УДК 622.02:531

Д.В.ШУСТОВ
Пермский государственный университет

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КАВЕРНЫ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ГАЗА С УЧЕТОМ РЕОЛОГИИ СОЛЕЙ

Рассматриваются вопросы устойчивости подземных сооружений для хранения газа, созданных в соляной толще, а также влияние конвергенции стенок выработки на земную поверхность с применением метода математического моделирования. По результатам расчета приводится геомеханическое обоснование целесообразности строительства.

Issues of stability of underground constructions for gas storing in salt caverns are reviewed in the article as well as the influence of the walls excavation convergence on the surface studied with application of the mathematical modelling method. Feasibility study of geomechanical aspects of the project has been carried out basing on the calculation results.

В настоящее время все большее значение приобретает проблема освоения подземного пространства, а потому на первый план выходят проблемы устойчивости подземных сооружений и их влияние на поверхность [1, 5]. Те же задачи встают при строительстве подземных хранилищ газа, которые предназначены для накопления стратегических запасов. Как известно, параметры выработок, в первую очередь, зависят от механических и прочностных свойств пород, слагающих толщу.

Подземные хранилища газа создаются методом растворения соли в толще каменной соли. В результате вымывания образуется полость правильной шаровидной формы радиусом $R = 20$ м. При этом в радиусе r до 40 м вокруг полости образуется зона пород повышенной влажности (до 70 %) [4] (рис.1). В ходе проведения исследований выявлено, что физико-механические и прочностные свойства пород существенно зависят от влажности соли [2]. При изучении напряженно-деформированного состояния пород принимается, что свойства массива изменяются по мере удаления от центра области повышенной влажности. Экспериментальное распределение физико-механических и прочностных свойств в приконтурном массиве может быть аппроксимировано следующими выражениями [2]: пределы прочности на сжатие и растяжение и модуль упругости соответственно (в мегапаскалях)

$$\sigma_{сж} = 11{,}88 + [45{,}33\exp(-W)]/3;$$

$$\sigma_{р} = 3{,}36 + [11{,}4\exp(-W)]/2;$$

$$E = (0{,}305 + 0{,}547\exp(-W)\cdot 2\cdot 10^4;$$

коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}278 + 0{,}065W$ и сцепление $C = \sigma_{сж}\sigma_{р}/(\sigma_{сж} + \sigma_{р})$, где W – влажность породы, $W = a + b\exp(-l)$; l – расстояние от обнажения, м; a и b – безразмерные параметры аппроксимации, подобранные так, чтобы при $r = 40$ м получить $W = 0{,}2$ %, а непосредственно на контуре $W = 70$ %.

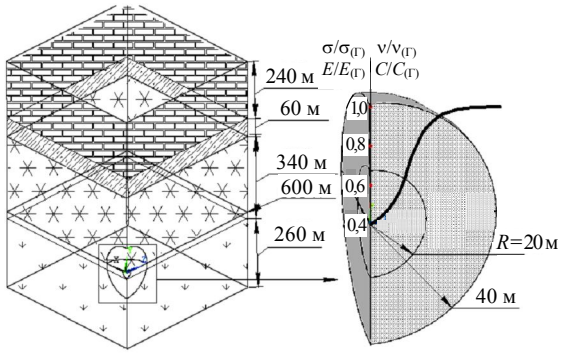


Рис.1. Общая расчетная модель

В связи с тем, что сооружения находятся в толще каменной соли, в расчетах необходимо учитывать реологию солей, т.е. приращение деформаций с течением времени при неизменном уровне напряжений. Реологические и прочностные параметры соли, а также геологические данные приняты для условий Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) [2]. В ходе исследований было установлено, что ползучесть солей на ВКМКС удовлетворительно описывается уравнением Вольтерра второго рода:

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E}\int_0^t K(t,\tau)\sigma(\tau)d\tau ,$$

где $K(t,\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha}$ – функция влияния или ядро ползучести Абеля; α и δ – реологические параметры.

