондиционирования золы предусматривается высокочастотное индукционное плавление [5].

Негорючие твердые отходы компактируются в бумажных мешках или металлических бочках в горизонтальном гидравлическом прессе, развивающем давление до $4,9 \text{ МПа}$, с коэффициентом сокращения объема $2\text{—}10$. Спрессованные отходы направляются в хранилище для цементирования.

При очистке водных растворов используется система, включающая узел механической очистки на основе сипроновых и керамзитовых фильтрующих элементов, электродиализную установку и узел катионообменной очистки, производительностью $2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ по отходам удельной радиоактивностью $0,05\text{—}0,4 \text{ мКи/л}$ и солесодержанием $0,6\text{—}3 \text{ г/л}$. Очищенная вода подается вновь на технологические нужды, связанные с дезактивацией транспортных средств, оборудования, помещений. Количество образующихся при этом отходов, подвергаемых дальнейшему кондиционированию и захоронению, составляет $0,8\text{—}2,5\%$ объема очищаемой воды. Для очистки водных растворов применяются также передвижные установки модульного типа на базе автомобильного шасси производительностью $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ [6].

Перед захоронением отходы подвергаются дополнительной иммобилизации, целью которой является уменьшение возможности миграции радионуклидов. Для этого применяются следующие основные методы: цементирование, битумирование, остекловывание, включение в металлические матрицы.

Цементируют жидкие отходы удельной радиоактивностью до 370 кБк/л и солесодержанием до 130 г/л либо непосредственно в приповерхностных хранилищах, либо в металлических бочках с дальнейшим их использованием для приготовления раствора при цементировании твердых негорючих отходов. Цементирование проводится с использованием стационарной установки или передвижной высокопроизводительной на базе автомобиля КрАЗ-250, снабженной гидровакуумным перемешивающим устройством производительностью до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В отличие от цементирования битумирование позволяет получить гидролитически стойкие компаунды без увеличения объема отходов. Жидкие радиоактивные отходы соледержанием 300—500 г/л битумируют на установке УРБ-8 производительностью 450—600 л/ч. Основной элемент установки — промышленный пленочный испаритель с поверхностью теплообмена 8 м², работающий при 130—140 °С. Получаемый битумно-солевой компаунд содержит 40—50% по массе солей. При этом скорость выщелачивания отвержденных отходов составляет 10⁻⁴—10⁻⁵ г/(см²·сут).

Остекловывание средне- и низкоактивных отходов является новым перспективным направлением, обеспечивающим наибольшее сокращение их объемов и получение максимально стойких продуктов. Опытное остекловывание радиоактивных отходов начато в МосНПО «Радон» еще в начале 70-х годов. Боросиликатное стекло выбрано в качестве матрицы. Для остекловывания использовали керамический плавитель с прямым джовулевым нагревом производительностью 50 кг/ч по жидким отходам соледержанием 200 г/л. Удельная производительность по стеклу составляет 40—50 кг/(м²·ч), удельные энергозатраты — 3,2—3,4 кВт·ч/кг. Электрическая мощность установки 150 кВт, температура в плавителе 1250 °С.

Остекловывали отходы удельной активностью до 1 мКи/л. Коэффициент сокращения их объема составляет 4,2—4,5. Скорость выщелачивания ¹³⁷Cs из конечного продукта 1,4·10⁻⁵—4,4·10⁻⁶ г/(см²·сут). Всего в керамическом плавителе получено более 10 т стекла, которое размещено на опытном полигоне для долговременного наблюдения и оценки надежности хранения. В настоящее время проводятся пусконаладочные работы новой высокопроизводительной установки остекловывания на базе индукционных плавителей типа «холодный тигель». Число тиглей на промышленной установке три, производительность по стекломассе 75 кг/ч. Предусмотрена возможность получения как боросиликатного стекла, так и различных минералоподобных материалов и стеклокомпозитов для иммобилизации компонентов отходов, малосовместимых со стеклянной матрицей [7].

Отработавшие источники ионизирующего излучения при захоронении в подземные хранилища включаются в металлические матричные материалы. Для этого применяются передвижные установки модульного типа, собранные на базе автомобильного шасси. В качестве матричного материала используются сплавы на основе свинца или загрязненный свинец, направляемый на захоронение в качестве низкоактивных отходов [8].

