УДК 622.272:621.039.7

В.С. Гупало

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПОДЗЕМНОГО ОБЪЕКТА ЗАХОРОНЕНИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА ЕГО ИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Проведен анализ результатов измерения в натурных условиях показателей напряженно-деформированного состояния скального массива в условиях теплового воздействия, аналогичного объектам захоронения высокоактивных отходов. По результатам исследований установлены закономерности разуплотнения приконтурной зоны выработок, для различных геологических и техногенных условий. Получение таких данных имеет важное практическое значение для прогноза изоляционных свойств геологической среды и обоснования долговременной безопасности подземных пунктов захоронения высокоактивных отходов.

Ключевые слова: высокоактивные отходы, захоронение, подземная лаборатория, обоснование безопасности.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-92-100

Вопрос о воздействии пунктов геологического захоронения высокоактивных отходов на окружающую среду является актуальным для всех аспектов проблемы изоляции радиоактивных материалов. Большинство специалистов придерживается мнения, что продолжительное тепловое воздействие на породу приведет к неуправляемым неблагоприятным эффектам [1]. Вместе с тем, отсутствие опыта эксплуатации действующих могильников такого типа до сих пор не позволяет осветить этот вопрос на конкретных примерах. В связи с этим понимание проблемы воздействия пунктов захоронения тепловыделяющих РАО на окружающую среду находится на стадии теоретических разработок, моделирующих экспериментов и исследований в подземных условиях [2, 3, 4].

Кроме того, способы проходки и эксплуатации подземных сооружений в скальных породах связаны с внедрением в природную среду искусственной техногенной системы, которая также нарушает его естественное состояние. Негативным результатом выполнения горно-строительных работ и создания комплекса подземных выработок для долговременной изоляции радиоактивных отходов можно считать нарушения целостности природного скального массива за счет механического разрушения пород, изменения естественного напряженно-де-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 92–100.
© В.С. Гупало. 2017.

формированнного состояния массива с развитием зон разрушения и трещиноватости, что также требует учета.

С целью получения данных по параметрам таких процессов (происходящих в условиях подземного могильника) проектируется создание подземной исследовательской лаборатории, а также выполнены исследования на объектах аналогах [5]. При этом в связи с тем, что в каждом конкретном месте геологическая среда характеризуется индивидуальными особенностями, наиболее представительными результатами, пригодными для практического использования, являются данные, полученные в условиях, максимально приближенных к возможным условиям заложения могильников. Кристаллические породы являются наиболее перспективной средой для захоронения ВАО в России. Поэтому в настоящей статье были проведены оценки параметров приконтурных зон трещиноватости в условиях тепловых воздействий на массив скальных пород на объекте аналоге — подземных выработках, пройденных в метаморфических породах атамановского комплекса Нижне-Канского гранитоидного массива.

Предметом исследований геомеханических процессов явилось изучение изменений напряженно-деформированного состояния в приконтурных зонах, контроль геодинамической активности породного массива, изучение процесса трещинообразования, взаимосвязь геомеханических, теплофизических, гидрогеологических и других процессов.

В качестве объекта исследований рассматривался комплекс подземных сооружений, вмещающих длительно функционирующие тепловыделяющие источники, представляющие собой уникальный подземный аналог пунктов изоляции тепловыделяющих ВАО в скальных породах. Мощные источники тепла, расположенные в горных выработках, разогревали вмещающие породы до температуры 60—65 °С и оказывали значительное техногенное воздействие на динамику развития геомеханических, гидрогеологических и геохимических процессов в породах вмещающего массива. Для сравнения поведения породного массива в условиях теплового воздействия и без него осуществлялись наблюдения за этими же процессами в породах объекта без теплового воздействия. Это позволяет контролировать развитие геомеханических и гидрогеологических процессов в условиях отсутствия тепловых нагрузок.

