

О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЕТА КОНСТРУКЦИИ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАО ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ДАЛЬНЮЮ ЗОНУ

Ф. В. Григорьев^{1,2}, А. В. Плёнкин¹, И. В. Капырин^{1,2}

¹Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 4 июля 2018 г.

Рассматривается задача моделирования миграции в ближней зоне радионуклидов, планируемых к размещению в пункте глубинного захоронения (ПГЗРО) в Нижнеканском массиве. С помощью расчетного кода GeRa создается трехмерная численная модель для расчета фильтрационных потоков и переноса радионуклидов. На основе анализа скорости выхода загрязнения за границы расчетной области демонстрируется значимость детального учета конструктивных особенностей ПГЗРО для оценки динамики выхода загрязнителя в дальнюю зону.

Ключевые слова: пункт глубинного захоронения, математическое моделирование, геомиграция.

Введение

Наиболее сложным объектом в системе пунктов захоронения радиоактивных отходов (РАО) является ПГЗРО, строительство которого планируется в Нижнеканском массиве гнейсов, расположенном в Красноярском крае. Вводу ПГЗРО в эксплуатацию должны предшествовать многочисленные этапы, включая создание подземной исследовательской лаборатории и проведение большого объема исследований для обоснования безопасности будущего пункта захоронения (см. пп. 2.5, 6.71, I.45, II.1 в SSG-14 [1] и [2]).

Основным средством подтверждения долговременной безопасности ПГЗРО является численное моделирование существенных для его эволюции процессов (подробнее о рассмотрении ОСП (особенность, событие, процесс от английского feature, event, process — FEP) для пунктов захоронения РАО см. [3]). Центральную

роль играет геомиграционное моделирование, поскольку подземная водная среда является главным потенциальным путем переноса радионуклидов из пункта захоронения РАО в биосферу. Сложность и различие пространственных масштабов интересующих процессов приводит к тому, что обычно при моделировании ПГЗРО создаются две модели переноса: модель выхода радионуклидов за пределы инженерных барьеров безопасности (ИББ), описывающая процессы в матрице иммобилизации РАО и системе инженерных барьеров, и модель дальней зоны пункта захоронения. В модели дальней зоны проводится расчет миграции радионуклидов в геологической породе вплоть до достижения биосферы. Ее пространственный масштаб обычно составляет единицы-десятки километров по простиранию, до километра в глубину.

Заметим, что в модели дальней зоны, имеющей региональный масштаб, затруднительно учесть детали строения ПГЗРО в силу вычислительной сложности получаемой задачи, поэтому на модели дальней зоны поступление радионуклидов зачастую задается с помощью равномерно распределенного в объеме либо точечного источника. Зарубежный опыт [4–7] показывает, что для получения адекватной оценки нельзя ограничиваться только изучением свойств ИББ или изучением геомиграции радионуклидов в дальней зоне без учета сложной структуры самого пункта захоронения, включающей скважины, системы туннелей и каньонов и другие элементы. Наличие всех этих структурных элементов оказывает существенное влияние на процесс выхода радионуклидов за пределы пункта захоронения. Отсюда следует необходимость разработки расчетных кодов для трехмерного моделирования фильтрации и миграции радионуклидов и создания трехмерных структурных моделей, учитывающих все основные конструктивные особенности захоронений. Такие модели могут дополнять модели регионального масштаба, например приведенную в работе [8], и уточнять информацию о поступлении радионуклидов в дальнюю зону.

В данной работе рассматривается модель геофильтрации и геомиграции в ближней зоне пункта захоронения (в некоторых работах ее называют «repository-scale model» или «моделью на масштабе пункта захоронения» [4]) в рамках одной из концепций компоновки ПГЗРО в Нижнеканском массиве, созданная в расчетном коде GeRa [9]. Она позволяет детально описать движение подземных вод и перенос загрязнителей вблизи конструктивных

элементов пункта захоронения. Такая модель позволит на следующих этапах работы провести сравнительный анализ различных концепций пункта захоронения с точки зрения выполнения требований безопасности, а также может быть использована для задания интенсивности поступления радионуклидов в модели дальней зоны.

