

УДК 510.67:553.63

Н.А. Самоделкина, А.А. Барях

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В УСЛОВИЯХ КРУПНОМАСШТАБНОГО
РАСТВОРЕНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД***

Проведен геомеханический комплекс исследований, ориентированный на прогноз деформаций земной поверхности, обусловленных растворением соляных пород, с целью оценки масштабов возможных негативных последствий аварии для подработанной территории города Березники и прилегающих районов.

Ключевые слова: математическое моделирование, калийный рудник, геомеханические модели деформирования, деформация земной поверхности.

Семинар № 3

**N.A. Samodelkina, A.A. Baryah
THE MATHEMATICAL MODELLING
OF EARTH SURFACE DEFORMATION
DURING THE WIDESCALE
SALIFEROUS ROCK RESORPTION**

The geomechanical complex of studies to forecast the earth surface deformation caused by the saliferous rock resorption and estimate the scale of the possible negative effects from accidents at the underworked territory of Berezniki city and the neighbouring areas is carried out.

Key words: mathematical modeling, potash mine, geomechanical models of deformation, earth surface deformation.

Аварийный водоприток в калийный рудник БКПРУ-1 был зафиксирован 17 октября 2006 года. В пределах шахтного поля вследствие отработки двух сильвинитовых (АБ и КрII) и карналлитового (В) пластов накоплено более 80 млн.м³ пустот. В результате поступления слабоминерализованных вод в рудник происходит растворение несущих элементов камерной системы разработки (междукамерных целиков,

кровли и почвы камер), что обуславливает интенсивное развитие деформаций подработанного массива, включая и земную поверхность. Основные негативные последствия аварии усугубляются наличием на подработанной территории значительной части жилой застройки города Березники с населением 180 тысяч человек. Кроме того, здесь расположены ответственные промышленные объекты и инженерные сооружения, проходит трасса федеральной железной дороги.

Результаты гидрогеохимического моделирования, выполненные Санкт-Петербургским отделением института геоэкологии РАН, показали, что в наибольшей степени растворению подвержен карналлитовый пласт В. Уменьшение ширины междукамерных целиков по сильвинитовым пластам КрII и АБ по площади шахтного поля происходит крайне неравномерно и варьируется от первых сантиметров до полной деградации (полного растворения) несущих элементов в районе прорыва надсолевых вод в горные выработки.

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

На момент полного заполнения выработанного пространства степень недонасыщенности рассолов по $MgCl_2$ на отдельных участках оказывается еще относительно высокой и растворение междукамерных целиков не достигает максимальных значений. Моделирование процесса дальнейшего растворения карналлита показало, что вне зависимости от уровня водопритоков через 180-210 суток после затопления рудника происходит полное донасыщение рассола по отношению к $MgCl_2$. В этом случае уменьшение ширины междукамерных целиков достигает: в камерах без закладки 8.8 м, в заложённых камерах 8.4 м по высоте незаложенной их части.

В процессе растворения соляных пород, в том числе и карналлита, формируется дополнительная «закладка» очистных камер за счет обрушения слоев каменной соли, неконгруэнтных процессов растворения (не растворяется КС), высаливания из рассолов галита и сильвина. Это несколько снижает негативные последствия, связанные с растворением междукамерных целиков.

Геомеханический комплекс исследований был ориентирован на прогноз деформаций земной поверхности, обусловленных растворением соляных пород, с целью оценки масштабов возможных негативных последствий аварии для подработанной территории города Березники и прилегающих районов, в пределах которых расположены ответственные инженерные объекты и сооружения. Кроме того, в условиях интенсивной деградации междукамерных целиков существует опасность реализации триггерного механизма разрушения пластов водозащитной толщи (ВЗТ) и образование дополнительного канала поступления надсолевых вод в

рудник. В этом случае вследствие растворения пород кровли соляных отложений формируется карстовая полость, которая может привести к обрушению надсоляных пород и образованию провала на земной поверхности.

По результатам гидрогеохимических расчетов построены локальные геомеханические модели деформирования конструктивных элементов камерной системы разработки, соответствующие различным горнотехническим ситуациям и отражающие степень деградации несущих элементов, дополнительную «закладку» камер и ряд других факторов.

На рис. 1 модели растворения иллюстрируются применительно к карналлитовому пласту В. При реализации этих процессов деформации подработанного массива по сути определяются «новыми» параметрами отработки: шириной камер и целиков, дополнительной закладкой. «Новые» параметры для пласта В приведены в таблице. Здесь: a, b, m, Z соответственно исходная ширина камеры, ширина целика, вынимаемая мощность и объем закладки на 1 погонный метр; 2Δ - уменьшение ширины целика; «штрих» - определяет соответствующие «новые» параметры отработки для незаложенных камер (рис. 1, а); «два штриха» - для заложённых камер (рис. 1, б).

Для «новых» параметров отработки согласно [1] оценивалась степень нагружения целиков C' и величина максимальных оседаний земной поверхности η_0' . Предполагалось, что если C' достигает критического значения, то происходит мгновенное разрушение целика, и оседания земной поверхности достигают максимальных величин $\eta(t) = \eta_0'$.

