

УДК 622.1:21:001.57

**А.А. Барях, Н.А. Самоделкина, Е.А. Телегина,
А.Ю. Шумихина**

**ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПО ДАННЫМ
МАРКШЕЙДЕРСКИХ И СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ
НАБЛЮДЕНИЙ***

Семинар №2

Главная особенность отработки Верхнекамского месторождения калийных солей связана с защитой рудников от затопления. Это достигается за счет обеспечения сохранности водоупорного целика, отделяющего выработанное пространство от водоносных горизонтов, который в горной практике получил название водозащитная толща (ВЗТ).

Одним из основных элементов системы защиты калийных рудников от затопления являются маркшейдерские наблюдения за деформацией земной поверхности, сейсморазведочный контроль состояния ВЗТ, геомеханическая оценка безопасных условий ее подработки.

Раздельное выполнение этих работ не позволяет получить адекватные оценки устойчивости ВЗТ. В этой связи разработана методика математического моделирования геомеханических процессов, параметрическое обеспечение которого включает результаты маркшейдерских наблюдений за сдвижением земной поверхности и данные сейсморазведочных измерений.

В рамках данной методики для описания развития во времени деформационных процессов в подработанном массиве используются графики нарастания оседаний земной поверхности. Рассмотрим основные положения схемы реологического анализа.

В соответствие с линейной теории наследственной вязкоупругости можно принять, что вертикальные смещения дневной поверхности изменяются во времени, согласно соотношению:

$$v(t) = v_0 \left(1 + \int_0^t K(t-\tau) d\tau \right) = v_0 [1 + \Phi(t)], \quad (1)$$

где v_0 - упругие смещения, связанные с формированием выработанного пространства, $K(t-\tau)$ - функция влияния напряжения $\sigma(\tau)$ в момент времени на деформацию в момент времени t , $\Phi(t)$ - функция ползучести.

Упругие смещения дневной поверхности определяются параметрами ведения горных работ и горно-геологическими условиями разработки. В общем случае расчет упругих смещений осуществляется путем ре-

*Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ (грант №07-05-97610-Р_ОФИ).

шения соответствующей геомеханической задачи о напряженно-деформированном состоянии массива, подработанного в конкретных горно-геологических условиях.

Поскольку реальные графики нарастания оседаний определяются разностью полных и упругих смещений, то

$$V(t) = v(t) - v_0 = v_0 \Phi(t) \quad (2)$$

В этом случае задача определения реологических параметров сводится к подбору такой теоретической функции $V(t)$, которая наилучшим образом описывала бы экспериментальную кривую нарастания оседаний земной поверхности.

Для реализации рассмотренного реологического подхода предложена модификация известного метода переменных модулей [1].

Пусть модуль деформации пласта на момент отработки определяется соотношением:

$$E^p = \frac{b}{a+b} E = (1-\omega)E, \quad (3)$$

где a, b – соответственно ширина камеры и междукammerного целика, ω – коэффициент извлечения руды с пласта, E – модуль деформации породы.

Математически легко показать, что в зоне полной подработки зависимость вертикальных смещений от времени будет определяться выражениями (1), (2), если переменный модуль отработанного пласта представить соотношением [2]:

$$E_t^p(t) = \frac{E^p}{1+(1-\omega)\Phi(t)}. \quad (4)$$

При отработке нескольких пластов действие выражения (4) с соответствующими параметрами (коэффициент извлечения, модуль деформации пород) и функцией ползучести $\Phi(t)$ распространяется на каждый из них. С учетом (4), реализация предложенно-

го реологического подхода сводится к отысканию для каждого отработанного пласта соответствующей временной функции $\Phi(t)$.

Таким образом, в отличие от стандартной схемы переменными модулями характеризуется деформирование не всех элементов геологического разреза, а лишь отработанных пластов. Преимущество этой модификации метода переменных модулей заключается в том, что она позволяет отдельно описать временной характер деформирования всех отработанных пластов, легко учесть разницу в сроках их отработки и оценить состояние подработанного массива на произвольный момент времени, включая конец процесса сдвижения.

Для анализа ситуации на текущий момент времени определение функции ползучести $\Phi(t)$ базируется на фактических графиках нарастания оседаний земной поверхности (рис. 1)

$$\Phi(t) = \frac{\eta(t)}{v_0}, \quad (5)$$

где значения оседания $\eta(t)$ определяются данными маркшейдерских наблюдений.

