

нологии могут изменять радиационные характеристики отходов лишь на отдельных этапах выдержки и в целом на радиационный баланс существенного влияния не оказывают. Единственное исключение — нельзя допускать, чтобы какой-либо нуклид или элемент полностью оставался в топливе при переработке. Равновесная концентрация продуктов деления достаточно велика (5—10% по отношению к актиноидам), и их накопление существенно изменяет размножающие и воспроизводящие свойства топлива, делая его непригодным для использования. Это обстоятельство ранее не учитывалось в предъявляемых к радиохимической технологии требованиях. Соответственно по результатам настоящей работы в требования внесена корректировка, рекомендуемая оставлять в топливе не более 10% каждого элемента продуктов деления.

Уточнена потенциальная биологическая опасность природного урана, учитывающая дозовые факторы всех членов радиоактивных семейств урановых изотопов. Это уточнение повышает его потенциальную биологическую опасность в 6 раз по сравнению с прежними оценками, что существенно облегчает условия достижения радиационного баланса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.В. и др. Трансмутационный топливный цикл в крупномасштабной ядерной энергетике России. Монография. НИКИЭТ, 1999.
2. Белая книга ядерной энергетики. Под общ. ред. Е.О. Адамова. 1-е изд. М., НИКИЭТ, 1998.
3. Программа Минатома России «Замкнутый топливный цикл широкомасштабной ядерной энергетики на быстрых реакторах с трансмутацией долгоживущих РАО, отвечающий требованиям нераспространения ядерного оружия и радиационной эквивалентности при захоронении радиоактивных отходов». Утверждена 12.07.99.
4. MCNP-4B, Manual. LA-12625M.
5. Forres R., Sublet J. FISPACT 4. User Manual. UKAEA FUS 287, 1995.
6. The European Activation File: EAF-97 Biological and Transport Libraries. UKAEA FUS 354.

Поступила в Редакцию 7.04.2000

УДК 613.649.16

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИАЦИОННО ТОКСИЧНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Билык Н.А., Харин В.И. (ВНИИЭФ)

В связи с широким использованием радиоактивных веществ в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и ядерной энергетике возросли объемы их перевозок всеми видами транспорта при выполнении требований к конструкции упаковочного комплекта и условиям перевозки [1—3].

Радиоактивные вещества представляют опасность для здоровья людей и могут нанести ущерб окружающей среде. В связи с этим становится актуальной оценка безопасности перевозки транспортного упаковочного комплекта с радиоактивными веществами. При этом необходимо учитывать, что перевозка включает в себя все операции, а также условия (нормальные и аварийные), связанные с обращением с радиоактивными веществами: проектирование, изготовление и обслуживание упаковочных комплектов, подготовка, обработка, перевозка, транзитное хранение и приемка в пункте назначения. Радиоактивные вещества могут находиться в жидком, газообразном и твердом состоянии. При транспортировании опасность представляют: ионизирующее излучение с дозой, превышающей допустимый уровень [3, 4];

утечка радиоактивного содержимого в окружающую среду и накапливание на поверхностях транспортных средств, перевозимых грузов, складских помещений, а также одежде, кожных покровах персонала в количестве, превышающем допустимые значения [2, 3];

возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления.

Транспортный упаковочный комплект может включать следующие элементы:

первичную емкость с радиоактивными веществами, исключающую их попадание в окружающую среду при перевозке и хранении;

вторичную емкость — герметизирующий сосуд, исключающую их попадание в окружающую среду в случае аварии;

защитный контейнер — часть упаковочного комплекта, предназначенный для снижения излучения до допустимых уровней.

В аварийной ситуации на транспортный упаковочный комплект действуют механические и (или) тепловые нагрузки, которые могут вызвать нарушение системы герметизации и, как следствие, опасную утечку (потерю) радиоактивных веществ, разрушение (изменение свойств) защитных слоев контейнера, обеспечивающих безопасный уровень излучения, изменение формы упакованного радиоактивного вещества или при затоплении попадание воды в объемы, содержащие радиоактивные вещества, что может обусловить переход системы в надкритическое состояние.

Вероятность возникновения аварийной ситуации $q_{a.c}$ оценивается на основе наблюдения за обращением и транспортировкой. Вероятность возникновения аварии $q_{ав}$ по i -му критерию (утечка, превышение дозы ионизирующего излучения, самоподдерживающаяся цепная реакция) оценивается на основании эксперимента и (или) расчетно-теоретически.

