

УДК 622.284.9

О.В. Ковалёв, И.Ю. Тхориков, С.П. Мозер

**ГОРНОГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
ВЫСОКОНАДЕЖНОГО ЗАХОРОНЕНИЯ
ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ В ЗОНАХ ПОВЫШЕННОЙ
СЕЙСМОАКТИВНОСТИ**

Семинар № 8

Захоронение токсичных отходов различного происхождения, включая отходы атомной промышленности, в настоящее время может рассматриваться как одна из приоритетных проблем современности. Отмеченное обстоятельство обуславливается, прежде всего, увеличением отходов атомных станций, связанным с прогнозируемым ростом ядерной энергетики в текущем столетии – до 25 % и более от суммарно производимой электроэнергии в различных странах. Локально конкретизируя значимость решения рассматриваемой проблемы достаточно упомянуть об объеме ликвидации (захоронения) отходов АЭС только в одной стране мира ФРГ (Германии). На границе XXI столетия объем требующих захоронения радиоактивных отходов составлял здесь порядка 200 тыс. м³ (Suddeutsche Zeitung, 1988, №1). Наличие проблемы захоронения отходов специфично также и для других стран Западной Европы, стран Северной Америки, ряда других стран Азиатского континента.

Очевидно, что решение вопросов захоронения отходов должно гарантировать необходимо высокую степень надежности изоляции.

В этой связи, учитывая и рост объемов захоронения и, одновременно, требования необходимо-достаточной гарантии его надежности, основными во-

просами проблемы будут являться: создание условий упомянутой выше изоляции отходов и, параллельно, минимизации затрат на производство таких работ.

Приведенное взаимовлияние данных вопросов в значительной мере – в свете решаемой проблемы – предопределяет направление “поиска” обеспечения требований экологической безопасности в комплексе с оптимизированной инвестиционной политикой.

Анализ широкого круга возможных вариантов объектов захоронения отходов и технологичности их практического использования показал следующее. Подобные объекты целесообразно совмещать с теми зонами земной коры, которые апробированно позволяют классифицировать их как гидроизолированные, характеризующиеся отсутствием (в геологическом аспекте) какой-либо выраженной в них динамики подземных вод. И в части второй составляющей комплексной проблемы – желательным аспектом является наличие уже освоенных инвестиций в указанных зонах и возможность “учета” их объемов при решении проблемы захоронения.

Достаточно очевидным резюме изложенных выше обстоятельств является ориентация вопросов захоронения на проблему подземного растворения солей (“ПРС-проблему”). При этом, в части принятия наиболее зна-

чимого решения, целесообразно считать разработку технологических параметров захоронения отходов в отработанных “камерах выщелачивания” каменной соли.

Представленный, в общих чертах, подход к решению проблемы захоронения требует безусловной дальнейшей конкретизации в вопросе выбора возможной “зональности” объектов, а также в вопросе применимости к ним требований экологической безопасности. Последние требования определяют необходимость выполнения специальных оценок механических состояний элементов камер ПРС, прежде всего, с учетом возможного внешнего на них воздействия.

На территории России потенциально пригодных для захоронения радиоактивных отходов, в частности по гидрогеологическим условиям, может быть использован ряд месторождений каменной соли (более десятка). Например, по геологическим и гидрогеологическим условиям возможно использование Хатангского (Северо-Сибирского) соленосного бассейна, представленного соляными залежами мощностью свыше 500 м, располагаемыми на глубинах до 300 м. Подобное использование месторождений может иметь место и в Восточно-Сибирском регионе, где общая площадь соляных отложений оценивается сотнями тысяч квадратных километров, а также могут использоваться месторождения солей юга Красноярского края. Особенностью последних следует считать достаточность уровня их промышленного освоения, что, как очевидно, значимо может определять “инвестиционный фактор” решения проблемы и прежде всего с учетом приемлемых сроков ее реализации.

Позитивно-перспективное решение рассматриваемых вопросов, как известно, базируется на составлении

кадастра соответствующих соляных формаций в России, включая таковые и в ее Европейской части, однако превалирующую значимость по данной проблематике могут иметь месторождения Сибири. Последнее, обеспечивая надежную изоляцию от биосфер радиоактивных отходов, требует для указанного региона – в большей мере, чем для иных – решения задач повышения (до необходимого достаточного уровня) механической устойчивости подземных объектов захоронения. Данная специфика региона связана с вероятным проявлением здесь сейсмоактивности литосферы, обусловленной, в том числе, неотектоническими процессами [1].

Ниже рассматриваются разработанные в Санкт-Петербургском горном институте имени Г.В. Плеханова подходы, позволяющие не только качественно учитывать, но и количественно оценивать уровни геодинамического и геостатического воздействия на элементы подземных сооружений.

