УДК 621.039.7:504

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОГО ПОДЗЕМНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ВАО В ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ

Г. Н. ИВАНЧЕНКО²

старший научный

сотрудник, канд.

физ.-мат. наук





F F NVKNIIIOR¹ начальник лаборатории, канд. физ.-мат. наук, Lukishov.B.G@vnipipt.ru

Н П ШRFЛORA¹ главный специалист

¹ АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Россия ²Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

Введение

Проблема захоронения тепловыделяющих высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) в геологические формации включает в себя решение ряда важных задач, в число которых входит изучение влияния тепла, выделяемого отходами, на механическое состояние вмещающего хранилище горного массива.

Температурное поле, развивающееся в массиве в результате длительного тепловыделения, приводит к возникновению деформаций пород. При этом в окрестности пункта подземной изоляции действуют термонапряжения — наиболее опасные относительно сохранения сплошности массива.

В качестве одной из перспективных подземных площадок изоляции выбран участок на одном из объектов разработки. При этом за 25-летний период эксплуатации предполагается изолировать 4500 м³ тепловыделяющих ВАО [1].

Термомеханические исследования

В целях выявления основных качественных и количественных характеристик тепловых и механических процессов в массиве гнейсов рассмотрим пункт подземной изоляции, занимающий объем 600×350×75 м, в котором равномерно размещены 4500 м³ ВАО в скважинах диаметром 0,65 м. Для расчетов примем экспоненциальный закон затухания тепловыделения ВАО со временем. Расчетные параметры источника ВАО приведены ниже.

Теплофизические характеристики материалов (порода -	— гнеисј	
Плотность, кг/м ³	2700	
Теплопроводность, Вт/(м·К)	2,8	
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	770	
Температура пород на глубине 450 м, °С	9	
Характеристики остеклованных ВАО		
Начальное удельное тепловыделение		
остеклованных ВАО q ₀ , Вт/м ³	1000	

© Лукишов Б. Г., Шведова Н. П., Иванченко Г. Н., 2021

Освещены проблемы безопасного подземного захоронения тепловыделяющих радиоактивных отходов в геологические формации. Изучено влияние тепла, выделяемого отходами, на тепловое и механическое состояние горного массива, зависящее как от выбора местоположения площадки объекта захоронения, конструктивных особенностей схемы захоронения, так и от технологии заполнения камер. Отмечено, что при выборе участка подземной изоляции ВАО особенно важной является оценка целостности горного массива. В последние годы с этой целью наряду с традиционными методами геологических исследований применяют космические методы. Для уточнения движений в линеаментных зонах на одном из объектов были установлены трехкомпонентные сейсмические станции, анализировавшие микросейсмический шум и регистрировавшие сигналы землетрясений.

Ключевые слова: тепловыделяющие радиоактивные отходы, подземная изоляция, горный массив, линеаментные зоны, космические методы, микросейсмика.

Динамика спада тепловыделения q₀e^{-t/τ} во времени t остеклованных ВАО т, лет

40

На рис. 1 представлена схема подземного расположения перспективной площадки подземной изоляции ВАО [1].

В основу расчетной схемы положена суперпозиция температурных полей от цилиндрических источников конечной длины. Значения температур в массиве для единичного источника с экспоненциальным затуханием мощности тепловыделения даны в работе [2].

Для определения максимальной температурной нагрузки на массив в расчетах принято одновременное заполнение всех скважин тепловыделяющими ВАО.

Результаты тепловых расчетов показали, что максимальное превышение температуры за счет тепловыделения над естественным температурным полем массива в среднем горизонтальном сечении площадки изоляции составит на поверхности пенала 114 К и будет достигнуто через 60 лет после размещения ВАО.

Через 500 лет после загрузки ВАО ожидается снижение превышения температуры до ~14 К в среднем горизонтальном сечении подземного пункта изоляции (рис. 2). Расчеты показали. что при заглублении пункта изоляции ВАО на 400-500 м максимальное температурное влияние на земной поверхности не превысит 0,6 К.