Численная модель миграции радионуклидов в ближней зоне

Геометрическая и сеточная модели ПГЗРО

Кратко опишем рассматриваемую концепцию компоновки ПГЗРО. Камеры захоронения, предназначенные для размещения РАО 2 класса, и соединяющие их транспортные тоннели располагаются на двух горизонтах. Размещение тепловыделяющих РАО 1 класса предполагается в контейнерах в вертикальных скважинах, пробуренных между выработками верхнего и нижнего горизонтов. Подробную схему пункта захоронения можно найти в работах [10–12].

Геометрическая модель пункта захоронения и окружающей породы строилась средствами кода GeRa на основе проектной документации и учитывает указанные выше элементы (462 скважины, 66 камер захоронения верхнего и нижнего уровней, 462 буровые камеры и т. д.) (рис. 1). Процесс построения модели автоматизирован с помощью скриптовых инструкций, позволяющих задавать контуры объектов и начальные условия для задачи переноса в виде текстового файла специального формата, поэтому при необходимости модель может быть легко модифицирована.

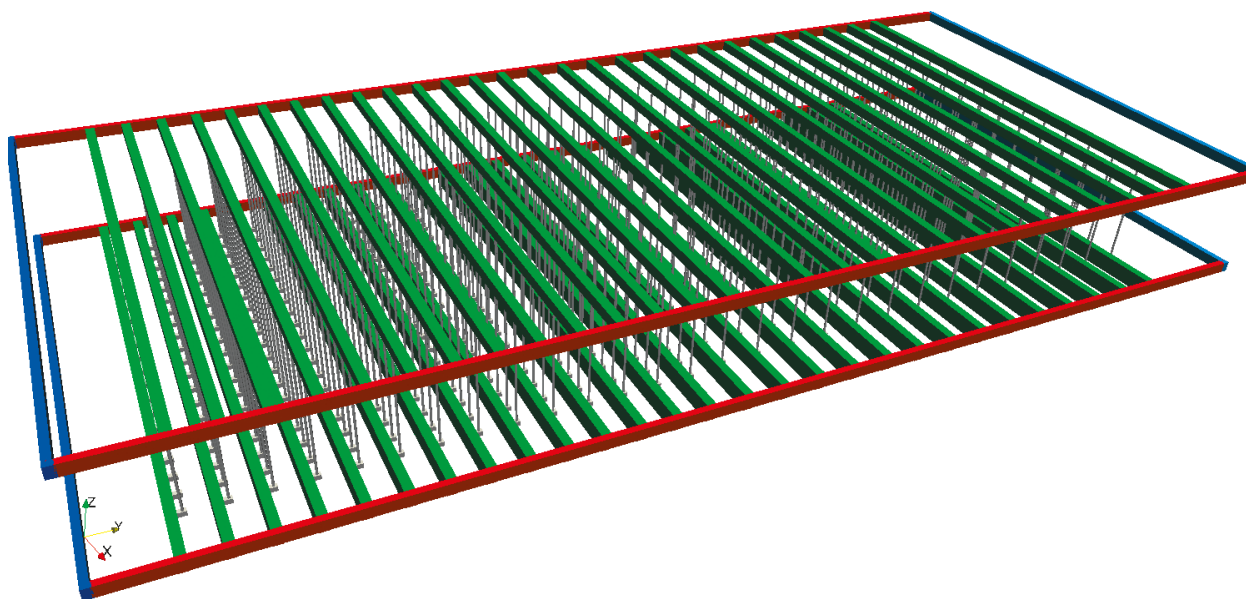


Рис. 1. Общий вид структурной модели пункта захоронения: транспортные тоннели показаны красным и синим цветами, камеры захоронения РАО 2 класса – зеленым цветом, скважины для РАО 1 класса и буровые камеры в их основании – серым цветом