В геологическом строении горного массива, вмещающего рассматриваемые сооружения, принимают участие гнейсовые комплексы кристаллического фундамента архейско-протерозойского возраста, прорванные верхнепротерозойскими интрузивными образованиями. С поверхности, практически повсеместно, коренные породы перекрыты маломощным (до 5,5 м) плащом четвертичных делювиальных отложений. Интрузивные породы в виде даек диабазов и порфиритов имеют незначительное распространение и составляют не более 2% от общего объема.

Горный массив, вмещающий все основные и вспомогательные сооружения объекта, сложен биотитовыми гнейсами. Биотитовые гнейсы на глубину от 5 м до 10 м (на портальных участках до глубины 20,0 м) выветрены до щебенистой массы, сцементированной глиной, с явными признаками глубокого химического изменения основной породы.

Ниже, до глубины 30 м, они разбиты густой сетью трещин со следами физического выветривания. По плоскостям трещин отмечается глинисто-карбонатный материал со следами подвижек и зеркалами скольжения.

В интервале глубин от 30 до 70 м биотитовые гнейсы нарушены трещинами выветривания, имеющими связь

с атмосферными осадками. Нарушенность пород в этом интервале от трещиноватых до сильнотрещиноватых.

Кроме массивных гнейсов наблюдаются катаклазированные их разновидности: зоны дробления (мощностью 0,1—18,0 м) и рассланцевания (мощностью 0,2—22,0 м). Как правило, эти зоны выветрены на большую глубину, чем обычные гнейсы, и на отметках заложения сооружений имеют следы окисления.

В тектоническом отношении выработки расположены непосредственно в теле региональной надвиговой структуры. Большинство составляющих ее разломов на рассматриваемой территории представлено маломощными (1—5 м) зонами дробления и рассланцевания, хорошо выраженными в подземных выработках и слабо на поверхности. Это характерно для тектонических нарушений с небольшими (<60°) углами падения плоскостей сместителей.

Рассматриваемые камеры *А, Б* (вмещающие тепловыделяющие сточники) и *В, Г* (без тепловыделения) расположены в различных инженерно-геологических условиях. Так камера *А* размещается в лежачем боку крутопадающей зоны дробления мощностью до 30 м, остальная часть камеры расположена в породах зон различной рассланцованности мощностью до 50 м. Вмещающие породы камеры *Б* представлены трещиноватыми и слаботрещиноватыми породами. Целик пересекается только одной крутопадающей зонкой дробления, мощностью менее 1,2 м.

Контролируемый участок горного массива в районе расположения камеры *Г* представлен, в основном, породами главной тектонической зоны рассланцевания, которая прослеживается и в камере *А*. Породы, вмещающие участок наблюдения по камере *В*, представлены слабо-трещиноватыми и трещиноватыми категориями.

При исследовании физических процессов основная задача исследований состояла в определении максимальных диапазонов изменения характеристик породного массива под воздействием природных и техногенных факторов. Особый интерес представляет поведение зон тектонических нарушений, т.к. именно они являются наиболее неблагоприятными участками горного массива с точки зрения его проницаемости и устойчивости.

Геологическое строение рассматриваемого массива не исключает возможности планово-высотных смещений его отдельных блоков по геологическим разломам. Предполагаемая геодинамическая активность может вызвать в массиве скальных пород некоторые смещения, которые могут также привести к образованию водопроводящих трещин и

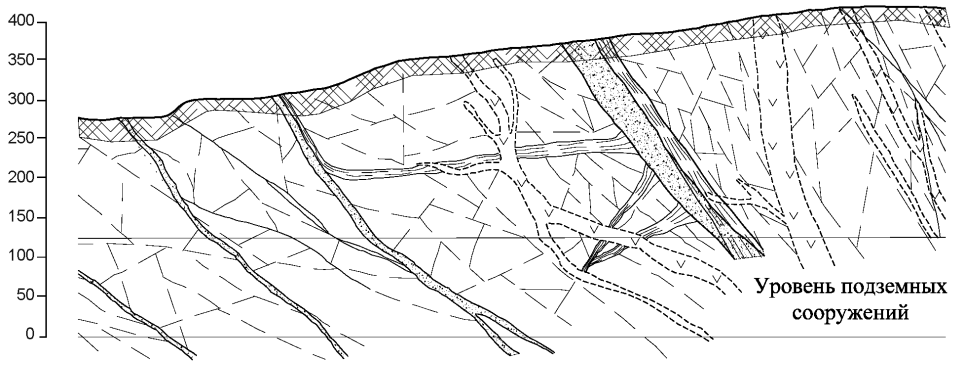

Рис. 1. Профиль структурной блок-схемы породного массива, вмещающего исследуемый объект

