

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ С УЧЕТОМ ЦЕПОЧЕК РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА В КОДЕ GERa: ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ СХЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ

Ф. В. Григорьев, А. С. Нужный

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2024 г.

В работе описана численная схема, реализованная в расчетном коде GeRa для решения задачи переноса в пористой среде радионуклидов с учетом цепочек радиоактивного распада. Она основана на схеме расщепления по физическим процессам и использовании отдельных модулей для решения задач переноса и радиоактивного распада по цепочкам. Проведена верификация численной схемы с применением аналитического решения для частного случая постановки задачи в однородной пористой среде. Исследована погрешность, вносимая в численное решение за счет использования схемы расщепления. По результатам исследования даны рекомендации по подбору необходимых параметров численной схемы при расчете переноса цепочки нуклидов с различной сорбируемостью.

Ключевые слова: *геомиграция радионуклидов, радиоактивный распад, код GeRa, радиоактивные отходы.*

Введение

Осуществляемый при оценке долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) расчет миграции радионуклидов в подземной гидросфере должен включать в себя учет радиоактивного распада с образованием цепочек дочерних радионуклидов [1]. В коде GeRa [2], предназначенном для решения трехмерных задач фильтрации и массопереноса, учет цепочек радиоактивных распадов реализован в специализированном модуле [3]. При этом для включения цепочек распада в модель переноса используется схема расщепления по физическим процессам: сначала выполняется решение задачи переноса с помощью различных численных схем метода конечных объемов, затем по полученным концентрациям рассчитывается

радиоактивный распад в каждой ячейке расчетной сетки. Заметим, что при использовании схемы расщепления неминуемо вносится ошибка, прямо пропорционально зависящая от шага по времени. Ее следствием может быть необоснованно ранний приход радионуклидов в точки, удаленные от источника загрязнения, а также занижение пиковых значений их концентраций в этих точках.

Целью настоящей работы является верификация разработанной модели, анализ ее особенностей, связанных с численной реализацией, и выработка рекомендаций по ее практическому применению в оценке безопасности ПЗРО и иных объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Для этого, следуя алгоритму,

представленному в работе [4], в явном виде находится аналитическое решение, с которым далее сравнивается численное в GeRa; исследуются особенности расчета задач переноса с радиоактивным распадом и существенной разницей в сорбируемости радионуклидов, входящих в цепочки; формируются рекомендации по выбору расчетного шага по времени; обсуждается численная ошибка, вносимая схемой расщепления, а также излагаются методические рекомендации, позволяющие эту ошибку уменьшить.

Математическая модель и расчетная схема

Уравнение адвективно-диффузионного переноса в пористой среде для родительского нуклида выглядит следующим образом (см., например, [5]):

$$\theta R_1 \frac{\partial C_1}{\partial t} - \nabla(D\nabla C_1) + \nabla(\bar{u}C_1) + \theta R_1 \lambda_1 C_1 = 0. \quad (1)$$

Здесь C_1 — удельная активность родительского нуклида, θ — пористость среды, D — тензор диффузии-дисперсии, \bar{u} — скорость фильтрации, λ_1 — константа распада, R_1 — коэффициент сорбционной задержки радионуклида, определяемый по формуле:

$$R_1 = 1 + \frac{k_{d1}\rho_b}{\theta}, \quad (2)$$

где k_{d1} — коэффициент сорбционного распределения родительского нуклида, ρ_b — плотность пористой матрицы.

Уравнение переноса i -го дочернего радионуклида может быть записано в аналогичных обозначениях:

$$\theta R_i \frac{\partial C_i}{\partial t} - \nabla(D\nabla C_i) + \nabla(\bar{u}C_i) + \theta R_i \lambda_i C_i - \theta \sum_{j<i} R_j p_{ji} \lambda_j C_j = 0. \quad (3)$$

Здесь p_{ji} — вероятность того, что при распаде j -го нуклида образуется i -й нуклид (для случая ветвлений цепочки).