Для сдвиговой ползучести эта формула имеет вид

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma(t)}{2G} + \frac{1}{2G}\int_0^t K(t,\tau)\sigma(\tau)d\tau .$$

Прочностные параметры солей задавались с применением теории прочности Друкера – Прагера [1, 3, 4]. Важно понимать, что уравнение Вольтерра описывает лишь непрерывную ползучесть с постоянно затухающей скоростью (первичная ползучесть) и не дает представления о пластическом разрушении материала. Для оценки зон разрушения необходимо применять модели, оценивающие возможность пластического разрушения. Данной моделью является модель Друкера – Прагера. Породы, лежащие выше каменной соли, рассчитывались как упругопластические. Исходные расчетные параметры приведены в таблице. В расчете были приняты следующие значения реологических параметров для каменной соли: $\alpha = 0{,}7$, $\delta = 0{,}086$ с$^{\alpha-1}$.

Расчетные данные

Порода	*m*, м	*E*, МПа	ν	*C*, МПа	φ	$\sigma_{сж}$, МПа
Терригенно-карбонатная толща	0-230	8000	0,25	5,0	20°	20,0
Сильвинито-карналлитовый пласт	230-300	9000	0,25	5,0	20	19,0
Каменная соль	300-620	17000	0,278	13,57	30	27,0

Примечание. *m* – диапазон глубин залегания; φ – угол внутреннего трения.

Для прогноза влияния подземных хранилищ газа на геомеханическую и геодинамическую обстановку необходимо выполнить анализ напряженно-деформированного состояния массива. Задача решалась с применением математического моделирования (метода конечных элементов) в программном комплексе ANSYS. Для установления точности расчетов в ANSYS был произведен предварительный расчет образцов цилиндрической формы диаметром 36 мм и высотой 72 мм. Сравнение производилось с результатами натурных наблюдений, изложенными в работе [2] (рис.2). Натурная кривая выбиралась для уровня нагружения $\sigma/\sigma_{сж} = 0{,}6$. Применительно к уравнению Вольтерра второго рода степень нагружения влияет на величину параметров реологии α и δ. Необходимо отметить, что при данном уровне нагружения ползучесть может перейти в стадию вынужденной ползучести с постоянно нарастающей скоростью. В этом случае возможно разрушение породы.

Конечно-элементная модель горного массива и подземного хранилища составлялась таким образом, чтобы учесть все особенности развития процессов деформирования. Для повышения точности расчетов модель строилась в 3D-пространстве со сгущением сетки в наиболее интересном для нас месте – вокруг полости (рис.3, 4). Размеры модели задавались так, чтобы удовлетворялись статические граничные условия, соответствующие гипотезе об отсутствии горизонтальных деформаций в нетронутом массиве.

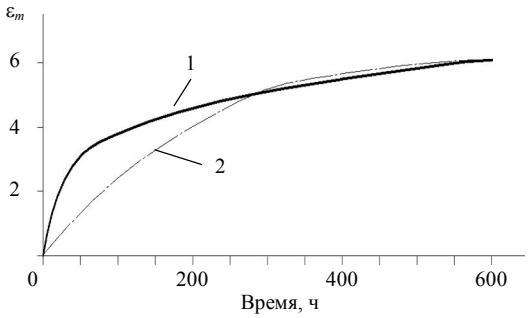


Рис.2. Результаты испытаний (1) и расчетные данные (2)

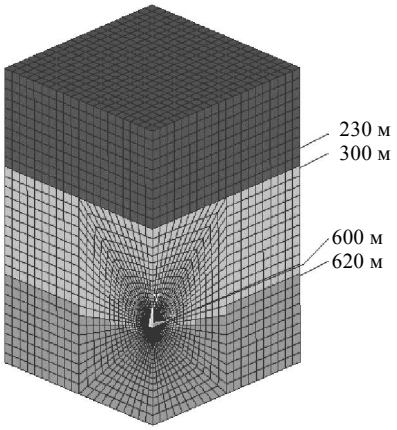


Рис.3. Конечно-элементная модель

Расчет выполнялся в два этапа. На первом этапе моделировалось исходное напряженное состояние нетронутого массива: задавались начальные свойства пород, воспроизводились граничные условия, приложенные нагрузки. В конце шага нагружения в массиве реализуется естественное для солей гидростатическое поле напряжений. На втором этапе формировалась шарообразная полость, задавались свойства пород приконтурного массива в виде кольцевых зон (рис.4) с параметрами, рассчитанными в соответствии с формулами аппроксимации. Расчет устойчивости выполнялся на заданный промежуток времени (50 лет).

