

В. Н. Васильченко¹, Я. А. Жигалов¹,
А. В. Носовский², Г. А. Сандул¹

¹ГП «Государственный научно-инженерный центр систем контроля и аварийного реагирования», г. Киев, Украина

²ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Киев, Украина

Защитные барьеры в ядерной энергетике: некоторые сценарии деградации системы «контейнер + радиоактивные отходы»

На примере изучения кинетики системы «контейнер + РАО» рассмотрены сценарии локального разрушения железобетонного контейнера как защитного барьера, а в рамках сценариев — механизмы образования центров локального разрушения в материале контейнера, содержащего радиоактивные материалы, с учетом его конструктивных особенностей, стохастического и нестохастического характера процессов разрушения. Проведено математическое моделирование временной деградации системы «контейнер + РАО» в процессе ее эксплуатации и выполнен анализ полученных решений для двух граничных оценок: если скорость перехода центров потенциального разрушения во вторичные центры разрушения существенно меньше скорости образования фактических центров разрушения и, соответственно, если первая скорость значительно превышает вторую.

Ключевые слова: контейнер, защитный барьер, радиоактивные отходы, ядерная энергетика.

В. М. Васильченко, Я. А. Жигалов, А. В. Носовський, Г. О. Сандул

Захисні бар'єри в ядерній енергетиці: деякі сценарії деградації системи «контейнер + радіоактивні відходи»

На прикладі дослідження кінетики системи «контейнер + РАО» розглянуто сценарії локального руйнування залізобетонного контейнера як захисного бар'єра, а в рамках сценаріїв — деякі механізми утворення центрів локального руйнування в матеріалі контейнера, який містить радіоактивні матеріали, з урахуванням його конструктивних особливостей, стохастичного та нестохастичного характеру процесів руйнування. Проведено математичне моделювання деградації в часі системи «контейнер + РАО» впродовж експлуатації та виконано аналіз отриманих результатів для двох граничних оцінок: якщо швидкість переходу центрів потенційного руйнування у вторинні центри руйнування істотно менша за швидкість утворення фактичних центрів руйнування і, відповідно, якщо перша швидкість значно перевищує другу.

Ключові слова: контейнер, захисний бар'єр, радіоактивні відходи, ядерна енергетика.

©В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, А. В. Носовский, Г. А. Сандул, 2013

Система «контейнер + радиоактивный материал», независимо от конструктивных особенностей контейнера и помещенных в нем радиоактивных материалов (РАМ), наиболее широко используется в различных технологиях по обращению с РАМ (обращение с радиоактивными отходами в ядерной энергетике, различные исследования и т. д.) [1]. Поскольку в данной системе контейнер представляет собой типичный защитный барьер (ЗБ), обеспечивающий радиационную безопасность, он, вполне заслуженно, является объектом пристального внимания.

Очевидно, что контейнер, как и любой другой ЗБ, должен удовлетворять как минимум трем основным требованиям:

– представлять собой ЗБ с четко установленным уровнем защитных функций, т. е. препятствовать распространению (ослаблять распространение) радионуклидов радиоактивных отходов (РАО) и их излучений в четко установленном интервале их значений;

– с точки зрения надежности, обладать регламентированной долговечностью: его «собственные» (проектные) характеристики должны обеспечивать (в определенных пределах) соответствующие установленные показатели долговечности;

– выполнять защитные функции в реальных условиях эксплуатации с учетом воздействия на него внешней окружающей среды (ОС) и радиационных воздействий радионуклидов РАО, помещенных внутрь контейнера.

Кроме того, все характеристики контейнера должны отвечать как требованиям технологического процесса, так и соответствующим требованиям (документам) в отношении общей безопасности: общепромышленной и радиационной.

Для реализации этих требований при создании различных ЗБ, в том числе и контейнеров, необходимо решить ряд общих фундаментальных (общих для различных барьеров) и частных задач в области прогнозирования их защитных функций.

В ранее опубликованной статье [2], наряду с обсуждением общих вопросов по ЗБ, рассматривался вопрос и о кинетических особенностях системы «контейнер + РАО». В данной работе речь идет о контейнерах для захоронения долгосуществующих (уровень освобождения РАО от контроля со стороны органа государственного регулирования достигается через 300 и более лет после их захоронения) среднеживущих (период полураспада радионуклидов РАО от 10 до 100 лет) РАО [3].

При рассмотрении кинетических особенностей системы «контейнер + РАО» авторы вполне сознательно отказались от обсуждения механизмов разрушения «типового» контейнера из-за отсутствия данных как о механизмах его старения, так и о соответствующих механизмах взаимодействия, например, γ -излучения РАО с конкретными материалами, предполагаемыми для использования их при производстве контейнеров.

В связи с отсутствием промышленного производства контейнеров в Украине, в настоящее время практически не проводятся системные целенаправленные исследования материалов, перспективных для их изготовления. Отсутствие соответствующих материаловедческих данных не позволяет выполнять какие-либо расчеты с целью оценки качества контейнеров: их надежности, долговечности, устойчивости к тем или иным возмущениям и пр.

Однако, исходя из самых общих соображений, рассмотрим более детально некоторые вероятные пути (сценарии) деградации контейнеров во время их эксплуатации. При этом, заведомо упрощая ситуацию, исключим из рассмотрения влияние на контейнер ОС, предположив, что кон-

тейнеры находятся в хранилище, условия хранения их стабильны и соответствуют регламенту. Считаем, что даже в такой системе приближений наши рассуждения, которые в большей степени влияют на постановку задачи, чем на ее решение, могут быть весьма полезны для того, чтобы более четко представить себе все проблемы, которые обязательно возникнут при рассмотрении ряда задач относительно конструирования и эксплуатации контейнеров.

