

ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСНОГО УЧЕТА ПРОЦЕССОВ ЭВОЛЮЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ БАРЬЕРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ЗА ПРЕДЕЛЫ ОБЪЕКТА

Д. В. Крючков, К. А. Болдырев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 30 октября 2019 г.

В статье рассматриваются принципы и подходы к оценке безопасности объектов на примере применения современного разрабатываемого расчетного средства DESTRUCT, учитывающего разнообразие процессов, происходящих при эволюции системы инженерных барьеров безопасности и предназначенного для прогнозирования выхода радионуклидов из ближней зоны анализируемого объекта.

Ключевые слова: пункт хранения радиоактивных отходов, радиоактивные отходы, захоронение, вывод из эксплуатации, расчетное моделирование, инженерные барьеры безопасности, эволюция, миграция, комплексный анализ безопасности.

Введение

Современный подход к оценке безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) предполагает рассмотрение изменения их свойств с учетом всех процессов, важных для оценки динамики распространения радионуклидов сквозь каскад барьеров. Это определяет необходимость комплексного анализа динамики внутренних свойств материалов, включая их взаимовлияние.

Такой подход реализуется созданием расчетных средств комплексного анализа свойств ИББ для прогнозирования их деградации и распространения радионуклидов за пределы исследуемого объекта.

Особенности описания эволюции барьеров безопасности

Общая схема формирования интегральной модели (ИМ) прохождения загрязнителя сквозь каскад эволюционирующих барьеров безопасности представлена на рис. 1. На приведенной схеме отражена возможность образования новых удерживающих барьеров в результате деградации уже существующих, а также влияния свойств агрессивной среды в результате их разрушения на скорость деградации последующих [1].

С целью обоснованного подхода к расчетам и подготовке исходных данных при разработке принципов формирования ИМ необходимо



Рис. 1. Блоковая схема ИМ распространения радионуклидов сквозь каскад ИББ с учетом их временной деградации

выделить перечень наиболее важных процессов и характеризующих их параметров и свойств.

Основными материалами, применяющимися при создании пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов, являются бетоны на основе портландцемента, сталь, бентонит, стекломатрицы различного состава для иммобилизации отходов класса 1, матрицы на основе цемента для иммобилизации других классов.

При создании ИМ преобразования материалов необходимо учитывать влияние физико-химических процессов на свойства материалов.

1. Коррозия металлоконструкций.

На скорость коррозии металлоконструкций влияют:

- химический состав металла (внутренние свойства барьера);
- химический состав окружения, в котором находится металлический барьер, и состав контактирующего с ним водного раствора;
- температура.

В разработанном ИБРАЭ РАН программном расчетном комплексе (ПК) DESTRUCT используются подходы, основанные как на экстраполяции литературных значений скоростей коррозии, так и на численном расчете скорости коррозии [1].

Коррозия металлических конструкций элементов изолирующих контейнеров приводит к потере ими гидроизолирующих свойств, но в то же время продукты коррозии формируют новообразованные барьеры и оказывают существенное влияние на иные материалы, что должно быть учтено при расчете миграции.

2. Деградация бетонных барьерных материалов.

Долговечность материала на основе портландцемента (бетон) зависит, прежде всего, от его структуры, химического состава, а также от условий среды. Согласно классификации разрушения бетона по Москвину, коррозия бетономатериалов разделена на три основных типа:

- процессы растворения основных составляющих цементного камня (при фильтрации воды сквозь бетон сначала выносятся легкорастворимые гидроксиды натрия, затем кальция);
- образование подвижных продуктов коррозии, которые ослабляют структуру цементного камня (а также могут быть вынесены с потоком фильтрующейся воды);

• образование в массиве цементного камня, в его порах, трещинах и капиллярах продуктов взаимодействия составляющих бетона с фильтрующейся водой, которые обладают большим объемом и могут приводить к его разрушению.

Таким образом, для создания корректной модели переноса сквозь материалы на основе бетона в свете описанных выше процессов реализуется следующая последовательность действий:

- описание вида бетона, оценка его механических и физических свойств;
- создание модели разрушения бетона во времени с учетом физических, биологических, химических преобразований;
- определение переносимых из источника радионуклидов, выбор оптимальных моделей сорбции и осаждения (для редокс-чувствительных элементов, а также элементов, которые могут образовать труднорастворимые минеральные фазы при их прохождении сквозь бетонный барьер);
- финальный прогноз с оценкой переноса и построением временной зависимости миграции через барьер.

3. Изменение бентонита во времени.

Эволюция бентонитового барьера может протекать по нескольким сценариям:

- изменение минерального состава бентонита (например, в процессе иллитизации, хлоритизации или цементации бентонита продуктами коррозии металлических материалов);
- изменение сорбционных и водно-фильтрационных свойств бентонита вследствие изменения химического состава подземных вод;
- параллельное протекание вышеуказанных сценариев.

