

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В НИЖНЕКАНСКОМ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Н. И. Дробышевский, Е. В. Моисеенко, Р. А. Бутов, Ю. Н. Токарев

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2017 г.

Рассматривается задача расчета теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) в Нижнеканском массиве (Красноярский край). Для моделирования тепловых процессов в ПГЗРО был разработан 3D конечно-элементный код FENIA (Finite Element Nonlinear Incremental Analysis). Полученные результаты описывают пространственную и временную эволюцию температуры внутри объема ПГЗРО и окружающей горной породы на период до 10 000 лет. Результаты показывают, что практически все тепло будет поглощено окружающей породой без существенного увеличения температуры. Тем не менее в течение небольших промежутков времени температура в объеме ПГЗРО превысит 100°C.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, глубинное захоронение, математическое моделирование, температурный режим.

Введение

Изоляция в глубоких геологических формациях в настоящее время считается наиболее приемлемым методом обращения с высокоактивными отходами (ВАО), способным минимизировать негативное воздействие на человека и объекты окружающей среды в течение периода их потенциальной опасности. Проекты пунктов захоронения существуют в целом ряде стран: Финляндии, Швеции, США, Бельгии, Франции и т. д. [1]. Текущее состояние этих проектов сильно различается: от этапа исследований, как, к примеру, в Бельгии, до уже строящегося хранилища в Финляндии. Проект пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) для РАО 1 и 2 класса разрабатывается и в России [2] — планируется строительство ПГЗРО на глубине около 500 м в Нижнеканском массиве (НКМ) горных пород.

При размещении РАО в пунктах глубинного захоронения функцию удержания выполняют инженерные барьеры безопасности, минимизирующие выход радионуклидов за пределы объекта, а функцию изоляции — природные (естественные) барьеры, ограничивающие воздействие отходов на человека и биосферу. Природные

барьеры представляют собой горные породы, как правило, трех основных типов: кристаллические, соляные и глинисто-обломочные. В российском проекте тип пород — кристаллический, состоящий из гранитов, гнейсов и диоритов. Инженерные барьеры включают в себя консервирующую матрицу, стальные оболочки, слои бетона, бентонита и других материалов. В соответствии с нормативными документами инженерные барьеры должны сохранять свою целостность по крайней мере в течение 1000 лет.

Диапазон исследований, необходимых для обоснования долговременной безопасности ПГЗРО, беспрецедентно велик и связан с процессами, в наибольшей степени влияющими на состояние объекта на разных этапах его жизненного цикла, длительность которого может достигать до миллиона лет (рис. 1). Отсюда следует и приоритетность необходимых исследований.

Первые несколько сотен лет ключевые вопросы связаны с тепловым воздействием. Они же, помимо прочего, влияют на выбор и концепции захоронения (геометрия объекта), и концепции безопасности (система барьеров безопасности).

