УДК 621.039.75

О.В.КОВАЛЕВ, *д-р. техн. наук, профессор, spggi4@mail.ru*
С.П.МОЗЕР, *канд. техн. наук., доцент, mozer1@yandex.ru*
И.Ю.ТХОРИКОВ, *канд. техн. наук, научный сотрудник, spggi4@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

O.V.KOVALEV, *Dr. in eng. sc., professor, spggi4@mail.ru*
S.P.MOZER, *PhD in eng. sc., associate professor, mozer1@yandex.ru*
I.Y.THORIKOV, *PhD in eng. sc., research assistant, spggi4@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ХРАНИЛИЩ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Радиоактивные отходы, получаемые при производстве электроэнергии, требуют высоконадежного захоронения. Одним из наиболее перспективных типов хранилищ являются подземные выработки в отложениях растворимых солей, создаваемые растворением через скважины с поверхности. Описаны существующие требования к захоронению радиоактивных отходов и сформулированы ключевые аспекты комплексного метода оценки механического состояния горных пород в окрестностях камер-хранилищ в сейсмически активных районах, потенциально пригодных для хранения и захоронения отходов.

***Ключевые слова*:** радиоактивные отходы, соли, хранение и захоронение, камеры подземного растворения, сейсмически активные районы, комплексный метод.

COMPLEX METHOD OF ASSESING MECHANICAL CONDITION OF ROCKS IN VICINITY STOREHOUSES OF RADIOACTIVE WASTE

Radioactive waste received by manufacture of electric power requires a highly reliable burial place. One of the most perspective types of storehouses is underground developments in adjournment to soluble salts, created by dissolution through chinks from the surface. Existing requirements to a burial place of radioactive waste are described as key aspects of a complex method of an assessment of a mechanical condition of rocks in vicinities of chambers-storehouses in seismically active areas which are potentially suitable for storage and burial place of waste are stated.

***Key words*:** radioactive waste, salts, storage and burial places, chambers of underground dissolution, seismically active areas and complex method.

Использование горных выработок для изоляции радиоактивных отходов с каждым годом становится все более насущным вопросом для человечества [4]. Изоляция отходов в подземном пространстве позволит исключить практически любое вредное воздействие отходов на биосферу на тысячи лет. Такую надежность гарантирует использование так называемого принципа «мультибарьера».

Рассмотрим основные аспекты оценки риска выхода радиоактивных отходов (РАО) в биосферу с точки зрения повседневной человеческой деятельности.

Решение о строительстве хранилищ (могильников) должно предусмотреть степень риска при выборе территории для захоронения РАО, а также опасность возникновения различных чрезвычайных ситуаций.

При оценке геологических источников риска загрязнения окружающей среды учитывают [1, 3, 5]:

• физические (механические, тепловые), фильтрационные и сорбционные свойства горных пород;

• тектоническую обстановку, общую сейсмическую опасность, новейшую активность разломов, скорость вертикальных движений блоков земной коры;

• интенсивность изменения геоморфологических характеристик: водообильность среды, активность динамики подземных вод, включая влияние глобального изменения климата, подвижность радионуклидов в подземных водах;

• особенности степени изоляции и образования каналов гидравлической связи подземных и поверхностных вод; наличие ценных ресурсов и перспектив их обнаружения.

Эти геологические условия, определяющие пригодность территории для устройства хранилища, должны оцениваться независимо, по представительному параметру для всех источников риска. Они должны обеспечить оценку по совокупности частных критериев, связанных с горными породами, гидрогеологическими условиями, геологическими, тектоническими и минеральными ресурсами. Это позволит дать корректную оценку пригодности геологической среды. Сведения о типе, количестве, ближайшей и долгосрочной динамике поступления РАО предоставят возможность выполнить районирование территории области, чтобы оценить пригодность участков для размещения хранилища, устройства (использование) коммуникаций, развития инфраструктуры и прочих смежных проблем.

При использовании подземных горных выработок для хранения или захоронения опасных и радиоактивных отходов весь массив рассматривается как единый горно-технический» барьер. При этом для принятия решения о пригодности массива горных пород для сооружения хранилища (могильника) отходов необходимо провести большое количество предварительных исследований и инженерных изысканий, в которые входят:

• изучение стратиграфической колонки;

• исследование минералогического состава горного массива;

• слоистость, элементы залегания и размеры пласта (рудного тела);

• трещиноватость массива горных пород;

• свойства проницаемости рассматриваемого для строительства хранилища (могильника) массива горных пород.

Общие требования к хранилищам (могильникам) отходов можно свести к следующим:

• низкий водоприток или его отсутствие;

• низкий коэффициент проницаемости массива;

• высокая устойчивость массива к внешним воздействиям;

• пластичность массива (способность к самозалечиванию трещин);

• гомогенность массива горных пород;

• высокая теплопроводность массива горных пород;

• достаточная сорбционная способность массива горных пород;

• низкая растворимость.

При выборе мест для хранения (захоронения) отходов, как правило, заведомо исключают районы с вулканизмом, сейсмической и тектонической активностью. При этом окончательный выбор мест изоляции отходов является сложной горно-технической, экологической и социальной задачей.

