

также показывает образование $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и диаспора. По мере осаждения указанных фаз швертманнит становится ненасыщенным и в этих условиях также может растворяться с образованием гетита.

Приведенный пример свидетельствует, что гидрохимическое моделирование на основе термодинамических расчетов с учетом особенностей форм нахождения элементов в водных потоках и характера вторичного минералообразования позволяет осуществлять прогноз влияния сбросов шахтных вод на особенности загрязнения водоемов-приемников.

Работа выполнена при поддержке Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0149-С-01.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна: офиц. сайт. – URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (дата обращения: 20.04.2019).
2. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения / ПГНИУ. – Пермь, 2018. – 287 с.: ил.
3. Accornero M., Marini L., Ottonello G., Zuccolini M. The fate of major constituents and chromium and other trace elements when acid waters from the derelict Libiola mine (Italy) are mixed with stream waters // Applied Geochemistry. – 2005. – V.20. – P. 1368-1380.
4. Bigham J.M., Nordstrom D.K. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters // Sulfate minerals – crystallography, geochemistry and environmental significance. – 2000. – V. 40. – P. 351-404. – (Review in mineralogy and geochemistry). DOI: 10.2138/rmg.2000.40.7.
5. Consani S., Carbone C., Dinelli E., Baltic-Zunic T., Cutroneo L., Capello M., Salviulo G., Lucchetti G. Metal transport and remobilisation in a basin affected by acid mine drainage: the role of ochreous amorphous precipitates // Environmental Science and Pollution Research. – 2017. – V. 24, № 18. – P. 15735-15747. DOI: 10.1007/s11356-017-9209-9.
6. Hammarstrom J.M., Seal R.R., Meier A.L., Kornfeld J.M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments // Chemical Geology. – 2005. – V. 215, № 1-4. – P. 407-431. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.053.
7. Yu J.Y., Heo B., Choi I.K., Cho J.P., Chang H.W. Apparent solubilities of schwertmannite and ferrihydrite in natural stream waters polluted by mine drainage // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1999. – V. 63, № 19-20. – P. 3407-3416. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00261-6.

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2020.2.5

КАЛИБРОВКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗТ ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

С.Ю. Лобанов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь.

Аннотация: Построена геомеханическая математическая модель водозащитной толщи, отражающая основные особенности геологического строения Гремячинского месторождения и проектные параметры камерной системы разработки. По результатам лабораторных экспериментальных исследований разработано параметрическое обеспечение геомеханической модели.

На основе информации о развитии процесса сдвижения земной поверхности для условий Верхнекамского и Саскачеванского калийных месторождений выполнена калибровка геомеханической модели.

Методами математического моделирования проведена предварительная оценка безопасных условий подработки ВЗТ при проектных параметрах разработки.

Исследования показали, что более предпочтительной является калибровка по данным о нарастании оседаний земной поверхности для Саскачеванского месторождения вследствие подобия горно-геологических и горнотехнических условий разработки.

Согласно результатам математического моделирования, в соответствии с деформационными и прочностными критериями при реализованных параметрах камерной системы разработки сохранность ВЗТ обеспечивается вплоть до завершения процесса сдвижения.

Ключевые слова: математическое моделирование, калибровка, геомеханическая оценка, водозащитная толща.

Построение геомеханической модели подработанного массива Гремячинского месторождения выполнялось на примере субширотного профиля, проходящего по 53П. Профиль ориентирован с северо-запада на юго-восток. Общая протяженность геомеханического профиля составила порядка 7500 метров. Исследуемые районы шахтного поля характеризуется пологим рельефом. Глубина залегания рабочего пласта Первый изменяется в диапазоне от 1140 до 1220 м.

На данном участке планируется к отработке сильвинитовый пласт Первый. Подробные сведения о параметрах очистной выемки соляных запасов приведены в работе [1] и включены в схему геомеханических расчетов.

Построение физико-геологической модели разреза в центральной части Гремячинского месторождения осуществлялось на основе результатов сейсморазведочных работ и данных бурения геологоразведочных скважин. В ходе работ пробурено 17 геологоразведочных скважин, в том числе две контрольно-стволовые и 12 гидрогеологических скважин [2].