Функции распределения аварийного воздействия и предельного воздействия по i -му фактору оцениваются расчетно-теоретически или экспериментально с привлечением модельных опытов. Вероятность возникновения аварии по i -му критерию определяется по формуле

$$q_i = q_{a.c} q_{ав_i}$$

Утечка радиоактивного содержимого из упаковочного комплекта при аварийном механическом и (или) тепловом воздействии. Вероятность утечки в условиях аварии при транспортировании q_n определяется по формуле

$$q_n = q_{a.c}(q_p + q_r),$$

где q_p — вероятность разрушения внутренних оболочек контейнера; q_r — вероятность нарушения системы герметизации контейнера.

Вероятность утечки радиоактивного содержимого из контейнера при разрушении внутренних оболочек упаковки, обеспечивающих его сохранность, определяется по формуле

$$q_n = 1 - \Pi(1 - q_p)(1 - q_r),$$

вероятность отсутствия утечки —

$$P_n = 1 - q_n.$$

Оценка вероятности разрушения может быть определена по условию

$$q_p = q(\eta_p \leq 1),$$

где η_p — коэффициент запаса, определяемый как отношение предельной нагрузки к действующей в аварийной ситуации.

Прочность (разрушение, нарушение системы герметизации, изменение свойств защитных оболочек) на этапе эскизного проектирования и при лабораторно-конст-

рукторской отработке транспортно-упаковочного комплекта оценивается расчетно-теоретически и экспериментально. В результате оценки прочности конструкции выявляются коэффициенты запаса прочности, заложенные в конструкцию.

При оценке вероятности разрушения контейнера средний коэффициент запаса может быть определен путем единичных испытаний. Упаковочный комплект может быть испытан с коэффициентом запаса, при котором контейнер может как разрушиться, так и нет. В этом случае оценить вероятность разрушения можно по методике [5].

Радиоактивное содержимое в упаковочном комплекте герметизируется путем обжатия прокладок силовыми элементами, например, болтовыми соединениями. Поэтому в аварийной ситуации заданный уровень герметичности будет определяться прочностью силовых элементов. Вероятность нарушения системы герметизации определяется по формуле

$$q_r = q(\eta_r \leq 1),$$

где η_r — коэффициент запаса прочности силовых элементов, обеспечивающих герметизацию контейнера.

Методика оценки показателя надежности не отличается от изложенной и приведенной в работе [5].

Превышение безопасной дозы ионизирующего излучения. При попадании в аварийную ситуацию транспортный упаковочный комплект может сохранить целостность и систему герметизации. Однако при этом может произойти разрушение (изменение свойств) защитных слоев контейнера, обеспечивающих безопасный уровень излучения.

Мощность дозы за радиационной защитой зависит от материала защиты и его толщины [6, 7].

Закон поглощения записывается в виде [7]

$$J = J_0 \exp(-\mu d),$$

где J — интенсивность γ -квантов после прохождения защиты; J_0 — интенсивность γ -квантов до прохождения защиты; μ — линейный коэффициент ослабления; d — толщина защиты.

Материал защиты от ионизирующего излучения зависит от типа перевозимых радиоактивных веществ [1]:

для γ -излучающих — свинец, чугун и другие тяжелые материалы;

для нейтроноизлучающих — парафин или другие водородосодержащие вещества с добавлением бора и кадмия;

для α -, β -излучающих — алюминий, пластмасса, картон и другие материалы малой плотности.

Линейный коэффициент ослабления многослойной защиты приближенно может быть определен, например, как [6]

$$\mu = \sum k_i \bar{\mu}_i,$$

где k_i — количество вещества i -го слоя защиты, выраженное в единицах плотности, г/см³; $\bar{\mu}_i$ — массовый коэффициент ослабления i -го слоя защиты. Таким образом, в общем виде величина μd является функцией нескольких параметров, т.е. $\mu d = f(y_i)$.

Введя новую переменную, получим

$$X = \ln J/J_0 = -f(y_i).$$

Так как в общем случае параметры Y_i случайные, то и функция X является случайной. Параметры распределения случайной функции $X = -f(y_i)$ (среднее значение, среднеквадратичное отклонение или коэффициент вариации) определим, воспользовавшись методом линеаризации функции случайного аргумента [8].

Оценка среднего значения определяется по формуле

$$\bar{X} = -f(\bar{y}_i),$$

коэффициент вариации —

$$w_x = \sigma_x / \bar{x} = \frac{\sqrt{\sum (\partial f / \partial y_i)^2 \sigma_{y_i}^2}}{\bar{x}},$$

где $\bar{y}_i$, σ_{y_i} — среднее и среднеквадратичное значение параметров.