Наиболее неблагоприятный процесс для бентонита — иллитизация монтмориллонита при воздействии высоких температур. Иллит обладает более низкими гидроизолирующими и сорбирующими свойствами по сравнению с монтмориллонитом. Благоприятные для развития этого процесса факторы — высокая температура и высокая концентрация калия в контактирующем растворе.

Согласно проведенным ранее многочисленным исследованиям, при температурах ниже 110 °С иллитизация монтмориллонита вообще

не происходит, по этой причине считается, что иллитизация бентонита в хранилищах с температурой менее 110 °С может быть исключена из рассмотрения [2].

4. Изменение стекломатрицы.

При растворении стекломатрицы наблюдается несоответствие состава раствора составу растворяющейся твердой фазы. Это объясняется образованием твердых продуктов гидролиза стекла и выпадением в осадок малорастворимых соединений. Так, при растворении боросиликатного стекла растворимые ионы кремнекислоты переходят в раствор, а на поверхности стекла остаются малорастворимые оксигидроксиды металлов составляющих матрицы.

На скорость растворения стекломатрицы существенное влияние оказывают температура, кислотность, а также химический состав раствора.

Приведенный спектр рассматриваемых изменений свойств материалов учитывается при решении методом камерного моделирования системы уравнений, описывающих распределение поллютанта в выделенных объемах (камерах) исследуемого пространства, ограниченного барьерами безопасности объекта.

В общем случае на элементы системы мультибарьерной защиты влияют не только внутренние механизмы эволюции составляющих ее элементов, но и внешняя среда, характеризующаяся непостоянными свойствами. В связи с этим, с целью корректного учета внешних факторов, необходимо рассматривать не только изменяющиеся со временем свойства материалов, но и внешние по отношению к системе барьеров граничные условия. Так, в частности, в случае наличия в системе радиоактивных компонентов при прогнозировании переноса загрязнителя учитывается изменение их концентраций, связанное с радиоактивными превращениями.

Математически задача камерного моделирования распространения загрязнителя формулируется в виде системы линейных дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентрации веществ в объемах (камерах) рассматриваемого пространства. В общем виде данная система выглядит таким образом:

$$\frac{dI_i^m}{dt} = - \left(L_r^m + \sum_i L_{i,j} \right) I_i^m + L_r^{m+1} I_i^{m+1} + \sum_j L_{j,i} I_j^m, \quad (1)$$

где: I — концентрация (количество) рассматриваемого вещества в каждой камере, $L_{i,j}$ — скорость обмена между камерами, L_r^{m+1} — скорость распада родительского по отношению к m -му вещества и L_r^m — скорость распада m -го вещества. Здесь индексы i и j описывают значения каждой

компоненты в каждой камере. Данная система уравнений может быть представлена в матричном виде:

$$\frac{d\vec{I}}{dt} = \hat{A}\vec{I}, \quad (2)$$

где вектор \vec{I} составлен из всех рассматриваемых веществ во всех элементарных объемах.

В некоторых ситуациях система может иметь аналитическое решение, однако в самом общем случае решить ее можно только численно.

Комплексный учет взаимосвязанных процессов эволюции мультибарьерной системы

ПК DESTRUCT предназначен для прогнозирования выхода загрязнителя из ближней зоны и учитывает большой спектр происходящих процессов при разрушении системы ИББ.

Разработанные элементы ПК DESTRUCT (расчетные блоки) позволяют осуществить прогноз поведения каждого барьера, учитывая условия его существования и эволюции. Результаты расчетов интегрируются в базу знаний в виде файлов сценариев изменения параметров от времени. Дальнейшие оценки состояния материалов, а также миграции веществ выполняются с учетом сценариев изменения свойств барьеров и характеристик среды.

Блок моделирования разрушения барьеров безопасности предполагает учет не только их физического разрушения, но и последовательного изменения физико-химических и миграционных параметров.

Блок прогнозирования эволюции бентонита предполагает возможность оценки иллитизации, степени уменьшения количества монтмориллонита с течением времени в зависимости от температуры и состава водной среды.

Блок прогнозирования динамики эволюции бетонных материалов предполагает оценку деградации бетона по различным механизмам, в том числе — карбонизации бетона, а также кислотной и сульфатной коррозии в зависимости от температуры и характеристик воды.

Блок прогнозирования динамики эволюции стальных материалов предполагает возможность определения времени и характера разрушения стальных элементов конструкции в зависимости от времени, температуры и свойств агрессивной среды.

Блок учета химических процессов используется практически всеми расчетными модулями, для которых важно принять во внимание различные аспекты эволюции материалов.

Так, в частности, ПК DESTRUCT позволяет оценивать актуальные характеристики упаковки (матричного материала). Разработанный алгоритм учитывает наличие подвижной и твердой неподвижной фазы, включающей полупроницаемый приповерхностный переходной слой и монолитную часть. В ходе исследований разработаны следующие алгоритмы расчетов выщелачивания:

- по постоянному закону на основе линейной зависимости от массовой доли для натрий-алюмофосфатной стекломатрицы;
- с учетом химических взаимодействий на основе заданной зависимости с учетом пересыщенности раствора по ведущим минеральным фазам для цементной матрицы, а также на основе зависимости с учетом пересыщенности раствора по ведущей минеральной фазе для стекломатриц разного состава.