Некоторые сведения о конструкционных материалах, применяемых при изготовлении контейнеров для хранения РАО. Один из наиболее распространенных материалов для изготовления контейнеров — железобетон. Железобетоном называют систему, состоящую из металлических конструкций и (или) металлического скрапа (в качестве добавок) в сочетании с бетоном.

Бетон, в современном понимании [4], представляет собой довольно сложный композиционный материал, свойства которого существенно зависят от рецептуры и точности ее соблюдения, технологии приготовления и др. В общем случае на макроуровне бетон представляет собой смесь песка, наполнителя (щебень разных размеров и другие материалы), цемента и воды. Соотношение двух последних элементов, так называемое водоцементное соотношение, является чрезвычайно важным, поскольку именно оно определяет многие свойства бетона, например его ползучесть или пластическое состояние, характеризующее время до окончательного затвердевания.

Цемент, в свою очередь, также представляет собой смесь из известняка, глинозема и различных добавок, сплавленных в печах до клинкера, который затем перемалывают в порошок (цемент как готовая товарная продукция). В производстве бетона цемент играет роль клея, образующегося при наличии воды (процесс гидратации). В настоящее время основными «изюминками» в производстве бетона служат его наполнители и добавки к цементу.

Технология приготовления бетона с наперед заданными свойствами представляет собой достаточно сложную задачу, тем более, когда речь идет о тоннажном его производстве. Именно технология приготовления бетона определяет его пористость, т. е. количество образующихся пор в 1 см^3 и их размеры; условия и время затвердевания, обеспечивающие однородность его свойств, отсутствие напряжений в готовых изделиях, и т. д. Огромное значение имеет и технология работы с готовым бетоном, например время и способы его доставки к месту производства изделия.

При использовании бетона для производства контейнеров необходимо обращать внимание на климатические условия, при которых эти контейнеры будут эксплуатироваться. Например, для климатической зоны, в которой находится 30-километровая зона отчуждения (Украинское полесье)*, к важным характеристикам бетона относятся те, которые маркируются индексами F и W:

индексом F (цифровые обозначения — от 25 до 1000) характеризуется морозостойкость бетона — количество циклов замораживания и размораживания, при которых бетон сохраняет свои регламентированные усредненные прочностные характеристики;

индексом W (цифровые обозначения — от 2 до 20) характеризуется водонепроницаемость бетона.

Материалы, из которых изготовлены контейнеры, и технология их производства в значительной степени

* Эти характеристики важны, практически, на всей территории Украины.

определяют качество самих контейнеров, а они, в свою очередь, являются объектом бизнеса для некоторых стран (например, Болгарии, США). Поэтому подобные сведения в открытой печати не публикуют.

Отметим также, что железобетонные контейнеры для захоронения РАО, по сравнению с другой продукцией, например строительной, обладают некоторой спецификой: они должны служить ЗБ, препятствующим распространению радионуклидов РАО или их излучений в ОС на протяжении нескольких сотен лет без ремонта, что должно накладывать определенный отпечаток на отношение к данной продукции. В этой связи еще раз акцентируем внимание на отсутствие промышленного производства контейнеров и соответствующих научных исследований в Украине при наличии миллионов кубометров РАО, образовавшихся только после катастрофы на Чернобыльской АЭС.

В данной работе рассмотрим железобетонный контейнер, стенки, дно и крышка которого армированы стальной конструкцией. В подавляющем большинстве случаев** эта конструкция представляет собой сварную (электродная сварка) стальную систему с диаметром арматуры 8—10 мм.

Процесс сварки приводит к двум эффектам: образованию грата (наплыв металла вблизи места сварки) и каверны (выгорание металла в местах сварки с образованием ямки). Оба эти эффекта приводят к изменению структуры металла в месте сварки и соответствующим напряжениям.

Можно предположить, что места сварки арматуры, помещенной в щелочную*** среду бетона, изначально представляют собой первичные центры потенциального разрушения контейнера (скрытые центры разрушения) $N_0(t)$, которые с течением времени со скоростью α' переходят во вторичные центры его разрушения $N'(t)$, обусловленные, например, химическими и (или) электрохимическими процессами, происходящими при взаимодействии различных сред (щелочной среды бетона с металлом), скорее всего, в местах его сварки. Именно эти локальные вторичные центры сами по себе или под действием излучения радионуклидов РАО могут стать реальными источниками разрушения контейнера. Поскольку срок службы контейнера, определяемый показателем его долговечности $T_{\text{ср}}$ (среднее время службы контейнера), рассчитан на более чем 300 лет, образование упомянутых центров как потенциальных источников разрушения не вызывает особого сомнения.

Для уменьшения вероятности возникновения центров разрушения металлическую арматуру покрывают специальными составами, а также применяют другие технические приемы, используя при изготовлении арматуры специальные сплавы стали, вводя в бетоны антикоррозионные добавки и т. д. Однако принципиально это не решает проблему.

При производстве контейнеров в качестве металлического скрапа чаще всего используют стальные шарики, проволоку, обрезки стального лома, арматуру.

