УДК 622.272:621.039.7

В.С. Гупало

ОЦЕНКА ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНЫ ТЕХНОГЕННОЙ И ПРИРОДНОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ОБЪЕКТОВ ПОДЗЕМНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВАО

Ключевым показателем пригодности массива горных пород, предполагаемого для подземного захоронения высокоактивных отходов является прогноз изменения его изоляционных свойств от техногенных и природных факторов. Проведена оценка долговременных гидродинамических процессов в массивах скальных пород в условиях длительных тепловых воздействий, аналогичных объекту подземного захоронения ВАО. На основе исследования изменения гидродинамических характеристик скального массива, обобщения и системного анализа данных регулярных замеров уровней подземных вод и водопритоков в выработки за период эксплуатации определены зависимости изменения изоляционных свойств скального массива от степени и тапа его нарушенности и наличия тепловых нагрузок. Полученные результаты позволили определить направления корректировки исследовательских работ на площадке предполагаемого создания ПГЗРО и явились исходными данными для оценки величин неопределенностей значимых параметров породного массива, используемых для оценки безопасности геологической изоляции ВАО.

Ключевые слова: высокоактивные отходы, подземное захоронение, изоляционные свойства массива скальных пород, обоснование безопасности.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-115-121

Средой переноса радионуклидов из могильника высокоактивных отходов (ВАО) в биосферу являются подземные воды. Поэтому значительные усилия специалистов при выборе места для могильника и создании инженерных барьеров нацелены на предотвращение контакта ВАО с подземными водами, а прогноз изменения гидрогеологических характеристик пород является ключевым показателем изоляционных свойств массива, выбранного для окончательной изоляции ВАО.

К настоящему времени на основе зарубежных исследований в подземных исследовательских лабораториях [1, 2] получен значительный объем данных, касающихся влияния горнопроходческих работ на изоляционные свойства геологической среды, влияния глубины на водопроницаемость пород, интенсивность водообмена и другие параметры. Однако, в связи с тем, что в каждом конкретном месте геологическая среда характеризуется сугубо индивидуальными особенностями, пере-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 115–121.
© В.С. Гупало. 2017.

носить полученные данные на ПГЗРО, расположенное в другом месте, можно лишь для самых предварительных оценок. Поэтому особенно ценными для достоверных оценок безопасности являются результаты исследований, полученные в условиях, максимально приближенных к предполагаемой площадке для создания ПГЗРО.

В статье приведен анализ результатов исследования трещиноватого скального массива, расположенного вблизи предполагаемой площадки строительства в РФ ПГЗРО [3]. Выработки, в которых проводились исследования вмещали подземные объекты атомной энергетики: уран-графитовые реактора, теплоообменники которых в течение периода эксплуатации оказывали тепловое воздействие на породный массив.

Горный массив, вмещающий выработки объекта исследований, сложен метаморфическим комплексом пород докембрийского возраста. До глубины 10—15 м метаморфическая порода сильно выветрена до рыхлой дресвяно-щебнистой массы. Ниже, до глубины 60—70 м, за счет экзогенных процессов она разбита сеткой трещин до глыбово-щебнистого материала. От 70 м вниз по разрезу следы физического выветривания отсутствуют.

Элементами структурного ослабления гнейсового массива являются трещины, зоны тектонических нарушений (рассланцевания и дробления), а также контакты петрографических разностей пород, т.е. гнейсов с интрузивными образованиями, представленными метадиабазами, амфиболитами и порфиритами разных возрастов, образующими жильные и дайковые тела.

Трещинно-грунтовые воды развиты в верхней части массива, в зоне экзогенной трещиноватости приуроченной к зоне поверхностного выветривания гнейсов. Эти трещины перехватывают поверхностный сток и верховодку и опускают их ниже местного базиса эрозии. Уровень воды отмечен на глубине порядка 15—35 м от поверхности земли. Ниже — зона полного водонасыщения массива.