Расчет переноса и распада по цепочкам в коде GeRa осуществляются в двух сопряженных между собой модулях. Первый использует для численного решения задачи различные схемы метода конечных объемов [6], второй работает на основе аналитического решения уравнения радиоактивного распада:

$$N_n = N_{10} \prod_{k=1}^{n-1} (\lambda_k p_k) \left(\sum_{i=1}^n \frac{\exp(-\lambda_i t)}{\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (\lambda_j - \lambda_i)} \right), \quad (4)$$

где N_{10} — исходное количество ядер родительского изотопа. Отметим, что в N включается как растворенное вещество, так и сорбированное на породе. Соответственно, после расчета шага распада происходит пересчет равновесия между раствором и породой. Формула (4) справедлива в предположении, что в начальный момент времени есть только ядра родительского нуклида, с которого запускается цепочка. В том случае, когда требуется общее решение при неравных нулю начальных количествах N_{n0} , где $n > 1$, его можно получить путем добавления к этой формуле аналогичных выражений для более коротких цепочек, начинающихся с соответствующих N_{n0} . Информация о составе цепочки и константах распада подгружается в GeRa из библиотеки ядерных данных [7]. Пересчет концентраций радионуклидов осуществляется на каждом шаге по времени в каждой ячейке расчетной сетки. Вычисление может производиться как в размерностях концентраций, так и в размерностях удельных активностей радионуклидов.

Формулы аналитического решения и верификация численной схемы

Проверить корректность кода можно, например, проведя расчет для задачи, имеющей аналитическое решение. В работе [4] приводится алгоритм получения аналитического решения уравнений (1)–(3), дополненных определенной постановкой граничных и начальных условий, основанный на использовании преобразования Лапласа. Пористая среда предполагается гомогенной. Диффузионным вкладом в перенос, по сравнению с гидродисперсией, пренебрегают. Выпишем, согласно этому алгоритму, явное решение для одномерной задачи переноса двух соседних радионуклидов из одной цепочки радиоактивного распада, который происходит в полубесконечной колонке вдоль оси x . Скорость фильтрации $u > 0$. На границе колонки заданы фиксированные значения концентрации радионуклидов:

$$C_1(0, t) = C_1; \quad (5)$$

$$C_2(0, t) = C_2.$$

Тензор диффузии-гидродисперсии D в пренебрежении диффузией выглядит так:

$$D = \alpha u, \quad (6)$$

где α — дисперсивность. В начальный момент времени концентрации переносимых радионуклидов в колонке равны нулю.

Аналитическое решение этой задачи выглядит следующим образом:

$$C_1(x, t) = C_1 A_1(x, t),$$

$$C_2(x, t) = C_2 A_2(x, t) + \frac{R_1 \lambda_1 C_1}{R_2 \lambda_2 - R_1 \lambda_1} (A_1(x, t) - A_2(x, t) - B_1(a, x, t) + B_2(a, x, t)). \quad (7)$$

Здесь введены следующие вспомогательные функции:

$$A_i(x, t) = \frac{1}{2} \left(e^{\frac{x(1-v)}{2\alpha_x}} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_i x - uvt}{\sqrt{4\alpha_x u R_i t}} \right) + e^{\frac{x(1+v)}{2\alpha_x}} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_i x + uvt}{\sqrt{4\alpha_x u R_i t}} \right) \right);$$

$$v = \sqrt{1 + \frac{4\alpha_x R_i \lambda_i}{u}};$$

$$B_i(x, t) = \frac{e^{-at}}{2} \left(e^{\frac{x(1-\mu)}{2\alpha_x}} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_i x - u\mu t}{\sqrt{4R_i \alpha_x u t}} \right) + e^{\frac{x(1+\mu)}{2\alpha_x}} \operatorname{erfc} \left(\frac{R_i x + u\mu t}{\sqrt{4R_i \alpha_x u t}} \right) \right);$$

$$\mu = \sqrt{1 + \frac{4\alpha_x R_i (\lambda_i - a)}{u}};$$

$$a = \frac{R_2 \lambda_2 - R_1 \lambda_1}{R_2 - R_1}. \quad (8)$$

Для тестирования численной схемы в GeRa был рассчитан перенос в колонке, заполненной глиной, для цепочки из двух радионуклидов $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$. Параметры задачи приведены в табл. 1. Модель реализована в квазиодномерной постановке: колонка разбивалась равномерной гексаэдральной сеткой вдоль оси x .

