

# РЕШЕНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ПОДЗЕМНОГО РАСТВОРЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



**А. Г. ОЛОВЯННЫЙ,**  
ведущий научный  
сотрудник,  
канд. техн. наук  
(ВНИИМ)



**В. П. ЧАНЦЕВ,**  
главный специалист,  
канд. физ.-мат. наук  
(ООО «СТРЕСС»)



**Л. А. КУБЛАНОВ,**  
главный инженер проекта  
(ЗАО «ВНИИ Галургии»)

При добыче солей способом подземного растворения (ПР) образуются полости с объемом в десятки и сотни тысяч кубических метров. В связи с этим при растворении солей возникают геомеханические проблемы двух видов. Первая связана с решением инженерных задач безаварийной эксплуатации при обеспечении максимального извлечения, а вторая — с охраной природных и инженерных объектов на земной поверхности в зоне влияния подработки. Размеры камер обусловлены геологическими условиями и технологическими возможностями ПР. Окончательное решение о размерах камер принимают на основе геомеханического анализа, исходя

из возможности обеспечения длительной устойчивости обнажений и ограничения оседаний земной поверхности.

В силу большого числа влияющих факторов методики, позволяющие расчетным путем выбрать параметры камер растворения, отсутствуют. Обоснование параметров камер и целиков может быть выполнено только поверочными расчетами при моделировании геомеханических процессов, протекающих в массиве горных пород в результате образования подземных выработок. Степень обоснованности при этом зависит от правильности представлений об этих процессах, способов их описания и решения соответствующих задач.

Геомеханические проблемы защиты природных и инженерных объектов на подрабатываемых территориях сводятся к решению задач деформирования толщ горных пород в результате образования в нем пустот большого объема.

## Математическое моделирование процесса деформирования массива горных пород

Для решения геомеханических проблем при ПР солей применяют математическое моделирование с использованием численного метода конечных элементов с привлечением математических моделей, учитывающих упругие, пластические и вязкие свойства горных пород [1, 2]. Особенность применяемого авторами метода математического моделирования, учитывающего названные свойства горных пород, заключается в способах описания процессов деформирования и разрушения.

Для описания поведения массива горных пород воспользуемся моделью структурного состояния [3], которая позволяет отражать проявления различных свойств материала (упругих, пластических, хрупких, вязких).

Механическое состояние горных пород характеризуется некоторым конечным числом параметров состояния. Общая идея метода заключается в том, что при заданных воздействиях (напряжения, температура, влажность) протекание процессов деформирования и разрушения зависит от меняющихся параметров состояния: прочности (нарушенности) и составляющих деформаций. Согласно этой гипотезе, изменение любого из параметров состояния описывается кинетическими уравнениями

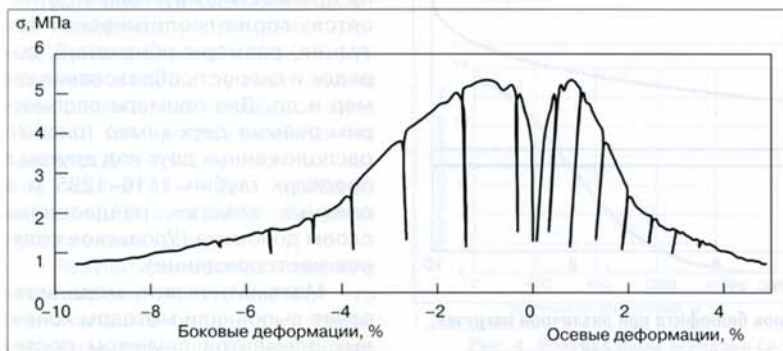


Рис. 1. Расчетная диаграмма одноосного нагружения образца бишофита

$$dp_i = a_{ij} dp_j + a_{Ti} dT + a_{W_i} dW + a_{ti} dt,$$

где  $p_i$  — параметры состояния;  $T$  — температура;  $W$  — влажность;  $t$  — время;  $a_{ij}$ ,  $a_{Ti}$ ,  $a_{W_i}$ ,  $a_{ti}$  — некоторые функции параметров состояния.