Целью выбора места захоронения РАО или прочих видов отходов является поиск устойчивых геологических структур с незначительной проницаемостью по всем направлениям.

Разработка требований к геологическим формациям для размещения РАО проводится во многих странах мира и России. На основании этих работ МАГАТЭ разработаны приведенные ниже принципы безопасности, определяемые соответствующими техническими требованиями.

Геологические формации для размещения хранилищ и могильников РАО должны располагаться в тектонически стабильной зоне земной коры. Формация считается стабильной, если в ней не ожидается недопустимых подвижек в течение 300-500 лет для

отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и для размещения высокоактивных отходов (ВАО) – в течение более 104 лет [1, 3, 5].

Могильники высоко- и среднеактивных РАО размещаются в массивах с коэффициентом проницаемости не выше 104 дарси в блоке горного отвода без тектонических нарушений. Выбранный геологический блок по своим размерам должен вмещать не только горные выработки могильника, но и зону санитарного отчуждения (200-250 м).

Основные требования, предъявляемые к участку строительства хранилища и могильника РАО в тектонически стабильном блоке, сводятся к следующему:

- сейсмичность района расположения участка не должна превышать 7 баллов по 12-балльной шкале;
- горный отвод структурного блока должен включать все подземные сооружения и предохранительные и барьерные целики; в пределах горного отвода не должно быть тектонических нарушений, которые могут быть каналами миграции;
- хранилища и могильники располагают в зонах затрудненного водообмена и застойного режима;
- участки геологических формаций не должны иметь пластов, жил, зон с высокой проницаемостью;
- горный массив, вмещающий хранилища и могильники, должен быть монолитным, однородным и надежно изолированным от горизонтов водообмена;
- геологические формации должны состоять из прочных и устойчивых горных пород, инертных по отношению к физико-химическому воздействию РАО, и обладать свойствами механических барьеров по пути возможной миграции радионуклидов;
- блок земной коры для размещения хранилищ и могильников РАО должен исключать возможность миграции радионуклидов, представляющих опасность для биосферы в течение 103-104 лет, сохраняя изоляционные свойства системы в этот период;
- геологическая формация должна иметь средний уровень естественных тектонических напряжений, а влияние трещиноватости массива должно быть сведено к минимуму;
- горный массив по составу, прочности пород и напряженно-деформированному состоянию должен удовлетворять требованиям для строительства выработок.

Геологические формации должны обладать высокой прочностью, непроницаемостью для жидкостей и газов, высокой термической стойкостью и теплопроводностью, иметь достаточные коэффициенты теплового расширения и не изменять свои свойства при воздействии радиации и химических реакций. Наиболее пригодны для сооружения могильников РАО необводненные слабопроницаемые геологические формации: плотные скальные породы, каменные соли и глины.

Таким образом, тип и конструкцию хранилища или могильника выбирают на основе анализа геологических, геомеханических, гидрогеологических, тектонических и сейсмических характеристик геологической формации, удобных подъездов и транспортных путей, особенностей рельефа избранной местности, технологического оборудования для захоронения РАО, социально-экологической обстановки и технико-экономических показателей комплекса мероприятий по изоляции отходов.

Отметим, что глубина расположения хранилищ и могильников, параметры несущих конструкций крепи, естественных и искусственных инженерных сооружений определяются из условия сохранения устойчивости массива пород между хранилищем и поверхностью земли, отсутствия раскрытия трещин и выхода радионуклидов на земную поверхность и геосферу при длительном хранении и воздействии особых внешних динамических нагрузок на земной поверхности.

Подземная изоляция предварительно отвержденных и твердых радиоактивных отходов может быть осуществлена: в специально оборудованных выработках рудников, шахт, освободившихся выработках, специальных подземных сооружениях; в специально создаваемых подземных сооружениях, выработках, камерах, скважи-

нах, подземных емкостях; в буровых скважинах различной глубины; в сооружениях приповерхностного типа.

Выработки в отложениях каменной соли обладают в ряде случаев всеми необходимыми качествами для их использования в качестве надежных и безопасных емкостей для накапливания и долговременного хранения РАО. Наиболее низкой стоимостью сооружения и эксплуатации обладают камеры, полученные путем растворения соли с поверхности.

В Российской Федерации имеется достаточно большое количество отработанных методом растворения через скважины с поверхности камер с объемом некоторых до нескольких миллионов кубометров. На их базе можно в натурных условиях исследовать возможность и целесообразность использования камер подземного растворения для захоронения РАО. Следует отметить, что практически все рассолопромыслы России находятся в сейсмически активных районах, что требует разработки специального комплексного метода для оценки возможности их использования для мест изоляции отходов.

Данная оценка должна базироваться на досконального изучении и научном обобщении:

- геологической информации об объекте исследований – галогенном массиве и покрывающей его толще пород;
- данных о горно-геомеханических параметрах массива горных пород и подземных сооружений;
- сведений о сейсмоактивности региона в рамках суперпозиционного рассмотрения влияния геостатического и геодинамического полей напряжений на формирование механического состояния пород в окрестности камер.