Математическое моделирование состояния ВЗТ выполнялось в упругопластической постановке с учетом всего комплекса горно-геологических (особенности строения, гипсометрия пластов и др.) и горнотехнических (количество отработанных пластов, параметры системы разработки, порядок отработки, наличие закладки выработанного пространства и т.д.) факторов.

Для анализа деформирования подработанного массива во времени использовался реологический подход, основанный на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности [3]. В рамках линейной теории наследственной вязкоупругости принималось, что вертикальные смещения дневной поверхности изменяются во времени, согласно соотношению:

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

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

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

В этом случае функция ползучести $\Phi(t)$ определяется фактическими или прогнозными графиками нарастания оседаний земной поверхности. Реализация соотношений (1), (2) осуществлялась на основе модификации [4] известного в практике реологического анализа метода переменных модулей упругости [3].

Оценка степени изменения состояния водозащитной толщи при развитии процесса сдвижения базировалась на анализе потенциальной возможности формирования в массиве трещин субвертикальной ориентации. Для рассматриваемой идеальной упругопластической среды связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывалась законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определя-

лись критерием Кулона-Мора [5]. В области растяжения критическое напряжение ограничивалось пределом прочности на растяжение.

Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях [6] с дискретизацией рассматриваемой области на треугольные элементы первого порядка. Решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [7, 8].

Для реализации реологического подхода описанного выше, необходимо знание функции ползучести $\Phi(t)$, которая, как уже отмечалось, определяется прогнозными или фактическими графиками нарастания оседаний земной поверхности $\eta(t)$. В противном случае возможно лишь оценить напряженно-деформированное состояние подработанного массива на конец процесса сдвижения.

Для условий Гремячинского месторождения при неизученном процессе сдвижения для первоначальной калибровки геомеханической модели можно попытаться использовать исходные данные, накопленные на других разрабатываемых месторождениях калийных солей.

Условия отработки крупнейшего в России Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) существенно отличаются от Гремячинского месторождения, в пределах которого продуктивные пласты залегают на глубинах порядка 1000 метров, а разрез ВЗТ включает высокопрочные доломитовые отложения. В отличие от ВКМКС, где выемочные зоны отрабатываются камерами с поддержанием вышележащей толщи периодической системой междукамерных целиков, при разработке Гремячинского месторождения планируется оставление широких барьерных целиков.

В то же время за годы отработки Верхнекамского месторождения накопился большой фактический материал по развитию оседаний земной поверхности под воздействием горных работ, построены методики их прогнозирования, построены и апробированы модели оценки сохранности ВЗТ.

На рис. 1 представлены оседания земной поверхности для различных моментов времени вдоль рассматриваемого профиля на Гремячинском месторождении при использовании функции ползучести $\Phi(t)$, основанной на построении прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности согласно действующему нормативному документу, разработанному для Верхнекамского месторождения [9], при степенях нагружения для условий отработки Гремячинского месторождения.