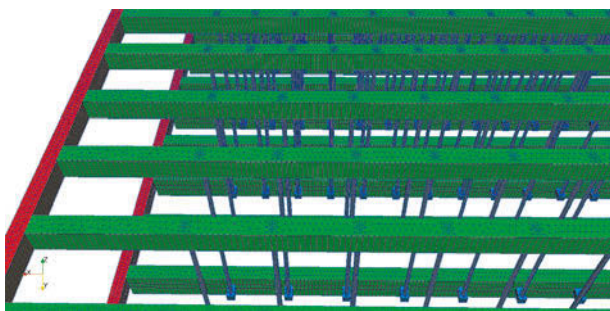


Рис. 2. Фрагмент призматической сетки верхнего уровня ПГЗРО

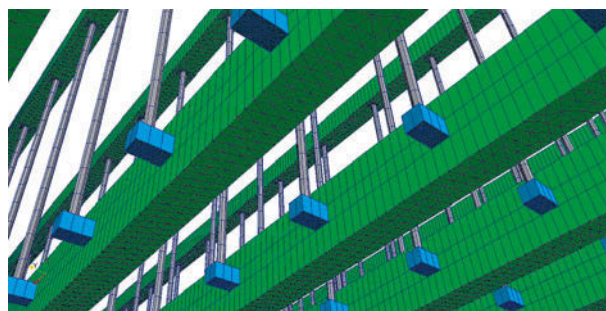


Рис. 3. Фрагмент призматической сетки нижнего уровня ПГЗРО

Расчетная область представляет собой параллелепипед размерами 480×910×107 м, включающий ПГЗРО и вмещающую породу. Для численного моделирования расчетная область разбивается на ячейки треугольно-призматической сеткой (рис. 2, 3). Построенная сетка содержит приблизительно 3 млн ячеек. Такое число ячеек представляется минимально необходимым для построения модели, учитывающей конструкцию пункта захоронения. Однако отметим, что для учета ИББ либо увеличения пространственного масштаба модели с учетом геологического строения массива потребуются сетки, состоящие из десятков и сотен миллионов ячеек.

На рис. 2, 3 для демонстрации трехмерной сетки, использованной для дискретизации элементов пункта захоронения, при отрисовке спрятаны ячейки, относящиеся к геологической среде. Скважины для РАО 1 класса показаны серым цветом, камеры захоронения РАО 2 класса — зеленым, транспортные тоннели — красным, бутовые камеры — синим цветом.

Постановка и методика численного решения задач фильтрации и переноса в рамках построенной сеточной модели

Расчет проводится с момента времени, когда произошло заполнение ПГЗРО подземными водами и начался выход загрязнителя через ИББ (подробнее про ИББ см. [11, 12]).

Решается стационарная задача напорной фильтрации [13]:

$$-K\Delta h = 0, \quad (1)$$

где $K(x, y, z)$ — коэффициент фильтрации (варьируется в пространстве), h — гидравлический напор.

Задача решалась в двух вариантах постановки граничных условий:

- 1) течение «вдоль» пункта захоронения: транспортные тоннели (обозначенные на рис. 1 красным цветом) сонаправлены с градиентом напора;
- 2) течение «поперек» пункта захоронения: транспортные тоннели перпендикулярны направлению градиента напора.

В обоих случаях граничные условия заданы таким образом, чтобы в направлении фильтрационного потока создавался градиент напора $\nabla h = 0,05$.