Для справки отметим, что способность бетона поглощать γ -излучение зависит от его плотности, которая может колебаться от 2,1 до 6,6 т/м^3 . Наибольшая плотность получается при использовании в качестве наполнителя железного скрапа, наименьшая — песка и гравия.

** Авторам известен только один случай, когда такая конструкция выполнена без сварки, с использованием проволочной скрутки отдельных деталей арматуры: контейнеры ББ-куб фирмы Бал-Бок Инжиниринг, Болгария.

*** Предположительно, поскольку в клинкере всегда присутствуют оксиды калия и натрия.

Кроме того, добавками могут служить различные химические соединения, например соединения, поглощающие γ -излучение (экранирующий эффект), такие как барит ($3\% \text{ BaCO}_3$), гематит (Fe_2O_3) и др.

Краткое описание характера процессов разрушения материала контейнера при его эксплуатации. Не конкретизируя материал контейнера, по поводу его разрушения можно высказать лишь некоторые версии. Однако все вероятные события, очевидно, могут развиваться по сценариям, которые способны радикально изменить защитные функции контейнера в ходе его эксплуатации несмотря даже на благоприятные обстоятельства его эксплуатации на начальном этапе. Здесь речь идет о характере процессов разрушения контейнера: стохастическом или нестохастическом.

Предположим, что процесс перехода скрытых центров разрушения во вторичные центры разрушения $N(t) \xrightarrow{\alpha'} N'(t)$ имеет стохастический (беспороговый) характер и при этом центры реального разрушения $n(t)$, возникающие как под действием, условно, старения материала контейнера, так и под действием излучения радионуклидов РАО, накапливаются довольно медленно. В этом случае процесс разрушения контейнера также происходит медленно и плавно, отодвигаясь на более далекий срок; следовательно, опасность D системы «контейнер + РАО» уменьшается.

Далее предположим, что процесс перехода $N(t) \xrightarrow{\alpha'} N'(t)$ нестохастический и при достижении определенного порога значений $N'(t)$ он становится лавинообразным. Если этот порог достигается достаточно быстро, то не исключено, что основной вклад в разрушение контейнера может дать процесс чисто механического разрушения, естественно, сопровождаемый (поддерживаемый), но не стимулированный, радиационным излучением РАО. Этот явно негативный вариант событий, способствующий быстрому разрушению контейнера, требует тщательного экспериментального изучения на предмет выявления вероятных лавинообразных механизмов разрушения контейнера и разработки определенных упреждающих мер по его созданию.

Лавинообразный характер процесса разрушения контейнера предугадать довольно сложно. Он может возникнуть на различных этапах превращения одних центров разрушения в другие: $N(t) \rightarrow N'(t)$ и $N'(t) \rightarrow n(t)$ как при участии γ -квантов, так и без их участия. При этом будем считать, что $n(t)$ — явные (реальные) интегральные центры разрушения контейнера, которые пока нельзя идентифицировать.

Из вышеизложенного следует, что нестохастический (наличие порога) характер процесса разрушения контейнера опасен при любом сценарии его разрушения, поскольку, во-первых, способствует лавинообразному процессу разрушения и, во-вторых, вносит существенную неопределенность, не позволяя с необходимой и достаточной степенью прогнозировать выполнение ЗБ своих функций.

Таким образом, даже при элементарном рассмотрении вероятных сценариев разрушения контейнеров возникают проблемы, для разрешения которых необходимы серьезные материаловедческие исследования в области кинетики естественного и стимулированного, например γ -излучением, старения их при различных условиях эксплуатации. К сожалению, данные о таких исследованиях авторам не известны.

Приведенный перечень вероятных процессов, влияющих на кинетику поведения системы «контейнер + РАО» в плане разрушения контейнера, далеко не полный и требует существенных уточнений. Другими словами, для того,

чтобы быть уверенным в выполнении контейнером, т. е. ЗБ, установленных функций, необходимо решить комплекс задач, соответствующих различным аспектам их проектирования, изготовления и функционирования в реальных условиях.

Обсуждая вопросы о степени выполнения контейнером (ЗБ) защитных функций, прежде всего, нужно остановиться на вопросах мотивации проведения работ по оценке защитных свойств контейнеров, т. е. способности выполнять декларируемые разработчиками защитные функции.

Обоснованием таких работ могут служить, например, данные многолетних наблюдений (научно-технические отчеты, Россия; частные сообщения* специалистов по обращению с РАО, США), из которых следует, что со временем (десять лет) на внешней стороне железобетонных контейнеров (система «контейнер + РАО») возникает некоторая «активность», имеющая тенденцию к увеличению со временем. Данные о характеристиках контейнеров и захороненных в них РАО не приведены, но это не столь важно. Прежде всего, имеет значение сам факт появления на внешней стороне контейнера «активности», который свидетельствует о деградации защитных свойств контейнера. Как уже говорилось, деградация контейнеров в основном обязана двум взаимосвязанным процессам: естественному старению материала контейнера с учетом реальных условий его эксплуатации и воздействию на него радиационного излучения РАО.

Поскольку контейнеры рассматриваемого класса рассчитаны на срок эксплуатации более 300 лет, было бы не вполне корректно приводить какие-либо количественные данные относительно характеристик системы «контейнер + РАО» в последние столетия ее функционирования. Что же касается качественных оценок данной системы, то они таковы: на внешней стенке контейнера «активность» может увеличиваться до некоторого максимального значения, после чего начнется медленный спад, связанный с естественным радиоактивным распадом радионуклидов РАО. В конце этого спада могут быть еще пики «активности», связанные с какими-либо существенными областями разрушения контейнера.

