© Г.А. Воронов, 2008

УДК 622.272

Г.А. Воронов

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК В КАМЕННОЙ СОЛИ

На сегодняшний день проблема прогнозирования и обеспечения устойчивости подземных выработок в соляных породах является весьма актуальной задачей. Это связано со значительными сложностями при строительстве и эксплуатации этих выработок (отсутствие крепления, большие глубины заложения, необходимость поддержания противодавления).

Для повышения эффективности и надежности решений, принимаемых при проектировании и строительстве подземных хранилищ углеводородов и могильников промышленных отходов, необходимо учитывать особенности деформирования и разрушения солей, их реальные свойства в натурных условиях и основные влияющие факторы, в том числе пространственную геометрию подземных сооружений, горно-геологические и технологические условия.

Под устойчивостью понимается сохранение выработкой проектных геометрических размеров (высота, максимальный пролёт, пролёт кровли, конфигурация) и технологических параметров (максимальное и минимальное противодавление хранимого продукта, количество и частота циклов закачивания и выкачивания, и др.) в течение всего срока эксплуатации. При этом допустимо частичное разрушение выработки, то есть переход вмещающего выработку породного массива в запредельное состояние. Поэтому при расчете устойчивости, определении допустимого объёма разрушенной породы, как правило, анализируются процессы деформирования и разрушения породного массива в окрестности выработки.

Если рассматривать методы расчёта устойчивости выработок, созданных в соляных породах, в историческом аспекте, то следует начать с исследования устойчивости камер выщелачивания.

В работе Долгих, Матвиенко и Хачатурьяна [2] изложен общий метод проверки прочности камер выщелачивания цилиндрической и сферической формы по условию Кулона-Прандля. Проверка прочности сводилась к оценке выполнения неравенства:

$$n - 1 > 0, \qquad (1)$$

где n – коэффициент запаса устойчивости, принимаемый как отношение разрушающей нагрузки к действующему напряжению на контуре выработки.

В статье Кислер, Матвиенко и Долгих [7] проведена оценка прочности камер выщелачивания прямоугольного поперечного сечения в плоской постановке, основанная на статистической теории хрупкого разрушения и решении задач теории упругости, и определены вероятности их разрушения. Было показано, что даже при наибольшем проти-

водавлении средняя прочность камеры прямоугольного сечения в три раза ниже, чем цилиндрической камеры, поэтому радикальным способом повышения прочности камер прямоугольно поперечного сечения является скругление углов по возможности большим радиусом.

Для определения устойчивых форм и размеров подземных хранилищ углеводородов применялся вероятностно-статистический подход [9]. На основании которого находилась область возможного разрушения. Таким образом, вероятность разрушения подземного резервуара зависит от его размеров. Полученная вероятность по методу аналогий сравнивается с вероятностью разрушения «эталонной» (существующей устойчивой) выработки и определяется безразмерная функция F_n, зависящая от геометрической формы выработки и прочностных параметров массива соли, определяемая из выражения:

$$F_n = \sqrt[m]{\iiint\limits_{f \geq 0} f^{\alpha} dxdydz}\ , \qquad (2)$$

где m – коэффициент, принимаемый m = 3 для сферических резервуаров; m = 2 для протяженных горизонтальных (слабонаклонных) резервуаров; f – функция, зависящая от предела прочности на одноосное сжатие, $\sigma_{ПП}$, угла внутреннего трения, φ, плотности хранимого в резервуаре жидкого продукта или рассола, обеспечивающего противодавление, ρ, безразмерная константа, определяемой по данным механических испытаний образцов каменной соли, α. Предельный пролет проектируемой выработки рассчитывался при соотношении прочностных и технологических параметров резервуаров с эталонной выработкой.

Среди других работ, посвященных вопросам устойчивости, следует упомянуть работу Ж.С. Ержанова [3] выполненную на основе линейной теории ползучести. Область применения полученных решений для соляных массивов ограничивается небольшими глубинами разработки, где деформации пород пропорциональны действующим нагрузкам, при отсутствии релаксации напряжений и разрушений приконтурных пород.

Численный анализ устойчивости соляного массива вокруг горизонтальной выработки кругового сечения и осесимметричных полостей различной конфигурации приведен в работе [4]. В качестве уравнений состояния соляных пород приняты уравнения нелинейной наследственности и уравнения теории упрочнения. Оценка прочности приконтурных пород производится по теории Мора. Модель описывает процессы релаксации напряжений в прикон-турных породах. Однако предположение об отсутствии объёмных деформаций (разрыхления) противоречит широко известным экспериментальным данным [6].

