

УДК 621.039-78:539.12.043

В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, Г. А. Сандул

ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования» (ГП «ГНИЦ СКАР»)
 Минэнергоугля Украины, г. Киев

ЗАЩИТНЫЕ БАРЬЕРЫ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ДЕГРАДАЦИИ

Рассмотрены основные причины и факторы деградации инженерных защитных барьеров. На примере контейнера как защитного барьера изучена кинетика системы “контейнер + РАО” с учетом деградации контейнера и распада радионуклидов РАО.

Ключевые слова: защитный барьер, физический защитный барьер, радиационно-опасный объект, система безопасности.

Физические защитные барьеры (ЗБ) различного назначения могут быть подвергнуты разрушению в силу самых различных обстоятельств. Поскольку ЗБ являются одними из важнейших элементов системы общей безопасности (ОБ) [1] радиационно-опасных объектов (РОО), обеспечение их эффективного функционирования является чрезвычайно важной задачей, на решение которой должны быть направлены соответствующие усилия. В этой связи, изучение защитных свойств ЗБ в реальных условиях их функционирования в окружающей среде (ОС) актуально и оправданно.

ЗБ на РОО довольно много [2], они отличаются по назначению, свойствам, характеру функционирования и т. д., однако весьма полезно проанализировать наиболее общие причины их деградации с позиции оправданного оптимизма, не акцентируя внимание на каком-либо конкретном виде ЗБ. При рассмотрении самого общего случая основой такого анализа может служить, например, перечень следующих факторов, от которых зависит эффективность функционирования ЗБ:

1. Качество непосредственно самих ЗБ (проектные решения, строительство или изготовление, материалы и т. д.).

2. Качество их обслуживания (в случае, когда это, в принципе, возможно).

3. Качество (характеристики) радиоактивных материалов (РМ), негативное влияние которых на ОС, включая человека, ограничивает (полностью или частично) ЗБ, естественно, находясь под их влиянием.

4. Качество (характеристики) ОС или ее части, например внешней по отношению к периметру РОО (обозначим ее как $\overline{ОС}$), в которой ЗБ выполняет свои функции.

От этих же факторов в конечном итоге зависит и интегральная деградация ЗБ — $\overline{D}^{ЗБ}$ (деградация — degradation), которую в общем виде можно представить следующей функциональной зависимостью:

$$\overline{D}^{ЗБ}(t) = F [D^{ЗБ}(t), D^{ОБСЛ}(t), D^{РМ}(t), D^{\overline{ОС}}(t), t],$$

где аргументами этой функции служат кинетические зависимости деградации “проектных” свойств самого

барьера, качества его обслуживания, негативного влияния на него РМ и $\overline{ОС}$. При этом закон изменения со временем каждого из аргументов данной зависимости различен.

Прежде всего, следует обратить внимание на то, что данная зависимость существенно нелинейна. Например, деградация “собственных” характеристик ЗБ существенно зависит от качества его обслуживания и влияния на него $\overline{ОС}$. Этот факт в ряде случаев может оказаться принципиальным, поскольку он указывает на то, что процесс деградации ЗБ может стать лавинообразным. К этому необходимо быть готовым, и в проектных решениях должны быть предусмотрены определенные контрмеры и элементы резервирования.

Зная качество ЗБ (совокупность их свойств) и условия функционирования в течение определенного времени (обслуживание, РМ и $\overline{ОС}$), на основе соответствующего анализа можно прогнозировать пути и механизмы деградации их защитных функций, а следовательно, принимать решения по организации соответствующих корректирующих и предупреждающих действий (контрмер).

В настоящей работе рассмотрен ряд наиболее общих причин, лежащих в основе деградации ЗБ.

Анализ перечисленных в пп. 1—4 факторов с точки зрения причин деградации ЗБ говорит о следующем:

- пп. 1, 2 — существенно зависят от человеческого фактора;
- п. 3 — в неявном виде также может зависеть от человеческого фактора;
- п. 4 — человеческий фактор исключить нельзя.

Таким образом, роль человеческого фактора в области создания ЗБ, их эффективной эксплуатации, а следовательно, и деградации, довольно велика, являясь еще одним перспективным направлением исследований, и не только в области ЗБ [3, 4].