Если система «контейнер + РАО» находится в хранилище, т. е. имеются дополнительные ЗБ [5], рассмотренный эффект может быть и не актуален, а если контейнеры расположены на открытой площадке (хранилище ТРО-1 («Вектор»), Украина; Хмельницкая АЭС, Украина; АЭС «Козлодуй», Болгария и др.), то актуальность данного эффекта очевидна.

Математическое моделирование кинетических особенностей поведения системы «контейнер + РАО» и анализ результатов. Сформулируем задачу: *изучить кинетику системы «контейнер + РАО» с учетом некоторых конструктивных особенностей контейнера.*

Из-за отсутствия конкретных материаловедческих данных и данных о технологии изготовления хотя бы одного конкретного модельного ряда контейнеров точно решить эту задачу не представляется возможным. Однако, как это обычно принято в таких ситуациях, можно приблизить ее решение, более подробно изучив, например, сведения о методах решения подобных задач и в какой степени они приемлемы, полноте имеющихся данных, корректности используемых модельных представлений и т. д. Другими словами, для решения данной задачи вначале необходимо

* Лекции по обращению с РАО.

создать некоторое «пространство», способствующее ее решению. При этом сама задача является частью такого пространства и, следовательно, необходимо изучать как свойства и характеристики данного пространства (например, его экономический аспект), так и структуру самой задачи.

На нынешнем этапе прежде всего необходимо понять природу процесса (или совокупности процессов) поведения рассматриваемой системы, описать его, пусть даже в терминах очевидных представлений, и на базе соответствующих решений получить возможность проведения его анализа. В любом случае, чтобы решить какую-либо задачу, ее необходимо обсуждать. В ходе такого обсуждения и идет поиск путей решения.

Поскольку нас интересуют кинетические особенности поведения системы «контейнер + РАО», для решения поставленной задачи воспользуемся хорошо развитым аппаратом описания кинетики различных процессов.

Аналогично тому, как это было сделано в предыдущей работе [2], рассмотрим как частный случай некоторые граничные условия решения данной задачи и проведем их анализ.

1. Предположим, что при изготовлении железобетонного контейнера со сварной арматурной конструкцией в нем изначально присутствуют скрытые центры разрушения N_0 , т. е. при $t = 0$ количество данных центров $N(0) = N_0 = \text{const}$. Примем, что количество N_0 соответствует количеству сварных узлов в арматуре контейнера.

Примем, что размер контейнера составляет $3,0 \times 3,0 \times 3,0$ м, толщина стенки — 15 см; размер сварной конструкции, находящейся между внутренней и внешней стенками контейнера и относящейся к одной из его сторон, — $2,9 \times 2,9 \times 0,1$ м, размер ячейки сварной конструкции — $0,1 \times 0,1$ м.

Учитывая размеры сварной конструкции, только одна ее плоскость ($2,9 \times 2,9$ м) имеет около 900 мест сварки (сварных узлов), а ведь сама конструкция является параллелепипедом; следовательно, только в одной стенке контейнера больше 2000 сварных узлов. Таким образом, стальная сварная конструкция в стенках, дне и крышке контейнера имеет более 12 000 мест сварки ($N_0 > 12000$).

Разумеется, вместо сварных узлов можно использовать переплетение элементов арматуры, но создание такой сетки требует специальной технологии и соответствующего оборудования. Кроме того, необходимо еще изучить устойчивость (жесткость) «переплетенной» конструкции, например при перемещении контейнера.

Возвращаясь к реально используемой сварной конструкции, отметим, что центры потенциального разрушения контейнера рассредоточены равномерно по всей толщине его стенок, дна и крышки. Кроме того, они расположены вблизи внешней и внутренней поверхности контейнера на глубине до 3 см. При этом нельзя забывать, что, даже находясь в хранилище, внешняя сторона контейнера, как и весь контейнер, подвержена влиянию ОС (сезонные колебания температуры т. д.), а внутренняя — еще и облучению радионуклидами РАО.

С одной стороны, равномерность распределения потенциальных центров разрушения контейнера по всему объему можно рассматривать в некотором смысле как положительное явление, поскольку маловероятно, что они будут взаимодействовать между собой и объединяться в макроцентр разрушения.

С другой стороны, контейнер начинает разрушаться точечно по всему объему и, что очень важно, с обеих сторон (внешней и внутренней) по встречному направлению.

Нетрудно себе представить, какому высокому уровню качества должен соответствовать контейнер, который должен служить защитным барьером в течение 300–400 лет.

2. Далее предположим, что процесс перехода потенциальных центров разрушения N_0 во вторичные центры разрушения $N'(t)$ происходит со скоростью α' (скорость генерации центров $N'(t)$) без участия γ -квантов радионуклидов РАО, а процесс перехода вторичных центров $N'(t)$ в центры реального разрушения $n(t)$ происходит со скоростью β при их участии. Отметим также, что протекающие процессы — процессы первого порядка по концентрации образующихся центров и, кроме того, образовавшиеся центры не релаксируют в исходные центры.

Данные последовательные процессы перехода соответствуют следующей схеме:



потенциальных в промежуточные вторичные центры разрушения) происходит всегда, даже при отсутствии РАО в контейнере;



шения (т. е. переход вторичных центров в центры реального разрушения) происходит под действием γ -излучения радионуклидов РАО.