тем самым изменить изоляционные параметры и соответственно гидрогеологические условия горного массива, что определило необходимость проведения планово-высотных измерений.

Таким образом, для решения комплекса задач, связанных с возникновением повреждаемости породного массива, проводились инструментальные наблюдения на монолитных участках пород и в зонах тектонических нарушений, как на поверхности, так и в подземных сооружениях, в составе:

• измерений линейных габаритов камер, позволяющих выявить деформации сближения стен камер, вызванных изменениями НДС породного массива;

• изменений температурных режимов породного массива и воздуха в камерах;

• высокоточных геодезических измерений по планово-высотным реперам;

• контроля микросдвижений и деформаций наклона стен камеры по обратным отвесам и микронивелированию;

• измерения глубинных деформационных процессов в породах междукамерных целиков;

• определения действующих напряжений в окружающих породах.

Планово-высотные измерения, проведенные на поверхности и в горных выработках объекта по створам, пересекающим разлом, показали, что переме-

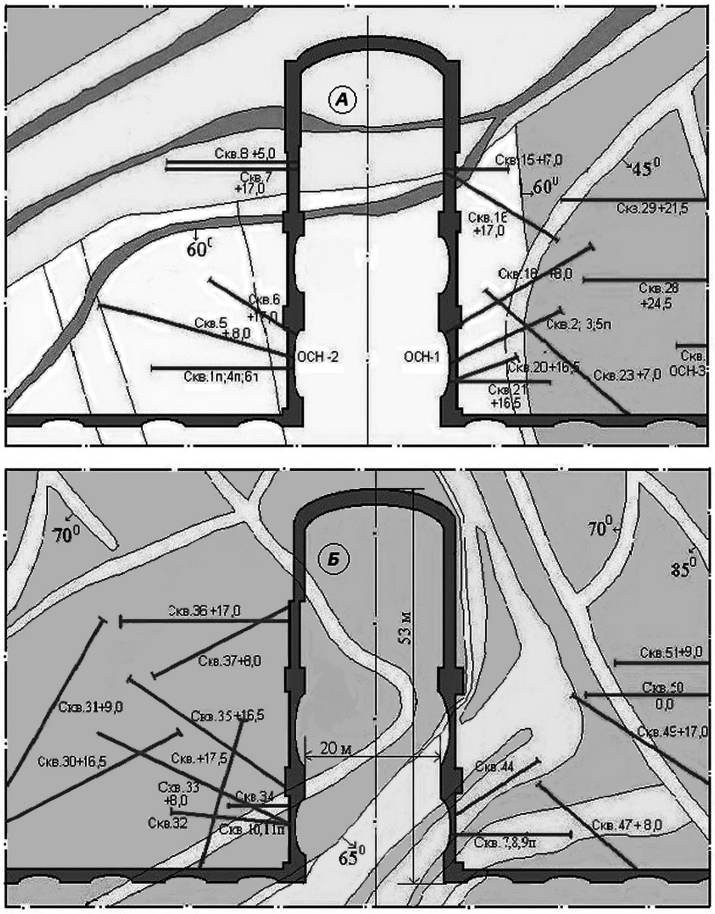

Рис. 2. Расположение исследовательских скважин в камерах А и Б

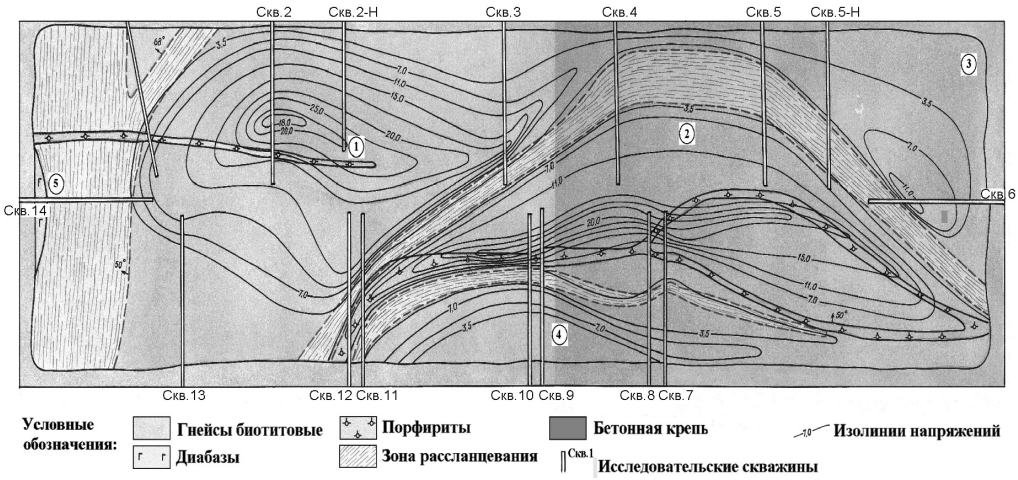

Рис. 3. Распределение исследовательских скважин в целике между камерами В и Г

щение бортов разлома относительно друг друга за период 40 лет составило соответственно 2,0 мм или 0,08 мм в год, и в горных выработках до 0,09 мм в год.