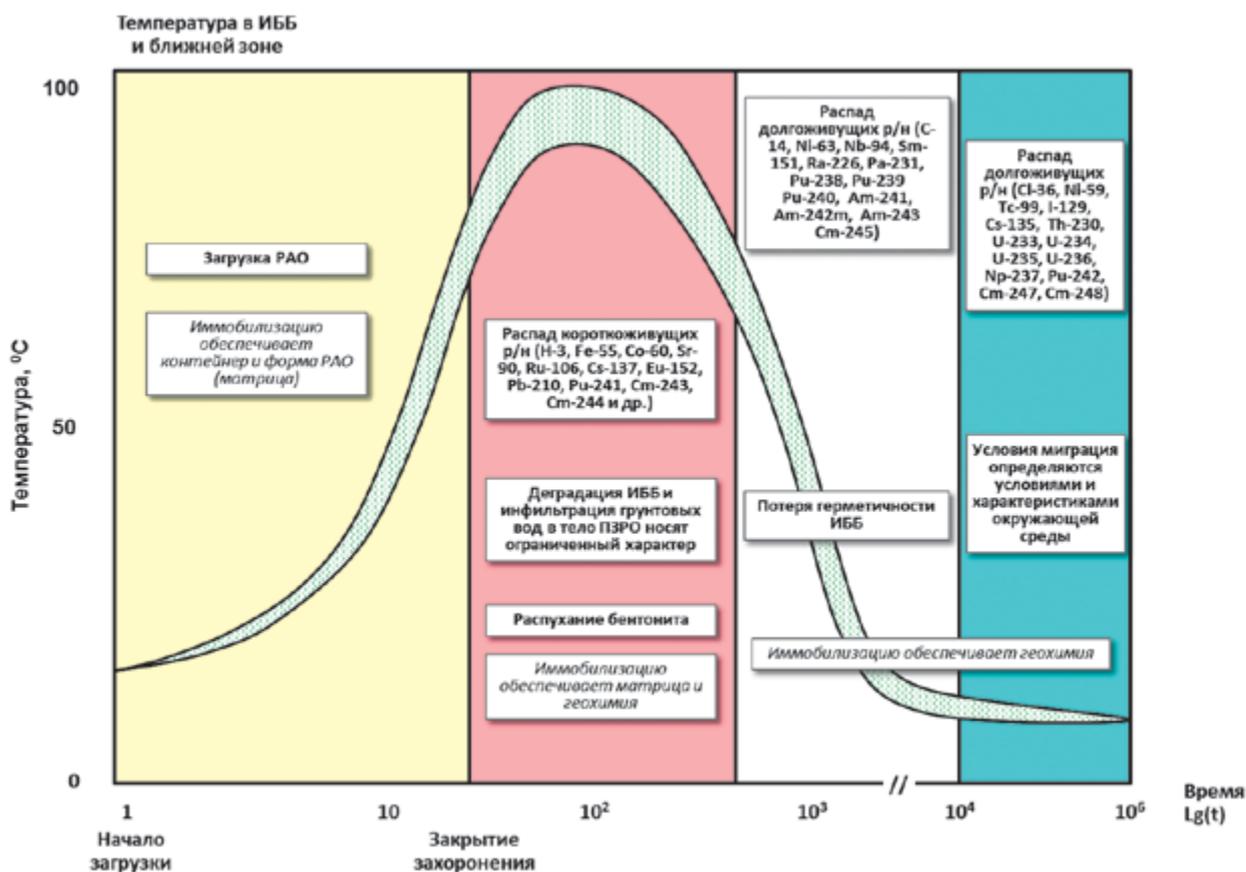


Рис. 1. Динамика основных процессов и температурный режим

Наиболее высокими температуры будут в первые десятилетия после закрытия, но для этого периода наиболее вероятна и целостность защитных барьеров. Для диапазона промежуточных значений температур и времен более 300 лет характерна неизбежность обводнения барьеров и нарастания интенсивности процессов коррозии, газообразования и т. д. Но значимость этих процессов целесообразно изучать уже не для короткоживущих радионуклидов. Подавляющий период времени система ПЗРО, в том числе и ближняя зона, будет находиться при относительно малых и соответствующих природным значениям температурах.

Уже на этом примере понятна принципиальная важность фиксации концепции безопасности как фактически постановочной части для исследований.

В нашем случае ВАО характеризуются высоким тепловыделением — до 2 кВт/м³. Тепловой режим ПЗРО зависит от целого ряда факторов, в том числе конфигурации пункта захоронения, графика его заполнения, тепловыделения РАО, теплофизических свойств материалов.

Изменяемые во времени тепловые поля будут оказывать значительное влияние на скорость и интенсивность протекания в ПЗРО различных химических и физических процессов. Причем многие из этих процессов взаимосвязаны. Температурные градиенты будут изменять

напряженно-деформированное состояние (НДС) и оказывать воздействие на движение жидкости и газов в инженерных барьерах и окружающей породе. НДС будет влиять на проницаемость среды для воды и газов. Движение воды будет дополненным механизмом переноса тепла и приводить к разбуханию бентонита. Адекватная оценка подобных явлений требует совместного решения уравнений теплопередачи, расчета НДС и движения воды в пористой среде (так называемый «ТНМ Coupling» [3]). Для совместного решения указанных уравнений разрабатывается программа FENIA (Finite Element Nonlinear Incremental Analysis). Дискретизация уравнений выполняется посредством метода конечных элементов, для чего разработана библиотека конечных элементов с функциями формы первого и второго порядка. Для интегрирования по времени используются неявные разностные схемы. Решения линейных и нелинейных алгебраических систем уравнений проводится при помощи библиотеки PETSc [4].

Необходимость теплового расчета связана с тем, что температура оказывает значительное влияние на механическую прочность, коррозионную стойкость и другие физические и химические свойства барьеров. При этом выполненные до настоящего времени оценки теплового режима ПЗРО проведены или для одной скважины с условиями симметрии по боковой поверхности,

т. е. не учитывается неодновременность заполнения всего захоронения, или посредством суперпозиции аналитических решений, полученных для скважины в виде линейного источника тепла, находящегося в однородной гомогенной среде [5].

В настоящей работе программа FENIA используется для численного моделирования эволюции теплового режима ПГЗРО в Нижнеканском массиве горных пород. В разработанной сеточной модели учитываются все скважины, заполняемые РАО, и растянутый во времени график их загрузки. В результате расчета было получено изменение температурного поля внутри ПГЗРО и в окружающей горной породе на период до 10 000 лет. Подобные оценки теплового режима будут способствовать оптимизации проекта создания ПЗРО за счет уточнения конфигурации размещения скважин, графика заполнения, выбора материалов инженерных барьеров.

Метод расчета теплового состояния

Для моделирования теплового состояния ПГЗРО используется конечно-элементный расчётный код FENIA, в котором решается трёхмерное уравнение теплопроводности:

$$\rho(t, \mathbf{X})c(t, T, \mathbf{X}) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij}(t, T, \mathbf{X}) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = q(t, \mathbf{X}), \quad (1)$$

$$i, j = 1..3, \quad \mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3),$$

где ρ — плотность, t — временная координата, \mathbf{X} — вектор пространственных координат, c — теплоемкость, T — температура, λ — тензор теплопроводности, q — источник тепла. Расчётные сетки, как правило, состоят из тетраэдрических или гексаэдрических элементов, но, вообще говоря, могут использоваться произвольные выпуклые конечные элементы. Для решения задачи могут использоваться функции формы конечных элементов первого или второго порядка.

Учитывается зависимость коэффициентов в (1) от временных и пространственных координат, а также от температуры. Зависимость теплоемкости и температуропроводности материалов от температуры может быть задана как из базы данных материалов, так и с помощью пользовательского ввода.

Так как уравнение (1) решается во всей области, которая включает в себя ПГЗРО и окружающую горную породу, функции $\rho(\mathbf{X})$, $c(\mathbf{X})$, $\lambda(\mathbf{X})$, $q(\mathbf{X})$ имеют разрывы на границах материалов. Другим источником пространственной зависимости тепловых свойств вмещающей породы является сам процесс земляных работ, так как свойства материала в зоне разуплотнения (EDZ — Excavation Disturbed Zone) могут отличаться от свойств основного массива горной породы.

Основным источником тепла является тепловыделение от распада РАО и химических реакций в инженерных барьерах, например при застывании бетона. Некоторые временные зависимости параметров будут экспортироваться из внешних расчетов, к примеру потоки тепла вследствие теплопереноса грунтовыми водами или химические реакции в инженерных барьерах.