Для оценки изменения напряженно-деформированного состояния подработанного массива во времени используются прогнозные графики нарастания оседаний земной поверхности, построение которых осуществляется по формуле [3]:

$$\eta(t) = \frac{(\eta_k^i + v_o^i)}{t_k^{1-\alpha_i}} \frac{t^{1-\alpha_i}}{(1 + e^{\rho_i - \beta_i t})}, \quad (6)$$

где α, ρ, β – реологические параметры, принимающие положительные значения, причем $\alpha < 1$, t_k – время завершения процесса сдвижения, $\eta_k = 0,9m\omega$ (m – вынимаемая мощность) – конечные оседания.

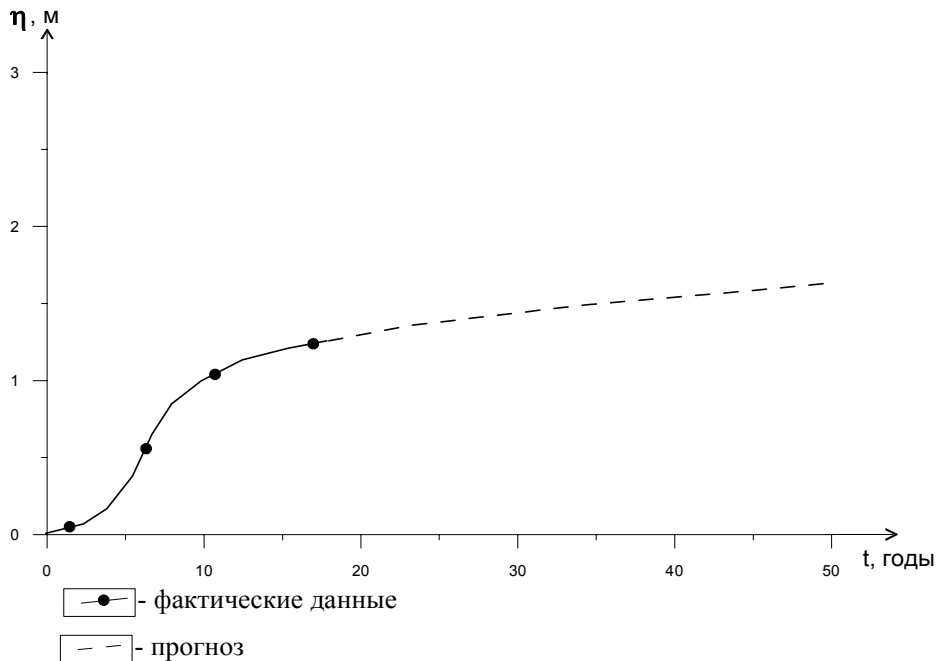


Рис. 1. Фактический и прогнозный график нарастания оседаний земной поверхности

В рамках рассмотренного реологического подхода анализ напряженно-деформированного состояния подработанного массива проводится в упруго-пластической постановке. В качестве определяющего уравнения нелинейной связи напряжений и деформаций используется идеальная упругопластическая модель, которая является обобщением упругой и жесткопластической среды с внутренним трением. При трехмерном математическом моделировании в каждой точке подработанного массива известен полный тензор напряжений. В этом случае из уравнений статики можно определить напряжения, действующие на любой наклонной площадке, проходящей через произвольную точку. В системе координат (x, y, z) ее пространственное положение определяется направляющими косинусами $\cos(Nx) = l$, $\cos(Ny) = m$, $\cos(Nz) = n$, где N – внешняя нормаль к площадке.

Полное напряжение P , действующее на этой площадке можно представить в виде проекций на координатные оси:

$$\begin{aligned} X &= \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n \\ Y &= \tau_{yx} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n \\ Z &= \tau_{zx} l + \tau_{zy} m + \sigma_z n \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда, нормальное к площадке напряжение σ_n определяется по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy} lm + \\ &+ 2\tau_{xz} ln + 2\tau_{yz} mn, \end{aligned} \quad (8)$$

а касательное напряжение τ_n вычисляется как:

$$\tau_n^2 = P^2 - \sigma_n^2, \quad (9)$$

где $P^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$.