Такие незначительные трендовые составляющие скоростей деформирования горного массива по главным зонам дробления и рассланцевания (0,08—0,10 мм/год) позволяют классифицировать контролируемые тектонические структуры по рассматриваемым разломам как геологически стабильные, от-

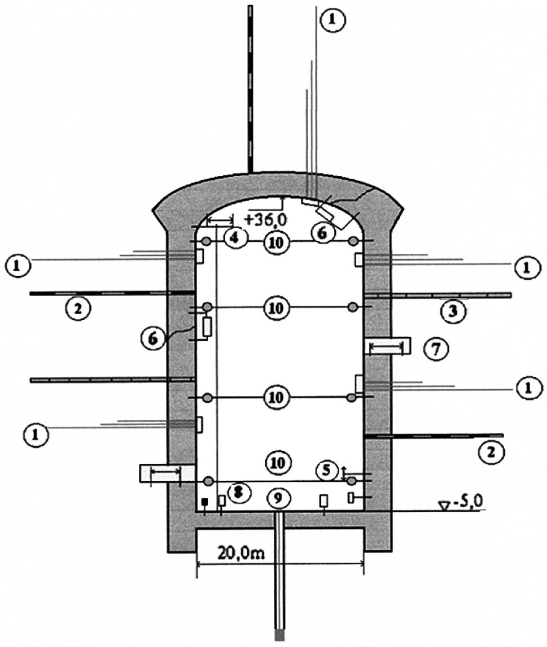

Рис. 4. Состав инструментального контроля деформированного состояния породного массива и обделки подземных камер А, Б и В, Г: 1 — экстензометры; 2 — термоизмерения; 3 — ультразвуковой каротаж; акустическая эмиссия, удельное водопоглащение, 4 — обратные отвесы; 5 — наклонометрия (микронивелирование); 6 — раскрытие трещин; 7 — контакт массив-обделка; 8 — прецизионное нивелирование; 9 — планово-высотные измерения; 10 — конвергенция стен

личающиеся спокойным тектоническим режимом без образования водопроводящих магистральных трещин.

Анализ инженерно-геологических условий вмещающего горного массива показал, что породы существенно отличаются по степени техногенной и тектонической нарушенности, а, следовательно, и по своим ожидаемым деформационным характеристикам, как между отдельными целиками, так и в пределах одного междукамерного целика. Это позволяет утверждать, что пространственно-временные процессы деформирования приконтурной части массива будут по-разному проявляться в изменении изоляционных свойств пород.