В результе расчета получены следующие данные:

1. На сфере каверны в точке 1 (рис.5) наблюдается слабозатухающая ползучесть (рис.6), скорость которой к временному отрезку в 50 лет составляет около 1 мм в год.

2. На расчетном интервале конвергенция стенок выработки имеют достаточно большие значения, при этом наблюдаются зоны пластических деформаций и разрушения. Оседание массива над каверной на со-

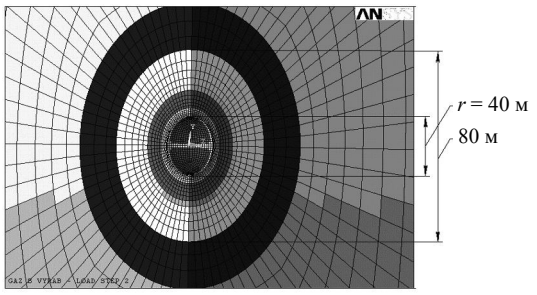


Рис.4. Распределение свойств

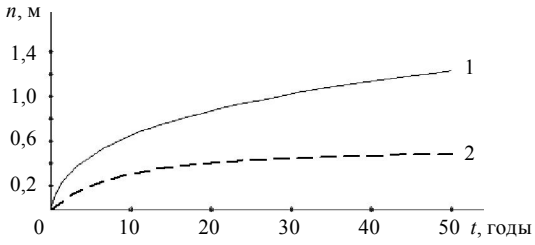


Рис.6. Кривые оседаний по времени t

1 и 2 – на контуре выработки и земной поверхности соответственно

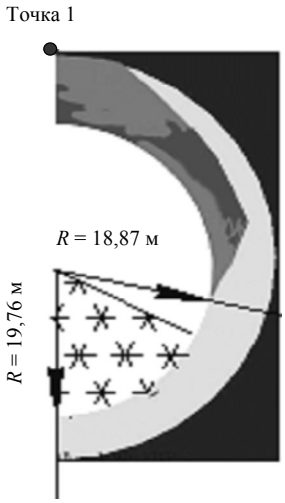


Рис.5. Конечное деформирование каверны. Зоны пластических деформаций

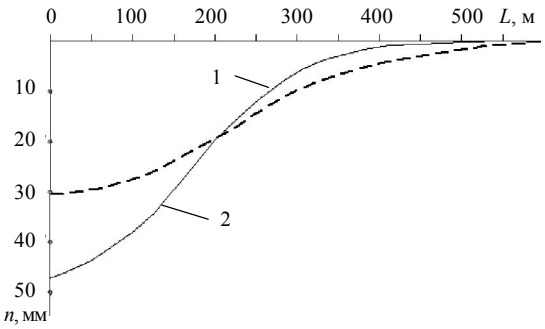


Рис.7. Мульды оседаний на конечное время

1 и 2 – на глубине 300 м и на земной поверхности; *L* – расстояние от каверны

пряжении с зоной разрушения достигает 1,23 м. На дне выработки образуется конус осыпавшихся пород, которые препятствуют движению пород в почве (см. рис.5).

3. Оседания массива на глубине 300 м имеют значения до 47 мм, тогда как на поверхности они не превышают 30 мм (рис.7).

Таким образом, несмотря на значительные деформации стенок каверны разрушения полости не происходит. На земной поверхности деформации каверны практически не сказываются. При этом оседание земной поверхности происходит со скоростью менее 0,5 мм в год (см. рис.6). Можно считать, что оседание земной поверхности является несущественным, а каверна вполне устойчива, что доказывает безопасность и целесообразность данного вида строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баклашов И.В.* Геомеханика / Московский горного ун-т. М., 2004. Т.1 208 с. Т.2 249 с.

2. *Барях А.А.* Деформирование соляных пород / А.А.Барях, С.А.Константинова, В.А.Асанов / Пермский ун-т. Екатеринбург, 1996. 215 с.

3. *Каплун А.Б.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б.Каплун, Е.М.Морозов, М.А.Олферьева.. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

4. *Петухов И.М.* Геодинамика недр / И.М.Петухов, И.М.Батугина.. М.: Недра, 1996. 217 с.

5. *Турчанинов И.А.* Основы механики горных пород / И.А.Турчанинов, М.А.Иофис, Э.В.Каспарьян. М.: Недра, 1989. 332 с.