

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛАГОПЕРЕНОСА В КОНСТРУКЦИЯХ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ПУНКТА ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Н. А. Анисимов, А. А. Куваев

ФГБУ «Гидроспецгеология», Москва

Статья поступила в редакцию 2 августа 2022 г.

Рассмотрена численная модель формирования фильтрационного потока в элементах конструкций приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов (ППЗРО). Приведены результаты расчета полей скоростей фильтрации и влажности внутри ППЗРО с учетом изменений со временем свойств верхнего экрана, бетона и упаковок с радиоактивными отходами (РАО). Проанализировано влияние особенностей поля фильтрационного потока на состояние барьеров безопасности.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, конструкции ППЗРО, барьеры безопасности, упаковки РАО, деградация, фильтрационный поток, влажность, дренаж атмосферных осадков.

Введение

Конструкция пункта захоронения радиоактивных отходов предусматривает систему барьеров безопасности, основная функция которых заключается в предотвращении или снижении до допустимого уровня скорости выхода нуклидов в окружающую среду.

Основным физическим процессом, обуславливающим выход нуклидов за пределы ППЗРО, является фильтрация влаги, проникающей в его конструкции с атмосферными осадками и грунтовыми водами. В связи с этим важной задачей при обосновании безопасности является расчет движения влаги в конструкциях ППЗРО и его прогноз с учетом изменения свойств использованных материалов со временем.

Как показывает опыт работ ФГБУ «Гидроспецгеология», модель ППЗРО как потенциального источника поступления радионуклидов

в грунтовые воды, в силу малых размеров в сравнении с масштабом региональной модели, целесообразно разрабатывать отдельно от геофильтрационной и геомиграционной моделей ближней и дальней зон. При этом обе модели: ППЗРО и регионального геофильтрационного потока, должны сопрягаться через ближнюю зону. Практика показывает, что использование для создания модели ППЗРО стандартных пакетов гидрогеологического моделирования, например, таких как MODFLOW [1], оказывается затруднительным в силу их исходной специфики, ориентированной на геологическую среду, имеющую целый ряд особенностей геофильтрационного строения, к которым прежде всего относится стратификация водовмещающих отложений. Существуют также проблемы при генерации

расчетной сетки, обусловленные сложностью конструкции ППЗРО.

С учетом данного обстоятельства, для задач расчетного анализа процессов, происходящих внутри ППЗРО, востребованными могут быть универсальные пакеты мультифизического моделирования. К ним относится, в частности, COMSOL Multiphysics [2], возможности которого рассматриваются ниже на примере разработки фильтрационной модели ППЗРО.

Конструкция ППЗРО и геометрия расчетной модели

Основная доля существующих и проектируемых в России пунктов захоронения радиоактивных отходов 3 и 4 классов относится к приповерхностному типу. Далее в качестве прототипа для расчетной модели используется конструкция ППЗРО, разработанная для площадки АО «СХК» [3, 4].

Это сооружение состоит из 12 отсеков (рис. 1) и имеет вытянутую в плане форму с размерами 186 × 24 м. Конструкция отсеков приведена на рисунке 2 в виде вертикального сечения по линии а—а.

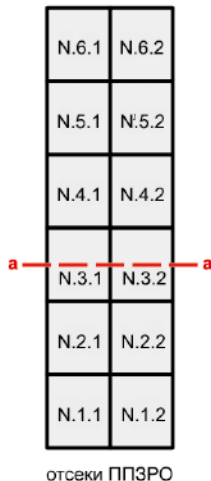


Рис. 1. Схема расположения отсеков в сооружении ППЗРО

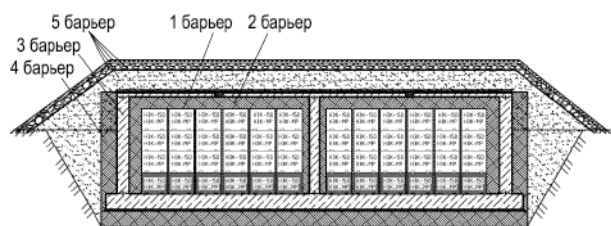


Рис. 2. Проектная конструкция отсеков ППЗРО [3, 4]

На рис. 2 указаны инженерные барьеры безопасности (ИБ1 – ИБ5). К ним относятся:

1 барьер (ИБ1): стенки упаковок РАО.

2 барьер (ИБ2): буферный материал (глинопорошок), заполняющий промежутки между упаковками и свободное пространство между упаковками и внутренними поверхностями отсека, остающееся после заполнения отсека упаковками. Толщина промежутков, заполненных буферным материалом, варьирует в зависимости от размеров упаковок.

3 барьер (ИБ3): бетонные стены — 800 мм, основание — 1000 мм, верхнее перекрытие — 250 мм.

4 барьер (ИБ4): глиняный замок по периметру сооружения (стены, основание) — 1000 мм.