С целью установления величин действующих напряжений и определения динамики изменения напряженного состояния приконтурной части массива под воздействием техногенных и природных факторов в натурных условиях были выполнены измерения напряженного состояния породного массива методом разгрузки.

На основе обобщения результатов измерений напряжений, выполненных в период начала эксплуатации сооружений, было установлено распределение интенсивности вертикальных напряжений δ_{zz} по исследуемым целикам в плане. Характер распределения поля напряжений ожидаемо оказался крайне неравномерным и, в основном, обусловлен степенью нарушенности пород и связанными с этим упругими свойствами и несущей способностью породного массива. В пределах зоны рассланцевания напряжения составили от 2,0 до 7,0 МПа, в среднем 5,0 МПа. Непосредственно в ближней зоне выработок напряжения составили 1,0—5,0 МПа и соответствуют несущей способности сильно нарушенных пород, в которых преобладают техногенная и подновленная тектоническая трещиноватость. Напряжения в раздробленных породах в среднем составил 3,0 МПа и с переходом в монолитную часть целика повысились до 11,0 МПа.

С целью количественной оценки динамики изменения напряженного состояния скальных пород были выполнены повторные измерения действующих напряжений в целиках объектов *А, Б* и между камерами *В, Г*. Современные измерения напряжений производились в скважинах, располагаемых в непосредственной близости (1,5—2,5 м) от ранее пробуренных.

Полученные результаты показали, что в породах целика в окрестности камеры *А* (участок *А*) в приконтурной части целика (глубина 2,5 м) в слабо рассланцованных породах напряжения составили δ_{zz} = 9,6 МПа. На глубине от контура 3,0—3,5 м и 5,0—6,0 скважина пересекает зонки дробления, напряжения в которых составляют 3,0—3,9 МПа. При удалении от контура целика на расстоянии 7,0—9,6 м в зоне монолитных пород напряжения возрастают до 18,7 МПа. Среднее значение напряженности в пределах участка «*А*» составило 17,0 МПа. Сопоставление результатов ранее выполненных и современных измерений показывает прирост вертикальных напряжений в породах участка «*А*», составивший за 40-летний период в среднем 14% (на 2,38 МПа). За этот же период в породах целиков камер *В* и *Г*, не подверженных тепловому прогреву, произошло увеличение напряжений в пределах 7%.

Изучение напряженно-деформированного состояния в приконтурных зонах подземных сооружений показало различие исследуемых процессов в различных геологических условиях. По данным натурных измерений, в целиках, однородных по составу, характер распределения напряжений в породах близок результатам математического моделирования с использованием методов перемещения дискретных сред отдельными блока-

ми. Были установлены зоны, в которых могут локализоваться опасные деформации контуров выработок, а также участки в глубине массива, характеризующиеся аномально высокой интенсивностью нарушенности.

Многократное совпадение результатов математического моделирования с фактическими породными вывалами позволяет успешно решать многие задачи по контролю за изменением состояния породного массива. Породы I, II и III категорий нарушенности, как правило, работают в упругой стадии с большим запасом несущей способности. Менее жесткие породы (категории IV и V) деформируются с большей скоростью за счет взаимного перемещения структурных блоков по плоскостям ослабления. Как правило, эти породы в междукамерных целиках работают в запредельном состоянии. В приконтурных зонах в этих породах возможно возникновение зон разуплотнения.

Выявленная, таким образом, неравномерность динамики изменения напряженного состояния в целиках может вызвать возникновение зон разуплотнения. Так, согласно кинетическим представлениям о процессе разрушения горных пород, локальные поля напряжений активизируют развитие процессов деформирования, трещинообразования в приконтурной части массива, создавая предпосылки для образования магистральных трещин — каналов инфильтрации подземных вод в рабочую зону камер с последующим массопереносом радионуклидов в окружающую среду.