Найденный при решении (1) напор используется для расчета скорости фильтрации по закону Дарси [13]:

$$\vec{u} = -K\nabla h, \quad (2)$$

которая затем применяется при решении задачи переноса. В качестве переносимого вещества рассматриваем нейтральный (несорбируемый, нераспадающийся) трассер. Уравнение, описывающее перенос, имеет следующий вид:

$$\phi \frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(\vec{u}C) - D\Delta C = 0. \quad (3)$$

Здесь ϕ — активная пористость среды, C — концентрация трассера в жидкости, D — коэффициент диффузии.

Поступление загрязнителя в среду моделируется диффузией растворенного вещества из скважин. Начальное условие для задачи — единичная концентрация трассера ($C = 1$ моль/м³) в скважинах. Захоронение РАО 2-го класса в камерах захоронения обоих уровней и каньонах нижнего уровня на данном этапе не моделируется.

Использованные параметры пористой среды указаны в таблице 1. Данные для породы взяты в соответствии с работой [14]. Параметры материалов тоннелей, камер захоронения и скважин не обосновывались физически, поскольку соответствующие проектные данные на этом этапе отсутствуют, но были взяты исходя из предположения, что засыпка будет более пористой и проницаемой, чем окружающая горная порода.

Для решения уравнения (1) в GeRa была использована классическая линейная схема метода конечных объемов (МКО) с двухточечной аппроксимацией потока. Уравнение (3) решалось с применением полностью неявной линейной схемы МКО 1-го порядка (критерий Куранта задавал слишком жесткое ограничение на шаг по времени, что обусловило отказ от явных схем высокого порядка). Подробнее о

Таблица 1. Параметры сред, использованные в модели

	Тоннели, камеры захоронения и области EDZ вокруг скважины	Порода	Скважина
Коэффициент фильтрации (м/сут)	0,1	10^{-4}	10^{-6}
Пористость	0,1	0,01	0,1
Коэффициент диффузии ($\text{м}^2/\text{сут}$)	–	–	$1,25 \times 10^{-11}$

методах дискретизации уравнений, доступных в комплексе GeRa, см. работу [9]. При расчетах использовался шаг по времени 100 лет. Моделирование проводится на период 10 000 лет.

Результаты моделирования

Рассмотрим зависимость интенсивности выхода нейтрального трассера за пределы расчетной области от времени для течения «вдоль» и «поперек» пункта захоронения (рис. 4). Со временем интенсивности выходят на стационарный уровень, причем для течения «вдоль» значение ее стационарного уровня примерно в два раза больше, чем для течения «поперек». Этот факт можно объяснить тем, что при течении «поперек» камеры захоронения сонаправлены с основным течением, эффективнее перехватывают поток жидкости и направляют его в обход скважин.

Здесь уместно провести сравнение с ситуацией, когда в модели дальней зоны используется упрощенная модель источника загрязнения, в которой радионуклиды равномерно распределяются в некотором параллелепипеде с однородными свойствами, содержащем пункт захоронения целиком. В этом случае адвективный вынос загрязнения из пункта захоронения в дальнюю зону будет интенсивнее именно при поперечном направлении потока, так как площадь сечения для случая «вдоль» меньше, чем для случая «поперек». В представленной здесь детальной модели

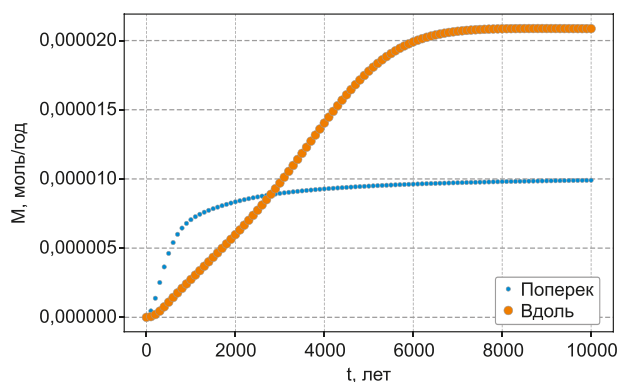


Рис. 4. Зависимость интенсивности выхода загрязнителя M за пределы области моделирования от времени для двух вариантов направления потока