Создание ЗБ на РОО необходимо рассматривать как отдельный проект, реализация которого должна осуществляться в соответствии с принципом TQM (Total Quality Management), и отношение к этому про-

екту, по сути дела, является отношением к безопасности РОО. Согласно данному принципу, для успешной реализации любого проекта, в том числе и для создания системы ЗБ или отдельного ЗБ, необходимо управлять всем процессом — от идеи до ее реализации, используя соответствующие ресурсы (финансирование, люди, технологии, материалы и т. д.) и некоторую организационную структуру, которая смогла бы эффективно использовать эти ресурсы.

Вопрос о создании организационной структуры любого предприятия или отдельной системы (подсистемы), например системы ОБ на РОО, подсистемы радиационной безопасности (в рамках системы ОБ), по реализации какого-либо проекта настолько важен, что заслуживает рассмотрения в отдельной публикации. Здесь лишь отметим, что во всех случаях организационная структура должна создаваться на основе функционально-целевой матрицы как элементарной ячейки любой организационной структуры.

Следующей общей причиной деградации ЗБ является нарушение регламента их эксплуатации и отсутствие надлежащего надзора за его выполнением. В этом случае организационные моменты также зависят от человеческого фактора, но они могут быть “промодулированы” событиями, не зависящими от человека. Например, стихийные бедствия или последствия отдаленных во времени антропогенных процессов могут существенно повлиять на ход регламентированной эксплуатации ЗБ.

Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе территории для создания РОО и, естественно, его ЗБ, изучая “исторические особенности” данной территории, используя консервативный подход и опираясь на следующие принципы:

- негативное событие¹, которое произошло на данной территории хотя бы один раз, с некоторой вероятностью может повториться;
- события, которые произошли на иных территориях, подобных данной по сейсмическим, гидрогеологическим, климатическим и другим условиям, могут произойти и на данной территории.

К общим причинам деградации ЗБ можно отнести и недостаток информации о состоянии ЗБ и ОС. Качество мониторинга / контроля состояния ЗБ и его функционирования в ОС (объективная достоверная необходимая и достаточная информация относительно ЗБ и ОС) является основой для принятия решений в области корректирующих и предупреждающих действий. Именно мониторинг / контроль состояния ЗБ и его функционирования (техническое состояние, влияние негативных факторов и т. д.) должен найти свое отражение в соответствующих программах, выполнение которых должно быть подкреплено необходимым ресурсом.

Учитывая некоторые “кризисные моменты” в использовании информации, характерные практически для всех наукоемких областей деятельности, в том числе и для ядерной энергетике, информационная поддержка с использованием компьютерных технологий при управлении данными (комплексная математическая обработка данных результатов наблюдений, их представление, хранение и др.) крайне необходима. Однако создание самой системы информационной поддержки при анализе выполнения ЗБ своих функций также представляет собой чрезвычайно сложную и затратную задачу. Техническая сторона решения этой задачи лежит в плоскости разработки соответствующих алгоритмов действий.

Отметим также, что и качество мониторинга / контроля существенно зависит от человеческого фактора.

К деградации ЗБ может привести и злой умысел, что чрезвычайно актуально в настоящее время, когда общество, прилагая колоссальные усилия для предотвращения широкомасштабных военных конфликтов, не может справиться с терроризмом. В этой связи некоторые ЗБ, в прямом смысле, должны стать барьерами на пути ядерного терроризма. Эта тема затрагивает серьезные вопросы организации общества, роли интеллигенции в нем и научно-технической интеллигенции в частности (идеология технократии), вопросы процессов глобализации, влияния ее на развитие ядерной энергетике и др.

Для того чтобы ЗБ функционировал в соответствии со своим назначением, необходима эффективная организация многих процессов / подпроцессов и их точное согласование: “выход” процесса должен точно совпадать с “входом” последующего процесса. Точное / оптимальное согласование процессов и / или их элементов — одна из серьезнейших задач в технической и даже гуманитарной сфере.

Попытка одновременно удовлетворить многим требованиям часто приводит к конфликту (несовместимости) свойств (характеристик) системы. Вопросам конфликтологии в технике посвящено много работ. Выход один — поиск компромиссов, оптимизация, гармонизация и т. п.

Следующей причиной успешного / неуспешного функционирования ЗБ является планирование процесса их создания и дальнейшей эксплуатации. Специалисты в области планирования (прогнозирования) утверждают, что ни один сколько-нибудь значительный объект нельзя, единожды изначально спланировав, воплотить в жизнь в системе этого плана. Планирование — это постоянный процесс, в котором путем проб и ошибок как раз и достигается компромисс, о котором шла речь выше: от качества планирования зависит качество созданного ЗБ и его функционирование.

