

Рис. 6. Диаграммы экспериментальной и модельной кривых нагружения соляного образца (сплошная – эксперимент, штриховая – модель)

Выполненное в текущей работе исследование показало, что построенной модели изотропной идеальной упругопластической среды с критерием прочности, описанным в [1], недостаточно для описания кривой нагружения и, как следствие, для описания процессов деформирования элементов камерной системы разработки полезных ископаемых. Из полученных результатов видно наличие упрочняющего эффекта в соляных образцах. Этот факт свидетельствует о том, что в модель разрушения необходимо включить упрочнение. Следующим этапом построения теоретического описания процесса разрушения соляных образцов будет попытка ввести изотропную линейную модель упрочнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №17-45-590681

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Самodelкина Н.А. Об одном критерии прочности горных пород // Чебышевский сборник. – 2017. – Т. 18, № 3 (63). – С. 72-87. DOI: 10.22405/2226-8383-2017-18-3-72-87.
2. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. – 7th edition. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. – 756 p.
3. Zienkiewicz O.S., Taylor R.L., Fox D.D. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. – 7th edition. – Oxford: Butterworth-Heinemann, Waltham, 2014. – 672 p.
4. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
5. de Souza Neto E.A., Peric D., Owen D.R.J. Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications. – John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2008. – 814 p.

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2019.4.9

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ НА УЧАСТКАХ РАЗВИТИЯ ПРИРОДНЫХ ТРЕЩИН

А.Ю. ШУМИХИНА

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе приводится анализ оценки условий роста открытых природных трещин в зависимости от их положения относительно границ выработанного пространства. Математическое моделирование проводилось в двумерной постановке методом конечных элементов и отражало установленные по геофизическим исследованиям особенности ее геологического строения. Связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывалась законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определялись критерием Кулона-Мора. Анализ нарушения сплошности слоев ВЗТ в области действия растягивающих напряжений основывался на их превышении предела прочности соляных пород при растяжении. Для определения условий роста трещин использовался энергетический критерий Гриффитса.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, природные трещины, энергетический критерий прочности, упругопластические деформации, соляные породы.

Важнейшим условием безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийных солей является обеспечение сохранности водоупорного целика, отделяющего

выработанное пространство от водоносных горизонтов, который в горной практике получил название водозащитной толщи (ВЗТ). Поэтому для калийных рудников при выборе системы и технологических параметров разработки наиболее важным является требование об исключении возможности образования системы трещин между выработанным пространством и водоносными горизонтами [1].

В основу расчетной схемы положен геологический разрез, построенный по результатам бурения солеразведочных скважин (рис. 1). Граничные условия определялись следующим образом: на боковых границах горизонтальные смещения, а на нижней границе вертикальные - принимались равными нулю. Учет собственного веса пород проводился посредством задания массовых сил интенсивностью γ_i (γ_i - удельный вес i -го элемента геологического разреза).

Для описания развития во времени деформационных процессов в подработанном массиве использовался реологический подход, основанный на модификации известного метода переменных модулей [1]. В данной модификации [2] переменными модулями характеризуется деформирование не всех элементов геологического разреза, а лишь отработанных пластов. При этом изменение модулей деформации во времени полностью определяются графиками нарастания оседаний земной поверхности.

Численная реализация математического моделирования производилось по стандартной схеме метода конечных элементов в упруго-пластической постановке [3]. В рамках упругопластической модели в условиях сжатия разрушение пород междупластья за счет сдвига оценивается по критерию Кулона-Мора [4]:

$$\tau_{\max} \geq \tau_{np}, \quad (1)$$

где τ_{\max} - максимальное касательное напряжение, σ_1, σ_3 - максимальное и минимальное главные напряжения. В неравенстве (1) τ_{np} определяется параболической огибающей кругов Мора:

$$\tau_{np} = \sqrt{(\sigma_p + \sigma)[2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж}]},$$

где $\sigma_{сж}, \sigma_p$ - пределы прочности на сжатие и растяжение, σ - нормальное напряжение в плоскости действия τ_{\max} .