Последовательными будем называть такие процессы, при которых продукт первого процесса является реагентом последующего.

3. Равно как и в [2], предположим, что РАО, помещенные в контейнер, содержат только один вид радионуклидов — изотоп ^{137}Cs с энергией γ -излучения $E_\gamma = 661,7$ кэВ и периодом полураспада $T_{1/2} \approx 30$ лет.

4. Поскольку механизмы образования рассматриваемых центров разрушения и превращения их друг в друга не известны, решение задачи, как и в [2], носит демонстрационный характер, но, как было указано в формулировке задачи, с учетом конструктивных особенностей контейнера.

5. При решении данной задачи, как и в [2], применяем метод редуционизма, рассматривая отдельно кинетику изменения центров $N(t)$ и N' с последующим обобщением относительно центров $n(t)$.

Предполагаем, что такой подход в дальнейшем позволит рассмотреть данные процессы на уровне физико-химических взаимодействий, влияющих на процессы разрушения контейнера (системы «бетон + металлическая арматура»).

6. В данном случае под словосочетанием «разрушение контейнера» подразумевается не тотальное разрушение контейнера как целостного изделия, а локальные разрушения, которые со временем (сотни лет) и при неблагоприятных или критических условиях его эксплуатации могут привести и к полному разрушению контейнера.

В соответствии с вышеприведенной схемой составим систему уравнений и опишем данный процесс:

$$\left\{ \begin{aligned} dN(t) / dt &= -\alpha' N(t); & (1) \\ dN'(t) / dt &= \alpha' N(t) - \beta N'(t). & (2) \end{aligned} \right.$$

Процесс образования $n(t)$ при протекании двух рассмотренных выше последовательных процессов, описанных системой уравнений (1) и (2), когда плотность потока γ -излучения радионуклидов РАО достаточно велика и постоянна, можно представить линейной комбинацией

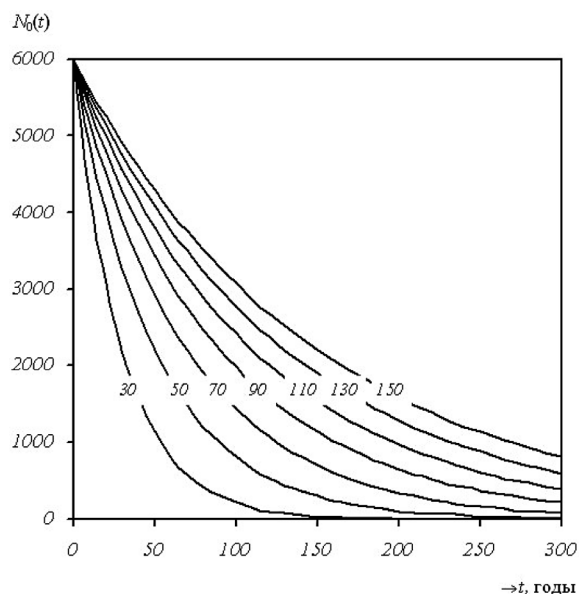


Рис. 1. Кинетика первичных скрытых центров разрушения $N_0(t)$ в процессе превращения их во вторичные центры $N'(t)$ при различных скоростях процесса $\alpha' = 1/T$, где $T = \{0; 30; 50; 70; 90; 110; 130; 150\}$ лет

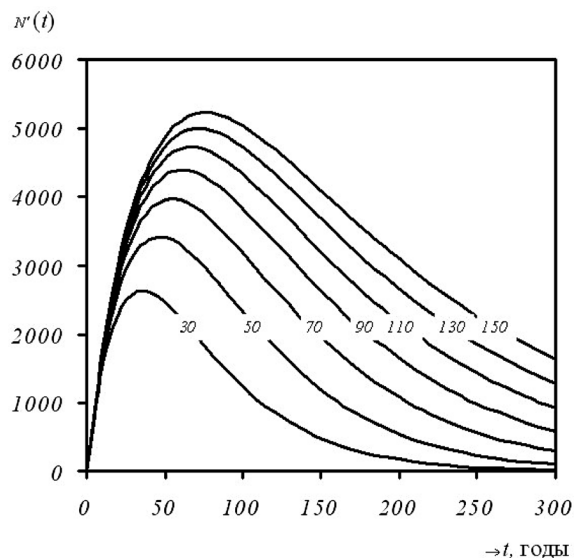


Рис. 2. Кинетика вторичных центров разрушения $N'(t)$ в процессе их образования и превращения в центры $n(t)$ при различных скоростях процесса $\alpha' = 1/T$, где $T = \{0; 30; 50; 70; 90; 110; 130; 150\}$ лет

данных уравнений. При этом β (скорость генерации центров $n(t)$) настолько медленно изменяется со временем, что ее можно считать постоянной.

Вначале решим данную систему уравнений.