В части анализа конструкционных элементов и материалов объекта размещения отходов ПК DESTRUCT позволяет оценивать состояние основных конструкционных элементов и материалов: бетон, металл и глинистые структуры. Они, как было указано ранее, рассматриваются в качестве барьеров безопасности, характеристики которых необходимо оценивать.

Для металлов моделируются механизмы коррозии, определяющие срок сохранения защитных свойств стали.

Укажем, что для оценки деградации бетона применяется подход, основанный на выделении стадий деградации бетона при использовании предположения о том, что эти стадии определяются перераспределением и изменением составляющих цементный камень минеральных фаз, следствием которых является уровень pH поровой воды бетона.

Эволюция глинистых материалов может протекать с разрушением бентонита на минеральном уровне (например, при иллитизации) или происходит лишь изменение сорбционной емкости бентонита вследствие контакта с водами, отличными по составу от его изначальной поровой воды.

ПК DESTRUCT позволяет оценивать изменение свойств основных рассматриваемых барьеров безопасности, в том числе с учетом нестационарных процессов.

Под моделированием ИББ понимается использование математического аппарата для описания физических и химических механизмов их разрушения, изменения свойств. В комплексе разработаны и интегрированы модели физических свойств основных материалов: стали и бетона.

Деградация материалов моделируется с учетом влияния температуры, химико-биологического состава среды и прочих факторов. Для всех параметров возможно уточнение химических свойств с применением разрабатываемых шаблонов поведения минеральных фаз и расчет миграции загрязнителя в каждом из барьеров. В результате комплексного анализа деградации материалов с применением описанных ранее моделей формируется зависимость динамики характеристик распространения загрязнения в ближней зоне.

Результатом оценки миграционных параметров являются зависимости их численных значений (коэффициент распределения, сорбции, фильтрации, диффузии и пр.) от времени.

Полученный набор численных значений интегрируется в единую миграционную модель, учитывающую динамические параметры распространения загрязнения и основные особенности протекающих процессов.

В результате вся система описывается в единой ИМ с использованием параметров, зависящих от времени, при этом учитываются изменения физико-химических свойств материалов в ходе эволюции и их влияние на распространение загрязнения в ближней зоне.

Учет динамических параметров при оценке распространения радионуклидов

Принципиальная структура блока прогноза миграции радионуклидов в ближней зоне исследуемого объекта содержит:

- модуль задания общих характеристик расчета миграционного моделирования, в котором формируются глобальные переменные начального и конечного времени расчета, максимальный шаг выдачи результатов, а также пути к инструментам камерных и 3D-расчетов и место хранения исходных файлов;
- модуль камерного моделирования, позволяющий оценить масштабы выхода РН за пределы системы инженерной защиты;
- модуль 3D-расчетов миграции РН используется для подробного моделирования распространения РН в ближней зоне с учетом локальных неравномерностей.

Для задания параметров деградации барьеров безопасности наиболее важными являются модуль формирования материалов, модуль импорта геометрических данных и интерфейсный модуль создания модели.

В модуле материалов предусмотрена возможность задания миграционных свойств материалов (водопроницаемость, пористость, параметры сорбционного взаимодействия

(коэффициенты сорбции), коэффициенты диффузии) переменными с помощью сценариев и расписаний.

В таком составе ПК DESTRUCT обеспечивает взаимосвязанное решение мультифизических задач распространения загрязнения в ближней зоне с учетом изменения свойств инженерных барьеров вследствие деградации материалов с применением каплинг-методов объединения моделей.

Примеры комплексного решения задач эволюции многобарьерной защиты

Моделирование основных процессов, требующих учета для оценки состояния материалов, продемонстрировано на следующих примерах:

- коррозия металлических материалов на примере вложенных контейнеров для захоронения в ПГЗРО НКМ;
- изменение свойств бетонных материалов при использовании в приповерхностных ПХРАО;
- изменение сорбционных свойств бентонитовых материалов для ПГЗРО НКМ;
- выщелачивание радионуклидов из наитриево-алюмофосфатного стекла для захоронения ВАО в условиях ПГЗРО НКМ;

Также представлены результаты комплексных расчетов выхода радионуклидов:

- из упаковки отходов класса 1 ПГЗРО;
- из железобетонного контейнера;
- за пределы хвостохранилища;
- за пределы пункта приповерхностного захоронения.

Коррозия металлических материалов на примере вложенных контейнеров для захоронения РАО в ПГЗРО

В реализованном в DESTRUCT подходе численные методы изменения свойств описывают коррозионное разрушение стали путем определения зависимости скорости коррозии (глубины ее проникновения с течением времени) от температуры, pH и Eh среды, напряжения деформации, масштабов влияния радиолитического изменения свойств матрицы и подземной воды.