Таблица 1. Параметры верификационного теста с переносом цепочки нуклидов

Параметр	Величина
Длина колонки	10 м
Δx (размер ячейки сетки)	0,1 м
Δt (шаг по времени)	25 лет
θ (пористость)	0,4
α (дисперсивность)	1 м
ρ_b (плотность сухой породы)	2000 кг/м ³
u (скорость фильтрации)	0,04 м/сут
k_d (^{234}U)	1,6 м ³ /кг
k_d (^{230}Th)	5,8 м ³ /кг
$T_{1/2}$ (^{234}U)	245 878 лет
$T_{1/2}$ (^{230}Th)	75 438 лет
C_1 (концентрация ^{234}U на левой границе колонки)	1 моль/л
C_2 (концентрация ^{230}Th на левой границе колонки)	0 моль/л

Распределение концентрации обоих радионуклидов в колонке на момент времени 1000 лет приведено на рис. 1. Сравнивается аналитическое решение (7)–(8) и расчетный результат, полученный в GeRa с использованием явной схемы дискретизации оператора переноса второго порядка точности по пространству. Видно хорошее соответствие результатов.

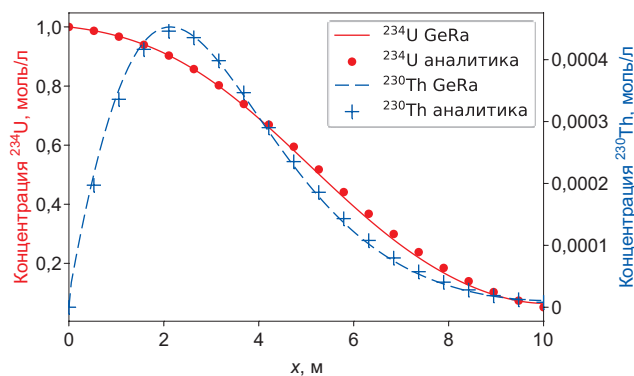


Рис. 1. Распределение концентрации ^{234}U и ^{230}Th по длине колонки на момент времени 1000 лет: результаты расчета в GeRa и аналитическое решение

Оценка ошибки сопряжения

Сопряжение модулей переноса и распада в коде GeRa выполняется с помощью схемы расщепления [8]: на каждом шаге по времени производятся последовательно шаг переноса и шаг расчета распада по цепочке. В работе [3] была сделана оценка численной погрешности, вносимой таким сопряжением, при расчете переноса цепочки из двух нуклидов. Ее величина для дочернего нуклида составляет:

$$err = \theta \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 \Delta t} - e^{-\lambda_2 \Delta t}) \frac{\partial C_1^s}{\partial t} \left(R_1 - \frac{R_1^2}{R_2} \right), \quad (9)$$

где C_1^s — концентрация первого нуклида после шага переноса в схеме расщепления.

Из выражения (9) следует, что ошибка не нулевая, когда коэффициенты сорбционной задержки у родительского и дочернего нуклидов разные. Устремляя шаг по времени к нулю, получим:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} err = \theta \lambda_1 \frac{\partial C_1^s}{\partial t} \left(R_1 - \frac{R_1^2}{R_2} \right) \Delta t. \quad (10)$$

Ошибка имеет первый порядок аппроксимации по времени, что является обычным для схем расщепления по физическим процессам такого типа [8]. Это приемлемо в нашем случае, так как дискретизация уравнения переноса по времени в коде GeRa также имеет первый порядок аппроксимации.

Исходя из выражений (9)—(10) видно, что наиболее «опасным» случаем с точки зрения погрешности вычислений является соседство в цепочке относительно долгоживущего сильносорбируемого нуклида с короткоживущим слабо сорбируемым. Рассмотрим в качестве примера перенос в колонке, заполненной песком, такого рода цепочки: $^{243}\text{Am} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$. В начальный момент времени в первую ячейку квазиодномерной сетки колонки поступает радионуклид ^{243}Am , активность которого равна 10^{10} Бк. Параметры задачи приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры модели

Параметр	Величина
Длина колонки	50 м
Δx (размер ячейки сетки)	1 м
θ (пористость)	0,43
ρ_b (плотность сухой породы)	1600 кг/м ³
u (скорость фильтрации)	1 м/сут
k_d (^{243}Am)	1,9 м ³ /кг
k_d (^{239}Np)	0,005 м ³ /кг
k_d (^{239}Pu)	0,55 м ³ /кг
$T_{1/2}$ (^{243}Am)	$2,69 \cdot 10^6$ сут
$T_{1/2}$ (^{239}Np)	2,36 сут
$T_{1/2}$ (^{239}Pu)	$8,81 \cdot 10^6$ сут

Рассмотрим различные комбинации численных схем и шагов по времени. В качестве результата расчета представлена зависимость удельной активности нуклидов в растворе от времени в точке $x = 50$ м.