Мы рассмотрели далеко не полный перечень наиболее общих причин, которые при любой, самой благоприятной, ситуации всегда будут влиять на функционирование ЗБ. Основная задача состоит в том,

¹ Негативное с точки зрения функционирования системы, в частности ЗБ.

чтобы свести к минимуму негативную компоненту этого влияния.

Таким образом, наряду с природными явлениями человеческий фактор в явном виде или косвенно служит основной “движущей силой” как создания ЗБ, так и причиной их деградации. Это и не удивительно, поскольку ЗБ от идеи до ее воплощения в жизнь является делом рук человеческих.

Как было отмечено ранее, в общем случае ЗБ на РОО достаточно много, все они имеют различные конструктивные решения, изготовлены из различных материалов, обладают различным набором характеристик и т. д. Каждый из них может деградировать по самым различным механизмам. Поэтому рассматривать вероятные механизмы деградации ЗБ имеет смысл лишь для конкретного ЗБ или, в некоторых случаях, для конкретного вида ЗБ. При этом должна быть известна необходимая и достаточная информация об объекте и условиях его функционирования. Однако, как правило, такой информации недостаточно, и задачи решают поэтапно на различных уровнях приближения (в системе различных приближений).

В качестве объекта изучения рассмотрим систему “контейнер + радиоактивные отходы”, где ЗБ является непосредственно сам контейнер, рассчитанный на захоронение, например, среднеактивных долговсуществующих (уровень освобождения от регулирующего контроля около 300 лет) среднеживущих (период радиоактивного полураспада от 10 до 100 лет) радиоактивных отходов (РАО) [5]. Контейнеры, как и другие ЗБ, могут иметь различные конструкции и изготавливаться из различных материалов: железобетона, камень-бетона, композиционных материалов и др. При этом на данном этапе изучения мы не будем рассматривать механизм деградации самого контейнера¹.

Отметим, что понятие “защитный барьер” является не только сложным, но и условным понятием. Например, контейнер для захоронения РАО является ЗБ только в том случае, если в него поместить РАО. Если в контейнере нет РАО, он представляет собой некоторое изделие, которое, в принципе, может долго храниться на складе и разрушаться под действием самых различных факторов, включая человеческий. Следовательно, возникает необходимость в знании предыстории изделий, конструкций, материалов и т. д., которые впоследствии могут быть использованы в качестве ЗБ или для их изготовления (TQM!).

Сформулируем задачу: *изучить кинетику эволюции системы “контейнер + РАО” и определить время t_{max} , когда данная система будет представлять собой наибольшую опасность.*

При этом отметим: наибольшую опасность данная система представляет собой в период наиболее ак-

тивной фазы деградации контейнера-ЗБ при наличии в нем значительного количества нераспавшихся радионуклидов РАО.

Определим граничные условия решения данной задачи (выбор модели).

1. Совершенно очевидно, что со временем контейнер деградирует. Механизм этой деградации достаточно сложный и пока не известен.

Предположим, что контейнер эксплуатируется в соответствии с требованиями технических условий, влияние ОС на контейнер равно нулю, а его обслуживание не предусмотрено регламентом. Такая или очень близкая ситуация реально имеет место, когда контейнер для захоронения РАО помещен, например, в хранилище, где на протяжении установленного срока эксплуатации хранилища можно пренебречь влиянием на него ОС.

Предположим также, что деградация контейнера происходит по двум причинам: естественное старение материалов, из которых изготовлен контейнер (деградация характеристик), и воздействие на него радиационного излучения радионуклидов РАО. При этом радиационное излучение может действовать на контейнер как фактор, стимулирующий процесс его естественного старения, подключаясь на различных этапах данного процесса, так и в качестве “самостоятельного агента влияния”. Для того чтобы разделить эти взаимосвязанные между собой процессы, необходимы серьезные исследования на конкретных материалах, потенциально используемых для изготовления контейнеров. В настоящее время из-за отсутствия в Украине промышленного производства контейнеров такие исследования пока не проводились.

С учетом вышеприведенных рассуждений будем считать, что деградация контейнера зависит от некоторой интегральной причины и происходит со скоростью $a \approx 1/T$, где T — “время жизни” контейнера.