Уравнение (1) представляет собой уравнение с разделяющимися переменными, решение которого можно представить в следующем виде:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \alpha' dt \quad \text{или} \quad \ln(N/N_0) = -\alpha' t,$$

откуда

$$N(t) = N_0 \exp(-\alpha' t). \quad (3)$$

Решение уравнения (2), аналогично [2], ищем в виде

$$N'(t) = C_1 \exp(-\alpha' t) - C_2 \exp(-\beta t).$$

При этом условии $N'(0) = 0$ требует равенства $C_1 = C_2$. Решение системы уравнений (1) и (2):

$$N'(t) = \frac{\alpha' N_0}{\beta - \alpha'} [\exp(-\alpha' t) - \exp(-\beta t)]. \quad (4)$$

С учетом нормировочного соотношения $N_0 = N(t) + N'(t) + n(t)$, имеем

$$n(t) = N_0 - N(t) - N'(t) \quad \text{или}$$

$$n(t) = N_0 - N_0 \exp(-\alpha' t) - \frac{\alpha' N_0}{\beta - \alpha'} [\exp(-\alpha' t) - \exp(-\beta t)].$$

После соответствующих преобразований получим

$$n(t) = N_0 \left[1 + \frac{1}{\beta - \alpha'} (\alpha' e^{-\beta t} - \beta e^{-\alpha' t}) \right]. \quad (5)$$

Данное выражение описывает кинетику генерации центров реального разрушения контейнера при заданной выше последовательности их образования.

Проведем анализ полученных решений.

В нашей модели общее количество центров разрушения ограничено числом скрытых центров разрушения N_0

(ресурсные отказы ограничены числом сварных узлов). При этом уравнение (3) описывает монотонное убывание центров N_0 , (4) — «рождение» и «уничтожение» промежуточных центров разрушения N' , а (5) — увеличение макроцентров реального разрушения $n(t)$. Конечный результат всех этих процессов существенно зависит от скорости развития каждого из них.

На рис. 1—3 можно проследить кинетику этих процессов по отдельности при различных скоростях α' развития процесса перехода $N(t) \xrightarrow{\alpha'} N'(t)$. При этом α' , скорость генерации центров $N'(t)$, можно представить как $1/T$, где T — время, в течение которого совершается полный переход $N(t) \rightarrow N'(t)$, т. е. время, когда $N_0 = 0$.

Процесс перехода $N'(t) \rightarrow n(t)$ в соответствии с принятой моделью связан с воздействием γ -излучения радионуклидов РАО на контейнер, и β , как и в [2], можно взять из формулы, описывающей закон радиоактивного распада $A(t) = A_0 \exp(-0,693t/T_{1/2})$. Для изотопа ^{137}Cs скорость данного процесса $\beta = 0,693/30 \approx 0,023$.

Кроме того, наиболее вероятно, что поток γ -излучения радионуклидов РАО сможет воздействовать лишь на ту плоскость сварной конструкции, которая находится вблизи внутренней стороны контейнера. Это означает, что при образовании центров $n(t)$ в качестве N_0 необходимо учитывать лишь $N_0/2$, т. е. $N_0/2 = \bar{N}_0$. Другая половина центров N_0 , находящихся вблизи внешней стороны контейнера, также будет переходить в центры N' с вероятным последующим переходом в центры $n(t)$ или другие центры $n'(t)$, но уже без участия γ -квантов. Природа же центров $n(t)$ и (или) других центров $n'(t)$ в данной работе не обсуждается.

Из приведенных на рис. 1—3 графиков видно, что в рамках принятой модели наиболее реальны события преобразования акцентированных центров, соответствующие значениям скоростей, которые лежат в интервале значений T от 30 до 70 лет.

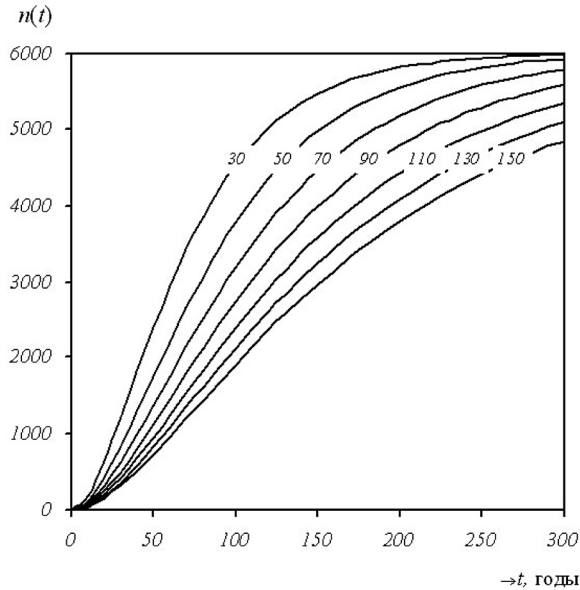


Рис. 3 Кинетика генерации центров реального разрушения $n(t)$ (суммарный процесс) при различных скоростях процесса $\alpha' = 1/T$, где $T = \{0; 30; 50; 70; 90; 110; 130; 150\}$ лет

Отметим, что при этих значениях времени полного перехода центров N_0 в N' , поток γ -излучения остается довольно интенсивным, и изменением его за счет естественного распада радионуклидов РАО можно пренебречь.

С учетом процесса естественного распада радионуклидов РАО количество центров реального разрушения n со временем будет падать, но уже во время более отдаленное, чем, например, 200 лет.

На рис. 4 эти процессы рассмотрены вместе, например, для скорости α' , соответствующей значению $T = 50$ лет.

Из графика на рис. 4 следует, что даже в данной, весьма упрощенной модели уже через 100–150 лет локальных разрушений контейнера может оказаться достаточно, чтобы начался процесс его тотального разрушения.

Анализируя полученные решения, рассмотрим их граничные значения.

1. Пусть $\alpha' \gg \beta$. Тогда, полагая, что $e^{-\alpha't} \rightarrow 0$, имеем

$$N'(t) = \bar{N}_0 e^{-\beta t}; \quad n(t) = \bar{N}_0 (1 - e^{-\beta t}). \quad (6)$$

При этом $dn(t)/dt = \bar{N}_0 \beta e^{-\beta t}$ или $dn(t)/dt = \beta N'$.