В первую очередь оценивается развитие питтинговой (локальной) коррозии, так как при образовании даже малейшего отверстия герметичность барьера будет нарушена, что приведет к возникновению фильтрации воды через барьер. Поэтому рассматривается дискретное изменение фильтрационных свойств металлического барьера, поскольку пока целостность не нарушена в результате коррозии либо механического разрушения, фильтрация не происходит.

При нарушении целостности стенки барьер становится проницаемым.

В общем случае скорость коррозии данного типа зависит от интенсивности воздействия внешней нагрузки, обусловленной различными механизмами.

В результате апробирования разработанных численных методов расчета коррозии стальных конструкций осуществлена оценка времени, требующегося для их разгерметизации и достижения водой источника загрязнения с учетом температуры поверхностей конструкций.

Последовательное разрушение ряда стальных барьеров, расположенных последовательно, в результате действия коррозии с учетом температуры поверхностей конструкций продемонстрировано на рис. 2. В данном случае время обводнения остеклованных ВАО оценивается в пределах 500 лет.

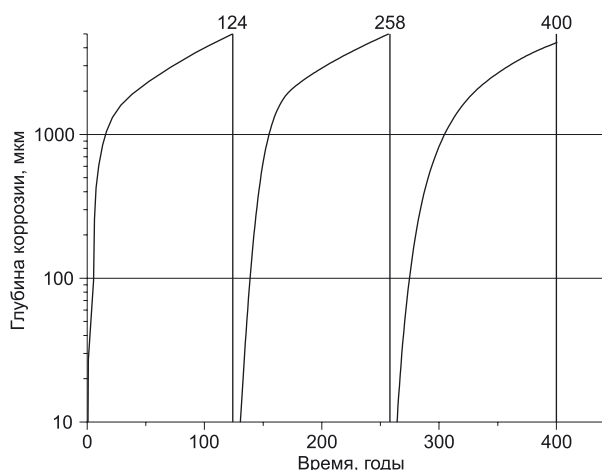


Рис. 2. Результат расчетов разрушения ряда металлических барьеров

Зависимость фильтрационных свойств бетонных материалов, используемых в приповерхностных ПХРАО

Фильтрационные и диффузионные свойства бетона по большей части зависят от его пористости, которая, в свою очередь, определяется составом минеральных фаз, слагающих бетон. Численными методами описана зависимость коэффициентов фильтрации (K_f) и диффузии (K_d) от пористости бетона:

$$K_f = c_f \theta^m, \quad (3)$$

где: c_f — коэффициент, связанный с сопротивляемостью пористой среды (значение $5,75 \cdot 10^{-11}$ м/с выведено на основе экспериментальных данных для цементной пасты);
 θ — пористость бетона, отн. ед.;

m — цементационная экспонента (значение 2,5 для исследуемого бетона марки М400).

$$K_d = \theta^{-F} + K_0, \quad (4)$$

где: θ — пористость бетона, отн. ед;
 F — коэффициент, связанный с сопротивляемостью пористой среды (значение 2 использовано для исследуемого бетона марки М400);
 K_0 — значение коэффициента диффузии для недеградированного бетона ($5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$).

На основе оцененных данных об изменении пористости бетона формируется динамика зависимости коэффициентов фильтрации и диффузии.

Модель влияния коррозии стального барьера на свойства бентонитового буфера для ПГЗРО НКМ

Проведены расчеты влияния продуктов коррозии на бентонит для условий проектного объекта глубинного захоронения (ПГЗРО) с учетом динамики температур в области моделирования, приведенного на рис. 3.

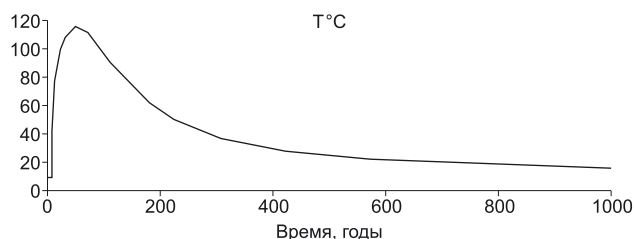


Рис. 3. Моделирование зависимости температуры бентонитового барьера от времени

В расчетах описывались изменения в бентоните при контакте его с корродирующим стальным барьером в изменяющемся поле температур. Модель включала кинетический блок коррозии стали, учитывающий ингибирование поверхности образующимися продуктами коррозии, а также блок учета химических процессов, учитывающий сорбцию, а также образование и растворение минеральных фаз. Расчеты проводились при помощи включенного в ПК DESTRUCT расчетного кода PhreeqC 2.18 [3].

Результаты тестовых расчетов количества твердых минеральных фаз в хакасском бентоните за период в 1000 лет показывают, что содержание наиболее важного компонента бентонита — монтмориллонита — практически неизменно. Только в зоне контакта со стальным корродирующим барьером его количество незначительно уменьшается. Также в этой зоне растет содержание продукта коррозии — гидроксида железа, незначительно увеличивается

количество хлорита, в результате чего снижается пористость бентонита, следовательно, и значение коэффициента диффузии.