2. Будем считать, что систему “контейнер + РАО” можно рассматривать на основе редукционизма (физикализма) — подхода, допускающего дифференциацию системы (ее процессов) на более простые составляющие элементы, изучение каждого из них в отдельности с последующим обобщающим анализом данных и интеграцией с позиции единого целого.

В системе “контейнер + РАО” будем рассматривать отдельно две подсистемы: контейнер и РАО.

3. Предположим, что РАО, помещенные в контейнер, содержат только один вид радионуклидов, например ^{137}Cs с энергией γ -излучения $E_\gamma = 661,7$ кэВ и периодом полураспада $T_{1/2}$ приблизительно 30 лет.

4. Далее предполагаем, что интегральная скорость деградации контейнера сопоставима со скоростью естественного распада радионуклидов РАО: контейнер полностью не разрушится в первые годы его эксплуатации. Кинетика деградации контейнера в процессе

¹ В данном случае контейнер следует рассматривать как некоторую абстрактную систему.

эксплуатации определяется его наработкой на отказ в течение всего срока службы. Возможные отказы являются ресурсными (уменьшают ресурс контейнера) и носят постепенный характер. Надежность контейнера в процессе эксплуатации определяется показателем его долговечности — сроком службы. Способ задания показателя долговечности¹ T_{cp} :

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt,$$

где $f(t)$ — функция плотности распределения вероятности отказов системы.

Показатель долговечности контейнера T_{cp} в общем случае определяется его собственным старением и некоторыми возмущающими факторами: воздействием радиационного излучения радионуклидов РАО, негативным влиянием ОС и пр. При решении данной задачи мы учитываем лишь два фактора: собственное старение контейнера и действие на него радиационного излучения радионуклидов РАО.

5. Решение задачи ведется на нулевом уровне приближения (“уровень идеологии — демонстрационный уровень”).

Поскольку со временем материал контейнера стареет (естественное старение и деградация под действием радиационного излучения²), характеристики, описывающие его состояние (качество), ухудшаются. Этот процесс, в силу ухудшения свойств контейнера-ЗБ, способствует его деградации D^{3b} и, следовательно, росту опасности D (danger), исходящей от данной системы. Однако, естественный распад радионуклидов РАО со временем приводит к уменьшению активности РАО и, следовательно, к уменьшению опасности, исходящей от рассматриваемой системы.

Таким образом, примем следующую концепцию: эволюция системы “контейнер + РАО” является результатом компромисса двух параллельно протекающих в ней противоположных относительно D процессов, отражающих макрособытия в заданном временном интервале, — увеличение и уменьшение исходящей от данной системы опасности, происходящих со скоростями α и β , соответственно. Соотношения α и β определяют реальную эволюцию системы.

В общем случае при рассмотрении абстрактной системы α и β являются аналогами операторов “рож-

дения” и “уничтожения”, часто встречающимися при решении многих задач физики в области конкурирующих процессов.

Приняв рассмотренную концепцию эволюции системы “контейнер + РАО”, опишем ее математически и проведем анализ решений соответствующих уравнений, сопоставив их с прогнозируемыми (в рамках здравого смысла) результатами.

Согласно выбранной модели будем считать, что подсистема “контейнер”, какой бы совершенной она не была, всегда изначально будет иметь некоторое количество “критических точек” $N(0)=N_0=\text{const}$, потенциально способных, под влиянием естественного старения материала контейнера и действия на него излучения радионуклидов РАО, развиться в систему “центров разрушения” контейнера (“ресурсные отказы”) — $n(t)$, причем $n(0)=0$.

При рассмотрении на макроуровне можно предположить, что центрами N_0 могут служить, например, различные напряжения, возникающие в материале контейнера при его производстве.

Скорость изменения абсолютного значения $n(t)$ определяется скоростью распада радионуклидов РАО — β , в данном случае радионуклида ^{137}Cs , и скоростью генерации центров разрушения контейнера — α .