5 барьер (ИБ5): многослойный покрывающий экран, представленный слоями (сверху вниз):

- почвенно-растительный слой — 200 мм;
- дренажный слой — 420 мм;
- бентомат (1-й слой) — 30 мм;
- слой уплотненной глины или суглинка — 1170 мм;
- песок — 200 мм;
- бентомат (2-й слой) — 30 мм.

На основе конструкции отсеков ППЗРО, приведенной на рис. 2, построена геометрия расчетной модели, в которую включены перечисленные выше барьеры безопасности. Отметим, что в отличие от прототипа в модели вместо плоской задана двускатная форма верхнего перекрытия, которая также применяется в данных конструкциях [3]. В соответствии с используемым в ППЗРО техническим решением упаковки с РАО 4 класса размещаются над упаковками с РАО 3 класса. В расчетной модели принято, что отходы 4 класса в составе металлических контейнеров размещены в трех верхних рядах, отходы 3 класса — в нижнем ряду в железобетонных контейнерах. Их габариты заданы по размерам контейнеров КМЗ и НЗК-150 [5] промежутки между контейнерами приняты равными 100 мм.

Принятая при моделировании геометрия с указанием материалов барьеров безопасности представлена на рис. 3. В модели также задана ближняя зона вмещающих пород (размером 80 × 30 м), и обозначен уровень грунтовых вод

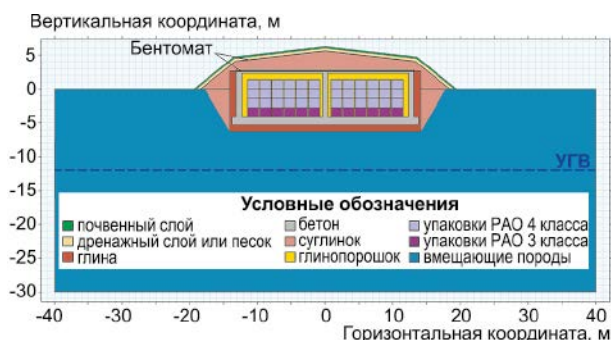


Рис. 3. Геометрия расчетной модели

(УГВ). Характеристики ближней зоны приняты по материалам изысканий, выполненных на реальном объекте. Водовмещающие отложения ближней зоны представлены суглинками, среднегодовая глубина залегания уровня грунтовых вод от поверхности земли составляет 12 м.

Расчетная модель

Учитывая, что продольный размер ППЗРО существенно преобладает над поперечным, с целью упрощения расчетов моделирование выполнено в двухмерной (профильной) постановке (расчетный профиль ориентирован поперек конструкции — рис. 1, сечение а—а).

Для расчета влагопереноса в пористой среде используется уравнение Ричардса при условии отсутствия источников-стоков [6]:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_w(h) \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz} \right) \right], \quad (1)$$

где:

$$k_w(h) = k S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1, \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left[1 + |\alpha h|^n \right]^m}, \quad (3)$$

где: θ — текущая объемная влажность пород, θ_r — максимальное объемное содержание связанной воды, θ_s — полная объемная влажность пород, S_e — относительная влажность, t — время (сут), k_w — коэффициент влагопереноса (м/сут), k — коэффициент фильтрации при полном влагонасыщении (м/сут), h — высота всасывания (м), x_i ($i=1, 2$) — пространственные координаты (м), K_{ij} — единичная матрица, α , n — параметры Ван Генухтена, l — параметр извилистости поровых каналов. Двойной индекс ij означает суммирование по всем возможным сочетаниям.

Далее принимается, что x_1 соответствует горизонтальной координате, а x_2 — вертикальной. В этом случае K_{iz} — обозначает величину, равную нулю при $i=1$ и равную 1 при $i=2$.

В конструкциях ППЗРО используются материалы, свойства которых определяются в ходе предварительных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при его проектировании [7, 8]. В данном случае параметры при проведении расчетов на основе уравнения (1) задаются по осредненным справочным величинам водно-физических характеристик материалов барьеров безопасности в соответствии с [9–11]. Значения параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Водно-физические характеристики грунтов и материалов

Грунты и материалы	k , м/сут	θ_s	θ_r	α , 1/м	n	l
Песок крупнозернистый/песок мелкозернистый	1,30/ 0,28	0,442	0,05	2,924	2,094	0,5
Суглинки вмещающих пород/суглинки экрана	0,02/ 0,01	0,525	0,096	1,9	1,31	0,5
Глина	5e-5	0,542	0,071	1,28	1,276	0,5
Почвенно-растительный грунт	0,3	0,7	0,2	1,9*	1,31*	0,5
Бентонит (глинопорошок)	4,3e-6	0,542**	0,071**	1,28**	1,276**	0,5
Бетон неразрушенный/разрушенный***	8,6e-8/ 0,28	0,15/ 0,442	0,1/ 0,05	1,28**/ 2,924	1,276**/ 2,094	0,5

Примечания: *задано по значению для суглинков;
**задано по значению для глины;
***задано по значению для мелкозернистого песка

Вследствие отсутствия данных в литературных источниках ряд характеристик почвенно-растительного грунта, бентонита и бетона, приведенных в табл. 1, принят по значениям для наиболее близких по свойствам материалов: песка, суглинков и глины.