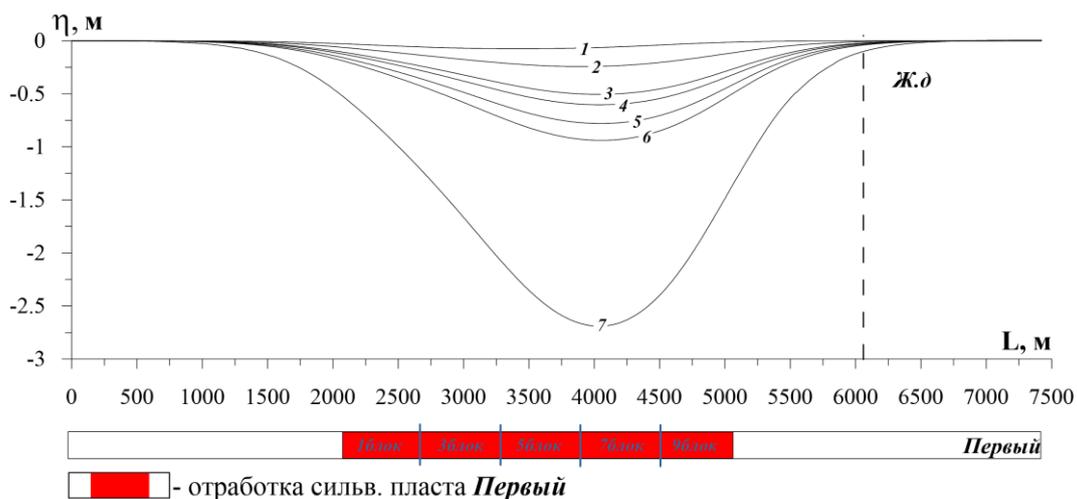


Рис. 1. Расчетные оседания земной поверхности вдоль геомеханического профиля
 1 – через 5 лет с начала отработки; 2 – через 10 лет; 3 – через 15 лет; 4 – через 20 лет; 5 – через 30 лет;
 6 – через 40 лет; 7- на конец процесса сдвижения

Горно-геологические и горнотехнические условия разработки Саскачеванского месторождения имеют ряд схожих черт с Гремячинским месторождением. Так, пригодные для разработки калийные пласты залегают на глубине 1000 м. Их перекрывают прочные карбонатные девонские отложения мощностью 500 м. Выше располагаются песчаники меловой формации мощностью 100 м, меловые сланцы мощностью 400 м и ледниковые тиллиты до уровня поверхности. Эвапоритовый пласт также подстилается девонскими карбонатными горными породами.

Отработка осуществляется панелями по пять камер. Между панелями оставляется барьерный целик шириной 45 м. Отрабатывается, как правило, один пласт; вынимаемая мощность изменяется от 2,5 до 4,9 м.

С использованием реологического подхода, описанного выше, была проведена оценка деформирования породного массива, подработанного рудником Нутриен Кори. На рис. 2 представлено изменение расчетных и фактических вертикальных деформаций земной поверхности в процессе движения фронта очистных работ. Как видно из рисунка, наблюдается удовлетворительное соответствие результатов моделирования натурным измерениям.

В связи с наличием определенного подобия в условиях отработки Саскачеванского и Гремячинского месторождений полученная для рудника Нутриен Кори функция нарастания оседаний земной поверхности $\eta(t)$ может в первом приближении рассматриваться как базовая при оценке напряженно-деформированного состояния подработанного породного массива Гремячинского месторождения.

Для учета влияния параметров отработки на функцию $\eta(t)$ для каждого набора параметров, планируемых на Гремячинском месторождении, решалась упругая задача по определению оседаний земной поверхности, обусловленных ведением очистных работ. Отношения полученных оседаний к упругим вертикальным деформациям земной поверхности Саскачеванского месторождения принимались в качестве поправочного коэффициента при использовании функции $\eta(t)$.