Приращение  $d\varepsilon$  полной деформации элемента среды представляется суммой

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^{ve} + d\varepsilon^p + d\varepsilon^v + d\varepsilon^f,$$

где  $d\varepsilon^e$ ,  $d\varepsilon^{ve}$ ,  $d\varepsilon^p$ ,  $d\varepsilon^v$  и  $d\varepsilon^f$  — приращение обратимых линейно-упругих и вязкоупругих деформаций, необратимых пластических, вязких и разрушающих деформаций соответственно.

Основная особенность данной математической модели заключается в том, что в каждой точке массива (при решении методом конечных элементов — в каждом элементе разбиения области) разрушение горных пород и пластические деформации протекают по ограниченному числу систем поверхностей [1]. Разрушение трактуется как снижение прочности по соответствующим направлениям. При разрушении в породах появляется прочностная и деформационная анизотропия, влияющая на деформирование и устойчивость пород вокруг выработок. Пластические и разрушающие деформации сдвига по поверхностям ослаблений сопровождаются деформациями по нормали к этим поверхностям. Для каждого из выделенных направлений применяется критерий прочности Кулона — Мора, дополненный ус-

ловием прочности на разрыв в следующей форме:

$$\tau_n = K p_i + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \text{ при } \sigma_n > 0;$$

$$\sigma_n = \sigma_p p_i \text{ при } \sigma_n < 0,$$

где  $\sigma_n$  и  $\tau_n$  — нормальные и касательные напряжения в плоскости нарушения с номером  $i$ ;  $\sigma_p$  — прочность материала на разрыв; параметры соприкосновения по сдвигу:  $K$  и  $\varphi$  — сцепление и угол трения в ненарушенном материале соответственно;  $p_i$  — параметр, характеризующий снижение прочности по  $i$ -й поверхности ослабления.

При математическом моделировании методом конечных элементов слоистой неоднородный массив горных пород представляется средой с различными физико-механическими свойствами. Естественная нарушенность пород характеризуется коэффициентом ослабления, который определяет, что по любым возможным площадкам разрушения сцепление имеет пониженное значение по сравнению с ненарушенной породой. По площадкам напластования пород сцепление задается с учетом возможной расслоенности, существенно влияющей на деформирование и разрушение.

Вязкоупругие деформации описываются уравнениями двух последовательных структурных реологических элементов модели Кельвина — Фойгта:

$$\dot{\varepsilon}^{ve} = \theta_1^{-1} (k_1 e^e - \varepsilon_1^{ve}) + \theta_2^{-1} (k_2 e^e - \varepsilon_2^{ve}),$$

где  $\dot{\varepsilon}^{ve}$  — скорость вязкоупругой деформации;  $\varepsilon_1^{ve}$  и  $\varepsilon_2^{ve}$  — вязкоупругие деформации;  $\theta_1$  и  $\theta_2$ ,  $k_1$  и  $k_2$

— время запаздывания и параметры равновесной вязкости соответственно; индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму элементам реологической модели;  $e^e$  — упругая деформация.

Расчет выполняют по шагам по времени, при этом на каждом шаге в каждом элементе массива проверяют условия нагружения по каждому из рассматриваемых направлений. Если нагружение соответствует условию разрушения, то по соответствующим направлениям снижается прочность и накапливаются разрушающие деформации. Если же условия прочности не нарушаются, то процессы снижения прочности описываются уравнением длительной прочности и накапливаются вязкопластические деформации.

Для иллюстрации предлагаемого метода математического моделирования и расчетных параметров модели среды выполнены расчеты деформирования образцов бишофита при одноосном сжатии в условиях прессовых кратковременных испытаний с постоянной осевой скоростью деформации (рис. 1) и в условиях ползучести при постоянной нагрузке (рис. 2).

### Моделирование камер подземного растворения

При создании камер ПР возникает проблема устойчивости стенок, кровли и почвы. При разрыве двух и более камер, расположенных друг над другом, наряду с устойчивостью обнажений камер существует проблема сохранения целика между ними. К важнейшим факторам, влияющим на процессы вокруг камер, относятся: горно-геологическая ситуация; размеры обнажений; порядок и скорость образования камер и др. Для примера рассмотрим разрыв двух камер (рис. 3), расположенных друг над другом в пределах глубин 1116–1295 м в соляных пластах, разделенных слоем доломита (Усольское соляное месторождение).