Отметим, что принципиально такая оценка может выполняться как для проектируемых специально для захоронения подземных сооружений, так и при повторном использовании камер ПРС в галогенных толщах пород. В обоих случаях результирующим аспектом решения задачи должно быть обеспечение условий гидрогеодинамической автономии каменносоляного массива, включающего либо отдельные объекты (камеры), либо их комплекс. Без указанной проработки вопросов нельзя (для конкретных регионов) утвердительно говорить о достаточности защиты биосферы от загрязнения продуктами захороняемых отходов.

Учитывая принятые выше условия целесообразности районирования мест захоронения и, в частности, рассматривая регионы повышенной сейсмоак-

тивности, кратко остановимся на параметрах, характеризующих таковую.

Уточняется положение объекта захоронения относительно “возможного очага землетрясения” (“ВОЗ”) и оценивается бальность землетрясения (по шкале, например MSK-64). С учетом прогнозируемых положений эпицентров землетрясений – вне их плесто-сейстовых зон (применительно к явлениям высокого энергетического уровня) – конкретизируется местоположение объекта, допускающее определяющее воздействие на него “плоской волны”, источник которой – в зоне гипоцентра сейсмоявления. В то же время, при оценке параметров геодинамического воздействия на элементы объекта захоронения (стенки камер, их потолочины, междуканальные целики – для комплексного объекта и др.) – учитывается и дифференция упомянутой волны. Обычно рассматривается воздействие на элементы преобладающе значимых “волн отражения” – при наличии “полного внутреннего отражения”. В целом, при оценке геодинамического воздействия упругих волн на элементы массива горных пород (МГП) в окрестности подземного объекта, формируются “априори вероятные” и, в то же время, “экстремально неблагоприятные” условия воздействия волн на горные породы. Такой подход обеспечивает максимальную возможность реализации требований экологической безопасности в части объекта захоронения. Далее оцениваются свойства МГП, вмещающего объект. Массив рассматривается как квазиупругая среда, позволяющая применение подходов динамической теории упругости, что более чем допустимо, поскольку процесс теплопередачи от “точки к точке” в такой среде существенно длительнее времени прохождения “через точку” упругой волны [2].

Подчеркнем также, что упомянутый эффект “полного внутреннего отражения” позволяет считать, что подобные волны практически не “переносят” энергию в глубину второй среды (контакт: массив – полость объекта захоронения). Энергия подающей волны (продольная “Р-волна расширения”) переходит в энергию “волны отраженности” [3]. В то же время, для рассматриваемого нами МГП, представленного каменносоляными отложениями, выполняется неравенство: $\sigma_{сж} > \tau_{ср} > \sigma_{р}$, что позволяет методически предусмотреть оценку воздействия отраженных волн в “области растяжения”, формируемой соответствующими “Р-волнами”, а, соответственно, и оценить экстремально-неблагоприятные условия механического состояния элементов объекта захоронения.

Учитывая принятые методические аспекты, касающиеся оценки воздействия геодинамического поля на МГП в окрестности объекта, дальнейшее решение задачи может быть реализовано используя основные посылы теории упругости и динамической теории упругости [4,5]. Очевидно, что искомыми параметрами сейсмоздействия на объект захоронения могут быть напряжения, определяемые распространяющейся в МГП (например по направлению “х”) “Р-волной”, т.е. величины напряжений “сжатия” (прямое движение волны к объекту) и напряжений “растяжения” (отраженная от рассматриваемой поверхности волна).

Не останавливаясь обстоятельно на известных [4, 5 и др.] системах уравнений, описывающих распространение в упругих средах продольных волн (“Р-волны”) расширения и волн поперечных (“S- волн искажения”), приведем результирующее уравнение движения, суперпозиционно отражающее “общий” случай перемещения “Р” и “N” волн в МГП в

окрестности объекта при его достаточном расположении от гипоцентра ВОЗ. Подобное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = a^2 \cdot \Delta \psi,$$

где ψ - суперпозиционная функция векторов U_p и U_s ; U_p - вектор "движения частиц" в МГП, соответствующий направлению движения фронта "волны расширения" ("Р-волны"); U_s - то же, соответствующий перпендикулярному относительно U_p движению частиц (по направлению "волн искажения" - "S - волн"); t - время; Δ - оператор Лапласа; a - параметр:

$$\text{- для "Р-волн": } a = C_1 = \left(\frac{\lambda + 2 \cdot G}{\rho} \right)^{0.5};$$

$$\text{- для "S-волн": } a = C_2 = \left(\frac{G}{\rho} \right)^{0.5};$$

$$\lambda - \text{константа Ламе } (\lambda = \frac{2 \cdot G \cdot \mu}{1 - 2 \cdot \mu});$$

G - модуль упругости при сдвиге; μ - коэффициент Пуассона; ρ - плотность среды (МГП); C_1 и C_2 - здесь соответственно скорости распространения продольных ("Р") волн и волн поперечных ("S").

Практическая оценка НДС МГП в окрестности объекта, используя отмеченный выше экстремально задаваемый подход к решению геодинамической задачи может быть реализована следующим образом.