Трещинно-жильные воды связаны с трещинами зон тектонических нарушений, глубоко рассекающих земную кору. Этот тип подземных вод образует локально линейно вытянутые водоносные зоны, прослеживающиеся на глубину 200 м и более.

Таким образом, геолого-гидрогеологические условия исследуемого горного массива в принципиальном плане соответствуют условиям кристаллических массивов южной части Енисейского кряжа [4, 5]. Это позволяет рассматривать исследуемый участок в качестве аналога Нижнеканского гранитоидного массива.

Техногенные источники тепла объекта исследований в течении четырех десятилетий оказывали мощное воздействие на вмещающий породный массив и динамику геомеханических, гидрогеологических, тепловых и др. процессов. Для оценки изменений гидродинамических процессов проведено исследование изменения по глубине гидрогеологических характеристик массива, а также обобщение и анализ данных регулярных замеров значений уровней подземных вод и водопритоков в выработки за период эксплуатации.

В рамках исследования изменений по глубине гидрогеологических характеристик породного массива в условиях техногенного воздействия с поверхности были пробурены две гидрогеологические скважины (скв. А и скв. Б) глубиной соответственно 223 и 200 м.

Помимо геологического описания керна и общих гидрогеологических наблюдений, в них выполнены стандартный каротажный комплекс геофизических исследований, кавернометрия и расходометрия.

Таблица 1

Коэффициенты фильтрации (Кф), определенные методами расходометрии и откачек по скважинам А и Б

Названия скважин	Интервал опробования, м	Дебит зоны, л/с	Расходометрия $K_ф$, м/сутки	Откачки $K_ф$, м/сутки
Скв. А	10,5—72,5	0,013	0,0010	0,0020
	72,5—192,5	0,003	0,0001	
	192,5—222,6	0,014	0,0021	
Скв. Б	76,7—132,0	0,03	0,0010	0,007
	132,0—159,7	0,005	0,0003	
	159,7—185,3	0,025	0,0020	

Забой скважины А расположен в центральной части межкамерного целика в тектонически менее нарушенной зоне, но характеризующей свойства зоны техногенной трещиноватости. Забой скважины Б расположен в пределах зоны тектонического нарушения (зоны рассланцевания). Гидрогеологические исследования в скважинах имели своей целью изучение проницаемости пород и установление направления и скорости движения трещинных вод.

Для установления закономерностей нарушенного гидродинамического режима в пределах скального массива в условиях теплового воздействия и для оценки его водопроницаемости в скважинах А и Б проанализированы результаты выполненных гидрогеологических откачек, расходометрии и индикаторных исследований, а также гидрогеологической съемки (поверхностной) над объектом.

В результате опытных откачек получены осредненные параметры проницаемости горного массива: коэффициент фильтрации по скважине А составил 0,002 м/сут, по скважине Б — 0,0007 м/сут.

Более подробную картину дала расходометрия: по скважине А коэффициент фильтрации меняется от 0,001 м/сут до 0,0021 м/сут, по скважине Б — от 0,001 до 0,0003 м/сут.

В целом на условно выделенных трех апробированных участках скважин А и Б наблюдается уменьшение значений коэффициента фильтрации с увеличением глубины, и в средней части скважин $K_ф$ становится равным десятитысячным долям м/сут. Это свидетельствует о затухании трещиноватости пород с глубиной (за исключением зон тектонических нарушений), что подтверждается и характером проявления трещиноватости пород по скважинам.

Характерным для обеих скважин является еще и увеличение $K_ф$ в призабойной части. Так скважина А попадает в трещиноватую зону, обусловленную влиянием горнопроходческих работ. Повышение $K_ф$ в нижней части скважины Б вызвано наличием на этом участке тектонического нарушения. Результаты анализа исследований фильтрационных свойств пород приведены в табл. 1.

Индикаторные исследования (запуск в призабойную часть скважины красителя — эозина) указали на высокую проницаемость горного массива в пределах приконтурной зоны объекта. Через сутки после запуска индикатора, он был обнаружен в дренажных водах выработок и горизонтальных наблюдательных скважинах, пройденных из них.