Положение в пространстве плоскости возможного роста микротрещины в субвертикальном направлении характеризуется двумя углами. Это

углы α между плоскостью и вертикальной осью (например, y) и β между плоскостью роста трещины и одной из горизонтальных осей координат (например, z). Тогда из простых геометрических соображений направляющие косинусы выразятся через заданные углы в соответствии со следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} l &= \cos \alpha \cos \beta; \\ m &= -\sin \alpha \cos \beta; \\ n &= \sin \beta. \end{aligned} \quad (10)$$

Паспорт прочности соляных пород определяется параболической огибающей кругов Мора [4], построенной по известным значениям их пределов прочности на растяжение (σ_p) и сжатие ($\sigma_{сж}$). Критерием нарушения сплошности ВЗТ за счет образования трещин сдвига, а, следовательно, и условием реализации пластического режима, является выполнение неравенства:

$$K_k = \frac{\tau}{\sqrt{(\sigma_p + \sigma)[2 \cdot \sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж}) + \sigma_{сж}}]} \geq 1 \quad (11)$$

где касательное (τ) и нормальное (σ) напряжения вычисляются для суб-вертикальных направлений ($\pm 25^\circ$ от вертикали) в соответствии с формулами (9)-(10).

Численная реализация математического моделирования осуществляется по стандартной процедуре метода конечных элементов при решении задач в плоской постановке и по полуаналитической схеме с разложением вектора смещений в ряд Фурье по одной из горизонтальных координат в трехмерных вариантах расчета [5].

Конечно-элементная процедура реализации упругопластической модели осуществляется в следующей последовательности: на каждом временном шаге во всех конечных элементах

проверяется условие (11); в случае его выполнения корректируются упругие характеристики среды конечного элемента:

$$G = G/K_k, \quad (12)$$

где G - модуль сдвига.

Далее расчет напряженно-деформированного состояния подработанного массива проводится с учетом скорректированных упругих характеристик. Итерационный процесс завершается при не выполнении условия (11) во всех конечных элементах.

В рамках упругопластической модели области локализации пластических деформаций в физическом смысле трактуются, как формирование зон техногенной трещиноватости пород ВЗТ вследствие образования трещин сдвига. Вместе с тем, по результатам сейсморазведочных работ определяется пространственное положение в подработанном массиве волновых аномалий, которые интерпретируются как зоны снижения механических свойств соляных пород за счет техногенной нарушенности. Это соответствие позволяет итерационным путем производить настройку геомеханической модели по данным сейсморазведочных наблюдений.

На первом этапе геомеханических расчетов с учетом всего комплекса горно-геологических (особенности строения, характер залегания пластов и др.) и горнотехнических (количество отработанных пластов, параметры системы разработки, порядок отработки, наличие закладки выработанного пространства и т.д.) факторов оцениваются области развития пластических деформаций в ВЗТ. Результаты математического моделирования сопоставляются с данными сейсморазведочных наблюдений, в части положения выделенных геофизических аномалий.