Напряжения τ_{\max} и σ_n вычисляются через значения главных напряжений:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2,$$

$$\sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2,$$

где для условий ПДС главные напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right]$$

Соляные породы плохо сопротивляются растягивающим усилиям, появление которых в тех или иных участках массива пород также может служить критерием разрушения в области растяжения:

$$\sigma_1 \geq \sigma_{раст}$$

В ходе очистных работ на одном из участков Верхнекамского месторождения были обнаружены открытые природные трещины развитые в кровле продуктивного пласта АБ.

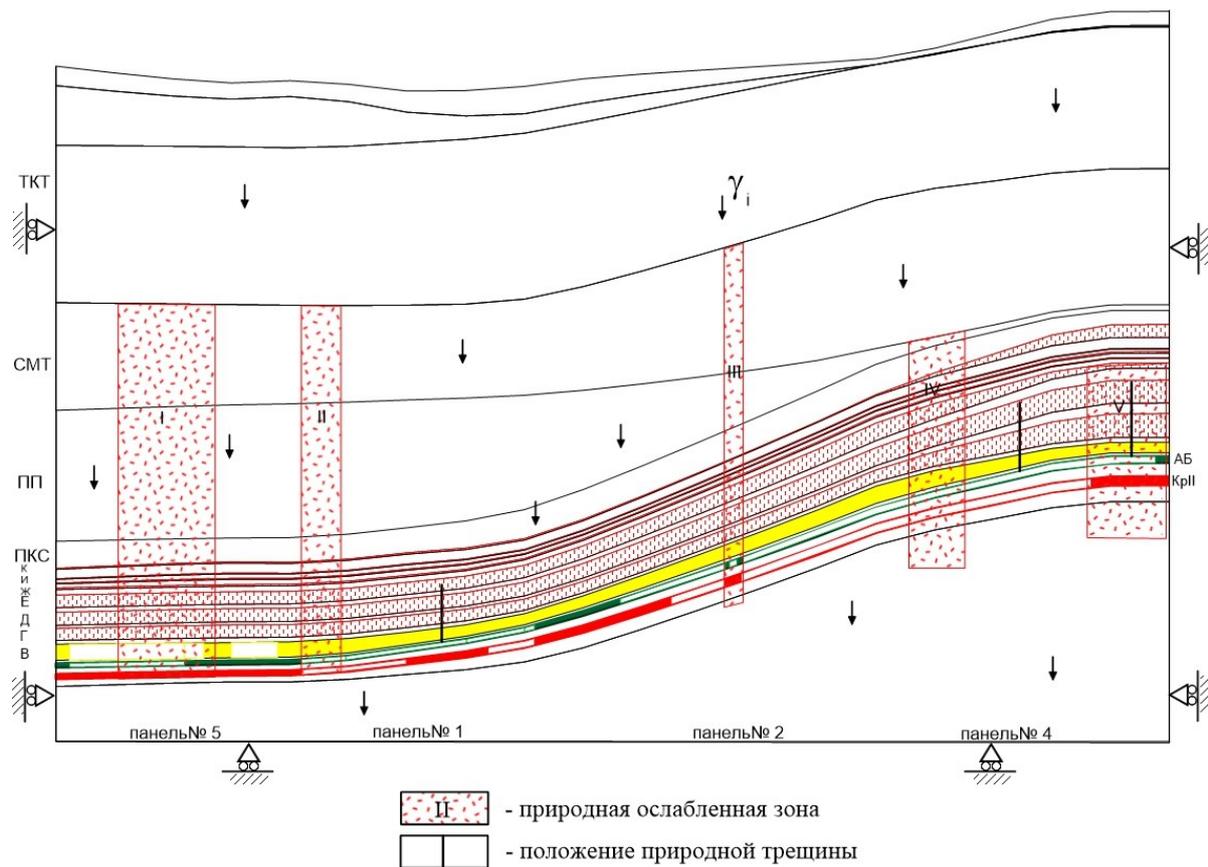


Рис. 1. Расчетная схема

Поскольку точная высота распространения природных трещин над выработанным пространством неизвестна, то определение условий ее роста проводилось для трех расчетных высот: 15 м, 45 м и 70 м. для каждого из трех вариантов расположения трещины относительно мульды сдвижения земной поверхности. В первом и втором вариантах трещины расположены в краевых частях выработанного пространства, в третьем варианте - в зоне полной подработки.