Это свидетельствует о наличии в закрепном, техногенно-нарушенном про-

странстве участков с проницаемостью более 1 м/сут.

То, что зона повышенной трещиноватости вокруг подземных сооружений имеет ограниченные размеры (первые метры), подтверждается индикаторными исследованиями в скважине Б. Краситель, запущенный в эту скважину, в дренажных водах никаких камер не был обнаружен и через несколько месяцев. То есть забой скважины Б не попадает в зону техногенной трещиноватости. Индикаторные опыты таким образом показали, что горные выработки дренируют трещинно-жильные воды только с сильно ограниченного объема вмещающего массива.

Проведенные опытные откачки подтвердили это — радиус влияния скважин находилсяся в интервале 20—30 м. Так при проведении опытных работ в скважине А понижение уровня воды на 2,2 м было отмечено только в ближайшей скважине, расположенной от нее на расстоянии около 20 м.

Для оценки динамики изменения гидродинамических показателей за период эксплуатации исследуемых сооружений проведен сравнительный анализ данных по уровням подземных вод и объемов водопритоков в выработки.

Результаты сравнительного анализа карт гидроизогипс, построенных по данным 60-х годов прошлого столетия и современных, показали принципиальное сходство формы уровенной поверхности. Поверхность подземных вод контролируется рельефом дневной поверхности и в весьма сглаженном виде повторяет его формы; по тальвегам логов происходит разгрузка подземных вод.

В табл. 2 приводятся значения разницы глубин залегания уровней, зафиксированных по одним и тем же скважинам на период 60 годов прошлого столетия и на современный период.

Из табл. 2 видно, что подъем уровня зафиксирован за период в тридцать пять лет по всем скважинам, при этом по четырем скважинам из шести амплитуда изменений превышает 2,5 м.

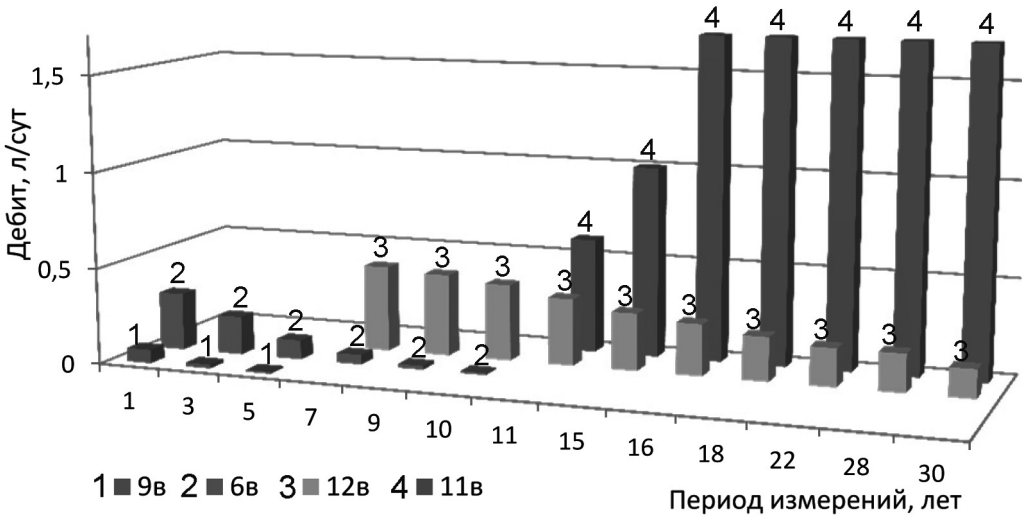
Проведенный таким образом анализ показал, что за период наблюдений снижения уровенной поверхности подземных вод в пределах массива не зафиксировано, что также говорит о низком дренирующем воздействии комплекса подземных сооружений на подземные воды массива. Исключением являются участки, примыкающие к вертикальным горным выработкам (стволам), где по отдельным скважинам в период их проходки зафиксирована амплитуда снижения уровенной поверхности до 6,5 м.