Кроме сбора, переработки и захоронения проводится обширная научно-исследовательская программа, направленная на усовершенствование известных и разработку новых методов обращения с отходами. Разрабатывается плазменная технология переработки и шахтная плазменная печь для высокотемпературной переработки отходов производительностью до 200 кг/ч с температурой в зоне плавления до 1650 °С, позволяющая расплавить тугоплавкие фракции отходов и получить конечный продукт, пригодный для захоронения [9]. Проводятся исследования по подбору минералоподобных, стеклокристаллических и стеклокомпозиционных материалов для надежной иммобилизации отходов. Проводятся также исследования по мембранным и биотехнологическим методам очистки жидких отходов, термохимическим и биологическим методам переработки органических твердых отходов, электрокинетическим методам очистки грунта. Разрабатываются эффективные методы мониторинга отходов и объектов окружающей среды, проводятся долговременные исследования поведения отвержденных отходов в условиях приповерхностного захоронения.

МосНПО «Радон» работает в тесном сотрудничестве с ведущими институтами и организациями. При этом оно участвует в выполнении национальных и международных программ. Среди национальных можно отметить федеральную программу обращения с отходами, программы оснащения технологическими процессами и установками по переработке радиоактивных отходов АЭС, радиационного мониторинга Мо-

сквы и Московского региона, радиационного мониторинга специализированных комбинатов «Радон», государственную научно-техническую программу «Новые материалы: стекломатериалы для захоронения радиоактивных отходов». МосНПО «Радон» участвует в выполнении программы технической помощи Комиссии Европейского сообщества по модернизации комплекса обращения с отходами и радиационного мониторинга Москвы. Кроме того, совместно с фирмой NUKEM (Германия) оно разрабатывает плазменную установку плавления зольного остатка от сжигания отходов, вместе с фирмами NUKEM и российско-германской Редвест работает над выполнением программы по минимизации жидких отходов на АЭС. С французской фирмой SGN разрабатывается установка остекловывания жидких отходов и ведется разработка плазменной установки сжигания смешанных отходов. С фирмой Martin Marietta (США) разрабатывается технология очистки сточных вод электрокинетическими способами, с фирмой Isotron (США) проводятся исследования по очистке грунта от урана. Вместе с Минатомом России и Австралийским ядерным обществом исследуются матрицы типа синрок для надежной иммобилизации отходов.

Мониторинг и реабилитация территорий. За последние 6—8 лет проведены значительные объемы работ по радиационному обследованию территорий городов и промышленных зон России, в результате чего выявлено немалое количество очагов повышенной загрязненности радионуклидами. Работы по дезактивации территорий выполняются с привлечением региональных специализированных комбинатов. Они также вывозят, обрабатывают и захоранивают радиоактивные отходы. В МосНПО «Радон» разработана высокоэффективная технология снятия загрязненных дорожных асфальтобетонных покрытий [10], разрабатываются способы и установки для дезактивации грунта непосредственно на месте и концентрирования загрязняющих радионуклидов в малом объеме.

МосНПО «Радон» работает над выполнением программ создания системы радиационного мониторинга Москвы и Московского региона, а также радиационного мониторинга специализированных комбинатов «Радон» в России. В период с 1989 по 1992 г. проведено радиоэкологическое обследование специализированных комбинатов для обнаружения их влияния на окружающую среду. Измерения проводили в трех зонах — строгого режима, санитарно-защитной и наблюдения. Измеренная мощность экспозиционной дозы такова, мкР/ч: МосНПО «Радон» 14, специализированный комбинат Казанский 12, Волгоградский, Челябинский 11, Нижегородский 8, Грозненский, Новосибирский 15, Иркутский 13, Самарский, Екатеринбургский, Уфимский 14, Мурманский 9, Саратовский 16, Хабаровский 10. В каждой зоне помимо мощности экспозиционной дозы определяли содержание радионуклидов в пробах почвы, растительности и воды. Статистическая обработка данных позволила с высокой степенью достоверности выявить отсутствие воздействия предприятий на объекты окружающей среды. При доверительной вероятности 0,95 различия в уровне содержания радионуклидов во всех зонах несущественны, т.е. концентрация радионуклидов фактически одинакова [11].