Математическое моделирование выполняли методом конечных элементов с учетом постепенного увеличения размера вы-

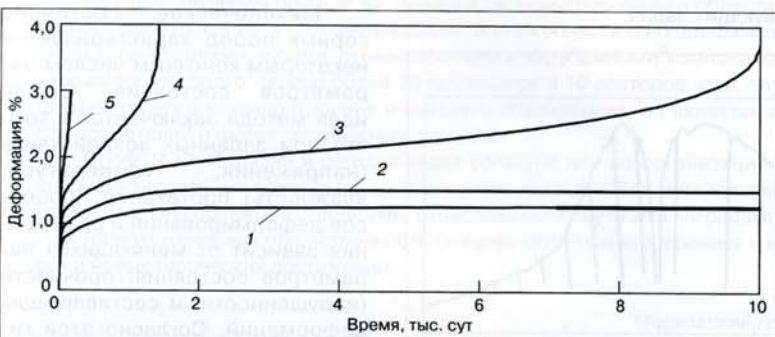


Рис. 2. Расчетные графики ползучести образцов бишофита при различной нагрузке, МПа:

1 — 3; 2 — 3,5; 3 — 4; 4 — 4,5; 5 — 5

работок: нижнюю камеру размывали в течение 7 лет, верхнюю — 13 лет, причем к размыву верхней камеры приступили через 5 лет после начала размыва нижней камеры.

Расчет проводили в постановке дополнительных сил, которые прикладываются к поверхности обнажений с учетом противодействия рассола:

$$q = \gamma h - q_p,$$

где  $\gamma h$  — литостатическое давление;  $q_p$  — противодействие рассола ( $q_p = 0,013h$ , МПа;  $h$  — расстояние от поверхности в метрах).

Расчеты позволили проследить процессы развития разрушения пород в окрестности растущих камер. На рис. 3 справа показано состояние пород в нижней части стенки верхней камеры. Разнонаправленные штрихи в прибортовой части указывают места и направления ослаблений пород, при этом степень ослабления становится меньше 0,2.

Результаты моделирования показали, что устойчивость камер будет обеспечена на длительный срок (не менее 50 лет) с высокой степенью надежности.

В итоге получено распределение смещений массива пород до земной поверхности, которые могут быть использованы для расчета ее оседаний и деформаций.

### Прогноз деформирования земной поверхности

Для расчета сдвижений земной поверхности применяют метод суммирования влияний [4]. Приемы метода суммирования для протяженных выработок типа галерей или расположенных по некоторой сетке одиночных камер одинаковы. Для примера рассмотрим ситуацию для ряда протяженных галерей.

Результаты математического моделирования показали, что вертикальные оседания и горизонтальные смещения земной поверхности, вызываемые одной

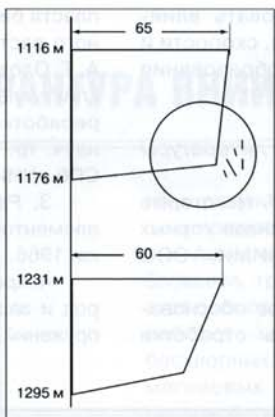


Рис. 3. Картина размыва двух камер, расположенных соосно друг над другом

$$A = 12,98; \alpha = 0,0012; B = 2,6 \times 10^{-6}; \beta = 0,001.$$

Из интегрального уравнения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y', x, y) dx = A e^{-\alpha^2(y'-y)^2},$$

где  $f(x', y', x, y)$  — оседание земной поверхности в произвольной точке с координатами  $x', y'$ , вызываемое элементом  $dx$  бесконечной галереи, параллельной оси  $X$ , имеющим координаты  $x, y$ , находим:

$$f(x', y', x, y) = A \left( \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} \right) e^{-\alpha^2 r^2}. \quad (1)$$

Здесь  $r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$  — расстояние от элемента галереи  $dx$  с координатами  $x, y$  до точки наблюдения  $(x', y')$ .