Главный вывод, который можно сделать на основании анализа данных режимных наблюдений [6], это то, что за время эксплуатации сооружений объемы воды, дренируемой горными выработками, резко снизился. По точкам наблюдения, расположенным в массиве, нарушенном единичными трещинами (6в, 12в), в том числе в условиях длительного теплового воздействия (9в) дебиты водопритоков значительно снизились. Так, по 6в дебит за период 1969—78 гг. снизился более чем в 12 раз, и скважина была закрыта; в точке наблюдения 9в водопритоки уменьшились более чем в 13 раз. В точках 10в и 12в они снизились в 8—10 раз, в точках 13в, 14в, 15в — в 2—4 раза. При этом, в местах

Таблица 2

Уменьшение глубин залегания уровней подземных вод

№ скважин	09	016	023	024	026	027
Величина амплитуды	3,2	3,0	5,04	0,2	2,8	0,6



Изменение дебита водопритоков в подземные выработки в зонах природной и техногенной трещиноватости

неблагоприятного сочетания природных условий и техногенных воздействий (точка наблюдения 11в) не отмечено снижение дебита водопритока, а зафиксировано его повышение (рисунок).

В ходе наблюдений за величинами водопритоков в горные выработки проводились отдельные замеры температуры разгружающихся вод. По данным разных лет, начиная с 1960 г., и по различным пунктам наблюдений температура вод варьирует от 19 до 25 °С. На основе этих данных, а также результатов замеров в наблюдательных скважинах были выполнены оценки влияния теплового воздействия парогенераторов и теплообменников, установленных в горных выработках, на тепловой режим подземных вод. Было выявлено, что объекты оказывают значительное отепляющее воздействие на массив горных пород.

При этом степень изменения температурного режима массива непостоянна в плане и по разрезу. Фоновая температура подземных вод в естественных условиях составляет 5—6 °С. Вертикальная мощность зоны с температурой выше фоновой достигает 38—70 м от кровли горных выработок. Температурный градиент, то есть интенсивность возрастания температуры по мере приближения к горным выработкам, изменяется от 0,06 до 0,43 °С на метр глубины. Температурный градиент в пятнадцатиметровой толще варьирует от 0,17 до 0,85 °С на один метр. Максимальная зафиксированная температура подземных вод в непосредственной близости от выработок достигает 36 °С.

Основные результаты показали:

• За период наблюдений снижения уровенной поверхности подземных вод в пределах массива не зафиксировано, что говорит о низком дренирующем воздействии комплекса подземных сооружений на подземные воды массива.

• Повышенные значения коэффициентов фильтрации (0,002 м/сут против 0,0001 м/сут) характерны только для нижних частей скважин, то есть тех, где скважина Б врезается в зону интенсивных тектонических нарушений, а скважина А — в зону интенсивной приконтурной трещиноватости.

• Совместный анализ результатов различных исследований (опытно-фильтрационных, индикаторных и др.) показал, что применение стандартных методик обследования скважин путем осреднения данных по интервалам опробования не исключает, что действительные значения $K_ф$ отдельных зон оказались приуменьшенными. В зависимости от степени раскрытости трещин и их ориентировки по отношению к тензору напряженного состояния пород, реальные значения $K_ф$ могут достигать 0,1 м/сут. Это требует отдельного исследования отмеченных зон нарушений по разведочным скважинам на площадке размещения ПГЗРО.

• Отличия в динамике водопритоков в горные выработки в различных горно-геологических и инженерно-технических условиях эксплуатации говорят о значительном влиянии теплового фактора на длительные изоляционные свойства массива. Так, уменьшение водопритоков в условиях отсутствия теплового воздействия составило 2—13 раз и связано с механической и химической кольматацией трещин.