Для изучения динамики возникновения таких зон производилось в натурных условиях экстензометрами, створовыми измерениями конвергенции стен камер и эндоскопией породного массива.

Инструментальные исследования породного массива с применением экстензометров позволяют вести наблюдения за характером смещения, расслоения и деформирования массива горных пород в приконтурной зоне горной выработки. В скважинах диаметром 76 мм устанавливались 2—3 экстензометра и термодатчики. В каждом конкретном случае глубина заанкерования экстензометра определялись строением целика и варьировала в пределах 2,5—30,0 м.

Параметр сближения стен интегрировано отражает изменения процессов в массиве пород в результате воздействия технологических процессов в камере и природных изменений напряженно-деформированного состояния, происходящих в окружающем породном массиве. Экстензометрические и створовые измерения проводились на различных по высоте камер уровнях, и поэтому полно отображают деформации стен и прилегающего горного массива, а также совместной работы системы «обделка-порода».

Анализ полученных абсолютных величин сдвижения обделки внутрь камер и смещений породного массива в сторону камер показал на их различный характер. Наибольшие значения конвергенции отмечаются по всем створам в камере *А*. Максимальная величина конвергенции *L* составила 21,5 мм. В камере *Б* максимальная конвергенция стен в два раза ниже, чем в камере *А*, по створу III' она составила 11,0 мм. В камерах *В, Г* максимальное сближение стен за весь период наблюдений составило 1,55 мм, т.е. на порядок меньше, чем в камерах *А* и *Б*. Если учитывать, что в камерах *А* и *Б* находятся примерно равные тепловые источники, их воздействие на вмещающий породный массив можно условно принять одинаковым как от камеры *А* (T = 55 °С), так и от камеры *Б* (T = 62 °С). В камерах *В* и *Г* тепловые нагрузки отсутствуют. Сравнивая горнотехнические условия контролируемых камер и величины конвергенции их стен, следует констатировать, что значительный при-

рост деформаций обделок в камере *А* объясняется неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, по сравнению с горным массивом в целиках, окружающих камеры *Б* и *Г*. Геомеханические процессы в породах вокруг камеры *А* более интенсивные за счет теплового гравитационного силового воздействия пород мощных тектонических зон дробления и рассланцевания.

Низкие величины конвергенции стен в камерах *В* и *Г* объясняются отсутствием тепловых нагрузок на породы междукамерных целиков этого объекта и благоприятными горнотехническими условиями размещения камер. Установлено влияние тепловых нагрузок на геомеханические процессы приконтурной зоны породного массива за 40 лет: сближение стен камер для практически однородного массива увеличиваются в 7,3 раза; от совместного влияния тепла, суффозионных процессов и неблагоприятных геологических условий — в 14 раз. Зафиксированные величины смещений экстензометров внутри породного массива на базах от 2,5 до 30,0 м подтверждают возникновение зон разуплотнения: в условиях нагрева суммарная пустотность составила 3,0—4,0 мм в зонах тектонических нарушений; без нагрева — 0,1—0,6 мм.

Основные результаты показали:

1. Естественное поле напряжений в исследуемом породном массиве в основном обусловлено весом налегающей толщи горных пород, тектоническая составляющая практически не присутствует, так как горизонтальные компоненты ниже вертикальных, и может характеризоваться средними оценочными значениями σ_{zz} = 6—8 МПа, σ_x = 2—3 МПа.

2. Наибольший прирост величины напряжений, составляющий 14%, отмечается в породах, подверженных тепловому воздействию. Эту величину можно разделить на две составляющие:

7% — прирост напряжений под влиянием времени за 40 лет в целиках, работающих без тепловых нагрузок;

7% — прирост напряжений под воздействием теплового разогрева пород.

3. Величины вертикальных напряжений находятся в прямой зависимости от степени нарушенности горных пород и их упруго-прочностных свойств. Зоны дробления и зоны интенсивного рассланцевания характеризуются в среднем напряжениями 1,0—1,5 МПа, сильно трещиноватые зоны 10—20 МПа, средне трещиноватые породы — 15—25 МПа.