В будущем будут также решаться уравнения равновесия для моделирования напряженно-деформированного состояния и уравнения движения жидкости для моделирования потоков грунтовых вод. После реализации вышеуказанных моделей будет возможно моделирование процессов в ПГЗРО в рамках совместной ТНМ (теплогидромеханической) модели. Необходимость такого сопряжения следует из тесной взаимосвязи этих процессов, продемонстрированной, в частности, в серии проектов DECOVALEX [3].

С помощью кода FENIA предполагается моделирование объектов разного размера. Самыми мелкими из них будут небольшие экспериментальные установки либо отдельные бидоны с РАО, самыми крупными — ПГЗРО в целом вместе с окружающими горными породами. Таким образом, характерный размер моделируемой области составляет от десятков сантиметров до сотен метров. На границе расчетной области могут устанавливаться условия первого, второго, третьего рода, а также описывающие переизлучение в полости и излучение во внешнюю среду. Также может использоваться комбинация граничных условий разного рода.

Верификация кода проводилась на двух нестационарных аналитических задачах: с точечным и протяженным линейным источником тепла, для которых авторами были получены аналитические решения [6]. Предполагалось, что тепловыделение уменьшается по экспоненциальному закону:

$$q(t) = q_0 e^{-t/t_0}, \quad (2)$$

где q — текущее тепловыделение, Вт; t — время, с; q_0 — начальное тепловыделение, Вт; t_0 — время, за которое начальное тепловыделение уменьшается в e раз, с.

Задача с точечным источником тепла решалась в сферической расчетной области, с протяженным линейным — в цилиндрической. Расчетная область для точечного источника представляла собой 1/8 шара радиусом 10 м, для протяженного — цилиндр радиусом 150 м. Размер области выбран таким образом, чтобы условия на внешней границе не влияли на решение. Теплофизические свойства материала брались близкими к характерным для вмещающей породы (гнейс для НКМ) [7] и приведены в табл. 1. Расчетные области для задач показаны на рис. 2.

На плоскостях симметрии шара, а также на верхней и нижней поверхности цилиндра задаются условия второго рода с нулевым тепловым

Таблица 1. Теплофизические свойства материала

Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость c , Вт/(кг·К)	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Температуропроводность $a = \lambda/(\rho c)$, м ² /с
2700	840	2,91	$1,28 \cdot 10^{-6}$

поток, на остальных — первого рода. Параметры, используемые в расчете, приведены в табл. 2.

Более подробное описание верификации дано в [6], здесь же приведем графики, показывающие сравнение результатов численного расчёта кодом FENIA с аналитическим решением. На рис. 3а показаны временные зависимости температуры для нескольких точек, находящихся на разном расстоянии от источника, для задачи

Таблица 2. Параметры для расчета

Начальное тепловыделение для сферы q_0 , Вт	Начальная линейная плотность тепловыделения для цилиндра q_0 , Вт/м	Время t_0 , лет	Начальная температура, °С	Температура на поверхностях с граничным условием 1 рода, °С
591,3	303,57	40	9	9

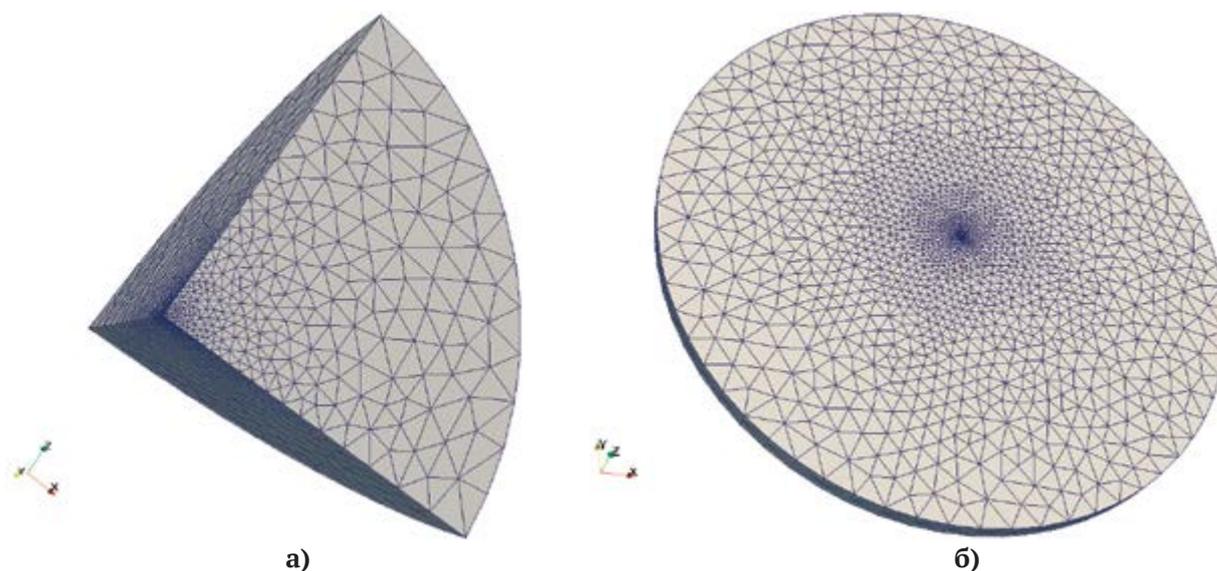


Рис. 2. Расчетные сетки: а – 1/8 шара с 30 ячейками по радиусу; б – цилиндр с 40 ячейками по радиусу