Итоговые показатели для явной схемы высокого порядка с шагом по времени $\Delta t = 5$ сут изображены на рис. 2. Шаг подобран так, чтобы был выполнен критерий Куранта для самого быстромигрирующего радионуклида в цепочке — ^{239}Np , что физически означает, что частица вещества за один шаг по времени не должна продвинуться больше, чем на один пространственный шаг [9]. Для явных схем это является необходимым условием устойчивой работы.

Видно, что, несмотря на высокую скорость миграции, ^{239}Np из-за малого периода его полураспада находится в равновесии со своим родителем ^{243}Am , поэтому в точку наблюдения они приходят вместе (максимум достигается в момент ~ 400 лет). Первым там оказывается ^{239}Pu через ~ 120 лет. В промежутке времени между первыми появлениями ^{239}Pu и ^{243}Am (в диапазоне 120—360 лет) удельная активность ^{239}Pu практически постоянная. Это вызвано тем,

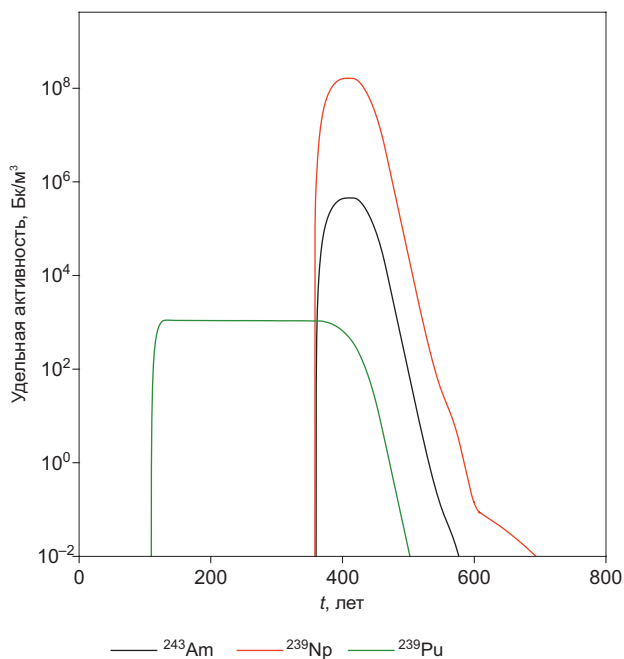


Рис. 2. Зависимость удельной активности радионуклидов в точке наблюдения от времени (явная схема высокого порядка, $\Delta t = 5$ сут)

что в точку наблюдения приходит появившийся позднее плутоний, «оторвавшийся» от облака активности америция и нептуния.

Рассмотрим теперь результат, полученный с использованием неявной схемы первого порядка по пространству с тем же шагом по времени (рис. 3).

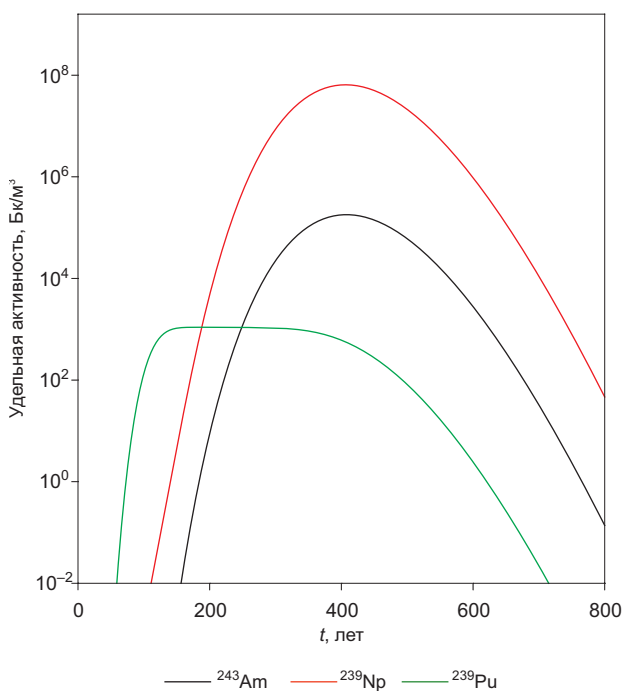


Рис. 3. Зависимость удельной активности радионуклидов в точке наблюдения от времени (неявная схема, $\Delta t = 5$ сут)

Видно, что пики заметно (максимальные значения удельных активностей для нептуния и америция в $\sim 2,5$ раза меньше) расплываются за счет диффузии. Время их прихода остается тем же, однако рост активности плутония наблюдается уже через ~ 50 лет (в модели с явной схемой высокого порядка — через ~ 100 лет).