Модель выщелачивания из натрий-алюмофосфатного стекла для захоронения ВАО в условиях ПГЗРО НКМ

Наиболее оптимальным подходом к оценке выщелачивания является учет реально протекающих реакций и кинетики выщелачивания при рассмотрении радионуклидов в составе стекломатрицы, как находящихся в виде индивидуальных минеральных фаз оксидов, силикатов, фосфатов, боросиликатов, количество материала которых пересчитывается из общей активности в матрице. Необходимо определить значение константы выщелачивания и состав воды, содержащейся в материалах каскада ИББ, с учетом влияния протекающих процессов, а также температуры и характеристик раствора.

В качестве примера рассмотрим расчеты выщелачивания натрий-алюмофосфатной стекломатрицы в контакте с бентонитом. Особенностью растворения стекол является несоответствие состава раствора составу растворяющейся твердой фазы, что объясняется образованием твердых продуктов гидролиза матрицы стекла, выпадением малорастворимых соединений вторичных фаз (инконгруэнтным растворением).

Расчеты проводились при помощи включенного в ПК DESTRUCT расчетного кода PhreeqC 2.18 [3].

В качестве модельного допущения ведущей фазой при растворении стекла принят фосфат алюминия. Принималось, что на первом шаге при растворении стекла его составляющие конгруэнтно переходят в раствор. Затем происходит перерасчет состава раствора, исходя из осаждения фаз (продуктов выщелачивания), пересыщающих раствор. Таким образом, реализуется инконгруэнтный характер растворения (выщелачивания) стекла.

На практике при моделировании растворения стекломатриц [4] нашло применение уравнение кинетики растворения в зависимости от степени насыщения раствора по ведущей фазе растворения стекломатрицы вида:

$$R_i = S \cdot k \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \left(1 - \frac{IAP}{K_s}\right), \quad (5)$$

где S — площадь контакта с раствором, м^2 ; k — действительная константа скорости реакции; E_a — энергия активации, Дж/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — абсолютная температура; IAP/K_s — отношение

текущих концентраций ионов, определяющих растворение фазы, к концентрациям при насыщении.

Уравнение (5) было положено в основу разработанных моделей выщелачивания. В расчетах применялись две модели. Первая основана на уравнении (5), вторая отличалась учетом торможения скорости коррозии стекла вследствие образования на его поверхности продуктов выщелачивания согласно зависимости:

$$R_i = S \cdot k \cdot k_T \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \cdot \left(1 - \frac{IAP}{K_s}\right), \quad (6)$$

где k_T — функция торможения, которая задается следующим эмпирическим уравнением:

$$k_T = 1 / (1 + k_1 \cdot \sum_i EQU_i(\text{"Продукт коррозии"})^{k_2}), \quad (7)$$

где $k_{1,2}$ — аппроксимирующие коэффициенты; $EQU_i(\text{"Продукт коррозии"})$ — количество i -го образовавшегося продукта коррозии, моль/л.

Результаты сравнения модельных и расчетных данных по натрию (Na), фосфору (P) и значению pH представлены на рис. 4 (более детально модель описана в статье [5]).

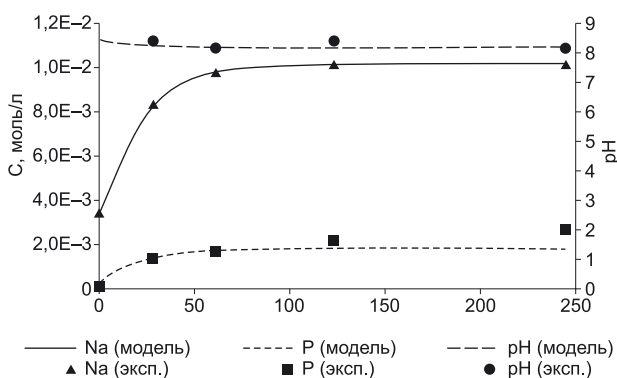


Рис. 4. Результаты сравнения модельных и расчетных данных по образованию в растворе Na, P и pH для алюмофосфатной матрицы

Как пример использования комплекса для решения интегральных задач рассмотрен ряд актуальных проблем анализа безопасности.

Расчет выхода радионуклидов за пределы хвостохранилища РАО

В качестве одного из таких объектов взят пункт хранения ТРО — хвостохранилище. Целью расчетов являлась оценка эффективности системы барьерной защиты.

При моделировании был принят следующий сценарий:

1. С момента ввода хвостохранилища в эксплуатацию предполагается постоянная величина

фильтрационных утечек через слой инженерных барьеров в водоносный горизонт с учетом наличия противофильтрационного покрывающего экрана.

2. После миграции через зону аэрации радионуклиды попадают в водоносный горизонт, в котором происходит их дальнейшая миграция к области разгрузки грунтовых вод.

В миграционной камерной модели комплекса DESTRUCT перенос загрязнителя между камерами определяется посредством задания коэффициентов переноса, выраженных в долях количества вещества, переносимого из одной камеры в другую в единицу времени. Основные используемые математические формулы, описывающие межкамерный перенос, приведены в работе [6]. Для прогнозирования распространения радионуклидов через барьер, представленный слоем суглинка, практически не претерпевающего изменения на протяжении многих тысяч лет, достаточно применения камерной модели, описывающей миграцию в ненасыщенной зоне, ограниченной подстилающим суглинком.