Разработанный метод оценки использует подход, параллельно обобщающий данные маркшейдерской информации о сдвижении поверхности и результаты геомеханической оценки состояния вмещающей подземные объекты (камеры) массива горных пород. Анализ геомеханической оценки позволяет учитывать изменения в массиве компонентов напряжений, деформаций и перемещений, оцениваемых в рамках влияния геостатических и геодинамических полей, характерных для данного района.

Недостаточность данных о маркшейдерских наблюдениях на объекте оценки можно компенсировать путем включения в указанный комплексный метод аналогового подхода. Для этого следует произвести сопоставление геологических и горно-геомеханических параметров вмещающего массива в условиях действующего рассолопромысла. При наличии достаточно адекватного сопоставления отмеченных характеристик в обоих случаях можно сделать вывод о возможности интерпретации данных по оцениваемому рассолопромыслу на объект исследований (захоронения РАО).

Горно-геомеханические задачи, требующие для своего решения наличия достаточно доскональных оценок параметров проявлений геостатического поля в окрестности камеры, вызывают необходимость рассмотрения и обоснованного выбора как аналитических, так и экспериментально-аналитических методов оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород в окрестности указанного объекта [2]. Выбранный метод должен обеспечивать возможность учета широкого спектра данных, в частности, геометрических соотношений камер выщелачивания в окрестности камеры-хранилища РАО. Рассмотренным обстоятельствам и некоторым иным особенностям выполнения количественных оценок НДС массива достаточно соответствует применение численных методов, разработанных на базе граничных элементов.

В качестве рабочего метода, с учетом данных обобщения геолого-горнотехнических характеристик массива, была принята одна из модификаций метода, а именно – метод разрывных смещений, позволяющий дать необходимую количественную оценку интересующих исследователя величин компонентов тензора напряжений, тензора деформаций и вектора перемещений. Методически предусмотрено выполнение оценки механического состояния подземных объектов для экстремально неблагоприятного сочетания условий эксплуатации камеры при размещении в ней

отходов РАО. Данная специфика учитывается путем формирования геометрических, механических и силовых (в данном случае геостатических) параметров, принимаемых в качестве исходных при решении этой части комплексного исследования механического состояния массива горных пород. Наличие сейсмоактивности достаточно высокого уровня (до 8-9 балов по шкале MSK-64) включает в комплексный метод требование о выборе подхода к оценке параметров и геодинамического поля, что также отражено в комплексном методе изучения горно-геомеханического состояния массива.

При учете только стахостической возможности проявления сейсмической активности в пределах горного отвода рассолопромысла, оценка его в рамках решаемой задачи целесообразна лишь в экстремальной постановке рассмотрения количественных величин динамического поля напряжений. Такой подход оптимален и с точки зрения принципиального назначения камеры в качестве емкости для размещения в ней отходов РАО. Рассмотренная постановка решения задачи позволяет допускать неучет физико-химического взаимодействия заполняющих камеры флюидов с горными породами.

Разработанный комплексный метод оценки механического состояния горных пород позволяет обоснованно выявлять условия устойчивого состояния системы элементов массива в окрестности камер-хранилищ РАО. С высокой степенью вероятности в методе уточнена возможность наличия в массиве узких мест, а также намечены принципиальные подходы по снижению отрицательного воздействия силовых полей на подземные конструкции различного назначения. В рамках оценки априори экстремальной ситуации квазиразрушения основных несущих элементов массива – междукамерных целиков в окрестности камеры – в методе может быть рассмотрено общее напряженно-деформированное состояние налегающего комплекса пород вплоть до поверхности. Комплексный метод позволяет оценить аспекты сохранения условий гидро-геодинамической автономии соляной толщи пород, вмещающей весь комплекс рассматриваемых подземных камер.

Исследования выполнены в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кочкин Б.Т.* Геоэкологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов. М., 2005.

2. *Мозер С.П.* Горная геомеханика: физические основы и закономерности проявлений геомеханических процессов при подземной разработке месторождений / С.П. Мозер, Е.Б. Куртуков. СПб, 2009.

3. Technical-scientific contributions on the topic of nuclear waste management. NAGRA. Bulletin № 35. 2004.

4. *Ian Hore Lacy.* Nuclear Electricity. Sixth edition. 2000.

5. Conceptual Design for a Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel. 1106/MD18085/REP/01. 2002.

REFERENCES

1. *Kochkin B.T.* Geoecological approach to selection of the nuclear disposal areas. Moscow, 2005.

2. *Mozer S.P., Kurtukov E.B.* Rock mechanics: basic physics and mechanism of occurrence of geomechanical processes in underground mining. Saint Petersburg, 2009.

3. Technical-scientific contributions on the topic of nuclear waste management. NAGRA. Bulletin № 35. 2004.

4. *Ian Hore Lacy.* Nuclear Electricity. Sixth edition. 2000.

5. Conceptual Design for a Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel. 1106/MD18085/REP/01. 2002.