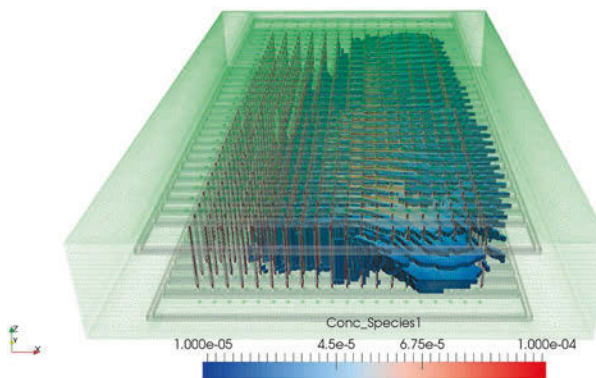


Рис. 5. Установившееся распределение концентрации для течения поперек пункта захоронения (концентрация, определяющая границу ореола $C = 10^{-5}$ моль/ м^3)

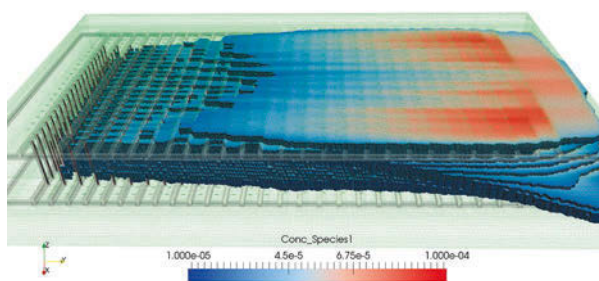


Рис. 6. Установившееся распределение концентрации для течения вдоль пункта захоронения (концентрация, определяющая границу ореола $C = 10^{-5}$ моль/ м^3)

наблюдается обратный эффект. Распределения концентрации в среде после установления стационарного состояния показаны на рис. 5, 6.

Ореол, задаваемый определенной концентрацией ($C > 10^{-5}$ моль/ м^3), на рис. 5 не достигает границы расчетной области в отличие от ситуации на рис. 6, что также свидетельствует о более интенсивном выносе загрязнителя при течении «вдоль», чем при течении «поперек» пункта захоронения.

Заключение

В работе рассмотрено моделирование процессов фильтрации и переноса загрязнителя в ближней зоне ПГЗРО. Модель позволяет учесть структурные особенности пункта захоронения, такие как скважины для размещения РАО 1 класса, камеры захоронения, транспортные тоннели, каньоны и др. Продемонстрированы возможности создания расчетных сеток для геометрически сложных объектов в расчетном коде GeRa. В результате численного моделирования показано, что конструктивные особенности пункта захоронения и его расположение относительно направления фильтрационного потока оказывает существенное влияние на процесс выхода загрязнителя за пределы пункта захоронения в дальнюю зону. Таким образом, представляется обоснованным построение цепочки моделей: модель

выхода загрязнителя за пределы ИББ (Ближняя зона 1) — модель миграции на масштабе пункта захоронения (Ближняя зона 2) — дальняя зона. Представленная в данной работе промежуточная модель ближней зоны на масштабе пункта захоронения позволит определить фильтрационные потоки в пределах подземной части ПГЗРО и оптимизировать его конструкцию с точки зрения замедления выхода загрязнителя.

Можно заключить, что разработанная численная геомиграционная модель ПГЗРО в ближней зоне пункта захоронения позволяет подтвердить необходимость учета его конструктивных особенностей для оценки выхода загрязнителя в дальнюю зону, оценить различные варианты пространственной компоновки ПГЗРО, а также исследовать и отобразить детали геофильтрационных и геомиграционных процессов, происходящих в ближней зоне пункта захоронения.