На рис. 4 приведена схема граничных условий фильтрационной модели ППЗРО и части ближней зоны.

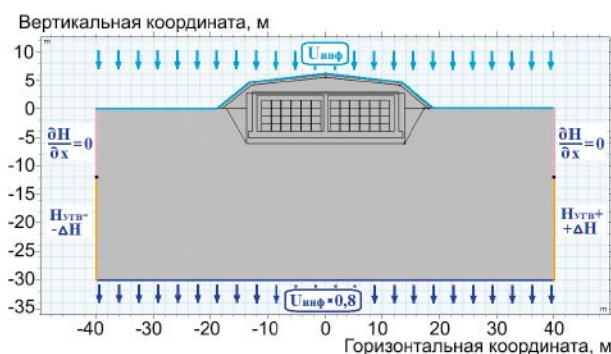


Рис. 4. Схема граничных условий фильтрационной модели

На границах заданы следующие условия:

- на верхней границе — модуль инфильтрационного питания грунтовых вод: $U_{инф}$;
- на нижней границе — скорость оттока подземных вод, определяемая выражением: $U_{инф} \times 0,8$ (исходя из результатов расчетов, выполненных на региональной модели);
- на правой и левой границах от УГВ и ниже — пьезометрический напор, соответственно: $H_{угв+} + \Delta H$ и $H_{угв-} - \Delta H$;
- на правой и левой границах выше УГВ — непроницаемая граница: $\partial H / \partial x = 0$.

Как правило, граничные условия для локального участка расположения ППЗРО задаются,

исходя из результатов расчета региональной модели. В данном случае они соответствуют осредненным условиям района размещения объекта [4]. Для модуля инфильтрационного питания ($W_{инф}$) принята величина равная 0,05 м/год. Исходное положение УГВ задано на глубине 12 м: $H_{УГВ} = -12$ м. Для величины ΔH , определяющей перепад уровня грунтовых вод в латеральном направлении, принято значение региональной модели, составляющее 0,8 м.

ИБ, представленные бетонными строительными конструкциями и стенками контейнеров, имеют ограниченный срок службы. Предполагается, что в начальный момент водно-физические характеристики данных элементов соответствуют бетону, а после полной деградации приобретают свойства мелкозернистого песка (табл. 1). Изменение свойств между этими состояниями представляет собой функцию от времени, являющуюся результатом химических превращений при фильтрации воды сквозь бетон, механических нагрузок и микробиологического воздействия [11]. На рис. 5 в качестве примера приведен график изменения свойств бетона при накоплении повреждений под действием химических и механических факторов [12].

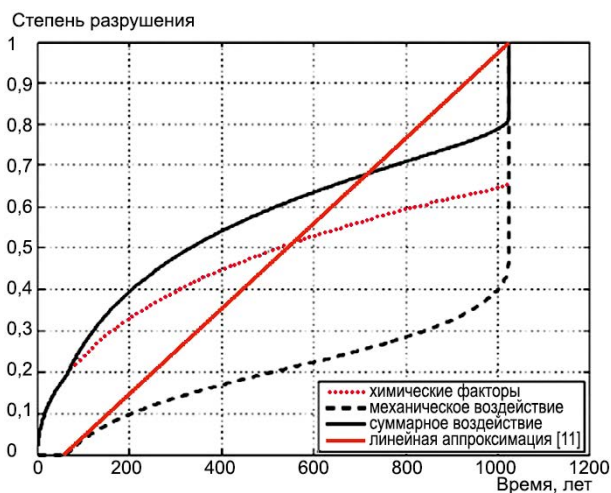


Рис. 5. Накопление повреждений в бетоне под действием химических и механических факторов [12]

На рис. 5 также приведена линейная зависимость изменения свойств бетонных конструкций, являющаяся упрощающей аппроксимацией, которая применяется в практических задачах оценки безопасности ППЗРО, приведенных в [11].

Однако линейная зависимость не подходит для интерполяции величин, различающихся на несколько порядков, к которым относятся значения коэффициента фильтрации бетона до

и после деградации. В связи с этим в расчетах применяется показательная функция:

$$a(t) = \begin{cases} a_1 & t < t_1 \\ a_1 \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^{\frac{t-t_1}{t_2-t_1}} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ a_2 & t_2 < t \end{cases} \quad (5)$$

Данная функция дает линейное приближение при близких величинах a_1 и a_2 и плавный переход при их большой разнице. В расчетной модели этой функцией задается изменение водно-физических характеристик при деградации элементов отсека ППЗРО, включающих бетонные конструкции, бентоматы и материал упаковок РАО.