4. Величины смещений экстензометров внутри породного массива на базах от 2,5 до 30,0 м подтверждают возникновение зон разуплотнения: в условиях нагрева суммарная пустотность составила 3,0—4,0 мм в зонах тектонических нарушений; без нагрева — 0,1—0,6 мм.

5. Снижение последствий техногенного воздействия сопряжено с исследованием геомеханических особенностей массива пород на стадии сооружения и исследования в подземной лаборатории, выбором оптимальных схем размещения выработок, обоснованием технологии их проведения и крепления, обеспечивающих минимальное нарушение структуры массива (использование мелкошпурового контурного взрывания при производстве буро-взрывных работ или механизированных коплексов с применение комбайнов и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омельяненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В.* Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. Т. 2. — М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. — 280 с.

2. *Talbot C.F., Sirat M.* Stress control of hydraulic conductivity in fracture saturated Swedish bedrock // Engineering Geology. 2001. N 61. P. 145—153.

3. *Luhmann L., Noseck U., Storck R.* Spent fuel performance assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany // Gesellschaft fur Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. GRS 154. 2000. 213 p.

4. *SKB 2006*. Äspö hard rock laboratory. Annual Report 2005. Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-06-10. 207 p.

5. *Гупало В.С.* Учет изменения прочностных свойств скальных трещиноватых пород, находящихся под действием температурных нагрузок, при проектировании / Сборник статей международной научной конференции «Проблемы подземного строительства в XXI веке». Тула, 25—27 апреля 2002 г. — Тула, 2002.

6. *Гупало В.С.*, *Коновалов В.Ю.* Влияние защитных барьеров на эколого-экономические показатели объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов // АНРИ. — 2010. — № 3(62). — С. 16—22. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Гупало Владимир Сергеевич — доктор технических наук, профессор,
e-mail: Gupalo13@rambler.ru, МГИ НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 11, pp. 92–100.

UDC 622.272:621.039.7

V.S. Gupalo

ESTIMATION OF PARAMETERS OF TECHNOGENIC FRACTURE UNDERGROUND FACILITY FOR THE DISPOSAL OF HIGH LEVEL WASTE TO FORECAST ITS INSULATING PROPERTIES

The analysis of the measurement results in situ indicators of the stress-strain state of rock massif in the conditions of thermal exposure, similar to the objects of high-level waste disposal. By results of researches the regularities of the decompression near-contour zone of workings, for various geological and technological conditions. Obtaining such data has important practical significance for the prediction of the insulating properties of the geological environment and justification of long-term security of underground settlements disposal of high level waste.

Key words: high-level waste, landfill, underground laboratory, called the safety case.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-92-100

AUTHOR

Gupalo V.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: Gupalo13@rambler.ru,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Laverov N.P., Velichkin V.I., Omel'yanenko B.I., Yudintsev S.V., Petrov V.A., Bychkov A.V. *Izolyatsiya otrabotavshikh yadernykh materialov: geologo-geokhimicheskie osnovy.* T. 2. (Isolation of spent nuclear materials: geological-geochemical basis, vol. 2), Moscow, IGEM RAN; IFZ RAN, 2008, 280 p.

2. Talbot C.F., Sirat M. Stress control of hydraulic conductivity in fracture saturated Swedish bedrock. *Engineering Geology*. 2001, no 61, pp. 145—153.

3. Luhmann L., Noseck U., Storck R. Spent fuel performance assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. *Gesellschaft fur Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH*. GRS 154. 2000. 213 p.

4. *SKB 2006. Äspö hard rock laboratory. Annual Report 2005.* Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-06-10. 207 p.

5. Gupalo V.S. *Sbornik statey mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Problemy podzemnogo stroitel'stva v XXI veke».* Tula, 25—27 aprelya 2002 g. (Collection of articles of international scientific conference «Problems of underground construction in the XXI century». Tula, 25—27 April 2002), Tula, 2002.

6. Gupalo V.S., Konovalov V.Yu. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy*. 2010, no 3(62), pp. 16—22.