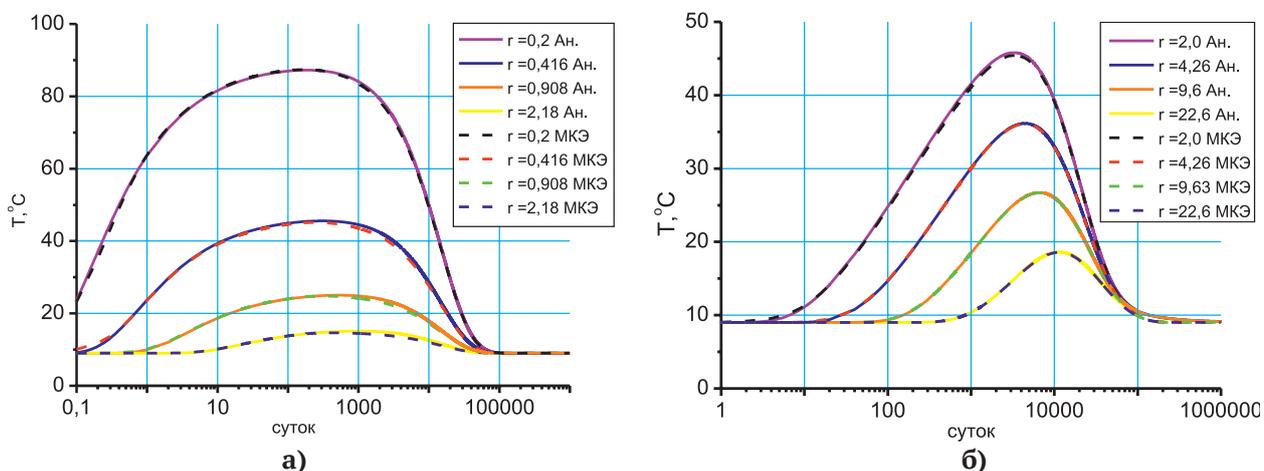


Рис. 3. Сравнение результатов численного решения кодом FENIA с аналитическим, расстояние r указано в метрах: а – для точечного источника; б – для протяженного

с точечным источником тепла, на рис. 36 — для задачи с протяженным источником. Видно достаточно хорошее совпадение результатов для всех рассмотренных точек обеих задач.

Геометрическая модель ПГЗРО

Согласно проекту ПГЗРО, остеклованные ВАО будут размещены в вертикальных скважинах глубиной 75 м между двумя горизонтами (+5 м и -70 м). На уровне горизонта скважины располагаются в 28 камерах захоронения длиной 360 м, концы которых объединены транспортно-технологическими выработками. Пункт захоронения будет разделен на два участка, на первом из которых будут захораниваться отходы, накопленные до 2010 года, имеющее начальное тепловыделение порядка 1 кВт/м^3 , на втором — накопленные после 2010 года с начальным тепловыделением около $1,5 \text{ кВт/м}^3$. Соответственно, на втором участке предполагается более разреженное расположение отходов: если в каждой из первых 14 камер захоронения (участок 1) будет находиться 20 скважин для ВАО, расположенных на расстоянии 15 м друг от друга, то в оставшихся (участок 2) — 13 скважин на расстоянии 23 м. На участке 1 расстояние между камерами захоронения составляет 23 м, на втором — 26 м, таким образом, габаритные размеры хранилища составляют примерно 360×700 м. Предполагается, что в одной скважине будет размещено 27 тонн ВАО, общее кол-во скважин — 462. План

моделируемой части ПГЗРО для горизонта +5 м показан на рис. 4.

После заполнения скважин РАО 1 класса камеры захоронения будут использоваться для размещения РАО 2 класса. Их тепловыделение в настоящем расчете не учитывается, как и прочие сравнительно слабые источники тепла: бетон в процессе отвердевания, прочие химические реакции в барьерах безопасности и т. д.

Инженерные барьеры (бидоны и контейнеры) состоят из нескольких слоев стали, разделенных бетоном или бентонитом. Пространство между контейнером и стенкой скважины заполняется тиксотропным шликером.

Вмещающие горные породы представлены гранитоидами: гранитами, гнейсами и диоритами. Температура окружающей породы на глубине 400–500 м составляет $5-10^\circ\text{C}$. Среднегодовая температура на поверхности земли — около 0°C .

Расчетная модель ПГЗРО

Для расчета была создана сеточная модель подземной части захоронения с окружающей горной породой. Сетка состоит из примерно 17,6 миллионов тетраэдральных конечных элементов, охватывает сам пункт захоронения и 400 м горной породы вокруг него в каждом направлении. Так как хранилище имеет две плоскости симметрии, сетка моделирует одну четверть ПГЗРО и имеет размер $1500 \times 550 \times 450$ м. Сеточное разбиение расчётной области показано на рис. 5.