Оценим изменение напряженно-деформированного состояния массива, вызванное температурным влиянием тепловыделяющих ВАО.

Скальный массив пункта изоляции ВАО, представленный гнейсами, является устойчивым горным блоком с отсутствием ярко выраженных разрывных нарушений с образованием зон



Рис. 1. Объемная модель перспективной площадки изоляции ВАО

дробления или рассланцевания, а также признаков свежих тектонических подвижек. Все отмечаемые трещины не имеют сквозного системного характера, а развиваются лишь на коротких интервалах в результате воздействия локальных процессов. Значения физико-механических характеристик гнейсов представлены ниже.

Нормативные геомеханические характеристики гнейсов в образце

Объемный вес, кг/м ³	2750
Коэффициент Пуассона	0,27
Модуль упругости, МПа	7–7,7·104
Модуль деформации, МПа	5,9·10 ⁴
Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	131
Предел прочности на растяжение, МПа	12,89
Предел прочности на сдвиг, МПа	57,15

Количественная оценка параметров поля естественных напряжений получена в масштабе измерений, соответствующем масштабу образцов. Для крупных блоков массива оценка может быть изменена в сторону их уменьшения приблизительно на 10–15 %.

Значения превышения температур составляют менее 120 К, в то время как для метаморфических горных пород, к которым относится гнейс, температура при его образовании была выше 473 К. Поэтому, колебание температурного поля не может изменить состав самой горной породы.

Коэффициент линейного температурного расширения для гнейсов равен (3,8±0,6)·10⁻⁶ 1/К [3]. Для расчета температурных напряжений примем коэффициент линейного температурного расширения равным 5·10⁻⁶ 1/К.

Максимальные температурные напряжения в зоне прогрева вблизи скважины, заполненной ВАО, можно рассчитать с помощью формул теории упругости [4]:



Рис. 2. Максимальное превышение температуры в среднем горизонтальном сечении подземного пункта изоляции



где *а* — радиус скважины м; *r* — расстояние от оси скважины до расчетной точки, м. Для гнейсов величина $\alpha E/(1 - v) = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 7, 7 \cdot 10^4/(1 - 0, 27) = 0,53$ МПа/К.

При прогреве массива до величины превышения температуры над естественной температурой массива до *T*_с, K, наблюдаются максимальные значения напряжений, представленные в **таблице**. Все напряжения являются сжимающими.

Из данных таблицы следует, что максимальные значения термонапряжений не превосходят предела прочности на одноосное сжатие для гнейсов — 131 МПа, даже с учетом вертикальных и горизонтальных напряжений на глубинах порядка 500 м, значения которых для горизонтальных напряжений не превышают 13,5 МПа, а для вертикальных напряжений — 16,5 МПа. Следует отметить, что массив в подземной зоне изоляции ВАО находится в условиях трехмерного напряженного состояния, поэтому его прочность в условиях естественного залегания будет выше, чем значения прочности в образце. Таким образом, температурные напряжения и деформации не повлияют на устойчивость подземных выработок в зоне изоляции ВАО.

При выборе участка подземной изоляции ВАО особенно важной является оценка целостности горного массива. В последние годы с этой целью наряду с традиционными методами геологических исследований применяют космические методы. В полной мере это относится к автоматизированному линеаментному анализу [5–12]. В качестве примера на **рис. З** показаны линеаментные зоны, определенные в результате дешифрирования космического снимка в районе предполагаемого участка подземного захоронения тепловыделяющих отходов.

ЗАХОРОНЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Максимальное Максимальное Максимальное T_c, K значение σ_г, МПа значение σ_i, МПа значение σ,, МПа 2.7 10 5.3 5,3 30 8 15.9 15.9 50 13.3 26.5 26.5 70 18,6 37,1 37,1 90 23.9 47.7 47.7 100 26,5 53 53 110 29.2 58.3 58.3 120 31,8 63,6 63,6

Величина максимальных термонапряжений в массиве

С целью уточнения движений в линеаментных зонах были установлены трехкомпонентные сейсмические станции, анализировавшие микросейсмический шум и регистрировавшие сигналы землетрясений.

На **рис. 4** представлены сейсмические сигналы скоростей дальнего (у берегов Антарктиды) сильного землетрясения 17 ноября 2013 г. магнитудой M = 7,7, зарегистрированные в четырех точках профиля, проходящего через наиболее протяженный линеамент.

Вертикальные компоненты скоростей Z заметно превышают горизонтальные компоненты, направленные по осям Север–Юг (С-Ю) и Запад–Восток (З-В).

Заключение

Следует отметить, что величины зарегистрированных скоростей и перемещений по каждой из трех компонент для точек 1—4 на профиле практически совпадают (см. рис. 4). Внешнее сейсмическое воздействие для зоны в районе линеамента при приходе практически вертикально направленной снизу глубинной телесейсмической волны не выявляет разницы движения при переходе через зону линеамента. Это свидетельствует



17.11.2013 UTC 9:04:55

о ненарушенности массива в зоне линеамента. Данный пример показывает полезность проведения профильных сейсмических наблюдений в выявленных линеаментных зонах как в процессе выбора участка подземной изоляции ВАО, так и во время его эксплуатации.

Библиографический список

- Поляков Ю. Д. Создание системы окончательной изоляции радиоактивных отходов в Российской Федерации / ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами», 2013. URL: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/ Prezentetion_31_10_2013/Polyakov.pdf (дата обращения: 19.06.2020).
- Iyer H. M. Variation of apparent velocity of teleseismic P waves across the Large-Aperture Seismic Array, Montana // Journal of Geophysical Research. 1971. Vol. 76. No. 35. P. 8554–8567.
- Jumikis A. R. Rock Mechanics. 2nd ed. Clausthal-Zellerfeld : Trans Tech Publications, 1983. – 613 p.
- 4. Тимошенко С. П., Гудьер Д. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
- Иванченко Г. Н. Применение автоматизированного дешифрирования космических снимков при сейсмических исследованиях // Структурно-геоморфологические исследования проявления сейсмичности : сб. ст. – М.: ИФЗ, 1987. С. 49–59.
- Иванченко Г. Н., Горбунова Э. М. Морфоструктуры и геодинамическая обстановка как факторы, влияющие на геолого-геофизические параметры среды (на примере Центральной части Восточно-Европейской платформы) // Проблемы взаимодействующих геосфер : сб. науч. тр. – М. : ГЕОС, 2009. С. 116–123.
- 7. *Короновский Н. В., Златопольский А. А., Иванченко Г. Н.* Автоматизированное дешифрирование космических снимков с целью структурного анализа // Исследование Земли из космоса. 1986. № 1. С. 111–118.

- Автоматизированный анализ природных линеаментных систем : сб. науч. тр. / под ред. Б. Н. Можаева. – Л. : ВСЕГЕИ, 1988. – 131 с.
- Бирюков А. И., Шкарин В. Е. Использование автоматизированного анализа поля линеаментов при изучении современной геодинамики // Автоматизированный анализ природных линеаментных систем : сб. науч. тр. ГИН им. Л. П. Карпинского. – Л., 1988. С. 59–64.
- Лобацкая Р. М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 2. С. 141–150.
- Лукина Н. В. Нижнеканский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС. – СПб., 1999. С. 49–59.
- Белов С. В., Морозов В. Н., Татаринов В. Н., Камнев Е. Н., Хаммер Й. Изучение строения и геодинамической эволюции Нижнеканского массива в связи с захоронением высокоактивных радиоактивных отходов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2007. № 3. С. 248–266. ГК