Из интегрального уравнения

$$\int_{-\infty}^{+\infty} g_y(x', y', x, y) dx = -B \left( \frac{\sqrt{\pi}}{\beta} \right) (y' - y) e^{-\beta^2(y'-y)^2},$$

бесконечно длинной галереей, достаточно хорошо аппроксимируются экспоненциальными функциями. Полагая, что ось галереи совпадает с осью  $X$ , оседания  $V(y)$  и горизонтальные перемещения  $U(y)$  равны  $V(y) = A e^{-\alpha^2 y^2}$  и  $U(y) = -B \sqrt{\pi} x y e^{-\beta^2 y^2} / \beta$  соответственно. Их изменение в зависимости от расстояния до оси галереи приведено на рис. 4 при следующих значениях параметров:

где  $g_y(x', y', x, y)$  — горизонтальное смещение земной поверхности в направлении оси  $Y$  в произвольной точке с координатами  $x', y'$ , вызываемое элементом  $dx$  бесконечной галереи, параллельной оси  $X$ , имеющим координаты  $x, y$ , находим:

$$g_y(x', y', x, y) = -B(y' - y) e^{-\beta^2 y^2}. \quad (2)$$

Поскольку в данном случае оси  $X$  и  $Y$  равноправны, то для горизонтального смещения земной поверхности в направлении оси  $X$  будем иметь

$$g_x(x', y', x, y) = -B(x' - x) e^{-\beta^2 y^2}. \quad (3)$$

Таким образом, в произвольной точке с координатами  $x', y'$  найдено влияние, вызываемое элементом галереи  $dx$ , имеющим координаты  $x, y$ .

Значения оседания и горизонтального смещения по подработанной территории через заданный срок после начала отработки получают в результате интегрирования функций (1)–(3) по осям всех галерей.

Для определения деформаций земной поверхности на территории добычи соли отдельными камерами процедура вычисления сводится к аналогичному суммированию вертикальных и горизонтальных смещений, полученных при моделировании размыва камеры.

### Заключение

Применяемый метод математического моделирования позволяет учитывать неоднородность массива горных пород и практически все наблюдаемые в экспериментах и в природе особенно

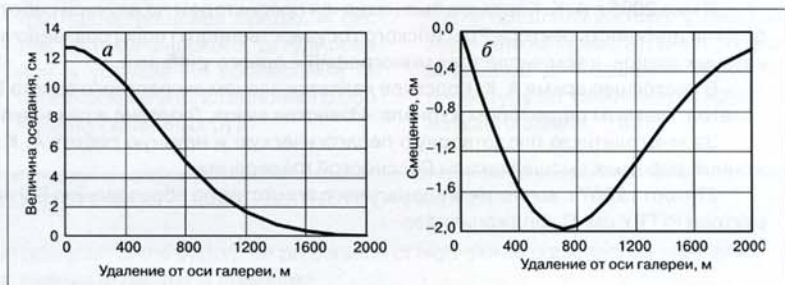


Рис. 4. Вертикальное оседание (а) и горизонтальное смещение (б) земной поверхности через 30 лет после начала эксплуатации одиночной галереи

сти поведения деформирования разрушающейся среды, в том числе свойство ползучести, особенно проявляющееся в соляных породах. Метод позволяет проследить за развитием процессов разрушения (ослабления) пород вблизи обнажений камер, сделать вывод о длительной устойчивости элементов системы разработки, получить картину деформирования земной поверхности. Математическое моделирование дает

возможность исследовать влияние формы, размеров, скорости и последовательности образования камер.

#### Список литературы

1. Оловянный А. Г. Некоторые задачи механики массивов горных пород. — СПб.: ВНИМИ, ООО «СТРЕСС», 2003.
2. Геомеханическое обоснование галерейной схемы отработки

пласта бишофита методом подземного растворения / А. В. Кубланов, А. Г. Оловянный, В. П. Чанцев и др. // Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей: Сб. науч. тр. ЗАО «ВНИИ Галургии». — СПб.: НИИЗК СПбГУ, 2006.

3. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966.
4. Кратч Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. — М.: Недра, 1978. 