Кроме того, полагая, что количество “центров разрушения” $n(t)$ в абсолютном значении увеличивается медленно и скорость их генерации настолько медленно изменяется со временем, что ее можно считать постоянной ($\alpha < \beta$ и $\alpha = \text{const}$ — контейнер теряет свой ресурс медленно), будем считать, что центры ресурсных отказов более-менее рассредоточены по контейнеру и, что наиболее важно, между собой не взаимодействуют. Это находит свое отражение в линейном характере уравнений, описывающих данную модель:

$$\begin{cases} \frac{dN(t)}{dt} = -\alpha \cdot N(t); & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \alpha \cdot N(t) - \beta \cdot n(t). & (2) \end{cases}$$

Из (1) следует, что $N(t) = N_0 \exp(-\alpha \cdot t)$;

решение (2) ищем в виде

$$n(t) = C_1 \exp(-\alpha \cdot t) - C_2 \exp(-\beta \cdot t);$$

условие $n(0)=0$ требует равенства $C_1=C_2$.

Решение системы уравнений (1), (2) имеет следующий вид:

$$n(t) = \left(\frac{\alpha \cdot N_0}{\beta - \alpha} \right) \cdot [\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)]. \quad (3)$$

Полученное уравнение в абстрактных терминах α и β представляет собой трансцендентное уравнение, описывающее бесконечное семейство кривых с максимумом, положение которого определяется соотношением α и β . По сути, данное уравнение, является

¹ Могут быть и другие способы, например показатель долговечности можно задать с помощью γ -% срока службы (T_γ) — календарной продолжительности эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельно-допустимого состояния с вероятностью γ , выраженной в процентах [6,7].

² В рассматриваемом случае мы ограничиваемся только этими двумя факторами разрушения контейнера, хотя реально существуют и другие факторы.

упрощенним уравнением Колмагорова. Суть такого упрощения состоит в равенстве показателя степени t единице ($t^n \equiv t$ при $n=1$), где n — параметр, описывающий (отображающий) особенности структурной организации системы.

Исследуем полученное решение:

производная функции $n=n(t)$ равна нулю ($n'(t)=0$) при критическом значении аргумента, равном $t_k = \ln(\alpha/\beta)/(\alpha - \beta)$;

условием максимума функции $n=n(t)$ является $n''(t) < 0$, что выполняется при $\beta > \alpha$.

Таким образом, время максимальной опасности системы “контейнер + РАО” также определяется соотношением констант скоростей процессов, соответствующих деградации контейнера и распада радионуклидов РАО. Причем, по соображениям “целесообразности”, скорость процесса разрушения контейнера должна быть существенно меньше, чем скорость распада радионуклидов РАО, т. е. контейнер должен быть настолько совершенным, чтобы процесс его разрушения был как можно более медленным. Последнее обстоятельство следует рассматривать как некоторую особенность поведения данной системы. Иные контейнеры просто нельзя использовать: при их изготовлении образцы контейнеров (выборочно) должны быть подвергнуты испытанию на предмет ускоренного состаривания на специальных стендах по соответствующим программам.

Вернемся к более конкретным значениям скоростей процессов α и β .

Предположим, что $\alpha = 1/T_{cp}$, а значение β задано формулой, описывающей закон радиоактивного распада: $A(t) = A_0 \cdot \exp(-0,693 \cdot t/T_{1/2})$, где A_0 — начальное количество распадающегося вещества при $t=0$; $T_{1/2}$ — период полураспада вещества, следовательно, $\beta = 0,693/T_{1/2}$.

При этом уравнение (3) будет иметь следующий вид:

$$n(t) = \left[\frac{N_0}{\left(\frac{0,693 \cdot T_{cp}}{30} - 1 \right)} \right] \times \left[\exp\left(-\frac{t}{T_{cp}} \right) - \exp\left(-\frac{0,693 \cdot t}{30} \right) \right]. \quad (4)$$

Таким образом, $D = \eta \cdot n(t)$, где η — коэффициент, устанавливающий связь между опасностью, исходящей от системы “контейнер + РАО”, и ее эволюцией (в данной работе для простоты значение коэффициента η принято равным 1).

На рис. 1 представлены графики, отражающие кинетику поведения системы “контейнер + РАО” при различных значениях T_{cp} , характеризующих качество контейнера.

Из графиков видно, что чем совершеннее контейнер-ЗБ, тем меньше опасность D , которая исходит от данной системы, и t_{max} , отождествляемое с критическим состоянием системы t_k (т. е. состоянием, когда система представляет собой наибольшую опасность), отодвигается на более далекое время. По сути дела, при $T_{cp} = 400$ лет данная система после 300 лет, когда радионуклиды РАО уже распались, представляет собой опасность лишь наличием самого контейнера.