Ж.С. Ержанов, А.С. Сагинов, Ю.А. Векслер разработали метод расчета устойчивости выработок с произвольной формой поперечного сечения с учетом больших деформаций ползучести и постепенного микро- и макроразрушения вмещающих пород [5]. В качестве физических со-отношений использованы уравнения Г.И. Гуревича, являющиеся частным случаем уравнений наследственности Больцмана-Вольтера.

Е.М. Шафаренко [1] на основе экспериментальных данных о ползучести солей Соль-Илецкого месторождения предложил физические уравнения наследственного типа в инвариантах тензоров напряжений и деформаций. Модель описывает все стадии ползучести,

допускает существование предела длительной прочности как порогового значения интенсивности напряжений, при котором начинаются процессы разрушения, сопровождающиеся разрыхлением среды. Предлагается методика определения параметров уравнений, и проводятся расчеты для сферической и цилиндрической полостей.

В России и странах СНГ для расчета устойчивости выработок-ёмкос-тей в соляных породах применяются нормативные документы [10, 11], в которых используется уравнение состояния каменой соли Е.М. Шафаренко. Основные принципы использования уравнения состояния каменной соли сводятся к следующему. Математическая модель включает уравнения, описывающие поведение пород, как при нагрузке, так и разгрузке. При снятии нагрузки порода подчиняется закону Гука. При длительном действии нагрузки – теории старения, включающей уравнения (3) и (4), описывающие поведение при постоянных напряжениях, и правило определения деформации при переменном нагружении, следующего из теории упрочнения.

Согласно этому правилу, изменение нагрузки, при некоторой необратимой деформации, равносильно переходу на новую кривую ползучести, описанную уравнением (3), в точку с той же необратимой деформацией:

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_i^\infty} = \frac{c}{c-1}\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i^\infty} \times \times\left[1 - \frac{1}{c}\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_i^\infty}\right)^{c-1}\left(1-\exp(-\alpha t^\delta)\right)\right]; \quad (3)$$

$$\sigma_v = K\varepsilon_v - \frac{\sigma_i^n}{m}\left(1-\exp\left(-\rho t^\beta\right)\right); \quad (4)$$

$$c = \frac{1}{1-\frac{\sigma_i^\infty}{G\varepsilon_i^\infty}}; \quad (5)$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\left(\sigma_1-\sigma_2\right)^2+\left(\sigma_2-\sigma_3\right)^2+\left(\sigma_3-\sigma_1\right)^2}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}\sqrt{\left(\varepsilon_1-\varepsilon_2\right)^2+\left(\varepsilon_2-\varepsilon_3\right)^2+\left(\varepsilon_3-\varepsilon_1\right)^2}}; \quad (7)$$

Здесь σ_i - интенсивность касательных напряжений, σ_i^∞ - интенсивность касательных напряжений, соответствующая пределу длительной прочности при заданной сумме главных напряжений σ_v, ε_i - интенсивность деформаций сдвига, ε_i^∞ - интенсивность деформаций сдвига при $\sigma_i = \sigma_i^\infty$ и бесконечно большом значении времени; σ_v - сумма главных напряжений; ε_v - объёмная деформация, σ_1, σ_2, σ_3 - главные напряжения, ε_1, ε_2, ε_3 - главные деформации, c - коэффициент нелинейности; E - модуль деформации, K - модуль объёмного сжатия, G - модуль сдвига, ν - коэффициент Пуассона, m, n, α, β, ρ, δ - параметры.

Уравнения (3) и (4) описывают процесс ползучести при постоянных напряжениях, протекающий как в одну стадию (затухающая ползучесть), так и в три стадии (затухающая ползучесть, установившееся течение, прогрессирующее течение).

Интересные результаты для низкотемпературного хранения газа были получены А.В. Черноиваном [12]. Из проведенных им исследований следует, что уменьшение температуры снижает величину сдвиговых деформаций на контуре выработки одновременно, умень-

шая механическую прочность каменной соли.

С.А. Константинова для расчета устойчивости выработок в соляных породах применила математическую модель упруговязкопластического деформирования, в которой упругие деформации описаны законом Гука, а вязкопластические - моделью Шведова-Бингмана при условии идеальной пластичности Мизеса. В проведенных исследованиях [8] было установлено, что на устойчивость выработок значительное влияние оказывают фактор геологии (наличие слабых прослоек, создающие структурные поверхности ослабления) и фактор приведенной глубины выработки ($\gamma H/\sigma_{сж}$, отношение вертикальной составляющей действующего напряжения к пределу прочности породы при одноосном сжатии).

