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

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ КАМЕР ПОДЗЕМНОГО РАСТВОРЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ

Описаны этапы развития метода подземного растворения солей через скважины с поверхности. Сформулированы ключевые аспекты комплексного метода оценки механического состояния горных пород в окрестностях камер рассолопромыслов, расположенных в сейсмически активных районах, потенциально пригодных для хранения и захоронения отходов.

Ключевые слова: каменная соль, камеры подземного растворения, сейсмически активные районы, напряженно-деформированное состояние, методика.

ON ESTIMATES OF STABILITY CHAMBERS UNDERGROUND DISSOLUTION IN SEISMICALLY ACTIVE AREAS

We describe the stages in the development of the method of underground dissolution of salts from the surface through wells. Formulated the key aspects of the complex method of assessing the mechanical state of rocks in the vicinity of mining solution such as cameras located in seismically active areas of potentially suitable for storage and disposal of waste

Key words: rock salt, an underground chamber of dissolution, a seismically active area, the stress-strain state method.

Легкая растворимость каменной соли в воде с древних времен широко использовалась для отработки запасов месторождений. Так называемая «колодезная» технология добычи поваренной соли относится к первым российским горным промыслам. В Западной Европе с XII в. получили распространение колодцы, заглубленные в соляной пласт с медленным насыщением залитой в них воды и последующим ее выпариванием из рассола (солеварни) для получения продукции в твердом виде. В богатой соляными залежами России первые промыслы появились на новгородских землях (Старая Русса), сравнительно быстро развились в высокодоходное дело, стали первым и традиционным минеральным продуктом экспорта (XIII-XIV вв.).

Использование скважин вместо колодцев было начато с 1915 г. в Германии. Прямоточная и противоточная схемы неуправляемого подземного растворения обеспечивали небольшую производительность рассольных камер (10-20 $м^3$/ч) и очень низкий коэффициент извлечения запасов – до 20 %.

Развивая запатентованную Э.Трэмпом в 1936 г. идею управления формой камеры с помощью изолирующей ее кровлю воздушной подушки, профессор Ленинградского горного института П.А.Кулле в 1948 г. пред-

ложил заменить сжатый воздух тонким слоем нефтепродуктов («нерастворителем»), обеспечивающим развитие цилиндрической камеры проектного радиуса $R_к$ небольшой высоты $h_в$ над почвой залежи – подготовительной камеры гидровруба.

Основные запасы будущей камеры отрабатывают снизу вверх с последовательным растворением уступов-ступеней высотой $h_{сг}$ = 10-15 м с периодическим выпуском и нагнетанием изолирующей жидкости, не растворяющей соль и не смешивающейся с водой. Такая технология ступенчатого растворения каменной соли, разработанная П.С.Бобко и другими сотрудниками ВНИИ-Галургии (1964), широко применяется в России и за рубежом (Румыния, Болгария, США, Франция, Италия и др.). В настоящее время метод подземного растворения солей через скважины является одним из основных для добычи каменной соли (новые предприятия по подземному растворению солей построены в Аргентине, Бразилии, США, Канаде, Германии, Израиле, Турции, Китае и многих других странах), что свидетельствует о технологичности и перспективности данного способа разработки месторождений горно-химического сырья.

Бесшахтная отработка соляных залежей предопределяет образование выемочных камер с диаметром 100 м и более, формой приближающихся к телам вращения, осью симметрии которых является скважина. Подземное растворение солей позволяет вовлекать в эксплуатацию месторождения, труднодоступные или недоступные для шахтного метода, так как предельная глубина, достигнутая соляными рудниками, составляет в настоящее время около 600-1000 м. Подземным растворением через скважины с поверхности сейчас разрабатываются месторождения каменной соли на глубинах около 2 км (Волгоградское и Зиминское), экспериментальные работы ведутся и на больших глубинах (например, в Голландии на глубине 2500-2800 м) [1, 2, 5]. Следует отметить, что шахтная добыча позволяет осуществить отработку более сложных форм залегания рудных тел в пространстве с получением готового продукта в твердом виде без операций выпаривания, но при увеличении глубин отработки себестоимость конечного продукта становится выше, чем при отработке с помощью скважинных методов. При использовании полученных выработок в качестве хранилищ при прочих равных условиях преимущество остается за подземным растворением через скважины, так как часть себестоимости продукта можно компенсировать прибылью, полученной от эксплуатации подземных объектов.

На сегодняшний день накоплен значительный опыт создания подземных камер методом ПРС. Его можно условно разделить на три больших группы:

1) отработка неглубоко залегающих пластов небольшой мощности сплошными системами разработки (Ново-Карфагенское месторождение);

2) отработка мощных пластов на больших глубинах камерной системой разработки (Яр-Бишкадакское, Зиминское, Волгоградское месторождения, и др.);

3) строительство индивидуальных камер в пластах различной мощности (камеры, используемые для хранения газа, нефтепродуктов, для захоронения отходов, включая отходы атомных производств и др.)