В результате, рассматривая существенно упрощенную модель, мы получили очевидный и ожидаемый результат. Но при этом мы получили и соотношение (формулу), куда входят некоторые параметры, характеризующие данную систему, что позволяет, варьируя эти параметры в рамках их конкретных значений, проводить анализ системы и ее оценку. Данный подход следует воспринимать лишь как инструмент для решения некоторых конкретных задач.

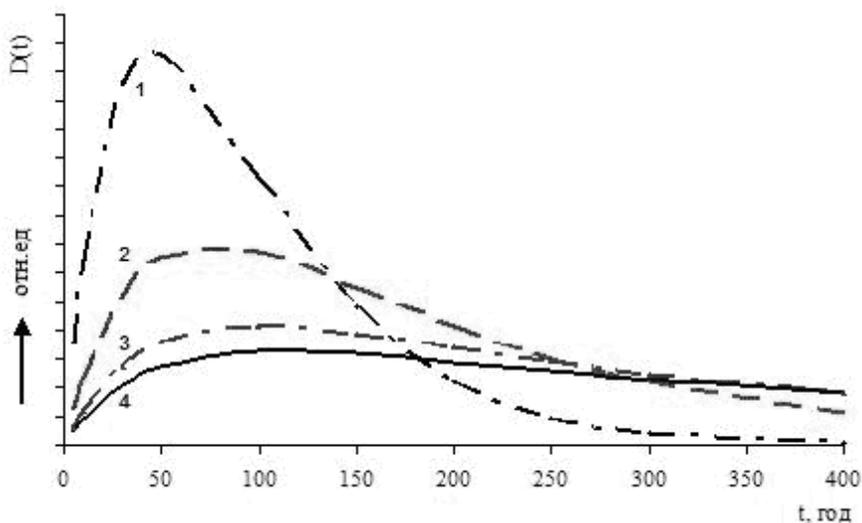


Рис. 1. Кинетика поведения системы “контейнер + РАО” (РАО содержат один изотоп ^{137}Cs):
1 — $T_{cp} = 50$ лет; 2 — $T_{cp} = 150$ лет; 3 — $T_{cp} = 300$ лет; 4 — $T_{cp} = 400$ лет

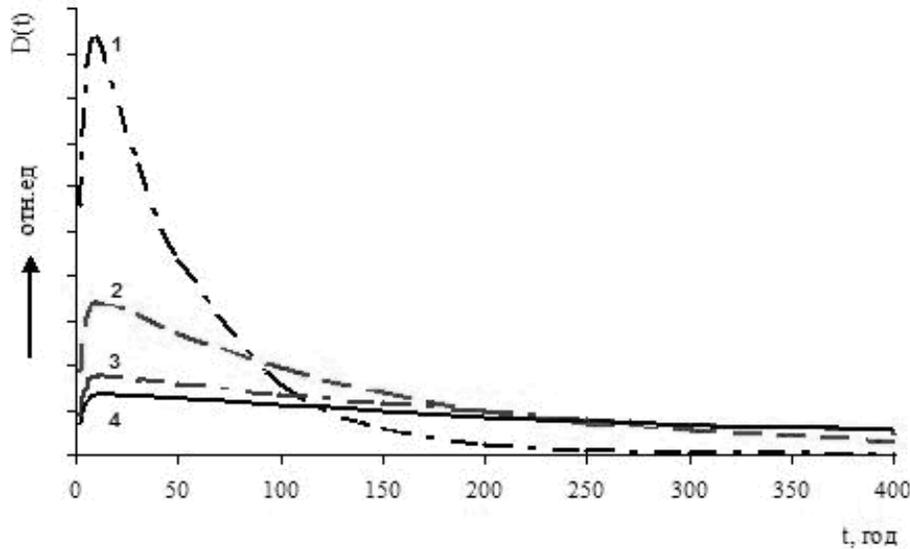


Рис. 2. Кинетика поведения системы “контейнер + РАО” (РАО представляют собой гомогенную смесь изотопов ^{137}Cs и ^{134}Cs):
1 – $T_{cp}=50$ лет; 2 – $T_{cp}=150$ лет; 3 – $T_{cp}=300$ лет; 4 – $T_{cp}=400$ лет)

Рассматривая процессы, происходящие в системе “контейнер + РАО” на более реальной основе, можно развить данную модель, предположив, например, что находящиеся в контейнере РАО содержат несколько видов радионуклидов с различными периодами полураспадов. Тогда β можно представить следующим образом:

$$\beta = 0,693 \cdot \sum_{i=1}^n 1/(T_{1/2})_i,$$

где $i=1, 2, \dots, n$ — количество видов радионуклидов РАО, находящихся в контейнере.