Анализ изменения напряженного состояния массива на участке открытой природной трещины показал [5], что ее развитие может происходить только за счет плоского сдвига. Критерий Гриффитса [6] основан на предположении, что трещина будет расти лишь в том случае, если освобождаемая при увеличении трещины энергия достаточна для обеспечения всех затрат энергии, связанных с этим ростом. В этой связи, согласно силового критерия механики разрушения, условием роста трещины является выполнение неравенства:

$$K_{II} \geq K_{IIc},$$

где K_{IIc} – критическое значение интенсивности напряжений, равное для соляных пород $K_{IIc} = 1 \text{ МПа м}^{1/2}$ [7].

Вычисление коэффициента интенсивности напряжений осуществлялось энергетическим методом:

$$K_{II}^2 = \frac{dWE}{1-\nu^2},$$

где E и ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, dW – высвобождение упругой энергии при росте трещины длиной l на бесконечно малую величину Δl .

Количественная оценка величины энергии производилась с помощью соотношения:

$$W = \frac{\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3}{2},$$

где $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ – соответственно компоненты тензора напряжений и деформаций, действующих в окрестностях вершины трещины. Их вычисление осуществлялось с использованием стандартной процедуры метода конечных элементов.

На рис.2 показаны расчетные оседания земной поверхности и положение природной трещины для всех вариантов расчета. Результаты оценки роста природной трещины в зависимости от местоположения этой трещины и ее высоты приведены в таблице 1. В первом варианте трещина приурочена к краевой части мульды сдвижения, с относительно небольшим градиентом оседаний на конец процесса сдвижения. Здесь прогнозируется рост трещины, достигающей нижней части ВЗТ.