Произведен расчет миграции радионуклидов с учетом цепочек распада через слой суглинка, рассматриваемого в качестве природного барьера, в насыщенную водой зону.

Комплексный выход радионуклидов при их миграции через удерживающие барьеры, нормированный на исходную активность изотопов ^{234}Th , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{231}Pa , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , представлен на рис. 5.

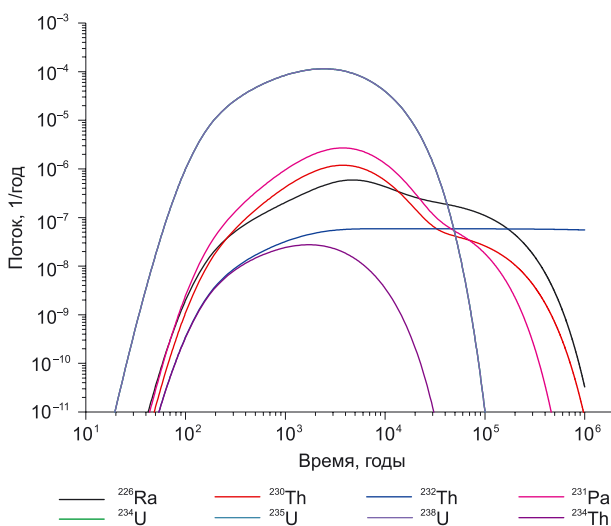


Рис. 5. Результаты расчета потока радионуклидов за пределы системы инженерной защиты ПХ ТРО (год⁻¹)

Пик выхода активности приходится на время ~10 000 лет, что характеризует эффективность подстилающего барьера из суглинка для ПХ ТРО.

Расчет выхода радионуклидов из упаковки РАО класса 1 ПГЗРО

Другим примером актуальных задач анализа безопасности является ПГЗРО, для которого важна оценка выхода радионуклидов из матриц отходов 1 класса за пределы мультибарьерной системы защиты.

В качестве упаковок отходов класса 1 предполагался стальной контейнер, внутри которого находятся бидоны с ВАО, включенными в фосфатную стекломатрицу. Предполагалось, что после «залпового» коррозионного разрушения стального контейнера через 1000 лет (время сохранения изолирующей способности для упаковки РАО класса 1 в соответствии с НП-093-14), скорость растворения отвержденных отходов класса 1 составляет $1 \cdot 10^{-5}$ г/см²/сут (согласно скорости выхода ¹³⁷Cs из стеклообразного компаунда в соответствии с требованиями НП-019-2000).

На основе созданной ИМ получен поток радионуклидов, выходящих из захоронения, нормированный на исходную активность (рис. 6).

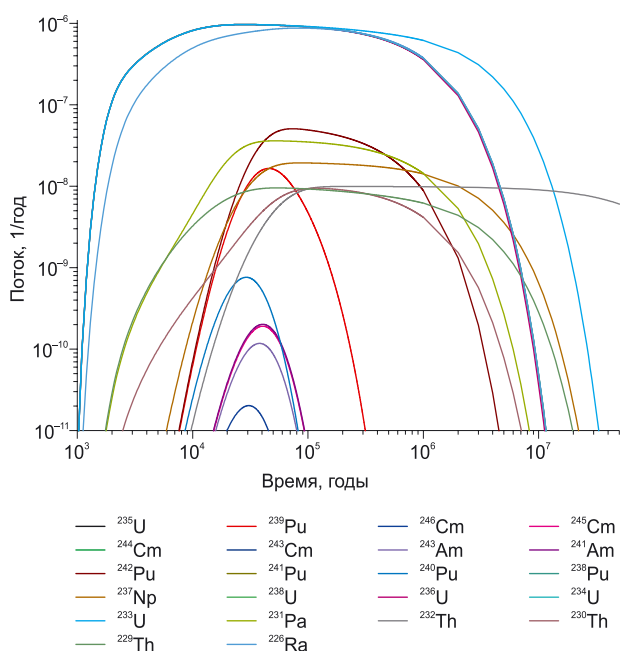


Рис. 6. Результаты расчета потока радионуклидов на выходе за пределы ПГЗРО (год⁻¹)

Расчет выхода радионуклидов за пределы ППЗРО

В качестве другого примера, на котором проводилась отработка методов оценки выхода деградирующих материалов, рассмотрен пункт приповерхностного захоронения (ППЗРО).

Предполагается, что бетонный барьер в течение 300 лет равномерно деградирует и к концу этого срока он теряет свои гидроизолирующие свойства. При прогнозировании выхода

радионуклидов из ППЗРО рассматривалась деградация верхней бетонной плиты, которая описывалась линейной функцией от времени. В расчетах это моделируется вводом дополнительного множителя к величине инфильтрации $F(t)$, изменяющегося во времени от 0 в начале до 1 через 300 лет, т. е. $I = I_0 \cdot F(t)$.