На рис. 2 приведен случай, когда контейнер содержит РАО, в составе которого находятся радионуклиды, значительно отличающиеся периодом полураспада, например изотопы цезия ^{134}Cs ($T_{1/2}=2,06$ года) и ^{137}Cs ($T_{1/2}\approx 30$ лет). Видно, что система представляет собой наибольшую опасность в первые годы эксплуатации контейнера.

На рис. 3 показан случай, когда в контейнере присутствуют РАО, содержащие радионуклиды, близкие по периоду полураспада: ^{137}Cs и ^{90}Sr ($T_{1/2}\approx 30$ лет).

Из рисунка видно, что максимум значений функции $D(t)$ в этом случае смещается в область более ранних времен эксплуатации контейнера по сравнению со случаем наличия одного изотопа ^{137}Cs .

Можно также рассмотреть ситуацию, когда в контейнере будут находиться радиоактивные вещества, претерпевающие дальнейшие радиоактивные превращения. Например, актуальным может оказаться случай, когда, наряду с радионуклидами цезия и стронция, РАО содержат изотоп плутония ^{241}Pu , который с периодом полураспада около 14 лет переходит в америций ^{241}Am , обладающий довольно жестким α -излучением приблизительно в 5,5 МэВ. При этом условно через 300 лет, когда хранилище РАО или его часть (контейнеры) будут сняты с регулирующего контроля и данная территория или ее участок будут считаться безопасными, на самом деле здесь будут находиться α -излучатели.

Конечно, не обязательно, чтобы именно эти процессы как-то существенно влияли на эволюцию системы “контейнер + РАО” в плане разрушения контейнера, однако знание их расширяет наши представления о вероятных событиях при захоронении РАО в контейнерах-ЗБ и о безопасном обращении с РАО в целом.

Известно, что был период (50-е годы прошлого века), когда в США захоранивали РАО, содержащие изотопы стронция и цезия, в картонных коробках (правда, это происходило на хранилище в штате Невада, где выпадает очень мало осадков). Был даже курьезный случай: инспектор провалился в одну из таких картонных коробок¹.

Повышая уровень приближения к реальным условиям эксплуатации системы “контейнер + РАО”, мы получаем более сложный результат, но он дает больше возможностей для анализа поведения данной системы в течение всего срока ее эксплуатации.

Систему “контейнер + РАО” следует считать некоторой моделью. Вместо контейнера может быть иной ЗБ со своими защитными функциями, свойствами и т. д. В дальнейшем данную модель можно уточнять с учетом ее особенностей.

Систему “контейнер + РАО” следует считать некоторой моделью. Вместо контейнера может быть иной ЗБ со своими защитными функциями, свойствами и т. д. В дальнейшем данную модель можно уточнять с учетом ее особенностей.

¹ Частное сообщение на лекции, посвященной обращению с РАО в США.