Таким образом, при данных условиях реальное разрушение контейнера за счет γ -излучения определяется скоростью β процесса $N'(t) \xrightarrow{\gamma, \beta} n(t)$. Иными словами, количество центров N' растет быстро и, если придерживаться постулированной нами системы последовательных процессов, то, действительно, процесс разрушения будет определяться скоростью β . Однако вряд ли центры N' , находящиеся в избытке и не являющиеся объектом воздействия со стороны γ -излучения, будут оставаться в «замороженном» состоянии и не будут в дальнейшем участвовать в процессе разрушения контейнера. Есть все основания предположить, что в данных условиях может развиваться и параллельный(е) процесс(ы), например $N'(t) \xrightarrow{\beta'} n(t)^*$ без участия γ -излучения.

* Очевидно, что это могут быть центры, отличные от центров, образованных за счет γ -излучения.

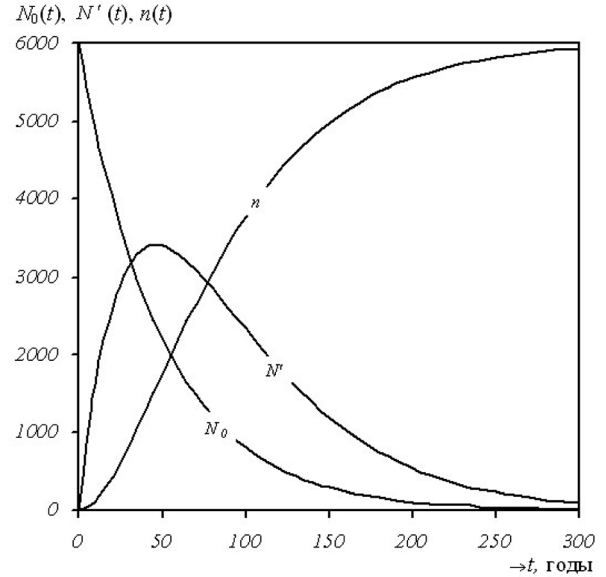


Рис. 4. Кинетика поведения потенциальных центров разрушения $N_0(t)$, вторичных (промежуточных) центров разрушения $N'(t)$ и центров реального разрушения $n(t)$ при скорости процессов $\alpha' = 1/T$, где $T = 50$ лет

Этот (эти) процесс(ы) может развиваться самостоятельно или стимулироваться различными факторами: повышением или понижением температуры ОС (сезонные колебания температуры, влага, промерзание и т. д.); физическими нагрузками (деформация контейнера под нагрузкой), если контейнеры стоят на открытой площадке друг на друге в несколько рядов**, и т. д.

Таким образом, при $\alpha' \gg \beta$ не исключена вероятность

того, что различные процессы разрушения контейнера будут происходить параллельно.

2. Пусть $\alpha' \ll \beta$. Тогда, полагая, что $e^{-\beta t} \rightarrow 0$, имеем

$$N'(t) = \frac{\alpha'}{\beta} \bar{N}_0 e^{-\alpha't}. \quad (7)$$

Разложив экспоненту в ряд, получим $N'(t) = \frac{\alpha'}{\beta} \bar{N}_0 \times (1 - \alpha't + \dots) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow 1/\alpha'$. Это означает, что в системе данных процессов количество промежуточных центров чрезвычайно мало; они не успевают накапливаться, т. е. скорость их генерации практически равна скорости «уничтожения» за счет перехода в центры разрушения $n(t)$. Такой процесс называют квазистационарным, поскольку скорость изменения абсолютного значения данных центров практически равна нулю ($dN'/dt \approx 0$).

Аналогично рассмотрим кинетику центров реального разрушения $n(t)$. Уравнение (5) при данном соотношении скоростей имеет следующий вид: $n(t) = \bar{N}_0 \alpha' t$, т. е. абсолютное значение количества центров разрушения $n(t)$ будет определяться скоростью α' процесса $N_0(t) \xrightarrow{\alpha'} N'(t)$.

В заключение напомним, что направленность нашей аналитической работы в значительной степени лежит в плоскости, способствующей постановке конкретных

** В закрытых хранилищах РАО между контейнерами находится плотный слой засыпки [4], который препятствует горизонтальным подвижкам контейнеров в штабеле и увеличивает прочность системы в целом, хотя давление на нижерасположенные контейнеры сохраняется.

задач с заданным целевым назначением их решения в области создания контейнеров — ЗБ. Приведенный анализ призван создать некоторую, вполне наглядную, «понятийную» базу для решения такого рода задач.

Выводы

Рассмотрев кинетику системы «контейнер + РАО» с учетом типичных конструктивных особенностей контейнера, можно сделать следующие выводы:

— сварная конструкция, помещенная внутрь корпуса железобетонного контейнера, существенно увеличивает риск разрушения контейнера и утраты им своих защитных функций;

— прогноз защитных функций железобетонного контейнера, в традиционном его исполнении, существенно затруднен;

— в том случае, если невозможно обойтись без сварных металлических конструкций и нельзя существенно уменьшить число точек сварки N_0 , такие контейнеры следует использовать только в соответствующих хранилищах, где существуют дополнительные ЗБ [5]. В этой связи становится совершенно очевидным, что необходимо искать альтернативные варианты как материалу, из которого изготавливают контейнеры (железобетон), так и самой технологии их изготовления.