Мощность дозы излучения до защиты I_0 (рад/ч) определяется по специальным методикам. Согласно правилам [2] допустимая норма мощности излучения на поверхности контейнера $I_n = 0,2$ рад/ч. Тогда

$$X_n = \ln I_n / I_0.$$

Вероятность превышения мощности дозы излучения оценим из условия

$$q_n = q_n(x \leq x_n) = q_n(x_n - x \geq 0).$$

В первом приближении предположим, что распределение случайной величины X подчиняется нормальному закону. Тогда вероятность превышения мощности дозы излучения определим по формуле

$$q_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{u_{q_n}}^{\infty} \exp(-t^2/2) dt,$$

$$\text{где } U_{q_n} = \frac{x_n - \bar{x}}{\bar{x} w_x}.$$

Возникновение самоподдерживающейся ядерной реакции в аварийной ситуации при перевозке делящихся веществ. Ядерно опасный делящийся материал должен упаковываться и перевозиться таким образом, чтобы было исключено достижение критической массы как при нормальных условиях перевозки, так и в аварийных ситуациях. Для обеспечения подкритичности делящегося вещества необходимо и достаточно, чтобы эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эф}$, способных поддерживать цепную реакцию деления атомных ядер (делящихся веществ), был меньше 1 с достаточно большой вероятностью в любой аварийной ситуации. Цепная реакция деления ядер должна быть практически не реализуема в любой аварийной ситуации как приводящая к катастрофическим последствиям. В первом приближении можно принять вероятность не превысить коэффициент размножения нейтронов $K_{эф} = 1$ равной 0,999999 (см., например, [9]).

Оценка вероятности отсутствия самоподдерживающейся цепной ядерной реакции может быть проведена при знании закона распределения $K_{эф}$. Предположим, что $K_{эф}$ распределен по нормальному закону со средним коэффициентом размножения в контейнере в аварийной ситуации и его среднеквадратичным отклонением $\sigma_{K_{эф}}$. Тогда вероятность не достигнуть надкритического состояния определяется по формуле

$$P_{ц.п} = 1 - q_{а.с} q_{ц.п}(K_{эф} < 1),$$

где $q_{а.с}$ — вероятность аварийной ситуации с погружением в воду или вероятность изменения формы радиоактивного вещества;

$$q_{ц.п}(K_{эф} < 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_1^{\infty} \exp\left(-\frac{(K_{эф} - \bar{K}_{эф})^2}{2\sigma_{K_{эф}}^2}\right) dK_{эф}.$$

Вероятность отсутствия аварии с радиационным эффектом. В общем случае вероятность отсутствия аварии с радиационным эффектом находится по формуле

$$P = 1 - \prod_j^k \prod_{i=1}^n (1 - q_{a.c_j} q_{ji}),$$

где $q_{a.c_j}$ — вероятность возникновения аварийной ситуации на j -м этапе обращения с радиоактивными веществами; q_{ji} — вероятность возникновения аварии при j -й аварийной ситуации по i -му фактору; n — число учитываемых факторов: утечка радиоактивного содержимого из упаковочного комплекта, превышение мощности дозы облучения, радиоактивное загрязнение поверхности упаковочного комплекта и транспортного средства, а также возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления при перевозке; k — число этапов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных веществ (ПБТРВ-73). М.: Атомиздат, 1974. 104 с.
2. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Вена: МАГАТЭ, 1985. 213 с.
3. Основные правила безопасности и физической защиты при перевозке ядерных материалов ОПБЗ-83. М., ЦНИИатоминформ, 1984. 79 с.
4. Нормы радиационной безопасности НРБ-87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующего излучения ОСП-87. М.: Энергоатомиздат, 1988. 159 с.
5. Билык Н.А., Харин В.И. Оценка показателей надежности и безопасности сложных систем с использованием модифицированного метода линеаризации по единичным испытаниям. — Надежность и контроль качества, 1999, № 3, с. 50—58.
6. Дубровский В.Б., Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений. М.: Стройиздат, 1983. 240 с.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 519 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
9. Гладкий В.Ф. Вероятностные методы проектирования конструкции летательного аппарата. М.: Наука, 1982. 270 с.

Поступила в Редакцию 5.05.2000

УДК 621.039

РАДИОТОКСИЧНОСТЬ И ОСТАТОЧНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ АКТИНОИДОВ И ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ

*Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Киселев Г.В., Мырцымова Л.А.
(ГНЦ РФ — ИТЭФ)*

Обращение с долгоживущими компонентами радиоактивных отходов отработавшего ядерного топлива обуславливает перспективы развития ядерной энергетики. В настоящее время прорабатываются несколько направлений решения этой проблемы. Одной из возможностей является сооружение долговременных контролируемых хранилищ. Другие способы связаны с ядерной трансмутацией отходов. По-видимому, в окончательном виде решение будет сочетать в себе несколько различных подходов. Для определения их правильного сочетания необходимо знать, как важнейшие характеристики радиоактивных отходов изменяются в процессе долговременного хранения.

В статье представлены результаты исследований изменения во времени энерговыделения и радиотоксичности однократной выгрузки отработавшего ядерного топлива