Литература

1. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14, IAEA Safety Standards. — IAEA, Vienna. — 2011.
2. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1. С. 33–42.
3. Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Уткин С. С., Познов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 54–63.
4. Joyce S., Hartley L., Applegate D., Hoek J., Jackson P. Multi-scale groundwater flow modeling during temperate climate conditions for the safety assessment of the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden // Hydrogeology Journal, 2014. No. 22(6). Pp. 1233–1249.
5. Brommundt J., Kaempfer Th. U., Enssle C. P., Mayer G., Wendling J. Full-scale 3D modelling of a nuclear waste repository in the Callovo-Oxfordian clay. Part 1: thermos-hydraulic two-phase transport of water and hydrogen // In: Norris, S. Bruno, J. et al. (eds) Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Geological Society, London, Special Publications, 400. 2014. Pp. 443–467.
6. Enssle C.P., Brommundt J., Kaempfer Th.U., Mayer G., Wendling J. Full-scale 3D modelling of a nuclear waste repository in the Callovo-Oxfordian clay. Part 2: thermos-hydraulic two-phase transport of water, hydrogen, ¹⁴C and ¹²⁹I // In: Norris, S. Bruno, J. et al. (eds) Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement. Geological Society, London, Special Publications, 400. 2014. Pp. 469–481.
7. Hoteit H., Ackerer P., Mose R. Nuclear waste disposal simulations: Couplex test cases // Computational Geosciences. 2004. No. 8 (2). Pp. 99–124.
8. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 42–53.
9. 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
10. Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Бутов П. А., Токарев Ю. Н. Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 65–74.
11. Богатов С. А. Захоронение остеклованных ВАО в вертикальных скважинах с цементной закладкой — плюсы и минусы с точки зрения обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 21–33.
12. Мартынов К. В., Захарова Е. В. Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы. 2018. № 2 (3). — С. 52–62.
13. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. — М.: Наука, 1977. — 664 с.
14. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Гидрогеологические исследования при изысканиях массива кристаллических пород для подземного строительства в Южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. 2012. № 11. С. 52–62.

Информация об авторах

Григорьев Федор Владимирович, инженер-исследователь, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52); аспирант, Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 8), e-mail: grig-fedor@ibrae.ac.ru.

Плёткин Андрей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., 52), e-mail: plenkin@ibrae.ac.ru.

Капырин Иван Викторович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией геомиграции, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., 52), старший научный сотрудник, Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 8), e-mail: kapyrin@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Григорьев Ф. В., Пленкин А. В., Капырин И. В. О необходимости учета конструкции пункта глубинного захоронения РАО при моделировании поступления радионуклидов в дальнюю зону // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3(4). — С. 95—101.

TO THE NECESSITY OF TAKING INTO ACCOUNT THE DISPOSAL'S STRUCTURE WHILST FAR FIELD WASTE INPUT MODELING

Grigorev F. V.^{1,2}, Plenkin A. V.¹, Kapyrin I. V.^{1,2}

¹Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received 4 July 2018

Radionuclides from radioactive waste disposal in Nizhnekansky Rock Massif modeling is considered on the repository scale which allows for taking into account the structure of proposed facility. 3D numerical flow and transport model is developed using the GeRa code. The contaminant release across the model's border is analyzed and the importance of repository construction features detailed consideration for dynamics of contaminant release into the far field is demonstrated.

Key words: nuclear waste disposal, mathematical modeling, geomigration.