Выход продуктов деления, нормированных на исходную активность, представлен на рис. 7. Пик выхода радионуклидов (до $1 \cdot 10^{-5}\%$ от исходного содержания) из приповерхностного хранилища приходится на диапазон от 10 000 до 1 000 000 лет.

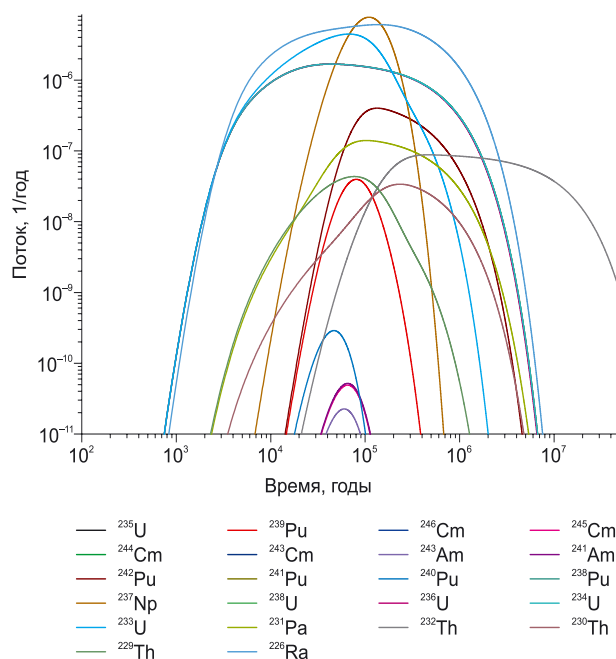


Рис. 7. Результаты расчета потока радионуклидов на выходе за пределы ППЗРО (год⁻¹)

Комплексный расчет выхода радионуклидов из контейнера РАО

С применением комплекса также анализировался темп выхода радионуклидов из железобетонных контейнеров. Полезно рассмотреть подобный объект с точки зрения долговременного хранения подверженных внешнему воздействию материалов.

По сценарию выходящие из источника радионуклиды сразу попадают в затопленную область хранилища, откуда далее поступают в горную породу.

С применением созданной численной модели определены потоки, нормированные на исходную активность. Выход радионуклидов, нормированный на исходную активность, представлен на рис. 8.

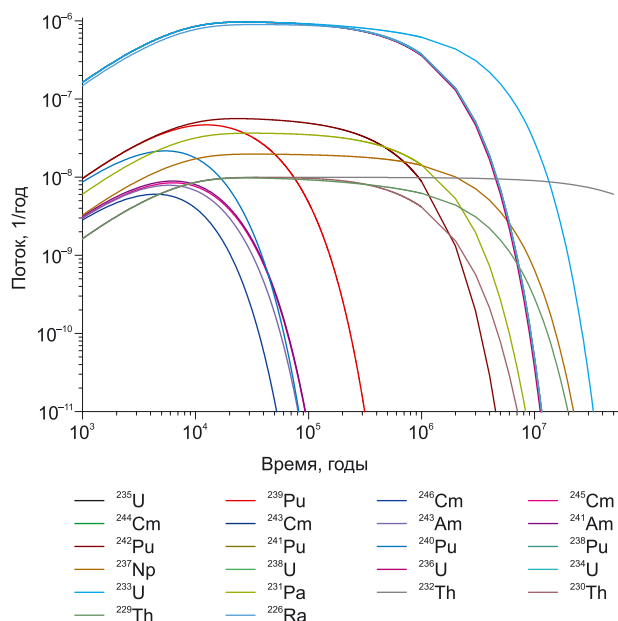


Рис. 8. Расчет потока радионуклидов через барьеры безопасности, (год^{-1})

Заключение

В статье изложены принципы и основы подхода к интегральному описанию изменения свойств инженерных барьеров безопасности ПЗРО и методов учета влияния этих процессов на долгосрочную безопасность. Рассмотрены основные механизмы, приводящие к деградации этих барьеров, в том числе таких, как матрица иммобилизации отходов, материалы упаковки и основные конструкционные материалы, используемые при создании ПЗРО. При этом предложен подход, основанный на комплексном учете эволюции всей системы ИББ при взаимном влиянии изменения свойств каждого из них.

Описано текущее состояние расчетного комплекса DESTRUCT, в котором интегрированы модули, обеспечивающие возможность прогнозирования динамики свойств различных ИББ в единой информационной среде. Разработанные инструменты комплексного учета эволюции ИББ при оценке выхода радионуклидов за пределы объекта позволили более качественно описать рассматриваемые механизмы, выделить

наиболее значимые, оценить их взаимное влияние и сформировать мультифизическую комплексную модель, учитывающую взаимодействие различных расчетных инструментов.

В качестве примера практического применения продемонстрированы некоторые результаты, относящиеся к анализу безопасности различных типичных объектов. Результаты исследований, проведенных с применением разработанного подхода, позволят снизить консервативность при расчетах распространения радионуклидов за пределы ИББ и более точно определить их возможное влияние на безопасность.