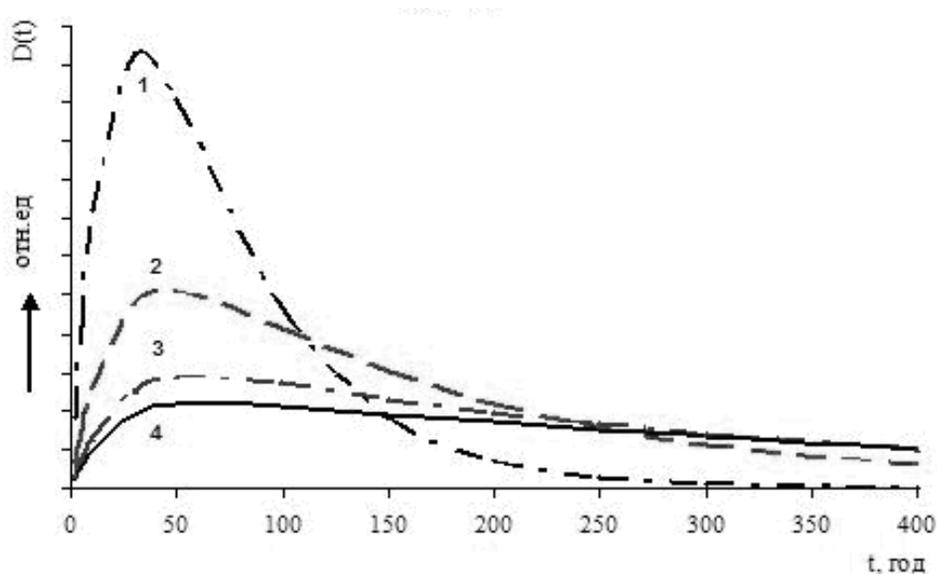


Рис. 3. Кинетика поведения системы “контейнер + РАО” (РАО представляют собой гомогенную смесь изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr):
 1 – $T_{cp}=50$ лет; 2 – $T_{cp}=150$ лет; 3 – $T_{cp}=300$ лет; 4 – $T_{cp}=400$ лет

Рассматривая причины разрушения ЗБ, нельзя, хотя бы вкратце, не остановиться на основных последствиях такого явления.

Одним из наиболее негативных последствий разрушения ЗБ является попадание радионуклидов в окружающую среду с последующей их миграцией вглубь почвы и по ее поверхности.

При миграции радионуклидов вглубь почвы существует вероятность того, что радионуклиды за счет дождевых вод или сезонных промерзаний почвы и последующего оттаивания смогут попасть в водоносные слои и далее в подземные воды к стокам рек. Этот процесс зависит от многих факторов, касающихся как свойств почв, в которых происходит миграция радионуклидов, так и непосредственно самих радионуклидов (растворимость в воде, ионное взаимодействие радионуклидов в различных средах и т. д.).

Миграция радионуклидов в приповерхностном слое почвы также представляет собой большую опас-

ность, например при ветровом переносе увеличивает область радиоактивного загрязнения, включая воздушное пространство, в частности зону дыхания человека (порядка 2 м от поверхности земли). Мигрируя в приповерхностном слое, радионуклиды могут захватываться корневой системой растений и далее попадать в стебли и плоды, которые, в свою очередь, могут служить продуктами питания как для животных, так и для человека. Эти “цепочки” довольно хорошо изучены [8—10]. Таким образом, кроме внешнего облучения, радионуклиды являются источниками внутреннего облучения организма человека и животных.

Вопросам миграции радионуклидов в окружающей среде (теоретические и экспериментальные исследования) посвящено огромное количество работ, часть которых сосредоточена в отраслевых документах, касающихся эксплуатации предприятий по обращению с РАО (“Отчет по анализу безопасности”) и АЭС (“Вероятностный отчет по анализу безопасности”).

Список использованной литературы

1. Сандул Г. А. Организация системы безопасности при эксплуатации хранилищ для захоронения радиоактивных отходов. Общие вопросы / Г. А. Сандул // Ядерна та радіаційна безпека. — 2008. — Вип. 3 — С. 35—44.
2. Защитные барьеры в ядерной энергетике: общие вопросы, классификация / В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, Г. А. Сандул, О. Н. Шевцова // Ядерна енергетика та довілля. — 2013. — № 1. — С. 31—37.
3. Бегун В. В. Анализ и учет человеческого фактора Чернобыльской аварии 26 апреля 1986 года современными методами / В. В. Бегун, В. Н. Васильченко // Ядерная и радиационная безопасность. — 2003. — Вып. 1. — С. 52—60.
4. Глаголева М. А. Роль человеческого фактора в обеспечении безопасности в ядерной энергетике. 1: Понятийно-категориальный аппарат / М. А. Глаголева, Г. А. Сандул // Ядерная и радиационная безопасность. — 2002. — Вып. 4. — С. 11—18.

5. ДГН 6.6.1.-6.5.061-2000. Державні гігієнічні нормативи. Норми радіаційної безпеки України. Доповнення: радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). — К., 2000.
6. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. — 96 с.
7. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. — 90 с.
8. Тюркканова Э. Б. О миграции стронция-90 и цезия-137 в почвах / Э. Б. Тюркканова. — М.: Гос. комитет по использованию атомной энергии СССР, 1972. — 14 с.
9. Прохоров В. М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах / В. М. Прохоров. — М.: Энергоиздат, 1981. — 100 с.
10. Геохимия техногенных радионуклидов / Под ред. Э. В. Собоновича, Г. Н. Бондаренко. — К: Наук. думка, 2002. — 332 с.

Получено 25.02.2013