Теперь рассмотрим результаты расчета для неявной схемы с шагом $\Delta t=400$ сут (рис. 4), который по времени обеспечивает выполнение критерия Куранта для плутония, и с учетом того, что активность нептуния за счет равновесия определяется активностью америция, такая величина шага может показаться адекватной для данной модели.

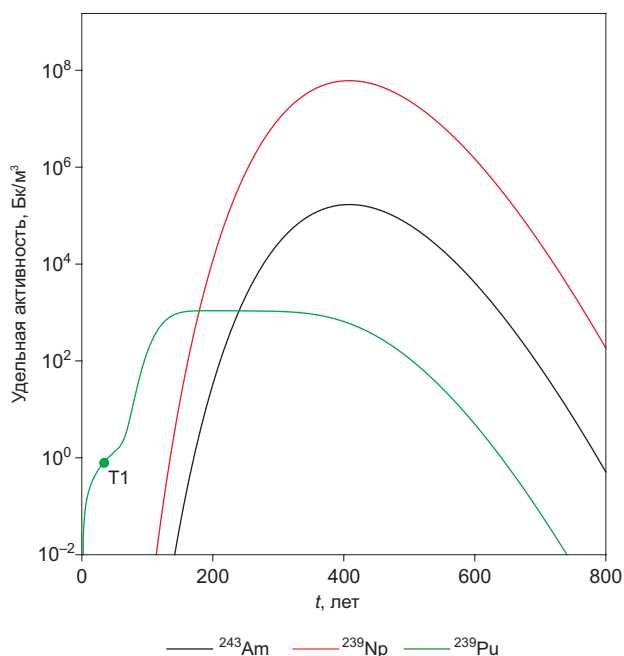


Рис. 4. Зависимость удельной активности радионуклидов в точке наблюдения от времени (неявная схема, $\Delta t=400$ сут)

Времена прихода пиков и максимумы удельной активности остались прежними, однако теперь заметные значения для плутония появляются в точке наблюдения с самого начала расчета, и только с момента времени ~ 60 лет (точка перегиба обозначена на графике как «Т1») эта зависимость приобретает вид такой же, как и в предыдущих вычислениях. Причина данного явления кроется в способе сопряжения модулей распада по цепочкам и переноса. Уже на первых шагах по времени быстромигрирующий нептуний успевает пробежать всю колонку и на этапе распада превращается в плутоний. Таким образом плутоний оказывается там, где быть не должен.

Теперь исключим нептуний из модели (будем считать, что америций сразу распадается с образованием плутония) и проведем расчет, применив явную схему высокого порядка с шагом $\Delta t=400$ сут. Отметим, что с нептунием проводить вычисление с таким шагом по времени нельзя — нарушение критерия Куранта для данного нуклида приведет к неустойчивостям в решении. Результат показан на рис. 5.

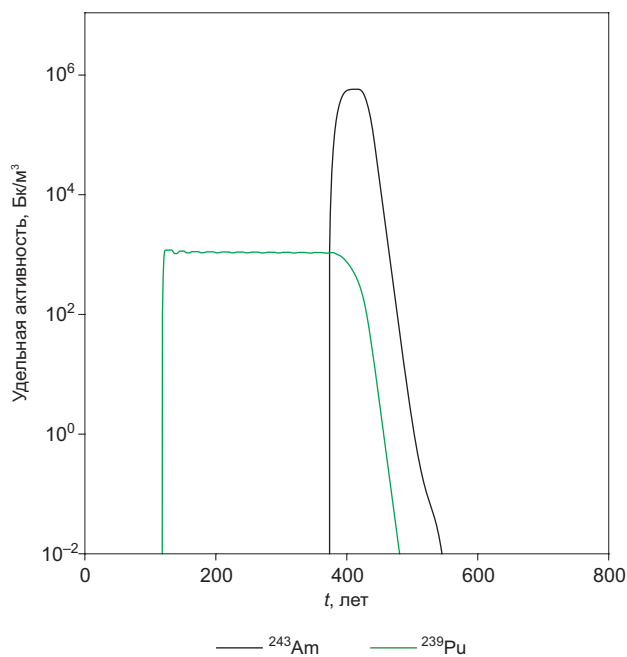


Рис. 5. Зависимость удельной активности радионуклидов в точке наблюдения от времени (явная схема высокого порядка, $\Delta t=400$ сут)

Результат практически не отличается от результата для $\Delta t=5$ сут (рис. 2). Небольшие колебания удельной активности плутония — следствие использования схемы высокого порядка для задачи с распределенным источником, вносимая погрешность составляет $\sim 5\%$.