Принятые в расчетах значения времени начала (t_1) и завершения (t_2) деградации элементов отсека ППЗРО приведены в табл. 2. Они заданы по диаграммам изменения свойств барьеров безопасности, используемым в [11].

Таблица 2. Периоды деградации барьеров безопасности

Элемент отсека ППЗРО	Начало деградации (t_1), годы	Завершение деградации (t_2), годы
Бетонные стены и основание	50	1000
Бетонное перекрытие	50	300
Бентомат	100	500
Упаковки с РАО 3 класса	200	400
Упаковки с РАО 4 класса	0	100

Создание расчетной модели и расчеты выполнены на основе метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе COMSOL Multiphysics [2]. Разбиение на расчетные ячейки осуществляется посредством нерегулярной гексагональной сетки. Общее число ячеек составило около 160 тыс. Фрагмент разбиения на расчетные ячейки представлен на рис. 6.



Рис. 6. Разбиение модели на расчетные ячейки (фрагмент)

Расчеты влагопереноса в отсеках ячеек ППЗРО

Расчетное моделирование выполняется для промежутка времени от 0 до 1000 лет. Полученные в результате вычислений поля скорости фильтрации для моментов времени 0, 100 и 1000 лет приведены на рис. 7а–7в.

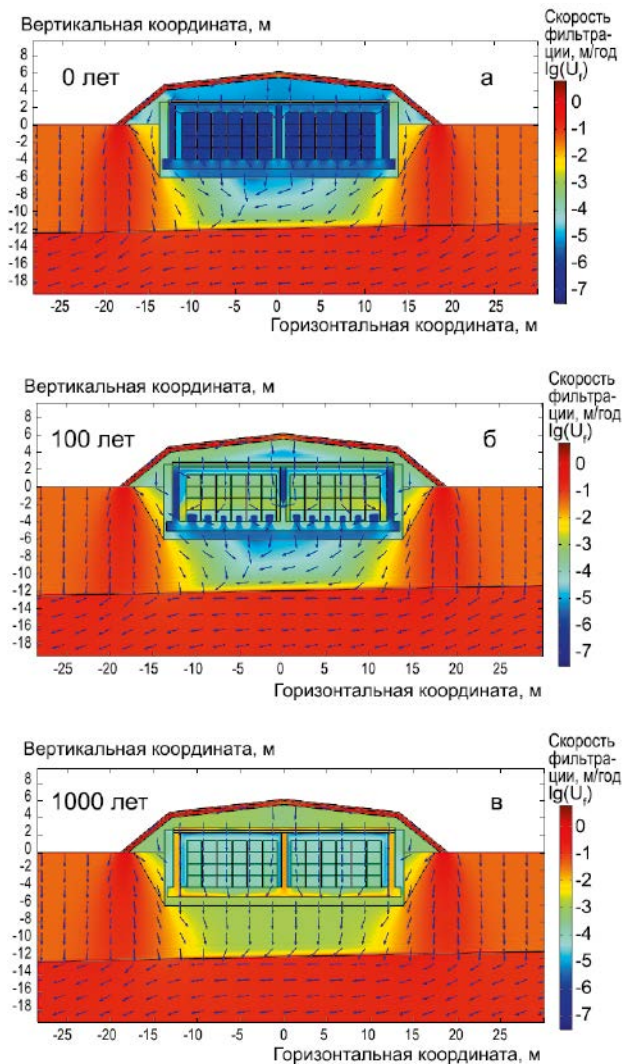


Рис. 7. Поля скорости фильтрации в элементах конструкций ППЗРО и упаковках РАО для моментов времени 0 (а), 100 (б) и 1000 лет (в)

Рисунки 7а–7в отражают этапы формирования фильтрационного потока в элементах конструкций ППЗРО и упаковках РАО. В начальный момент времени (0 лет) наибольшим фильтрационным сопротивлением обладают бетонные конструкции и упаковки РАО. Соответственно, скорость фильтрации через них имеет сравнительно низкие значения. Спустя 100 лет, согласно принятым условиям, завершается этап деградации упаковок РАО 4 класса, и скорость фильтрации через них существенно увеличивается.

Возросший фильтрационный поток также затрагивает упаковки РАО 3 класса (рис. 7б).

Поле скоростей фильтрации, приведенное на рисунке 7в, соответствует моменту 1000 лет, при котором завершаются основные процессы деградации барьеров безопасности. Бетонные стены и основание становятся проводящими «каналами» с низким фильтрационным сопротивлением. По ним направляется основной поток, обходящий область размещения упаковок РАО и заполнителя из бентонитовой глины. Подробная картина векторов и значений скоростей фильтрации на момент 1000 лет приведена на рис. 8.