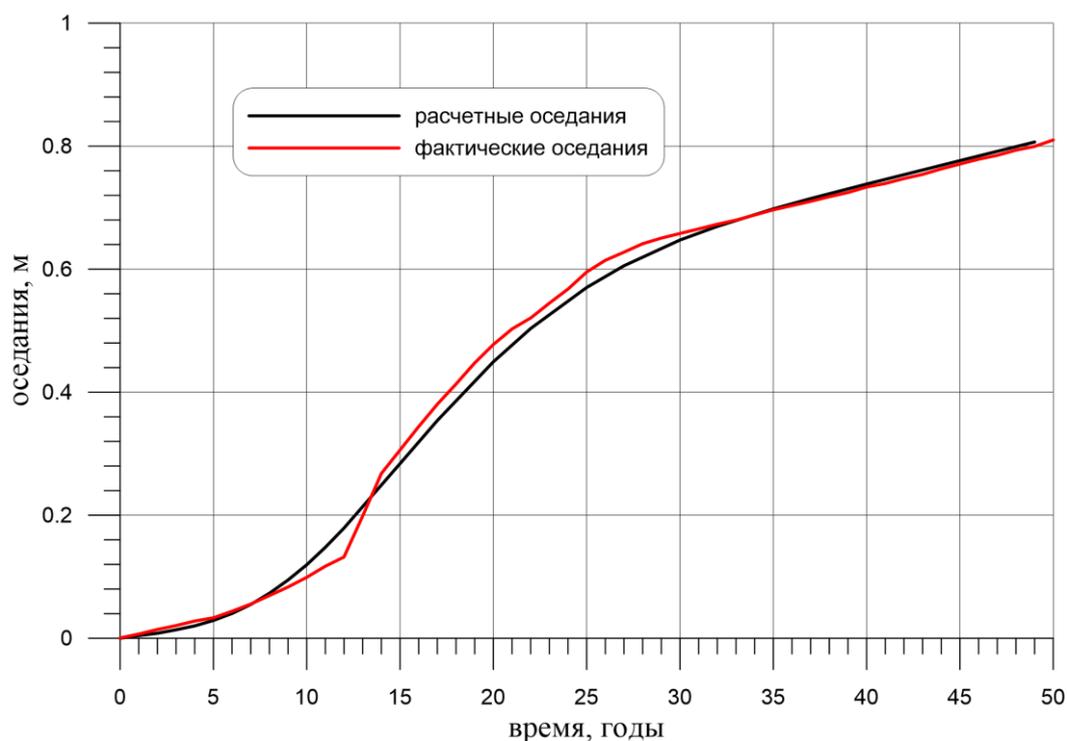


Рис. 2. Изменение расчетных и фактических оседаний земной поверхности при движении фронта очистных работ

С учетом выполненной по данным для Саскачеванского месторождения калибровки геомеханической модели Гремячинского месторождения на рис. 3 представлены оседания земной поверхности вдоль геомеханического профиля на расчетные моменты времени вплоть до конца процесса сдвижения.