Литература

1. Крючков Д. В., Болдырев К. А., Мартынов К. В., Ковальчук В. Д. Методы применения базовых принципов комплексного учета процессов эволюции ИББ при оценке выхода радионуклидов за пределы объекта. Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2018-15, 2018. 27 с.
2. Гупало В. С., Казаков К. С., Крючков Д. В., Панкратенко А. Н., Плешко М. С., Вознесенский А. С., Гайсин Р. М., Мосейкин В. В. Изучение состояния массива пород при строительстве подземной исследовательской лаборатории как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПЗРО // Радиоактивные отходы. 2019. № 1(6). С. 90—99.
3. Parkhurst D. L. et al. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Denver, Colorado, 1999.
4. PNNL-13369. Waste Form Release Calculations for the 2001 Immobilized Low-Activity Waste Performance Assessment. 2001.
5. Болдырев К. А., Мартынов К. В., Крючков Д. В., Захарова Е. В., Ермолаев В. М. Численное моделирование выщелачивания алюмофосфатного стекла в статическом режиме в присутствии бентонита // Радиохимия. 2019. Т. 61. № 5. С. 427—432 (в печати).
6. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Vol. 1, 2, IAEA, VIENNA, 2004, 408 p.

Информация об авторах:

Крючков Дмитрий Вячеславович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: dvk@ibrae.ac.ru.

Болдырев Кирилл Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., 52), e-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Крючков Д. В., Болдырев К. А. Принципы комплексного учета процессов эволюции инженерных барьеров безопасности при оценке распространения радионуклидов за пределы объекта // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 106—115. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-106-115.

PRINCIPLES ENSURING COMPREHENSIVE ACCOUNTING OF PROCESSES ASSOCIATED WITH ENGINEERED SAFETY BARRIERS' EVOLUTION: ASSESSING RADIONUCLIDE SPREAD BEYOND SITE BOUNDARIES

Krychkov D. V., Boldyrev K. A.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on October 30, 2019

The article discusses the principles and approaches applied in the safety assessment of facilities based on the example of a modern tool DESTRUCT being currently developed. The code takes into account a set of processes associated with the evolution of engineered barrier system and is designed to predict the release of radionuclides from the near field.

Keywords: radioactive waste storage facility, radioactive waste, disposal, decommissioning, design modeling, engineered safety barriers, evolution, migration, comprehensive safety analysis.

References

1. Krychkov D. V., Boldyrev K. A., Martynov K. V., Kovalchuk V. D. Metody primeneniya bazovykh principov kompleksnogo ucheta processov evolyucii IBB pri ocenke vyhoda radionuklidov za predely ob'ekta [Methods of application of basic principles of integrated accounting of EBS evolution processes in estimation of radionuclide release outside the facility]. Preprint IBRAE № IBRAE-2018-15, 2018. 27 p.
2. Gupalo V. S., Kazakov K. S., Kryuchkov D. V., Pankratenko A. N., Pleshko M. S., Voznesensky A. S., Gaisin R. M., Moseykin V. V. Izuchenie sostoyaniya massiva porod pri stroitel'stve podzemnoj issledovatel'skoj laboratorii kak etap polucheniya iskhodnykh dannykh dlya ocenok bezopasnosti PGZRO [The Study of the State of Rock Mass During Construction of Underground Research Laboratory as a Stage of Obtaining Initial Data for the Safety Assessments of Deep Geological Disposal]. *Radioaktivnye othody — Radioactive Waste*, 2019, no. 1 (6), pp. 90—99.
3. Parkhurst D. L. et al. User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Denver, Colorado, 1999.
4. PNNL-13369. Waste Form Release Calculations for the 2001 Immobilized Low-Activity Waste Performance Assessment. 2001.
5. Boldyrev K. A., Martynov K. V., Kryuchkov D. V., Zakharova E. V., Ermolaev V. M. Chislennoe modelirovanie vyshchelachivaniya alyumofosfatnogo stekla v staticheskom rezhime v prisutstvii bentonite [Numerical Modeling of Leaching of Alumino-phosphate Glass in the Batch Mode in the Presence of Bentonite]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2019, Vol. 61, no. 5, pp. 612—618. (In print).
6. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities, Vol. 1, 2, IAEA, VIENNA, 2004, 408 p.

Information about the authors

Kryuchkov Dmitry Vyacheslavovich, PhD, Chief of Laboratory, The Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulkaya str., Moscow, 115191, Russia), e-mail: dvk@ibrae.ac.ru.

Boldyrev Kirill Aleksandrovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of RAS (52, Bolshaya Tulkaya St., Moscow, 115191, Russia), e-mail: kaboldyrev@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Kryuchkov D. V., Boldyrev K. A. Principles Ensuring Comprehensive Accounting of Processes Associated with Engineered Safety Barriers' Evolution: Assessing Radionuclide Spread Beyond Site Boundaries. *Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 106—115. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-106-115. (In Russian).