Легкая растворимость соли полезна с точки зрения создания высокопроизводительной технологии разработки, а также накладывает особые требования для сохранения устойчивости полученных камер подземного растворения. В общем случае под устойчивым понимается состояние горной выработки, удовлетворяющее в течение заданного срока требованиям ее эксплуатации и техники безопасности в отношении формы, размеров поперечного сечения и продольного профиля.

Под устойчивостью горных пород понимается их свойство сохранять устойчивые обнажения при проведении горных выработок. Основными формами потери устойчивости подземных горных выработок в общем случае являются: вывалообразование по трещинам; разрушение пород в зонах предельной концентрации напряжений. Сдвижение (обрушение, сползание) пород наступает в результате разрушения (напри-

мер, скола) в зонах концентрации напряжений или под действием собственной массы отдельных блоков породы. Для оценки устойчивости горной выработки при хрупком разрушении в зонах предельной концентрации напряжений, как установлено опытным путем, достаточным является сопоставление прочности породы с действующими на контуре выработки максимальными напряжениями. Однако при подземном растворении основным является вопрос обеспечения устойчивости междукамерных целиков на различных этапах эксплуатации камер.

Обычно разделяют два основных этапа «жизненного» цикла камер ПРС: первый – этап собственно образования (растворения) данной камеры и второй – этап последующего ее использования. Причем проект вторичного (повторного) использования камер растворения является одним из разделов проекта отработки месторождения. Если в условиях эксплуатации подземных рудников (при камерной системе разработки) в качестве критерия устойчивого состояния целиков обычно принимается условие непревышения рассчитанных нагрузок на целик некоторому граничному значению (обычно пределу прочности на сжатие с учетом коэффициента запаса прочности), то при подземном растворении через скважины с поверхности необходимо учитывать, как минимум, противодавление в камерах. Основной отличительной особенностью таких целиков является необходимость сохранения ими устойчивого состояния в процессе всего срока существования камер (т.е. с учетом необходимости изоляции камер друг от друга и от водоносных горизонтов). При отработке подземным растворением мощных соляных пластов довольно часто плоскости кровли и почвы камер могут условно пересекать рядом расположенные камеры, целики в этом случае имеют сложную (непрямоугольную форму), в основном, из-за анизотропии свойств соли.

Характерной особенностью рассолопромыслов является трудность достоверной и оперативной оценки не только состояния поверхности подземных выработок (камер), но даже и их формы и ориентации в пространстве. Для уточнения формы камеры ежегодно останавливают растворение и проводят комплекс работ по эхолокации. Еще более сложно получать информацию о сдвижениях (деформациях) вмещающего камеры массива. Единственной сравнительно легко доступной является информация о состоянии поверхности на участках рассолопромыслов. Ранее считалось, что поверхность в районах рассолопромыслов, поддерживаемая на целиках, не испытывает существенных деформаций. Однако, как показывает опыт эксплуатации рассолопромыслов в этом случае, как и при подземной разработке шахтным способом, поверхность также испытывает существенные опускания, хотя во времени они более растянуты [2, 4]. Основными факторами, оказывающими влияние на опускание поверхности, является не только площадь поперечного сечения камер, но и их высота (т.е. практически объем вынутого полезного ископаемого). При отработке одиночной камеры большой высоты (несколько сотен метров) на поверхности всегда образуется мульда сдвижения вне зависимости от глубины разработки.

В условиях расположения камер в зонах повышенной сейсмической активности необходимо оценивать и дополнительные нагрузки на междукамерные целики, вызванные сейсмическим воздействием на элементы массива горных пород.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при оценке состояния элементов соляного массива (например, от целиков сложной формы, разделяющих камеры растворения, вплоть до состояния поверхности) в сейсмически активных районах при ведении работ подземным растворением необходимо решить три принципиальные задачи:

- получение научно обоснованных данных, позволяющих установить параметры состояния земной поверхности (причем обязательно в течение достаточно длительного времени – более 10-20 лет с момента начала работы рассолопромысла);
- горно-геомеханическое обоснование параметров устойчивого (неустойчивого) состояния элементов массива (барьерных, междукамерных, потолочных целиков и др.)

в окрестности камер (как в период растворения, так и в период вторичного использования в качестве хранилища [3]);

• установление влияния сейсмической активности региона расположения рассолопромысла на отмеченные выше аспекты.

Подобные оценки должны базироваться на тщательном изучении и научном обобщении:

• геологической информации об объекте исследований – соляном массиве и покрывающей его толще пород;

• данных горно-геомеханических параметров указанной среды 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.