В условиях воздействия теплового поля переменный характер механических свойств породы, образованной скальным массивом и материалом заполнителя трещин, с соответствующим неоднородным напряженно-деформированным состоянием не создает значительных помех перемещению глинистых частиц с потоком подземных вод, что является основой дальнейшего изменения гидрогеологического параметров массива, вмещающего источник тепла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *Hökmark H., Lönnqvist M., Fälth B.* THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-10-23. 2010. 276 p.

3. *Абрамов А. А.*, *Бейгул В. П.* Создание подземной исследовательский лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива: состояние и дальнейшее развитие работ. http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690.

4. *Гупало Т. А.*, *Соколовский Л. Г.*, *Поляков В. А.*, *Миловидов В. Л.* Гидрогеология Нижне-Канского гранитоидного массива // Разведка и охрана недр. — 2004. — № 10. — С. 53—58.

5. *Андерсон Е. Б.*, *Даценко В. М.*, *Кирко В. И.*, *Копылов И. С. и др.* Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов / Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО. Материалы КНТС. г. Железногорск. 1998. — СПб.: НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», 1999. — С. 14—23.

6. *ISTC PROJECT #307B-97* Development of quantitative criteria for suitability of rock mass for safe long-term storage of waste from weapons-grade plutonium production, illustrated by Krasnoyarsk mining chemical combine, 2001. 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. 12, pp. 115–121.
UDC 622.272:621.039.7

V.S. Gupalo

ASSESSMENT OF LONG-TERM CHANGE IN PENETRABILITY IN THE INDUCED AND NATURAL JOINTING ZONE NEAR UNDERGROUND HIGH-ACTIVE WASTE DISPOSAL

A key indication of suitability of rock mass for hypothetical underground high-active waste disposal is the prediction of change in the sealing capacity of rocks due to technology-caused and natural factors.

The long-term hydrodynamic processes are assessed in hard rock mass exposed to long-term thermal effects similarly to an underground high-active waste disposal. Based on the analyzed change in the hydrodynamic characteristics of hard rock mass, as well as on the generalized and systematized analysis of regular measurements of groundwater level and inflows in mines in the period of operation, the dependence of the permeability change on the degree and type of damage and heat loads in hard rock mass is determined.

The obtained results enabled adjustment of the research work in the area of the intended high-active waste disposal point and became the source data for the uncertainty estimation of rock mass parameters used in the assessment of safe geological sealing of high-active waste.

Key words: high-active waste, underground disposal, sealing capacity, hard rock mass, safety validation.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-115-121

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

2. Hökmark H., Lönnqvist M., Fälth B. *THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites.* Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB). Technical Report TR-10-23. 2010. 276 p.

3. Abramov A. A., Beygul V. P. *Sozdanie podzemnoy issledovatel'skiy laboratorii na uchastke «Eniseyskiy» Nizhnekanskogo massiva: sostoyanie i dal'neyshee razvitie rabot*, available at: http://www.atomic-energy.ru/articles/2017/08/22/78690

4. Gupalo T. A., Sokolovskiy L. G., Polyakov V. A., Milovidov V. L. *Razvedka i okhrana nedr*. 2004, no 10, pp. 53—58.

5. Anderson E. B., Datsenko V. M., Kirko V. I., Kopylov I. S. *Issledovaniya granitoidov Nizhnekanskogo massiva dlya zakhoroneniya RAO. Materialy KNTS*. Zheleznogorsk. 1998 (Study of Nizhnekansky Massif granitoids with intent to arrange radioactive waste disposal. Transactions of the Coordinating Council for Science and Technology. Zheleznogorsk. 1998), Saint-Petersburg, NPO «Radievyy institut im. V.G. Khlopina», 1999, pp. 14—23.

6. *ISTC PROJECT #307B-97 Development of quantitative criteria for suitability of rock mass for safe long-term storage of waste from weapons-grade plutonium production*, illustrated by Krasnoyarsk mining chemical combine, 2001.