Итак, неаккуратный подбор шага по времени и расчетной схемы в задаче геомиграции радионуклидов с учетом цепочек радиоактивного распада может привести к неадекватным результатам. Во избежание подобного рода ошибок в данных вычислениях следует по возможности использовать явные схемы переноса высокого порядка по пространству. Однако это приводит к ограничениям шага по времени, что может значительно увеличить время расчета на сложных моделях с большим количеством ячеек в сетке. Чтобы избежать подобного затруднения, следует по возможности исключать из вычислений слабосорбируемые дочерние нуклиды. Это допустимо делать, если их период полураспада значительно

меньше выбранного шага по времени. Тогда можно гарантировать, что данный дочерний радионуклид будет в равновесии с родительским нуклидом (обычно считается, что оно наступает за ~10 периодов полураспада [10], соответственно, условие исключения выглядит так: $T_{1/2} < 0,1\Delta t$), и в итоговый результат достаточно добавить равновесную активность дочернего радионуклида.

Выводы

В расчетном коде GeRa реализован алгоритм численного моделирования геомиграции радионуклидов с учетом цепочек радиоактивных распадов. Проведена верификация модели на задаче, имеющей аналитическое решение. Используемая в алгоритме схема расщепления по процессам вносит определенную вычислительную погрешность, тем большую, чем сильнее различаются сорбционные свойства родительского и дочернего нуклида. Для ее минимизации в практических расчетах, проводимых в коде GeRa, можно дать следующие рекомендации:

- для дискретизации оператора адвекции лучше использовать явную схему второго порядка точности по пространству;
- шаг по времени следует выбирать, исходя из выполнения критерия Куранта для наименее сорбируемого радионуклида;
- из расчета переноса лучше исключать слабосорбируемые быстрораспадающиеся радионуклиды, учитывая их в итоговом результате в равновесии с родительским нуклидом.

Литература

1. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste : Radioactive Waste Management

and Decommissioning : NEA/RWM/R(2019)1. — Paris, France : OECD NEA, 2019.

2. Капырин И. В., Иванов В. А., Копытов Г. В., Уткин С. С. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения РАО // Горный журнал. 2015. № 10. С. 44—50. DOI 10.17580/gzh.2015.10.08.

3. Григорьев Ф. В., Нужный А. С. Особенности моделирования миграции радионуклидов с учетом цепочек распада в расчетном коде GeRa // Инновации в атомной энергетике : Электронный ресурс, Москва, 01—03 октября 2019 года. — Москва: Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея, 2019. С. 473—476.

4. Bauer P., Attinger S., Kinzelbach W. Transport of a decay chain in homogenous porous media: analytical solutions // Journal of Contaminant Hydrology. 2001. Vol. 49. No. 3—4. Pp. 217—239. DOI: 10.1016/S0169-7722(00)00195-9.

5. Bear J., Cheng A. H.-D. Modeling groundwater flow and contaminant transport. — Dordrecht, Springer, 2010. V. 23. 834 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-6682-5.

6. Григорьев Ф. В., Капырин И. В., Коньшин И. Н. Применение программной платформы INMOST в расчетном коде GeRa для работы с распределенными сетками общего вида // Математика Црне Горе. 2016. Т. 36. С. 27—44.

7. Santamarina A., Bernard D., Rugama Y. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 22, 2009. — URL: <http://www.nea.fr/>.

8. Марчук Г. И. Методы расщепления. — М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 264 с.

9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. — М. : Мир, 1991. 504 с.

10. Бекман И. Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения : учебник для среднего профессионального образования. 2-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2022. 493 с.

Информация об авторах

Григорьев Федор Владимирович, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: grig-fedor@ibrae.ac.ru.