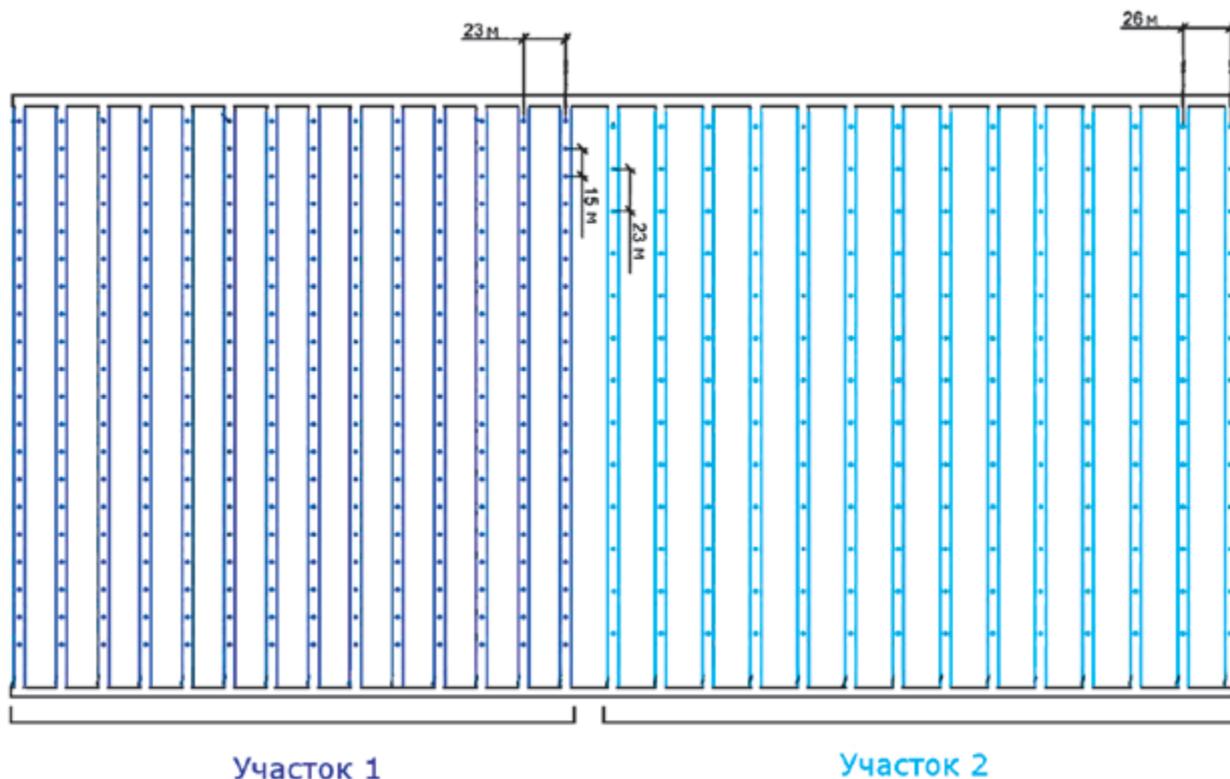


Рис. 4. Схема моделируемой части горизонта ПГЗРО +5 м

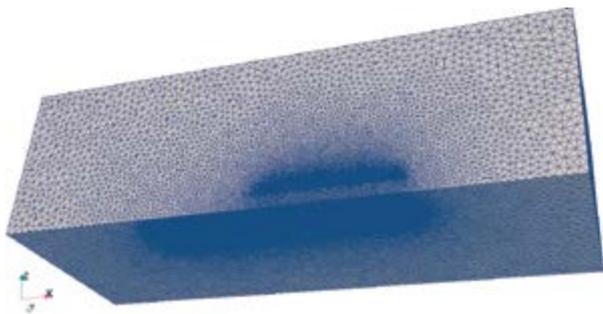


Рис. 5. Сеточное разбиение для моделирования ПГЗРО

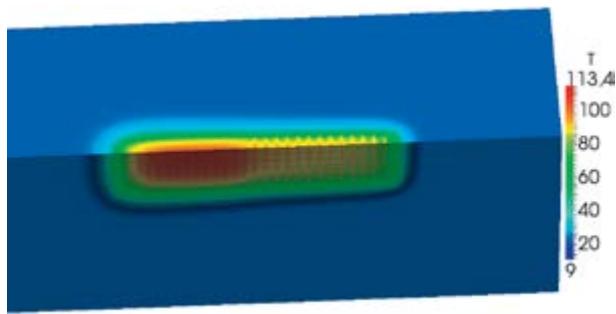


Рис. 6. Расчетное поле температур в ПГЗРО через 55 лет с начала заполнения

Таблица 3. Теплофизические свойства материалов, принятые в расчете

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³
Остеклованные ВАО	2,4	800	2500
Горная порода	2,91	840	2700
Инженерные барьеры	8,1	1500	2800

При формировании расчетной области было сделано несколько упрощений. Так, тепловыделение было принято равномерно распределенным вдоль скважины, материалы инженерных барьеров (бентонит, бетон, стенки контейнеров) были сгруппированы в один с усредненными свойствами, не рассматривалось отличие теплофизических свойств в зоне разуплотнения. Все коридоры и галереи считались заполненными горной породой с самого начала расчета (в реальности они будут заполнены РАО 2 класса и выработанными породами после заполнения хранилища). Свойства горной породы принимались соответствующими свойствам гнейсов при температурах 20–100°C [7]. Теплофизические свойства материалов, принятые в расчёте, показаны в табл. 3. Моделировалось постепенное заполнение ПГЗРО, при этом каждый год заполнялись скважины одной камеры захоронения. Таким образом, общее время заполнения равно 27 годам. Начальная температура во всей расчётной области принималась равной 9°C. На границах области задавались условия первого рода также с температурой 9°C. Предполагалось, что мощность тепловыделения ВАО спадает во времени по экспоненциальному закону (2). Значение начальной мощности для участка 1 принималось равным 1 кВт/м³, для участка 2 — равным 1,5 кВт/м³, параметра t_0 — равным 40 годам, то есть предполагалось, что мощность тепловыделения снижается в e раз за 40 лет или на 2,5% за год, как и в верификационных задачах.