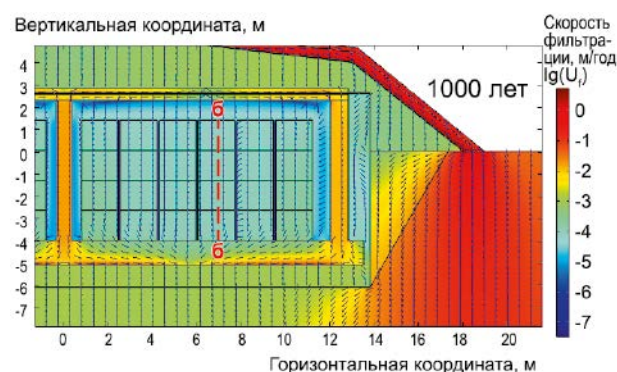


Рис. 8. Поля скорости фильтрации в области размещения РАО для момента времени 1000 лет (б–б – линия построения профиля скорости)

От скорости фильтрации в упаковках РАО зависит интенсивность выхода нуклидов за пределы отсеков ППЗРО. В начальный момент времени скорости фильтрации в области размещения упаковок РАО имеют очень низкие значения: порядка 10^{-6} – 10^{-8} м/год. Со временем вследствие деградации материалов упаковок происходит изменение их воднофизических характеристик и увеличение активной пористости, что приводит к высвобождению влаги, содержащейся в них, и к ее переносу от верхних слоев РАО к нижним.

На этапе от начала до завершения деградации упаковок РАО, который соответствует промежутку времени до 400 лет (табл. 2), поле скорости фильтрации в области их размещения характеризуется ярко выраженной неоднородностью. Затем оно выравнивается. К моменту 1000 лет завершается процесс перераспределения влаги, накопленной в элементах конструкции ППЗРО и упаковках РАО. После этого скорость фильтрации в области размещения упаковок РАО снижается до уровня, определяемого потоком атмосферной влаги, проникающей через потерявшие защитные свойства барьеры безопасности.

На рис. 9 приведены графики изменения скоростей фильтрации в области размещения упаковок РАО (по линии б–б, приведенной на рис. 8), для различных моментов времени, характеризующих разные этапы деградации барьеров безопасности ППЗРО.

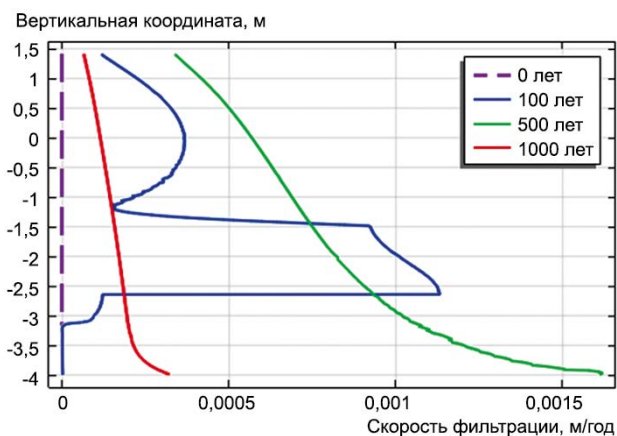


Рис. 9. Эпюры скоростей фильтрации по высоте области размещения упаковок РАО в моменты времени 0, 100, 500 и 1000 лет

Для профиля скорости фильтрации, установившегося после завершения переходных процессов, связанных с деградацией барьеров безопасности, который соответствует моменту 1000 лет (рис. 9), характерно увеличение значений в направлении от верхнего ряда упаковок РАО к нижнему. Таким образом, нижний ряд упаковок РАО оказывается в наименее благоприятных условиях — с более интенсивным фильтрационным потоком. В связи с этим изменение компоновочной схемы расположения упаковок в отсеке ППЗРО, при котором упаковки РАО 4 класса устанавливаются в нижнем ряду, а слой упаковок 3 класса размещается над ним, позволит снизить выход из них нуклидов и уменьшить в долгосрочной перспективе выход нуклидов из отсека ППЗРО в геологическую среду.

Характеристика влажности конструкций ППЗРО

В выполненных расчетах предполагалось, что глиняный замок и заполнитель (увлажненный глинопорошок) не имеют разрывов и сохраняют сплошность на всем периоде моделирования. Однако при возникновении механических нагрузок, например при сейсмическом воздействии, возможно нарушение целостности этих барьеров. Будут ли сохраняться возникшие в глине трещины или они быстро закроются, определяется пластичностью глины, зависящей от ее влажности.

На рис. 10 приведены результаты расчета относительной влажности S_e (3) элементов ППЗРО и вмещающих пород ближней зоны. В начальный момент (0 лет) распределение влажности получено для установившихся условий при исходном состоянии барьеров безопасности. Согласно результатам моделирования наибольшее изменение изменения данного показателя в течение периода их деградации характерно для упаковок РАО и бетонных конструкций. Это вызвано уменьшением высоты капиллярного подъема [13], происходящим вследствие вымывания связующих компонентов бетона и матричного материала.