Закключение. Система региональных специализированных комбинатов «Радон» была создана более 30 лет назад и за это время позволила утилизировать радиоактивные отходы промышленных и научных центров страны. Принятая на специализированных комбинатах технология подготовки и захоронения радиоактивных отходов обеспечивает их безопасную локализацию в течение длительного времени. Исследования по оценке влияния пунктов захоронения специализированных комбинатов на объекты окружающей среды показали надежность принятых технических решений.

В настоящее время система региональных специализированных комбинатов испытывает затруднения законодательного, финансового и технического плана. Системе необходима реконструкция и модернизация. Основа последующих решений будет определена законодательной базой и используемыми при этом принципами. Наиболее оптимальным путем модернизации региональных комбинатов является создание на

их основе комплексов по сбору, кондиционированию и временному хранению радиоактивных отходов, образующихся в зоне обслуживания. В настоящее время МосНПО «Радон» приступило к реализации этой концепции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Н.Н. Состояние проблемы с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в России — проблемы и направления решения. Труды совещания МАГАТЭ, Вена, 15—18 мая 1995.
2. Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Соболев И.А., Коренков И.П., Хомчик Л.М., Проказова Л.М. Радиационная безопасность при обезвреживании радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Sobolev I.A., Dmitriev S.A., Barinov A.S. e.a. Management of institutional and industrial radioactive waste in Central Russia. — In: Proc. Intern. Conf. Waste Management'95, Tucson (USA), 1995, CD-ROM.
5. Дмитриев С.А., Лифанов Ф.А., Князев И.А. и др. Некоторые аспекты совершенствования технологии термической переработки горючих радиоактивных отходов и кондиционирования зольного остатка. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 5, с. 304—306.
6. Sobolev I.A., Panteleev V.I., Demkin V.I. Mobile plant for low level radioactive waste processing. — In: Proc. Intern. Conf on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, Prague, 1993, v. 3, p. 775—780.
7. Sobolev I.A., Dmitriev S.A., Lifanov F.A. e.a. Low and intermediate level waste vitrification: basic principles, process units and product characterization. — In: Proc. Intern. Conf. Waste Management'95, Tucson (USA), 1995, CD-ROM.
8. Соболев И.А., Арустамов А.Э., Ширяев В.В. и др. Передвижная установка для включения в металлическую матрицу высокоактивных твердых отходов. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 6, с. 531—533.
9. Technical Rept, Ser. № 223. Vienna: IAEA, 1991.
10. Карлина О.К., Овчинников А.В., Ожован М.И. и др. Исследование возможности дезактивации асфальтобетонных покрытий, загрязненных радионуклидами. — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 4, с. 270—274.
11. Вербов В.В., Польский О.Г., Пузанов Ю.В. и др. Оценка воздействия на окружающую среду предприятий по обращению с радиоактивными отходами. — Там же, 1993, т. 75, вып. 5, с. 389—391.

Поступила в Редакцию 25.09.95

УДК 621.039.533

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

*Амосова Т.В. (Госкоматом, Украина), Козлов В.Ф., Кузьмин И.И.,
Лысцов В.Н. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Махутов Н.А. (ИМАШ РАН),
Меньшиков В.Ф. (Совет Безопасности РФ)*

В 1990 г. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) приняла новые рекомендации по радиационной безопасности, оформленные в виде Публикаций № 60, № 61 [1, 2]. Ими предусматривается оценка только радиационного риска, хотя и отмечается, что такую оценку следует проводить в сравнении с другими видами риска нерадиационного характера. Опыт показал, что невозможно оптимизировать решения по ликвидации последствий аварии путем оценки только радиационного риска, обусловленного аварией [3]. Для того чтобы решения были оптимальны, необходимо учитывать и нерадиационные факторы воздействия на население (экологические, психологические, социальные и др.). Чтобы учесть это обстоятельство, авторы настоящей статьи использовали принцип оценки риска для здоровья человека и состояния окружающей его социально-экономической и природной среды и управлению им в социально-экономической системе, предложенной в работе [4].

Управление риском, связанным с конкретным источником опасности, должно осуществляться с учетом всего совокупного риска для человека, населения и природной среды, обусловленного хозяйственной деятельностью в рассматриваемой социально-