Результаты моделирования теплового состояния

Были получены значения температурного поля в хранилище и окружающей породе на протяжении 10 000 лет. В качестве примера расчёта

трёхмерного поля температур на рис. 6 приведено состояние на момент времени $t = 55$ лет с начала заполнения. Видно, что к этому моменту горные породы в пределах участка 1 (левая сторона) заметно прогрелись и их температура превышает 100°C, на участке 2 такие же значения температур соответствуют матрице с ВАО и изолирующим контейнерам, причем только в той части, которая находится ближе к середине пункта захоронения и заполнялась раньше, породы же, как и захороненные в последнюю очередь контейнеры, еще не прогрелись. Зависимость температуры для центральной части внутренних скважин участков 1 и 2, приведенная на рис. 7, показывает, что максимальные температуры достигаются через 50-70 лет с начала заполнения ПГЗРО. Отметим, что на участке 2, который начинает заполняться через 14 лет, вследствие большего тепловыделения максимальные значения температур достигаются примерно в то же время, что и на участке 1. После этого начинается остывание как контейнеров, так и вмещающих пород, и через 7-10 тысяч лет температура во всей расчетной области возвращается к исходным значениям.

Изменение пространственных профилей температуры со временем на этапе разогрева ПГЗРО представлено на рис. 8. Так, на рис. 8а показаны профили температуры вдоль горизонтальной оси симметрии ПГЗРО. На кривых, соответствующих моментам времени $t = 8$ лет и $t = 14$ лет с начала захоронения ВАО, видна степень заполнения ПГЗРО на эти моменты времени — температура в незаполненной области имеет исходное значение, в заполненной же она тем выше, чем раньше захоранивались отходы. Время $t = 28$ лет соответствует полной загрузке ПГЗРО, на момент времени $t = 55$ лет наблюдаются

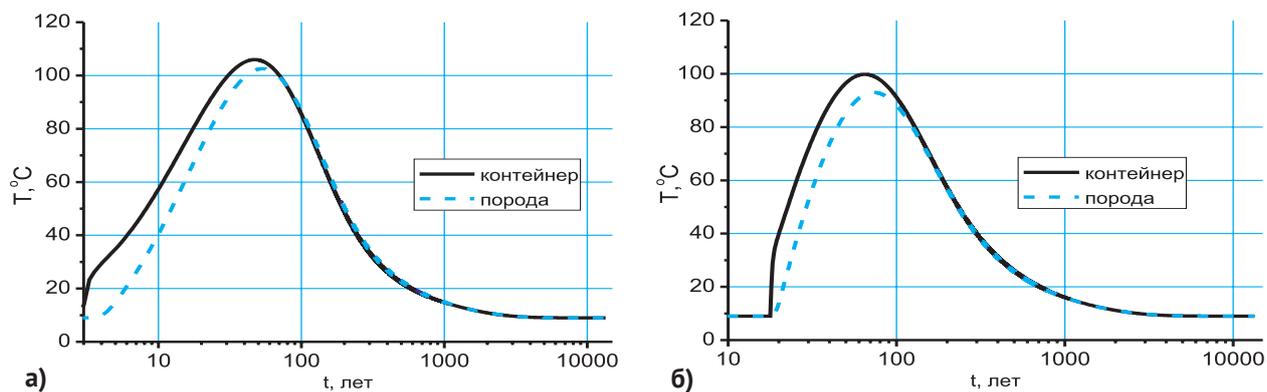


Рис. 7. Временные зависимости температур для центра внутренней скважины: а – участок 1; б – участок 2