Для разработчиков контейнеров можно сформулировать следующие фундаментальные взаимосвязанные задачи:

1. Разработка показателей качества для определенных классов контейнеров, удовлетворяющих установленным требованиям с учетом характеристик захораниваемых в них РАО.

При этом необходимо опираться на классификацию РАО и критерии приема РАО на захоронение, которые разрабатываются в соответствии с [6] отдельно для каждого хранилища, например для специально оборудованного приповерхностного хранилища твердых радиоактивных отходов (СОПХТРО).

2. Поиск новых композиционных материалов для производства контейнеров (разного класса), которые бы удовлетворяли соответствующим показателям качества.

Без системных экспериментальных исследований продвижение в данной области будет чрезвычайно затратным, а в некоторых случаях вообще невозможным. Настало время, когда необходима интервенция идей.

Отдельно хотелось бы отметить, что, кроме указанных первичных центров потенциального разрушения контейнера N_0 , отождествляемых с местами сварки, существуют и другие первичные скрытые центры разрушения. Эти центры возникают, например, на поверхностях контейнера, поскольку любая поверхность, ограничивая некоторую среду, характеризуемую удовлетворяющими нас физическими свойствами, приводит к нарушениям этих свойств и образованию различных дефектов на поверхности конечного изделия, например микротрещин.

Кроме того, существуют первичные скрытые центры разрушения и вдоль границ областей с различной плотностью бетона, обусловленные различным временем его застывания (затвердевания), что, естественно, также связано с поверхностью изделия: процессы затвердевания бетона в объеме и на поверхности отличаются друг от друга. И это далеко не полный перечень вероятных скрытых центров потенциального разрушения контейнеров.

Поскольку вопросы о вероятных механизмах разрушения бетона как материала, из которого изготовлены контейнеры, и влияния на эти процессы факторов ОС (условия эксплуатации контейнеров) чрезвычайно важны, мы намерены рассмотреть их в следующих публикациях.

Приведенные аргументы подтверждают, насколько сложно прогнозировать поведение рассматриваемой системы «контейнер + РАО» в течение длительного срока ее эксплуатации, а коллективно насаждаемый оптимизм в отношении создания контейнерного парка и отсутствие его вот уже в течение 25 лет, без создания базы соответствующих научных знаний, только отодвигает время решения данной проблемы.

Список использованной литературы

1. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними / А. А. Ключников, Э. М. Пазухин, Ю. М. Шигера, В. Ю. Шигера. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2005.— 486 с.
2. Васильченко В. Н. Защитные барьеры в ядерной энергетике: основные причины деградации / В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, Г. А. Сандул // Ядерна енергетика та довкілля. — 2013. — № 1. — С. 38–45.
3. Норми радіаційної безпеки України. Доповнення: радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000). Державні гігієнічні нормативи ДГН 6.6.1–6.5.061–2000. — К., 2000
4. Будівельне матеріалознавство / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарьова, В. Б. Барановський, М. О. Кочевих, Ю. Г. Гасан, Б. Я. Константи́нівський, В. О. Ракша. — К. : ТОВ УВПК «ЕксОб», 2004. — 704 с.
5. Защитные барьеры в ядерной энергетике: общие вопросы, классификация / В. Н. Васильченко, Я. А. Жигалов, Г. А. Сандул, О. Н. Шевцова // Ядерна енергетика та довкілля. — 2013.— № 1. — С. 31–37.
6. РД 306.4.098–2004. Рекомендації щодо встановлення критеріїв приймання кондиційованих радіоактивних відходів на захоронення в приповерхневих сховищах. — Затвердж. наказом ДКЯРУ № 160 від 25.10.2004.

References

1. Klyuchnikov A. A., Pazukhin E.M., Shygera Yu. M., Shygera V. Yu. Radioactive waste of NPP and methods of radwaste management / Institute for safety problems of nuclear power plants (ISP NPP) of national academy of sciences of Ukraine. — Chernobyl, 2005. — 486 p. (Rus)
2. Vasylychenko V. N., Zhygalov I. A., Sandul G. A. Protective barriers in nuclear power: general causes degradation // Yaderna enerhytyka ta dovkillya (Nuclear power and the environment). — 2012. — № 1. — P. 38–45. (Rus)
3. Radiation safety standards of Ukraine. Addendum: radiation protection from the sources of potential irradiation. (NRBU-97/D-2000). State hygienic standards DGN 6.6.1–6.5.061–2000. — Kyiv, 2000. (Rus)
4. Kryvenko P. V., Pushkaryova K. K., Baranovsky V. B., Kochevykh M. O., Gasan Yu. G., Kostantynivsky B. Ya., Raksha V. Science of building materials. — Kyiv: TOV UVPK «EksOb», 2004. — 704 p. (Rus)
5. Vasylychenko V. N., Zhygalov I. A., Sandul G. A. Protective barriers in nuclear power: general questions, classification // Yadernaenerhytyka ta dovkillya (Nuclear power and the environment). — 2012. — № 1.— P. 31–37. (Rus)
6. RD306.4.098–2004. Branch normative document of Ukraine. Recommendations for establishing of the acceptance criteria for conditioned radioactive waste disposal in the near-surface repositories. — Approved by order of State nuclear regulatory inspectorate of Ukraine № 160, 25.10.2004. (Rus)

Получено 11.10.2013.