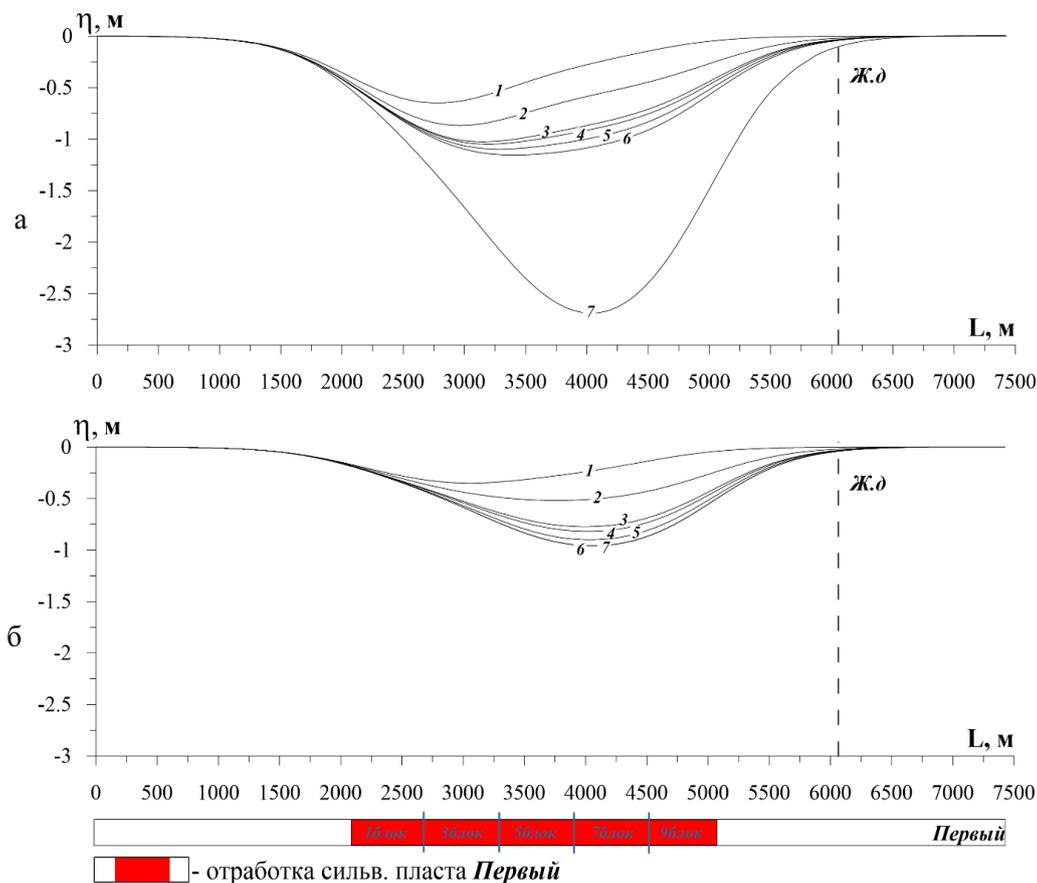


Рис. 3. Расчетные оседания земной поверхности вдоль геомеханического профиля: а) без закладки, б) с закладкой
1 – через 5 лет сначала отработки; 2 – через 10 лет; 3 – через 15 лет; 4 – через 20 лет; 5 – через 30 лет; 6 – через 40 лет; 7 – на конец процесса сдвижения

Рассматривались варианты отработки без применения закладки и с учетом гидрозакладки очистных камер с коэффициентом заполнения $A=0.8$.

Вдоль расчетного профиля с увеличением времени с момента начала отработки наблюдается плавный рост оседаний земной поверхности, которые на конец процесса сдвижения достигают 2,7 метра (рис. 3, а). Небольшое смещение максимума мульды сдвижения на начальных отрезках времени связано с порядком отработки выделенных блоков. На рис. 3, б представлены результаты с учетом закладки выработанного пространства. Гидрозакладка существенно улучшает горнотехническую ситуацию в районе исследований, максимальные оседания земной поверхности не превышают 0,9 метра.

Сравнение с оседаниями, полученными по разработанной для ВКМКС методике, демонстрирует заметное качественное и количественное отличие в развитии деформаций земной поверхности во времени. По-видимому, учитывая определенное подобие условий отработки Саскачеванского и Гремячинского месторождений, такой характер изменения оседаний является более реалистичным и может рассматриваться как приоритетный при выборе модели прогноза сохранности ВЗТ.

Таким образом, на основе информации о развитии процесса сдвижения земной поверхности для условий Верхнекамского и Саскачеванского калийных месторождений выполнена калибровка геомеханической модели. Показано, что более предпочтительной является калибровка по данным о нарастании оседаний земной поверхности для Саскачеванского месторождения вследствие подобия горно-геологических и горнотехнических условий разработки.

Работа выполнена в рамках государственного задания №0422-2019-0148-С-01.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горно-обогатительный комбинат по добыче и обогащению калийных солей мощностью 2,3 млн. т/год 95% КСЛ Гремячинского месторождения Котельниковского района Волгоградской области. Рудник Гремячинского ГОК: Проектная документация. Раздел 5 / АО «ВНИИ Галургии». – Пермь, 2016.
2. Технический проект отработки Гремячинского месторождения подземным шахтным способом: Проектная документация. Раздел 2. Геологическое строение шахтного поля. 71.002-ГГ / ОАО «Галургия». – Пермь, 2015.
3. Амусин Б.З. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 162-166.
4. Vagayakh A.A., Samodelkina N.A Rheological analysis of geomechanical processes // Journal of Mining Science. – 2005. – V. 41, № 6. – P. 522-530. DOI: 10.1007/s10913-006-0015-x.
5. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
8. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
9. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2020.2.6

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИКОНТУРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ГОРИЗОНТОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

И.А. Морозов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния одиночной горной выработки, пройденной на глубине 1100 м в соляных породах Гремячинского рудника. Поведение пород описывалось идеальной упруго-пластической средой, что соответствует моменту проходки выработки. Задача решалась методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. Оценка состояния приконтурных пород в момент проходки выработки выполнялась по критерию прочности Кулона-Мора.

По результатам исследования установлено, что для рассмотренных горно-геологических, горнотехнических условий наибольший размер зоны сдвиговой нарушенности характерен для боков выработок, локализованной в основном в пласте силвинита. Установлено образование локальных участков повышенных растягивающих напряжений в момент проходки как в кровле, почве, так и в боках выработок.

Полученные результаты предназначены для обоснования способов повышения устойчивости элементов горных выработок.

Ключевые слова: соляные горные породы, гидростатическое поле напряжений, прочность, зоны нарушенности, устойчивость выработок.