References

1. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14, IAEA Safety Standards. IAEA, Vienna, 2011.
2. Dorofeev A. N., Bolshov L. A., Linge I. I., Utkin S. S., Saveleva E. A. Strategic Master Plan for R&D Demonstrating the Safety of Construction, Operation and Closure of a Deep Geological Disposal Facility for Radioactive Waste. *Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 32—41. (In Russian).
3. Dorofeev A. N., Saveleva E. A., Utkin S. S., Ponzov A. V. et al. Evolution in the Safety Case for Liquid Radioactive Waste Geological Repositories. *Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 54—63. (In Russian).
4. Joyce S., Hartley L., Applegate D., Hoek J., Jackson P. Multi-scale groundwater flow modeling during temperate climate conditions for the safety assessment of the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden. *Hydrogeology Journal*, 2014, no. 22(6), pp. 1233—1249.
5. Brommundt J., Kaempfer Th.U., Enssle C.P., Mayer G., Wendling J. Full-scale 3D modelling of a nuclear waste repository in the Callovo-Oxfordian clay. Part 1: thermos-hydraulic two-phase transport of water and hydrogen. In: Norris, S. Bruno, J. et al. (eds) *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Geological Society, London, Special Publications, 400, 2014, pp. 443—467.
6. Enssle C.P., Brommundt J., Kaempfer Th.U., Mayer G., Wendling J. Full-scale 3D modelling of a nuclear waste repository in the Callovo-Oxfordian clay. Part 2: thermos-hydraulic two-phase transport of water, hydrogen, ¹⁴C and ¹²⁹I. In: Norris, S. Bruno, J. et al. (eds) *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*. Geological Society, London, Special Publications, 400, 2014, pp. 469—481.
7. Hoteit H., Ackerer P., Mose R. Nuclear waste disposal simulations: Coupled test cases. *Computational Geosciences*, 2004, no.8 (2), pp. 99—124.
8. Rumynin V. G. Experience of Studying the Clay Masses and Crystalline Core-areas as Geological Environment for RW Final Isolation. *Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 42—53. (In Russian).
9. Kapyrin I. V., Ivanov V. A., Kopytov G. V., Utkin S. S. Integral code GeRa for RAW disposal safety validation. *Mining Journal*, 2015, no. 10, pp. 44—50. (In Russian). Doi: 10.17580/gzh.2015.10.08.

10. Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Butov R. A., Tokarev Yu. N. Three-dimensional numerical modelling of the thermal state of the deep radioactive waste disposal facility in the Nizhnekansk granitoid massif. *Radioactive Waste*, 2017, no. 1, pp. 64–73. (In Russian).
11. Bogatov S.A. Disposal of HLW in Vertical Deposition Holes with Cement Backfill – Pro and Contra with Regard to Long Term Safety of Geological Disposal Facility. *Radioactive Waste*, 2018, no. 1(2). pp. 21–33. (In Russian).
12. Martynov K.V., Zakharova E.V. The Analysis of Localization and the Scenario of Evolution of DGDF for RW at the Yeniseisky Site (Krasnoyarsk Region). *Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 52–62. (In Russian).
13. Polubarinova-Kochina, P. Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of motion of ground water]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 664 pp.
14. Ozerskiy A. Yu., Karaulov V. A. *Gidrogeologicheskiye issledovaniya pri izyskaniyakh massiva kristallicheskikh porod dlya podzemnogo stroitel'stva v Yuzhnoy chasti Yeniseyskogo kryazha* [Hydrogeological investigations for engineering surveys for underground construction within a crystalline rock massif in the southern part of the Yeniseyskiy Ridge]. *Inzhenernyye izyskaniya*, 2012, no. 11, pp. 52–62.

Information about the authors

Grigorev Fedor Vladimirovich, research engineer, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya st., Moscow, 115191, Russia), postgraduate, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (8, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), e-mail: grig-fedor@ibrae.ac.ru.

Plenkin Andrey Valerievich, PhD, Researcher, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: plenkin@ibrae.ac.ru.

Kapyrin Ivan Viktorovich, PhD, laboratory chief, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya st., Moscow, 115191, Russia), Senior Researcher, Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences (8, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), e-mail: kapyrin@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Grigorev F. V., Plenkin A. V., Kapyrin I. V. To the Necessity of Taking into Account the Disposal's Structure Whilst Far Field Waste Input Modeling. *Radioactive Waste*, 2018, no. 3(4), pp. 95–101. (In Russian).