Незаложенные камеры пласта В	$a' = a + 2\Delta$	$b' = b - 2\Delta$	$m' = m$	$Z' = \frac{\Delta V}{a' m'}$
Заложенные камеры пласта В	$a'' = a + 2\Delta$	$b'' = b - 2\Delta$	$m'' = m(1 - Z)$	$Z'' = \frac{\Delta V}{a'' m''}$

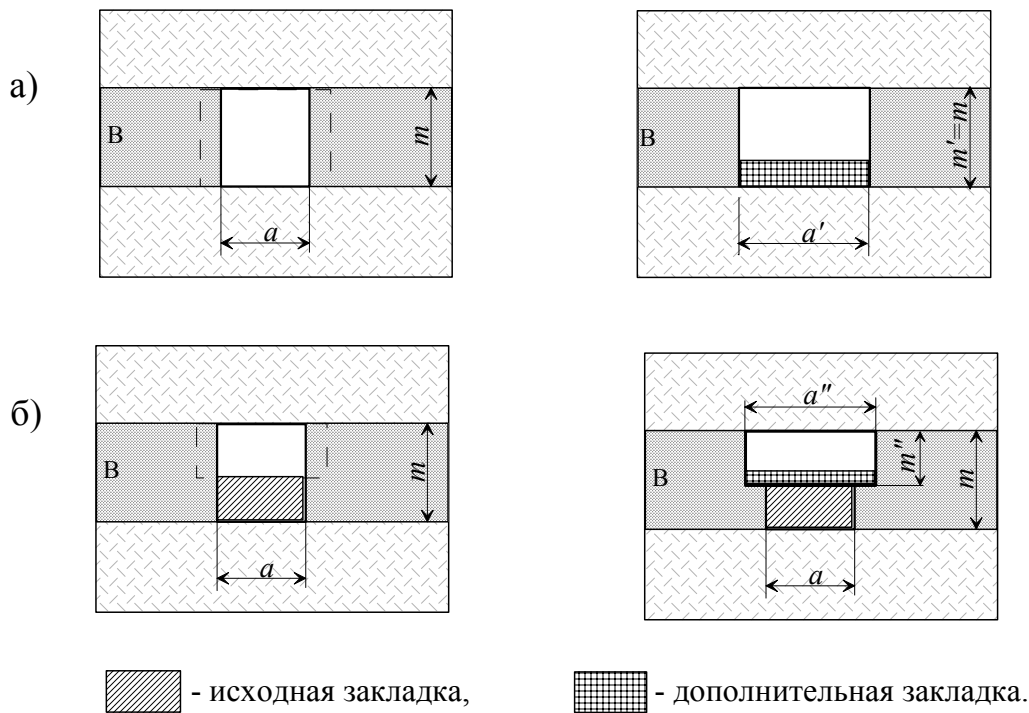


Рис. 1. Модели растворения карналлитового пласта В: а) незаложенные камеры; б) заложённые камеры

В противном случае $\eta(t)$ определяется расчетной степенью нагружения «нового» целика в соответствии с методикой, изложенной в [1].

Анализ вязкоупругого поведения подработанного массива осуществлялся по схеме метода переменных модулей [2, 3]. Отработанный пласт моделировался сплошной средой с эффективным модулем упругости E^p , который вычислялся по формуле:

$$E^p = E^0 / [1 + \Psi(t)],$$

где E^0 - исходный модуль упругости продуктивного пласта, а параметр $\Psi(t) = \eta(t) / (m \varepsilon_{yy}^0)$ определяется расчетными оседаниями земной поверхности в зоне полной подработки (ε_{yy}^0 - исходная упругая вертикальная деформация ненарушенного продуктивного пласта).

Локальные расчетные схемы синтезированы в обобщенную трехмерную математическую модель массива, подработанного в пределах шахтного поля рудника БКПРУ-1. Данная модель описывает основные особенности геологического строения массива и технологии горных работ (количество отработанных пластов, конфигурацию выработанного пространства, параметры системы разработки и реализованные меры охраны), характер деформирования и разрушения соляных пород под нагрузкой.

Анализ напряженно-деформированного состояния подработанного массива проводился в упругопластической постановке. Это позволило локализовать области пластических деформаций, которые в физическом смысле трактовались, как зоны формирования техногенной нарушенности пород водо-

защитной толщии вследствие образования трещин сдвига.