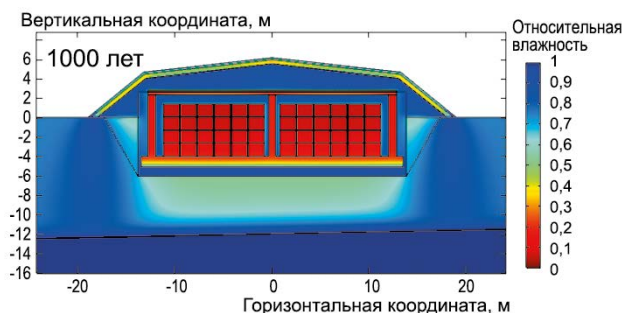
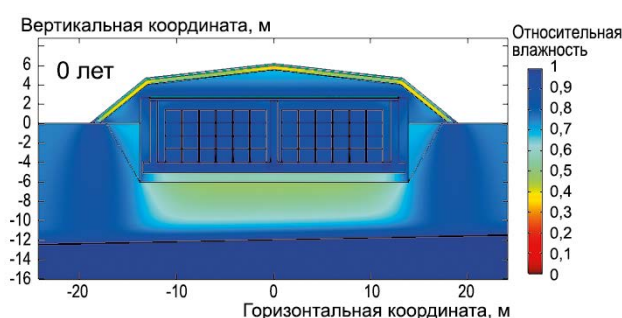


Рис. 10. Результат расчета относительной влажности элементов ППЗРО и вмещающих пород ближней зоны для моментов 0 и 1000 лет

Изменение относительной влажности глиняного замка и бентонитового заполнителя происходит в меньшей степени. Оно представлено в виде графиков на рис. 11.

Минимальные значения относительной влажности за все время моделирования составляют:

- для глиняного замка: 0,56;
- для бентонитового заполнителя: 0,57.

Глины, находящиеся в природном состоянии, при этих значениях относительной влажности могут проявлять свойства твердого материала, а имеющие нарушенное строение, к которым относятся глины в составе барьеров безопасности ППЗРО, при такой влажности проявляют пластичность [14]. В связи с этим при данной конструкции ППЗРО и гидрогеологических условиях возможно лишь кратковременное нарушение

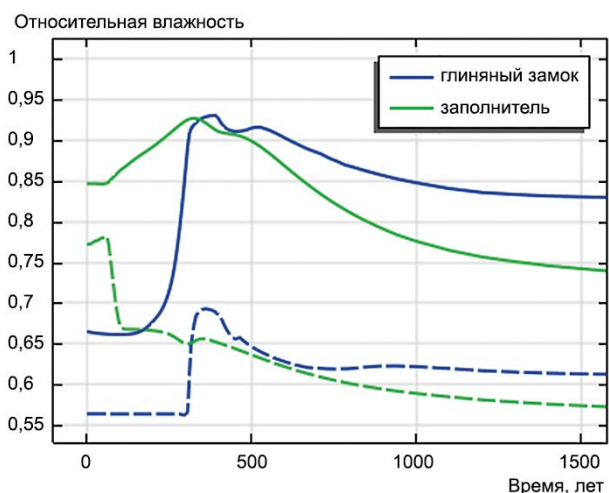


Рис. 11. Графики изменения осредненных (сплошная линия) и минимальных (пунктир) значений относительной влажности материала глиняного замка и бентонитового заполнителя

сплошности глиняных материалов. В целом — на длительных промежутках времени — они будут выполнять требуемые барьерные функции.

Дренаж атмосферных осадков

На рисунках 7а – 7в видно, что значительная доля атмосферных осадков отводится на периферию сооружения благодаря наличию дренажного слоя и уклону верхнего экрана. Для оценки влияния угла наклона верхнего перекрытия на количество осадков, проникающих под дренарующий слой, выполнено параметрическое исследование, при котором произведена последовательность расчетов с перестроением геометрии модели. Полученные в результате расчетов значения доли осадков, проникающих под дренарующий слой, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения доли атмосферных осадков, проникающих под дренарующий слой

Угол наклона экрана, град	Доля осадков, проникающих внутрь отсека, %		Увеличение доли осадков через 1000 лет, %
	0 лет	через 1000 лет	
0	7,75	7,95	2,56
4	5,65	5,84	3,44
8	4,67	4,74	1,59
12	4,03	4,06	0,94
16	3,5	3,53	0,96
20	3,02	3,03	0,43

Согласно данным табл. 3 величина потока влаги, проникающей под дренарующий слой, зависит от угла наклона верхнего экрана и составляет

от 3 до 8%. При увеличении угла наклона верхнего экрана от 0 до 20° происходит снижение количества проникающих осадков почти в три раза. Сопоставление результатов для 0 и 1000 лет показывает, что деградация барьеров безопасности — бетонных стен сооружения и дополнительной защиты в виде слоев бентоматов — приводит к росту фильтрационного потока не более чем на 3,5%. Это свидетельствует о том, что основными барьерами, препятствующими проникновению влаги под дренарующий слой, являются: глиняный замок и слой уплотненного суглинка покрывающего экрана. Использование в конструкции ППЗРО бентоматов существенного влияния на скорость фильтрационных потоков под дренарующий слой не оказывает.