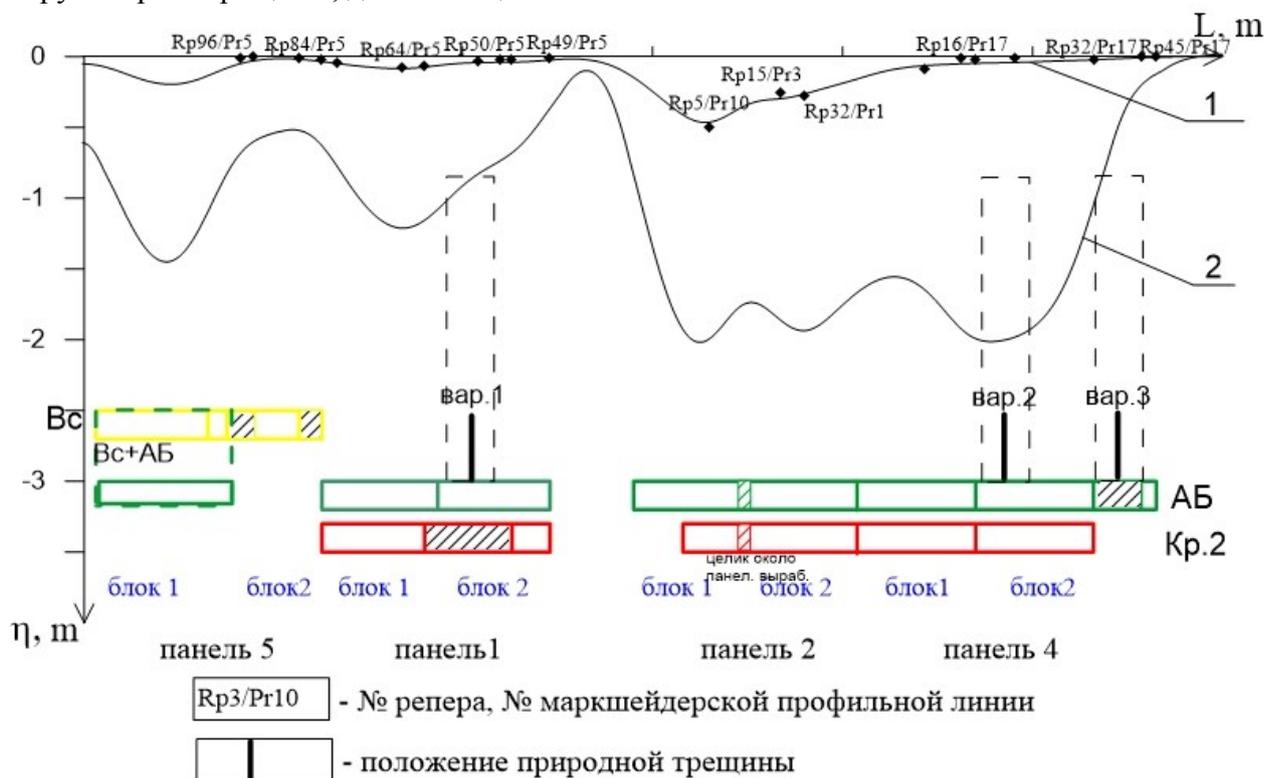


Рис. 2. Расчетные оседания земной поверхности:
1- на 2018 г; 2- на конец процесса сдвижения

Во втором варианте, трещина вскрыта в краевой части выработанного пространства, где формируется максимальный градиент оседаний земной поверхности. Здесь рост трещины прогнозируется для всех трех вариантов ее простираия в ВЗТ

Таблица 1

Результаты оценки роста природных открытых трещин

Высота трещины, м	Коэффициент интенсивности напряжений, МПа м ^{1/2}		
	вариант 1	вариант 2	вариант 3
15	1,4	0,65	0,42
45	1,78	0,89	0,31
70	0,54	0,45	0,29

В третьем варианте условием выбора местоположения трещины было отсутствие на участке значительного градиента оседания земной поверхности. Расчеты показали, что на здесь рост трещины не прогнозируется.

Результаты расчета коэффициента интенсивности напряжений свидетельствуют, что его максимальные значения, а, следовательно, наиболее вероятные условия для роста трещины, возникают в нижней части ВЗТ. С увеличением расстояния от кровли продуктивного пласта до вершины трещины его значение падает. Это объясняется более высоким уровнем действующих напряжений в нижней части ВЗТ - с увеличением расстояния от кровли очистных камер техногенное воздействие на массив уменьшается.

Значение коэффициента интенсивности напряжений в окрестностях вершины трещины зависит от места расположения природных трещин относительно границ выработанного пространства. На участках со значительным градиентом оседаний земной поверхности он может превышать предельно допустимые значения для трещин достигающих верхней части ВЗТ, что наиболее опасно с точки зрения сохранности ВЗТ.

Таким образом, для обеспечения безопасных условий подработки ВЗТ не рекомендуется оставление открытых природных трещин в краевой части выработанного пространства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амосин, Б.З., Линьков А.М. Об использовании переменных модулей для решения одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 162-166.
2. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №6. – С. 32-41.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
4. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
5. Барях А.А., Еремина Н.А., Грачева Е.А. Оценка условий развития трещин в подработанном соляном массиве // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1994. – № 5. – С. 84-88.
6. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.: ил.
7. Зильбершмидт В.Г., Спиркова С.И., Замесов Л.А. Развитие трещины в каменной соли при плоском сдвиге // Изв. вузов. Горн. журн. – 1982. – № 6. – С.13-14.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.83

DOI:10.7242/echo.2019.4.10

МЕТОДИКА СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГРАВИМЕТРИИ НА ПРИМЕРЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

А.А. СИМАНОВ

Горный институт УрО РАН, Пермь

Аннотация: Длительные техногенные нагрузки, связанные с эксплуатацией месторождений полезных ископаемых, являются мощным воздействием на природную геологическую среду. Откликом на эти воздействия могут быть масштабные изменения, ведущие к катастрофическим последствиям – просадкам и провалам земной поверхности, угрожающие жизнедеятельности и приносящие значительные экономические потери. Для изучения и прогнозирования негативных инженерно-геологических явлений широко используются геофизические методы, немаловажную роль в комплексе которых играют гравиметрические исследования. Об актуальности задачи выявления техногенного воздействия на геологическую среду говорят факты катастрофических аварий последних лет с затоплением рудников Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), расположенного в Пермском крае.

Ключевые слова: гравиразведка; мониторинг, аномалия гравитационного поля, динамическая гравитационная аномалия, обратные задачи геофизики.