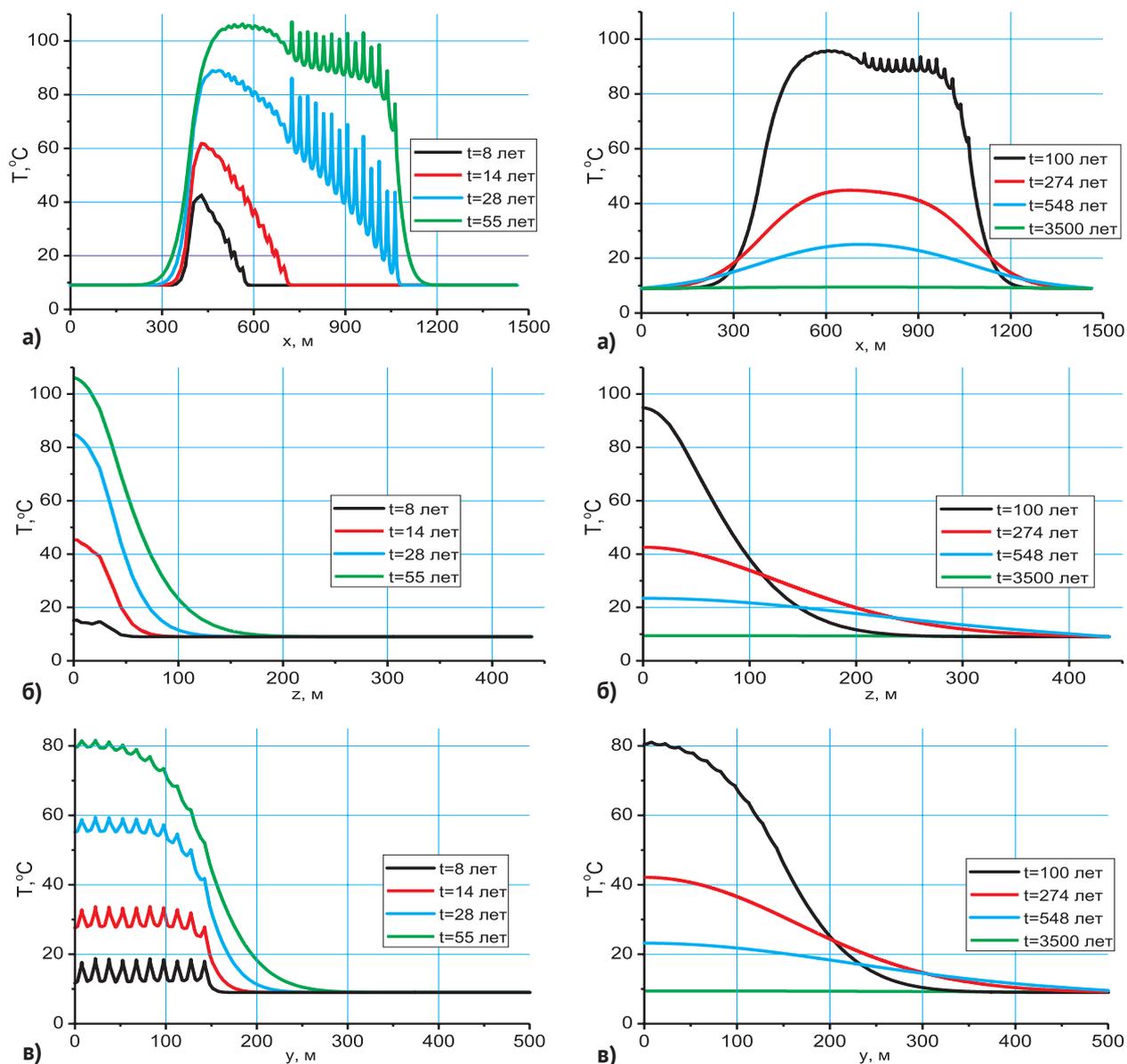


Рис. 8. Пространственные профили температур на этапе разогрева ПГЗРО: а – вдоль горизонтальной оси симметрии ПГЗРО; б – вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр восьмой камеры захоронения участка 1; в – вдоль горизонтальной прямой, проходящей по вершинам скважин восьмой камеры захоронения участка 1

Рис. 9. Пространственные профили температур на этапе остывания ПГЗРО: а – вдоль горизонтальной оси симметрии ПГЗРО; б – вдоль вертикальной прямой, проходящей через центр восьмой камеры захоронения участка 1; в – вдоль горизонтальной прямой, проходящей по вершинам скважин восьмой камеры захоронения участка 1

температуры, близкие к максимальным. Более резкие пики на участке 2 связаны с тем, что на нем ось симметрии проходит непосредственно через скважины (их на участке 2 нечетное число), а на участке 1 — посередине между скважинами. Естественным образом температура внутри тепловыделяющей матрицы с ВАО выше, чем в окружающих породах. На рис. 86 показаны профили температуры вдоль вертикальной прямой, проходящей вблизи центра участка 1 — через середину восьмой камеры захоронения. Через 55 лет с начала заполнения ПГЗРО прогревается толща пород порядка 200 м от горизонтальной плоскости симметрии, что соответствует примерно 160 м от вершин скважин (горизонта +5 м). Поскольку после закупоривания скважин с ВАО предполагается заполнение камер захоронения среднеактивными отходами, важным аспектом функционирования ПГЗРО является температурный режим на соответствующих горизонтах (+5 м и –50 м). Из профилей температуры вдоль горизонтальной прямой, проходящей по вершинам скважин восьмой камеры захоронения участка 1 (горизонт +5 м), видно, что через год после заполнения скважин этой камеры ВАО ($t = 8$ лет) температура поднимется примерно до 20°C. К концу заполнения первого участка ($t = 14$ лет) температура составит 25–35°C, а на момент заполнения всего ПГЗРО ($t = 28$ лет) достигнет 60°C. При этом в транспортно-технологических тоннелях ($y \approx 180$ м) вплоть до $t = 55$ лет расчетная температура будет менее 30°C.

Пространственные профили температур на этапе остывания представлены на рис. 9. Через 100 лет с начала заполнения температура в объеме ПГЗРО выравнивается и составляет 90–95°C, а через 3500 лет, как отмечалось выше, практически возвращается к исходным значениям. В транспортно-технологических тоннелях (рис. 9в, $y \approx 180$ м) температура около 30°C сохраняется вплоть до $t = 274$ года, после чего постепенно снижается. Следует отметить, что вблизи внешних границ расчетной области не происходит заметного повышения температуры, то есть тепловые потоки через границы области практически отсутствуют.

Заключение

Знание теплового состояния требуется на всех этапах функционирования хранилища, начиная с загрузки РАО, и является важным аспектом обоснования безопасности ПГЗРО. От температуры существенно зависят различные свойства инженерных барьеров безопасности и вмещающих горных пород: прочностные, переносные, химические и т. д. Разработанный 3D конечно-элементный код FENIA позволяет рассчитывать эволюцию поля температур в ПГЗРО и окружающих его горных породах в течение любого интервала времени. Проведенная на задачах, релевантных

для моделирования температурного поля пункта глубинного захоронения РАО, верификация показала хорошую близость численных решений, полученных кодом FENIA, с эталонными.

Приведенные расчеты являются одним из этапов исследования, в них учитываются не все механизмы переноса тепла. Более точная оценка теплового режима и доработка программы FENIA для моделирования этих процессов и решения сопряженной теплогидромеханической задачи будет выполняться в дальнейшем. Представленная оценка теплового режима позволяет понять пределы изменения температуры в хранилище, более обоснованно подойти к подбору материалов для защитных барьеров (бентонит, шликер, бетон), оптимизировать конфигурации скважин в ПГЗРО и порядок их заполнения.