Заключение

Результаты расчетного исследования, выполненного на основе фильтрационной модели отсека ППЗРО, позволяют сделать следующие выводы.

1) Скорость фильтрационного потока, проходящего через упаковки РАО, изменяется по высоте штабеля упаковок, увеличиваясь ближе к основанию отсека ППЗРО. В связи с этим мерой, позволяющей снизить поток радионуклидов во вмещающие породы, являются компоновочные схемы, при которых отходы 3 класса оказываются приподнятыми над основанием отсека. Например, такое возможно, если упаковки с отходами 3 класса располагать на втором снизу слое, а на первом слое размещать упаковки с отходами 4 класса.

2) Расчет влажности материалов глиняного замка и заполнителя отсека ППЗРО показал, что на всем интервале моделирования они будут сохранять пластичное состояние, при котором происходит залечивание возникающих трещин. В связи с этим можно считать, что при внешнем механическом воздействии возможно лишь кратковременное нарушение сплошности этих материалов и в целом — на длительных промежутках времени — они будут выполнять требуемые барьерные функции.

3) Глиняный замок в сочетании с конструкцией верхнего экрана, включающего дренарующий слой и массив материала с низким коэффициентом фильтрации, являются основными барьерами, препятствующими проникновению атмосферной влаги внутрь сооружения ППЗРО. Величина потока влаги, проникающей под дренарующий слой, для рассмотренной конструкции ППЗРО составляет от 3 до 8% в зависимости от угла наклона верхнего экрана.

В целом из результатов расчетного моделирования следует, что режим фильтрационного потока, формирующегося внутри ППЗРО по мере деградации барьеров безопасности, имеет сложную и изменяющуюся во времени пространственную структуру, зависящую от сочетания различных факторов. Ее изучение дает возможность оптимизации проектных решений с целью повышения безопасности ППЗРО.

Литература

1. Chiang W., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Springer, 2001.
2. Коваленко А., Узденова А., Уртенев М., Николенко В. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде COMSOL Multiphysics 5.2. — СПб.: Лань, 2017. 228 с.
3. Павлов Д. И., Сорокин В. Т., Баринов А. С., Дёмин А. В., Сыченко Д. В. Научно-технические и проектные основы создания конструкций приповерхностных пунктов захоронения низко- и среднеактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2021. № 4 (17). С. 65–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-65-77.
4. Материалы обоснования лицензии на размещение и сооружение приповерхностного пункта захоронения твердых радиоактивных отходов 3 и 4 классов, Томская область, городской округ ЗАТО Северск. Т. 1. — М.: ФГУП «НО РАО», 2018.
5. Гатауллин Р. М., Меделяев И. А., Шарафутдинов Р. Б. Использование перспективных технологий для решения проблем безопасного обращения с радиоактивными отходами // Ядерная и радиационная безопасность. 2008. № 4 (50). С. 68–75.
6. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical manual. Version 3.0. Preprint Department of Environmental Sciences University of California Riverside. California, 2012. 260 p.
7. Павлов Д. И., Ильина О. А. О системном подходе к выбору барьеров безопасности для захоронения РАО классов 3 и 4 // Радиоактивные отходы. 2020. № 3 (12). С. 54–65.
8. Ильина О. А., Крупская В. В., Винокуров С. Е., Калмыков С. Н. Современное состояние в разработках и использовании глинистых материалов в качестве инженерных барьеров безопасности на объектах консервации и захоронения РАО в России // Радиоактивные отходы. 2019. № 4 (9). С. 71–84.
9. Zhonghui Ou. Differential Evolution's Application to Estimation of Soil Water Retention Parameters // Agronomy. 2015. № 5. Pp. 464–475.
10. Экспертная система: База данных ИГЭ РАН. 2017.
11. ISAM. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities. Vol. 1, 2. — IAEA, Vienna, 2004.
12. Bart F., Cau-dit-Coumes C., Frizon F., Lorente S. Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage / ISBN 978-1-4614-3445-0 (eBook). Springer Science+Business Media, New York, 2013.
13. Шейн Е. В. Курс физики почв. — М.: Изд. МГУ, 2005. 432 с.
14. Сергеев Е. М., Голодковская Г. А., Зиангиров Р. С. и др. Грунтоведение. Под ред. акад. Е. М. Сергеева. 5-е изд. — М.: Изд. МГУ, 1983. 392 с.

Информация об авторах

Анисимов Николай Александрович, главный специалист, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: anisn@msnr.ru.

Куваев Андрей Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, начальник отдела, ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: kuvaev@msnr.ru.

Библиографическое описание статьи

Анисимов Н. А., Куваев А. А. Численное моделирование влагопереноса в конструкциях приповерхностного пункта захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 3 (20). С. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106.