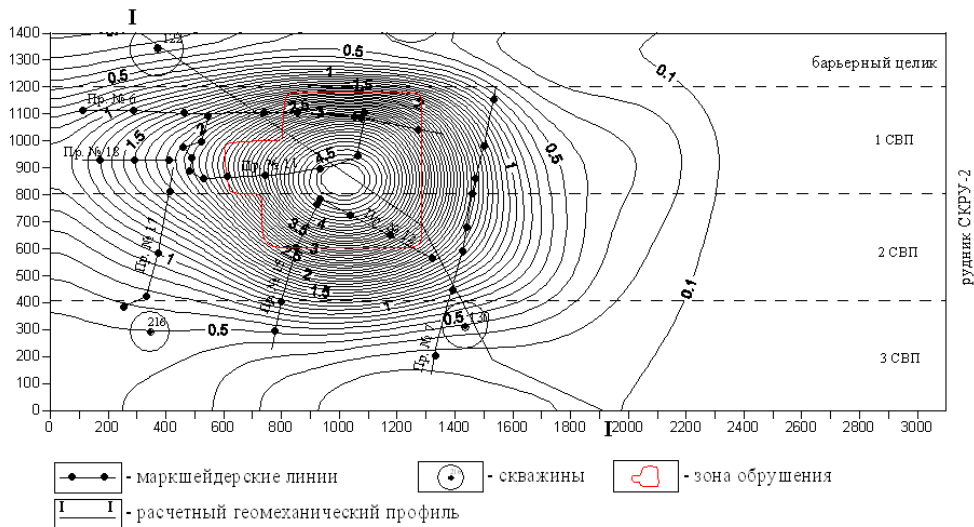


Рис. 2. Изолинии расчетных оседаний земной поверхности

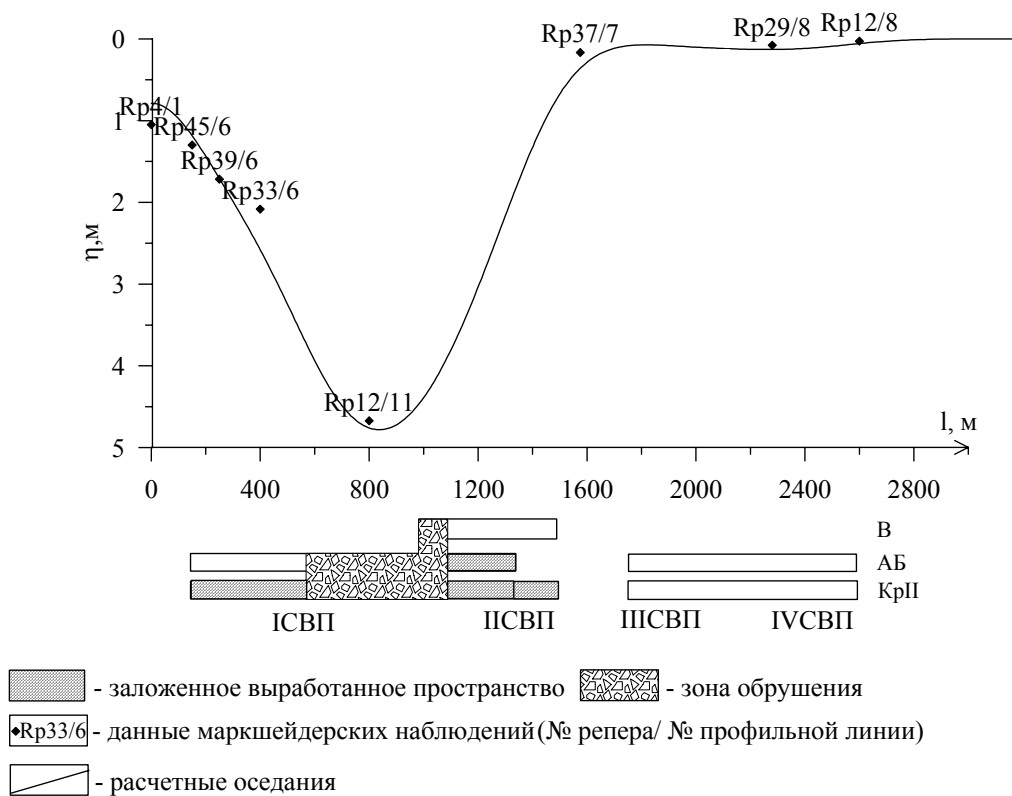


Рис. 3. Изменение оседания земной поверхности по разрезу I-I

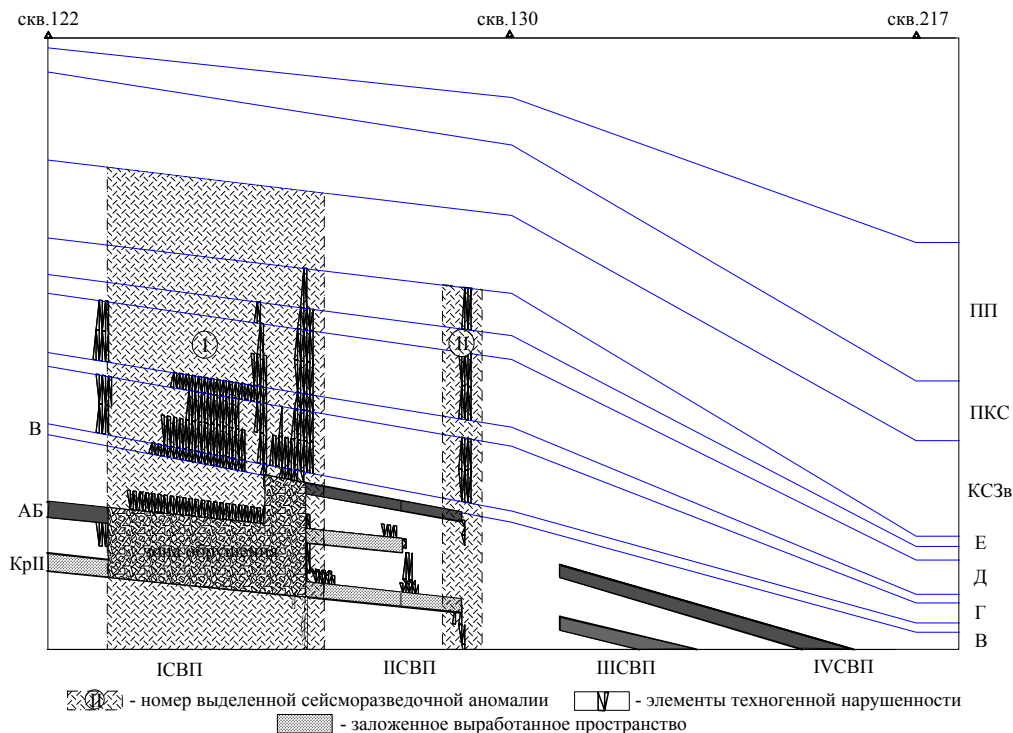


Рис. 4. Характер развития зон техногенной нарушенности по разрезу I-I

При их несоответствии в соотношении (11) производится изменение прочностных свойств пород, и расчеты повторяются. Конечным этапом итерационного цикла является подбор таких прочностных характеристик соляных пород, которые обеспечивают пространственное согласование (по латерали и вертикали) зон пластических деформаций и установленных волновых аномалий. Реализация данного подхода в рамках итерационной процедуры (11-12) дает возможность непосредственно в процессе счета определять степень снижения механических свойств соляных пород и получать оценку степени сохранности сплошности пластов ВЗТ.

Проиллюстрируем применение разработанной методики на примере

северо-восточной части шахтного поля рудника СКРУ-2 ОАО «Сильвинит».

В геологическом отношении исследуемая территория обладает достаточно сложным рельефом. Глубина залегания отработываемых пластов на разных участках варьируется в достаточно больших диапазонах. В разработке находятся три сильвинитовых пласта: АБ, КрII и В с различными параметрами камерной системы разработки.

В результате массового обрушения пород в 1995 году на участке 1-2 северо-восточных панелях рудника СКРУ-2 сформировалась обширная мульда сдвижений, в которой максимальные оседания к настоящему моменту времени достигли порядка 4,8-4,9 м. Целью исследований являлась

оценка состояния ВЗТ в районе зоны обрушения.