Принимается одномерный (реально отвечающий вышеприведенным постулатам) характер распространения "Р-волны" в МГП - например, по направлению "х", нормальному в "точке" к контакту "МГП-объект". Компоненты вектора перемещений " δ_i " в этом случае определяются как: $U \neq 0$, а $V = \omega = 0$. Определяющее волну "Р" уравнение в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = C_1^2 \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2},$$

частными решениями которого являются функции вида: $f(x+C_1t)$ и $f_1(x-C_1t)$, а общее решение определится как

$$U = f(x+C_1t) + f_1(x-C_1t),$$

где функция " f_1 " характеризует "прямое" (от источника - гипоцентра) движение "Р-волны", а функция " f " - "обратное" движение волны "Р". Проведя известные преобразования определяется скорость " C_1 " - скорость распространения в МГП рассматриваемой волны, а именно

$$C_1 = \left[\frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu) \cdot \rho} \right]^{0.5},$$

где E - модуль упругости МГП (в конкретике - модуль деформации).

При прохождении в МГП "прямой" волны ("Р") скорость перемещения частиц массива определится:

$$\dot{U} = \frac{\partial U}{\partial t} = -C \frac{\partial U}{\partial x} = -C_1 \cdot \varepsilon_x,$$

имея в виду, что $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$, но $\sigma_y \neq 0$ и $\sigma_z \neq 0$, связаны с δ_x соотношением:

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_x} = \frac{\sigma_z}{\sigma_x} = \mu \cdot (1 - \mu).$$

Следовательно для волны "сжатия" напряжение σ_x (вдоль оси "х") опре-

делится как: $\sigma_x = -\rho \cdot C_1 \cdot \dot{U}$, а для волны "растяжения" (отраженная волна), соответственно, как

$$\sigma_x = \rho \cdot C_1 \cdot \dot{U}.$$

В конкретных случаях функции " f " и " f_1 " выбираются с учетом начальных условий, в частности при $t=0$ будем иметь

$$U_{t=0} = f(x) + f_1(x) \text{ и}$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{t=0} = C[f'(x) - f_1'].$$

Оценивая по приведенной методике экстремальные величины геодинамических напряжений в элементах объекта захоронения (потолочина, почва, целики - при конструктивно-комп-

лексном многокамерном объекте), выполняя такую оценку, естественно, с учетом величин напряжений, действующих в тех же элементах и обусловленных геостатическим полем, возможно реализовать достаточно представительный анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород в зоне захоронения радиоактивных (высокотоксичных отходов).

Заканчивая рассмотрение вопросов оценки НДС МГП в окрестности объектов (камер) захоронения, располагаемых в сложных геолого-географических условиях, подчеркнем следующие основополагающие моменты решаемых задач. Для подобных горно-геомеханических задач нельзя ограничиваться рассмотрением “силовых проявлений” в многосвязной среде, исходя из анализа “только для геостатического поля”, либо “только для поля геодинамического”, поскольку на глубинах расположения рассматриваемых объектов (сотни – до 1000 и более м) такие проявления всегда значимы. Уже геостатические оценки (реализуемые, например, на базе методов граничных элементов [6]

и др.) показывают наличие величин компонентов σ_{ij} (либо ϵ_{ij}) достаточно высокого уровня, близкого (сопоставимого) с предельными значениями механических характеристик горных пород (массива). В этой связи упомянутая оценка “силовых проявлений” должна осуществляться комплексно, учитывая как воздействие на МГП динамического (сейсмического) фактора, так и фактора геостатического. Собственно реализация такого подхода может быть осуществлена с использованием вышеизложенных методических аспектов оценки первого – динамического фактора, суперпозиционно рассматривая его со вторым – геостатическим фактором, выполняя оценку последнего, например, на базе упомянутого выше подхода [6]. Только в этом случае возможно получить достаточно объективные данные о геомеханической “обстановке” в окрестности объектов захоронения отходов, а, соответственно, с высокой надежностью прогнозировать состояние техногенно возмущенной среды (массива) с учетом требований экологической безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В.В. Основы геотектоники. М., Недра, 1983.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. Гостехиздат, 1950.
3. Смирнов В.И., Соболев С.Л. О применении нового метода к изучению упругих колебаний в пространстве при наличии осевой симметрии. Труды сейсмологического института АН СССР, №29, 1933.
4. Тимошенко С.П. Теория упругости. ОНТИ-ГТТИ, 1934.
5. Поручиков В.Е. Методы динамической теории упругости. М., Недра, 1986.
6. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. М., Мир, 1987. 

Коротко об авторах

Ковалёв О.В. – профессор, доктор технических наук,

Мозер С.П. – кандидат технических наук, ассистент,

Тхориков И.Ю. – кандидат технических наук, научный сотрудник,

кафедра разработки месторождений полезных ископаемых (РМПИ) Санкт-Петербургского государственного горного института (технического университета).

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 8 симпозиума «Неделя горняка-2008».

Рецензент д-р техн. наук, проф. Е.А. Ельчанинов.