В настоящее время существует значительная неопределенность проектных решений и выбора материалов для ПГЗРО. Не выбраны окончательно материалы инженерных барьеров, в первую очередь — бентонитсодержащие засыпки и шликер, а также бетон изолирующих контейнеров. С другой стороны, неопределенность исходных данных связана с неоднородностью геологических структур, так как теплофизические свойства гранитоидов, слагающих Нижнеканский массив, существенно различаются. Так, удельная теплопроводность образцов пород, отобранных на расстоянии нескольких сотен метров друг от друга, может различаться в три раза [7]. Для получения более точных оценок эволюции теплового состояния ПГЗРО требуется уточнение входных данных для расчетов. В первую очередь это касается свойств материалов, которые могут быть получены в рамках геологоразведочных работ, лабораторных исследований, а после сооружения подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в НКМ — в результате проводимых в ней экспериментов. Естественно, полностью избавиться от неопределенности входных данных не представляется возможным, но сужение диапазона неопределенности и проведение многовариантных расчетов позволит получить реалистичные оценки, сохраняя разумный уровень консерватизма.

Приведенная оценка теплового режима позволяет задать условия для модельных экспериментов, которые будут проводиться в ПИЛ на контейнерах с источником тепла, имитирующим тепловыделение РАО. Для определения мощности модельных источников тепловыделения и их конфигурации потребуются предтестовое моделирование этих экспериментов, которое может быть выполнено при помощи программы FENIA. Результаты модельных экспериментов в ПИЛ позволят расширить наши знания о состоянии барьеров безопасности и вмещающей породы ПГЗРО, провести дополнительную верификацию программы и уточнить используемые численные и сеточные модели.

Литература

1. *Цебаковская Н. С.* и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. – М.: Издательство «Комтехпринт», 2015. – 208 с.
2. Подземная исследовательская лаборатория в Нижне-Канском массиве [электронный ресурс]. – URL: <http://www.norao.ru/about/underground/>.
3. *Chijimatsu M., et al.* Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of results // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. – 2005. – 42 (2005). – P. 720–730.
4. Программа PETSc. [электронный ресурс]. – URL: <http://www.mcs.anl.gov/petsc/petsc-as/>.
5. Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks: Final Report, TEC-28-2015-AB. – 2016. – P. 175.
6. *Butov R. A., Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N.* Finite element code FENIA verification and application for 3D modelling of thermal state of deep geological storage of radioactive waste // *Journal of Physics: Conference Series* (в печати).
7. *Андерсон Е. Б. и др.* Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В. Н. Морозова. – М.: Изд-во «Горная книга», 2011. – 592 с.

Информация об авторах

Дробышевский Николай Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: drobyshevsky@inbox.ru.

Моисеенко Евгений Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: moi@ibrae.ac.ru.

Бутов Роман Александрович, инженер, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: bra@ibrae.ac.ru.

Токарев Юрий Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Россия, Москва, Б. Тульская ул., д. 52), e-mail: utokarev@ya.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Дробышевский Н. И., Моисеенко Е. В., Бутов Р. А., Токарев Ю. Н. Трёхмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород // *Радиоактивные отходы*. – 2017. – № 1. – С. 64–73.

3D NUMERICAL MODELLING OF THE THERMAL STATE OF GEOLOGICAL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY IN NIZHNEKANSKY ROCK MASSIF

Nikolay I. Drobysheskiy, Evgeniy V. Moiseenko, Roman A. Butov, Yuriy N. Tokarev

Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences

Article received 13 September 2017

The long-term simulations of the thermal state were performed for the layout based on the radioactive waste repository project in Nizhnekansky Rock Massif. The 3D finite-element computer code FENIA was developed as a tool for simulation of thermal processes in deep geological repositories. Further the models for mechanical phenomena and groundwater hydraulics will be added resulting in a fully coupled thermo-hydro-mechanical (THM) solution. The obtained results describe the spatial and temporal evolution of the temperature field inside the repository and in the surrounding rock for the duration of 10 000 years. These results show that practically all generated heat was ultimately absorbed by the host rock without any significant temperature increase. Still in the short time span the temperature maximum exceeds 100 °C.

Keywords: radioactive waste, deep disposal, mathematical modelling, temperature behaviors

References

1. Cebakovskaya N. S. *i dr.* Obzor zarubezhnykh praktik zahoroneniya OYAT i RAO. – M.: Izdatel'stvo «Komtekhprint», 2015. – 208 s.
2. Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya v Nizhne-Kanskom massive [ehlektronnyj resurs]: <http://www.norao.ru/about/underground/>.
3. M. Chijimatsu, *et al.* Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository-BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: Conceptualization and characterization of the problems and summary of results. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42 (2005), pp.720-730.
4. Programma PETSc. [ehlektronnyj resurs] : <http://www.mcs.anl.gov/petsc/petsc-as/>.
5. Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks, Final Report, TEC-28-2015-AB. 2016, p. 175
6. Butov R. A., Drobysheskiy N. I., Moiseenko E. V., Tokarev Yu. N. Finite element code FENIA verification and application for 3D modelling of thermal state of deep geological storage of radioactive waste // *Journal of Physics: Conference Series* (v pechati)
7. Anderson E.B. *i dr.* Podzemnaya izolyaciya radioaktivnykh othodov / Pod red. V. N. Morozova. – M.: Izd-vo «Gornaya kniga», 2011. – 592 s.

Information about the authors

Drobysheskiy Nikolay Ivanovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191), e-mail: drobysheskiy@inbox.ru.

Moiseenko Evgeniy Viktorovich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191), e-mail: moi@ibrae.ac.ru.

Butov Roman Aleksandrovich, Engineer, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191), e-mail: bra@ibrae.ac.ru.

Tokarev Yuriy Nikolaevich, PhD, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute (52, Bolshaya Tuskaya St., Moscow, 115191), e-mail: ytokarev@ya.ru.

Bibliographic description

Drobysheskiy 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. – № 1. – pp. 64–73. (In Russian).