В качестве определяющего уравнения нелинейной связи напряжений и деформаций в подработанном массиве использовалась идеальная упругопластическая модель, которая является обобщением упругой и жесткопластической среды с внутренним трением. Паспорт прочности соляных пород описывался параболической огибающей кругов Мора [4], построенной по известным значениям их пределов прочности на растяжение (σ_p) и сжатие ($\sigma_{сж}$). Условием нарушения сплошности водозащитной толщии за счет образования трещин сдвига являлось выполнение неравенства:

$$K_k = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{ип}}} = \frac{\tau_{\max}}{\sqrt{(\sigma_p + \sigma_n)[2 \cdot \sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{сж})} + \sigma_{сж}]} \geq 1 \quad (1)$$

где максимальное касательное (τ_{\max}) и нормальное (σ_n) напряжения вычислялись в общем случае для трехмерной задачи:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad \sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}.$$

Значения главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ находились из решения кубического векового уравнения с использованием тригонометрической процедуры.

В случае выполнения в некоторой точке тела неравенства (1) упругие характеристики среды корректировались следующим образом:

$$G^{i+1} = G^i / K_k,$$

где G^i - модуль сдвига на i -той итерации. После корректировки модуля сдвига расчет напряженно-деформированного состояния повторялся. Итерационный процесс завершался при не выполнении неравенства (1) во всех точках.

Задача по определению напряженно-деформированного состояния подработанного массива в районе шахтного поля БКПРУ-1 с учетом растворения отрабатываемых пластов является существенно трехмерной. Для ее решения использовался полуаналитический метод конечных элементов [5], позволяющий на основе разложения функций формы, определяющих закон изменения перемещений конечного элемента, в ряд Фурье свести трехмерную задачу к двумерной.

Для повышения эффективности крупномасштабного математического моделирования предложена модификация полуаналитической схемы конечных элементов. Ее суть заключается в разбиении расчетной области в направлении разложения на отдельные зоны с перекрытием на длину краевого эффекта и решении для каждой из них независимой задачи. При формировании общего решения зона перекрытия отбрасывается.

В рамках данных геомеханических построений выполнены расчеты деформаций земной поверхности, обусловленные растворением междукамерных целиков. Результаты математического моделирования иллюстрируются на примере участка городской застройки, подработанного карналлитовым пластом В. На рис. 2 показана мульда сдвижения, в пределах которой оседания земной поверхности вследствие растворения карналлита на момент полного затопления рудника достигают 3.2 м.

Мульда имеет сложную пространственную конфигурацию - ее южная и восточная краевая часть является относительно пологой, западная и отчасти северная - крутой. Такое развитие процессов сдвижения предопределяет характер распределения основных показателей деформации земной поверхности: горизонтальных деформаций сжатия и растяжения, наклонов и кривизн, максимальные значения которых

приурочены преимущественно к западной и, в меньшей степени, к северной краевым частям мульды. Все расчетные показатели получены непосредственно из результатов математического моделирования и согласно рекомендациям нормативных документов приведены к 15-метровому интервалу.

Оценка негативных последствий аварии для расположенных на данном участке зданий гражданского назначения в соответствии с [6] производилась на основе сопоставления расчетных (ожидаемых) горизонтальных деформаций (растяжения или сжатия) земной поверхности с их допустимыми и предельными величинами. Согласно данным геомеханических расчетов ожидаемые деформации для 14 объектов превышают или находятся на уровне допустимых значений.

Результаты критериальной оценки состояния водозащитной толщи представлены на рис. 2. Как видно, вследствие растворения междукамерных целиков создаются условия нарушения сплошности ВЗТ и, как следствие возникает опасность образования техногенных провалов на земной поверхности.

Отметим, что образование провалов при нарушении сплошности ВЗТ в значительной степени определяется временным фактором. Если нарушение про-

изойдет на заключительной стадии затопления, то карстовая полость, а, следовательно, и провал, не успеют сформироваться. Растворение карналлитовых междукамерных целиков в пределах данного участка начнется при оставшемся объеме выработанного пространства порядка 20 млн.м³. Потеря их устойчивости и, как следствие, интенсификация деформаций ВЗТ будет происходить при еще меньших объемах. В этом случае даже при нарушении сплошности ВЗТ с учетом, что часть воды поступает в рудник по уже существующему каналу, вряд ли ее будет достаточно для размыва карстовой полости до критических размеров. В этой связи образование здесь провалов маловероятно.

Результаты геомеханических расчетов определяют потенциальную опасность реализации негативных последствий аварии для гражданских и промышленных объектов. Именно на этих участках должна быть развернута полновесная система мониторинга, включающая наблюдение за сдвижением земной поверхности и комплексный геофизический контроль состояния ВЗТ. Полученная информация является основой для корректировки математических моделей и выполнения в интерактивном режиме уточненных геомеханических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей (технологический регламент).* – С.-Петербург, 2004.

2. *Амусин Б.З., Линьков А.М.* Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести. – *Механика твердого тела*, 1974, №6.

3. *Барях А.А., Самоделкина Н.А.* Об одном подходе к реологическому анализу

геомеханических процессов.– *Физико-техн. пробл. разраб. месторож. полез. ископаемых*, 2005, №6.

4. *Кузнецов Г.Н.* Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1947.

5. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975

6. *Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях.* ПБ-07-269-98. С.-Петербург, 1998. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Самоделкина Н.А., Барях А.А. – Горный институт УрО РАН, arc@mi-perm.ru