Решение вопросов обоснования исходных данных на проектирование подобных сооружений требует разработки специального комплексного метода. Этот метод должен основываться на подходах, параллельно использующих и обобщающих данные маркшейдерской информации о сдвижении поверхности, и результатах геомеханической оценки состояния вмещающего подземные объекты (камеры) массива горных пород. Анализ результатов геомеханических оценок должен учитывать изменения в массиве величин компонентов напряжений, деформаций и перемещений, оцениваемых как в рамках влияния геостатических и геодинамических полей, характерных для данного региона, так и в рамках суперпозиционного поля.

Недостаточность информации о маркшейдерских наблюдениях для площадок вновь проектируемых рассолопромыслов может быть компенсирована включением в указанный комплексный метод аналогового подхода, включающего сопоставление геологических и горно-геомеханических параметров вмещающего массива данного рассолопромысла и рассолопромысла-аналога.

Горно-геомеханические задачи, целью которых является получение достаточно точных оценок параметров проявлений геостатического поля в рассматриваемых массивах горных пород (в окрестности камер растворения), практически всегда базируются на рассмотрении и обосновании выбора как аналитических, так и экспериментально-аналитических методов оценки напряженно-деформированного состояния горных пород в окрестностях указаных объектов. Очевидно, что приоритетно выбранный метод должен обеспечивать возможность учета широкого спектра геометрических параметров изучаемых объектов (например невыдержанность диаметра камер по высоте и участков массива, их разделяющих), а также структурно-механических характеристик вмещающих их массивов (слоистость, неоднородность, упруго-пластические свойства и т.д.). Рассмотренным обстоятельствам и некоторым иным особенностям выполнения количественных оценок напряженно-деформирован ного состояния массива достаточно соответствует применение численных методов, разработанных на базе так называемых «граничных» и «конечных» элементов.

В качестве рабочего метода, с учетом данных обобщения горно-технических характеристик соляных массивов, возможно принять одну из модификаций метода граничных элементов, а именно – метод разрывных смещений, позволяющий дать необходимую количественную оценку интересующих исследователя величин компонента тензора напряжений σ_{ij}, тензора деформаций ε_{ij} и вектора перемещений δ_{ij}.

Особо следует отметить, что необходимый и достаточный анализ всего спектра технологически возможных ситуаций (как с точки зрения изменения геометрии камер во времени, так и с точки зрения вероятности их отклонения от запроектированного контура) выполнить практически нереально. В этой связи целесообразно предусматривать выполнение оценки механического состояния подземных объектов для экстремально неблагоприятного сочетания условий эксплуатации камер на различных стадиях их существования (развитие, вторичное использование, консервация – захоронение и т.п.). Такая специфика должна направленно от-

ражаться в формировании геометрических, механических и силовых (в частном случае – геостатических) параметров, принимаемых в качестве исходных при решении этой части комплексного исследования.

Наличие сейсмоактивости достаточно высокого уровня (от 2-3 до 8-9 баллов и выше по шкале MSK-64) требует разработки специального подхода к оценке параметров и геодинамического поля, что также должно отражаться в комплексном методе изучения горно-геомеханического состояния массива. При этом, с учетом сугубо стохастической возможности проявления данного фактора в пределах горного отвода рассолопромысла, оценка его в рамках решаемой задачи целесообразна лишь в экстремальной постановке рассмотрения количественных величин динамического поля напряжений (аналогично с экстремально неблагоприятными технологическими ситуациями). Такой подход, как очевидно, является единственно возможным, поскольку подобные камеры зачастую используются в качестве емкостей для размещения в них различного рода отходов, в том числе потенциально опасных для экологии региона размещения [3].

Результаты геомеханических оценок дают исходные данные для анализа возможных экстремальных проявлений горного давления как в пределах околокамерного массива (междукамерные целики, стенки и потолочины камер), определяющих технологическое состояние рассолопромысла, так и в налегающих толщах – вплоть до земной поверхности. Появляется возможность выполнения подробной оценки вопросов гидродинамической автономности всей соляной толщи, вмещающей комплекс действующих и консервируемых камер рассолопромысла.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дудко П.М.* Подземное выщелачивание солей. М., 1972.

2. *Вильк С.* Деградация естественной среды вследствие эксплуатации месторождения каменной соли скважинным методом / С.Вильк, Я.Трапле, С.Лучински // Горный информационно-аналитический бюллетень; МГГИ. М., 2001. № 9.

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

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

5. *Stax und Barge.* Zur Geologie und Nutzung der Salzlagerstatte der Frisia Zout BV // Gluckauf 137. 2001. № 7-8.

REFERENCES

1. *Dudko P.M.* Underground leaching of salts. Moscow, 1972.

2. *Wilk S.* Degradation of natural environment as a result of field wells by salt / S.Vilk, I.Traple, S.Luchinski // Mining informational and analytical bulletin; Moscow, 2001. № 9.

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

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

5. *Stax und Barge.* Zur Geologie und Nutzung der Salzlagerstatte der Frisia Zout BV // Gluckauf 137. 2001. № 7-8.