Нужный Антон Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: nuzhny@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Григорьев Ф. В., Нужный А. С. Моделирование геомиграции радионуклидов с учетом цепочек радиоактивного распада в коде GeRa: верификация численной схемы и особенности расчетов // Радиоактивные отходы. 2024. № 2 (27). С. 95—101. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-95-101.

RADIONUCLIDE TRANSPORT IN GEOLOGICAL ENVIRONMENT MODELED IN THE GERA CODE WITH AN ACCOUNT TAKEN OF RADIOACTIVE DECAY CHAINS: NUMERICAL SCHEME VERIFICATION AND CALCULATION SPECIFICS

Grigor'yev F. V., Nuzhnyy A. S.

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

Article received on February 15, 2024

The paper describes a numerical scheme implemented in the GeRa code to solve the problem of radionuclide transport in porous medium taking into account radioactive decay chains. It is based on a scheme of splitting by physical processes and the use of separate modules for solving transport and radioactive decay chain problems. Verification of the numerical scheme was performed using an analytical solution for a specific case of the problem formulation in a homogeneous porous medium. The study explores the error introduced into the numerical solution by the use of the splitting scheme. The study provides recommendations regarding the selection of appropriate parameters for the numerical scheme to calculate the transport of nuclide chains with different sorption properties.

Keywords: radionuclide transport in geological environment, radioactive decay, GeRa code, radioactive waste.

References

1. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste : Radioactive Waste Management and Decommissioning : NEA/RWM/R(2019)1. — Paris, France : OECD NEA, 2019.
2. Kapyrin I. V., Ivanov V. A., Kopytov G. V., Utkin S. S. Integral'nyy kod GeRa dlya obosnovaniya bezopasnosti zakhroneniya RAO [Integrated GeRa code for the demonstration of radioactive waste disposal safety]. *Gornyy zhurnal — Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 44—50. DOI 10.17580/gzh.2015.10.08.
3. Grigor'yev F. V., Nuzhnyy A. S. *Osobennosti modelirovaniya migratsii radionuklidov s uchetom tsepohek raspada v raschetnom kode GeRa* [Specific aspects associated with radionuclide transport modeling in the GeRa code considering the decay chains]. Proceedings of a Conference for Young Specialists “Innovations in Nuclear Power”. 2019. Pp. 473—476.
4. Bauer P., Attinger S., Kinzelbach W. Transport of a decay chain in homogenous porous media: analytical solutions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, vol. 49, no. 3—4, pp. 217—239. DOI: 10.1016/S0169-7722(00)00195-9.
5. Bear J., Cheng A. H.-D. *Modeling groundwater flow and contaminant transport*. — Dordrecht, Springer, 2010. Vol. 23. 834 p. DOI: 10.1007/978-1-4020-6682-5.
6. Grigor'yev F. V., Kapyrin I. V., Kon'shin I. N. Prime-niye programmnoy platformy INMOST v raschetnom kode GeRa dlya raboty s raspredelennymi setkami obshchego vida [Application of the INMOST software platform in the GeRa calculation code to handle the distributed meshes of a general form]. *Matematika Tsrne Gore — Matematika Montisnigri*, 2016, vol. 36, pp. 27—44.
7. Santamarina A., Bernard D., Rugama Y. *The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library*, JEFF Report 22, 2009. — URL: <http://www.nea.fr/>.
8. Marchuk G. I. *Metody rasshchepleniya* [Splitting methods]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 264 p.
9. Fletcher K. *Vychislitel'nyye metody v dinamike zhidkostey* [Computational technics for fluid dynamics]. Moscow, Mir Publ., 1991. 504 p.
10. Bekman I. N. *Atomnaya i yadernaya fizika: radioaktivnost' i ioniziruyushchiye izlucheniya* [Atomic and nuclear physics: radioactivity and ionizing radiation]. Moscow, Yurait Publ., 2022. 493 p.

Information about the authors

Grigor'yev Fedor Vladimirovich, engineer, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: grig-fedor@ibrae.ac.ru.

Nuzhnyy Anton Sergeevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: nuzhny@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Grigor'yev F. V., Nuzhnyy A. S. Radionuclide Transport in Geological Environment Modeled in the GeRa Code with an Account Taken of Radioactive Decay Chains: Numerical Scheme Verification and Calculation Specifics. *Radioactive Waste*, 2024, no. 2 (27), pp. 95—101. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-95-101. (In Russian).