NUMERICAL MODELING OF MOISTURE TRANSFER IN THE STRUCTURES OF A NEAR-SURFACE RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITY

Anisimov N. A., Kuvaev A. A.

FSBI «Hydrospetzgeologiya», Moscow, Russia

Article received on August 2, 2022

The paper considers a model used to calculate the filtration flow in the structural elements of a near-surface radioactive waste disposal facility (RWDF). It presents the results of calculations focused on the filtration and humidity field rates inside the RWDF taking into account changes in the properties of the upper screen, concrete and packages with radioactive waste occurring over time. The study also analyzes the influence of the filtration flow field features on the safety barriers state.

Keywords: radioactive waste, RWDF structures, safety barriers, radioactive waste packages, degradation, filtration flow, humidity, rainfall drainage.

References

1. Chiang W., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Springer, 2001.
2. Kovalenko A., Uzdenova A., Urtenov M., Nikonenko V. *Matematicheskoye modelirovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov v srede COMSOL Multiphysics 5.2*. [Mathematical modeling of physical and chemical processes in COMSOL Multiphysics 5.2]. Saint-Petersburg, Lan Publ., 2017. 228 p.
3. Pavlov D. I., Sorokin V. T., Barinov A. S., Demin A. V., Sychenko D. V. Nauchno-tehnicheskoye i proyektnyye osnovy sozdaniya konstruktsiy pripoverkhnostnykh punktov zakhoroneniya nizko- i sredneaktivnykh otkhodov [Scientific and Design Aspects in the Development of Near-Surface Disposal Facilities for Low- And Intermediate-Level Waste]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 65–77. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-4-65-77.
4. License application materials for siting and construction of a near-surface disposal facility for solid radioactive waste Class 3 and 4, Tomsk Region, Seversk City District. Vol. 1. — Moscow, FSUE NO RAO Publ., 2018.
5. Gataullin R. M., Medelyayev I. A., Sharafutdinov R. B. Ispol'zovaniye perspektivnykh tekhnologiy dlya resheniya problem bezopasnogo obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami [Promising methods and their application in addressing the problems associated with the safe radioactive waste management]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' — Nuclear and Radiation Safety*, 2008, no. 4 (50), pp. 68–75.
6. Šimůnek J., van Genuchten M. Th., Šejna M. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media. Technical manual. Version 3.0. Preprint Department of Environmental Sciences University of California Riverside. California, 2012. 260 p.
7. Pavlov D. I., Ilina O. A. O sistemnom podkhode k vyboru bar'yerov bezopasnosti dlya zakhoroneniya RAO klassov 3 i 4 [On a System Approach to the Selection of Safety Barriers for the Disposal of Radioactive Waste Class 3 and 4]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2020, no. 3 (12), pp. 54–65. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-3-54-65.
8. Ilina O. A., Krupskaya V. V., Vinokurov S. E., Kalmykov S. N. Sovremennoye sostoyaniye v razrabotkakh i ispol'zovanii glinistyykh materialov v kachestve inzhenernykh bar'yerov bezopasnosti na ob'yektakh konservatsii i zakhoroneniya RAO v Rossii [State-of-Art in the Development and Use of Clay Materials as Engineered Safety Barriers at Radioactive Waste Conservation and Disposal Facilities in Russia]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2019, no. 4 (9), pp. 71–84. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-71-84.

9. Zhonghui Ou. Differential Evolution's Application to Estimation of Soil Water Retention Parameters. *Agronomy*, 2015, no. 5, pp. 464–475.
10. Expert system: Database of the IGE RAS. 2017.
11. ISAM. *Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities*. V.1, 2. — IAEA, Vienna, 2004.
12. Bart F., Cau-dit-Coumes C., Frizon F., Lorrente S. *Cement-Based Materials for Nuclear Waste Storage* / ISBN 978-1-4614-3445-0 (eBook). Springer Science+Business Media, New York, 2013.
13. Shein E. V. *Kurs fiziki pochv* [Soil physics course]. Moscow, Moscow State University Publ., 2005. 432 p.
14. Sergeev E. M., Golodkovskaya G. A., Ziangirov R. S. et al. *Gruntovedeniye* [Ground science]. Edt. by Member of the Academy of Science E. M. Sergeev — Moscow, Moscow State University Publ., 1983. 392 p.

Information about the authors

Anisimov Nikolai Alexandrovich, chief specialist, FSBI “Hydrospetzgeologiya” (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: anisn@msnr.ru.

Kuvaev Andrey Alekseevich, doctor of Geological and Mineralogical Sciences, head of department, FSBI “Hydrospetzgeologiya” (4, Marshal Rybalko st., Moscow, 123060, Russia), e-mail: kuvaev@msnr.ru.

Bibliographic description

Anisimov N. A., Kuvaev A. A. Numerical Modeling of Moisture Transfer in the Structures of a Near-Surface Radioactive Waste Disposal Facility. *Radioactive Waste*, 2022, no. 3 (20), pp. 97–106. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-3-97-106. (In Russian).