В работах зарубежных авторов [13, 14] проводятся определения устойчивости ёмкостей для подземного хранения газа с применением критерия, основанного на критерии Кулона-Мора:

$$\sqrt{J_2} = \frac{D_1(\frac{I_1}{\sigma_0})^n + T_0}{(\sqrt{3}\cos\psi - D_2\sin\psi)}, \qquad (8)$$

где J_2 - второй инвариант девиатора напряжений; I_1 - первый инвариант тензора напряжений; σ_0 - постоянная, равная – 1 МПа; T_0 - предел длительной прочности при растяжении; ψ - угол Лоде; n, D_1 и D_2 - параметры, которые должны быть определены для каждой соляной формации. В этом критерии учитывается нелинейная связь между инвариантами тензора напряжений и пределом прочности при растяжении. Полученные, таким образом значения $\sqrt{J_2}$ сравниваются с критическими и делаются выводы о переходе соляного массива в запредельное состояние. Для оценки устойчивости выработки вводится коэффициент запаса устойчивости, равный, при постоянной сумме главных напряжений, отношению корней критического и действующего значений второго инварианта девиатора напряжений.

В заключение следует подчеркнуть, что при оценке устойчивости выработок в соляных породах необходимо учитывать такие важные параметры как предел длительной прочности породы, нелинейность связи напряжений и деформаций, разницу между гравитационной составляющей напряжений и минимальным уровнем давления продукта в ёмкости, разрушение каменной соли в процессе её деформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гальперин А.М., Шафаренко Е.М.* Реологические расчеты горнотехнических сооружений. – М.: Недра. 1977. -246 с.

2. *Долгих М.А., Матвиенко В.В., Хачатурьян Н.С.* Оценка прочности камер выщелачивания в отложениях каменной соли. – Труды ВНИИСТА, 1962, вып. 12, -74-112 с.

3. *Ержанов Ж.С.* Теория ползучести горных пород и её приложения. – Алма-Ата: Наука, 1964. -175 с.

4. *Ержанов Ж.С., Бергман Э.И.* Ползучесть соляных пород. – Алма-Ата: Наука, 1977. -110 с.

5. *Ержанов Ж.С., Сагинов А.С., Векс-лер Ю.А.* Расчет устойчивости горных вы-

работок, подверженных большим деформациям. – Алма-Ата: Наука, 1973. - 175 с.

6. *Каталог* механических свойств горных пород при длительных испытаниях в условиях одноосного сжатия // Ставрогин А.Н., Георгиевский В.С.,Лодус В.Е. – Л. ВНИМИ, 1973. - 73 с.

7. *Кислер Л.Н., Матвиенко В.В., Долгих М.А.* Оценка прочности камер выщелачивания прямоугольного поперечного сечения. – Труды ВНИИСТА, 1962, вып. 12, -112-122 с.

8. *Константинова С.А., Спирков В.Л.* О применении модели упруговязкопластической среды к оценке изменения напряженного состояния соляного массива в окрестности горной выработки во времени // ФТПРПИ. – 1982. - № 1.

9. *Мазуров В.А.* Подземные газонефтехранилища в отложениях каменной соли. – М.: Недра, 1982. - 212 с.

10. *Свод правил* "Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки". (приложение к СНиП 34-02-99). СП 34-106-98. – М., 1999. - 110 с.

11. СНиП РФ. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки,СниП 34-02-99. - М.: Госстрой России, 1999. - 18 с.

12. *Черноиван А.В.* Исследование прочностных и деформационных свойств каменной соли применительно к расчету устойчивости подземных емкостей сооружаемых для промысловой обработки и хранения газа при низких температурах. – М.: МГИ, 1982. - 63 с.

13. *DeVries, Kerry L.* Geomechanical analyses to determine the onset of dilation around natural gas storage caverns in bedded salt. SMRI // Spring 2006. Brussels. -20 с.

14. *Nieland J. D., Ratigan J.L.* Geomechaical evaluation of two Gulf coast natural gas storage caverns. SMRI // Spring 2006. Brussels. -29 с. ГИАБ

Коротко об авторе

Воронов Г.А. – аспирант, кафедра ФГП, Московский государственный горный университет.

Рецензент канд. техн. наук *М.Н. Тавостин.*

Д И С С Е Р Т А Ц И И

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УрО РАН			
ПАНЖИН Андрей Алексеевич	Геомеханическое обоснование метода площадных инструментальных исследований сдвижений горных пород при разработке месторождений	25.00.20	к.т.н.