Решение задачи проводилось в трехмерной постановке. На рис. 2, 3 представлены расчетные оседания земной поверхности по площади исследований и вдоль характерного разреза. Как видно, результаты расчетов достаточно хорошо соответствуют фактическим данным наблюдений за сдвижением земной поверхности (рис. 3).

На рис. 4 показаны расчетные зоны формирования техногенной нарушенности пород ВЗТ по разрезу И,

которые пространственно согласуются с выделенными в пределах этой части шахтного поля сейсморазведочными аномалиями.

Таким образом, разработанная методика математического моделирования вследствие использования маркшейдерской и геофизической информации позволяет повысить адекватность геомеханических расчетов, что качественно изменяет уровень геомеханического обеспечения безопасности горных работ на Верхнекамских калийных рудниках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амузин Б.З., Линьков А.М. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести.- Механика твердого тела, 1974, № 6.
2. Барях А.А. Об одном подходе к прогнозу изменения во времени напряженно-деформированного состояния подработанного массива // Стратегия и процессы освоения гересурсов. Материалы научной сессии ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. Пермь, 2004.
3. Барях А.А., Самоделкина Н.А., Телегина Е.А., Девятков С.Ю. Прогноз нарастания оседаний земной поверхности при обработке свиты калийных пластов// Физ.-тех. проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005, №4.
4. Барях А.А. Геомеханические аспекты защиты калийных рудников от затопления// Изв.ВУЗов. Горный журнал. – 1995, № 6.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Барях А.А., Самоделкина Н.А., Телегина Е.А., Шумихина А.Ю. – Горный институт УрО РАН, г. Пермь.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 2 симпозиума «Неделя горняка-2008». Рецензент д-р техн. наук, проф. В.Л. Шкуратник.

