УДК 622.83

О мерах охраны калийных рудников от затопления

А.А.БАРЯХ¹, Е.А.ГУБАНОВА²✉¹ Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Пермь, Россия² Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

Разработка месторождений водорастворимых руд связана с необходимостью обеспечения сохранности водозащитной толщи (ВЗТ), отделяющей водоносные горизонты от выработанного пространства рудника. Одним из индикаторов уровня техногенной нагрузки на пласты ВЗТ являются оседания земной поверхности, определяющие характер формирования мульды сдвижения земной поверхности. Наибольшую опасность нарушения сплошности водозащитной толщи составляют участки, расположенные в краевых частях мульды сдвижения.

Применительно к условиям Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей методами математического моделирования показано, что в качестве индикаторов опасности сквозного разрушения водозащитной толщи могут быть приняты следующие параметры мульды сдвижения: длина краевой части, нормированная на глубину горных работ, и максимальные оседания земной поверхности. Критическое сочетание этих показателей обуславливает нарушение сплошности краевой части водозащитной толщи. Данные параметры мульды сдвижения легко контролируются инструментальными методами и могут быть включены в основу общей системы мониторинга состояния водозащитной толщи на калийных рудниках.

В целях обеспечения защиты рудника от прорыва пресных вод необходимым является создание в краевых частях выработанного пространства у постоянно или временно остановленных границ горных работ зон смягчения. Рассмотрены различные варианты формирования зон смягчения. Численными экспериментами установлено, что наиболее эффективным способом обеспечения сохранности водозащитной толщи является создание зон смягчения путем закладки очистных камер нижнего обрабатываемого пласта или исключением его из отработки.

Ключевые слова: математическое моделирование; разрушение; водозащитная толща; мульда сдвижения; оседания; зона смягчения

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 19-77-30008.

Как цитировать эту статью: Барях А.А. О мерах охраны калийных рудников от затопления / А.А.Барях, Е.А.Губанова // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613-620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613

Введение. Особенность разработки месторождений водорастворимых руд связана с необходимостью гарантированной сохранности водозащитной толщи (ВЗТ), отделяющей водоносные горизонты от выработанного пространства рудника [19]. Это обеспечивается применением камерной системы разработки с поддержанием ВЗТ на междуканальных целиках. Одним из индикаторов уровня техногенной нагрузки на пласты ВЗТ являются оседания земной поверхности, определяющие характер формирования мульды сдвижения земной поверхности. Наиболее опасными по критерию нарушения сплошности ВЗТ являются участки, приуроченные к краевым частям мульды сдвижения [2].

Для снижения градиента оседания у постоянных или длительно остановленных границ горных работ применяются горно-технические меры охраны в виде зон смягчения, наличие которых позволяет уменьшить деформацию пород ВЗТ. Формирование зон смягчения может осуществляться путем изменения параметров камерной системы разработки, применением закладки очистных камер или исключением из очистной выемки одного из рабочих пластов. Способы создания зон смягчения на границах горных работ за счет изменения ширины междуканальных целиков рассмотрены в работах [11, 13]. Эффективность применения закладки как меры защиты рудников от затопления рассматривалась во многих исследованиях [7, 11, 12, 18, 20, 21]. Одновременно отмечается, что закладка выработанного пространства отходами калийного производства позволяет минимизировать негативное воздействие добычи полезных ископаемых на окружающую среду [14, 17]. На некоторых участках возможно также создание зон смягчения за счет выемки запасов охранных целиков. Реализация этих мероприятий может снизить концентрацию горного давления и обеспечить однородный характер деформирования пластов ВЗТ [5, 6]. Вместе с тем актуальной задачей остается выбор для конкретных горно-геологических условий подземной

Рис. 1. Расчетная схема математического моделирования

ее краевой части L , нормированной на глубину горных работ H , и максимальными оседаниями земной поверхности $\eta_{\max}$ в зоне полной подработки (рис.1).

Условие полной подработки продуктивных калийных пластов согласно [15] выражается отношением

$$\chi = D/H \geq 1,4, \quad (1)$$

где D – размер выработанного пространства в рассматриваемом главном сечении мульды сдвижения.

Значения параметра χ устанавливаются в главных сечениях мульды сдвижения в соответствии с выражениями:

$$\chi_{11} = D_{11}/H, \quad (2)$$

$$\chi_{12} = D_{12}/H, \quad (3)$$

где D_{11} – длина рассматриваемого участка в главном сечении мульды сдвижения, располагаемом параллельно выемочным штрекам; D_{12} – ширина рассматриваемого участка в главном сечении мульды сдвижения в перпендикулярном направлении. В зоне неполной подработки ($\chi < 1,4$) краевая часть мульды сдвижения зависит от размера выработанного пространства.

При горизонтальном залегании отрабатываемых пластов краевая часть мульды сдвижения L ограничивается углом полных сдвижений ψ и граничным углом δ_0 (рис.1). Расчетная длина краевой части мульды сдвижения при полной подработке определяется по формуле [15]

$$L = H(\text{ctg } \delta_0 + \text{ctg } \psi), \quad (4)$$

где $\psi = 55^\circ$, $\delta_0 = 50^\circ$. Применительно к Верхнекамскому месторождению калийных солей (ВКМКС) относительная длина краевой части в зоне полной подработки $L/H = 1,54$.

Величина максимального оседания земной поверхности на конец процесса сдвижения рассчитывается по формуле

$$\eta_{\max} = 0,9m_0\omega p, \quad (5)$$

где m_0 – вынимаемая мощность при отработке пласта; ω – расчетный коэффициент извлечения руды из недр; p – параметр, учитывающий влияние закладки выработанного пространства при отработке рассматриваемого пласта. Коэффициент извлечения при очистной выемке одного пласта определяется выражением

разработки наиболее эффективного способа и обоснованных параметров создания зон смягчения. Только в этом случае своевременное применение дополнительных мер охраны позволит результативно управлять горным давлением, обеспечит безопасность горных работ и оптимальное извлечение калийной руды из недр.

Методика расчетов. Эффективность применения различных способов создания зон смягчения связана с характером деформирования подработанного массива, отражающегося в условиях формирования мульды сдвижения.

Мульда сдвижения земной поверхности может быть определена следующими параметрами: длиной

$$\omega = \frac{S_0}{m_0 l}, \quad (6)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения очистной камеры; l – межосевое расстояние. Параметр p учитывает влияние закладки выработанного пространства на конечные оседания земной поверхности:

$$p = 1 - A(1 - B), \quad (7)$$

где A – степень заполнения очистных камер закладкой; B – коэффициент усадки закладочного массива. При отсутствии закладки $p = 1$.

Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния ВЗТ в зависимости от длины краевой части мульды сдвижения проводилось в двухмерной упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния. Для оценки изменения состояния ВЗТ и всего подработанного массива во времени при ведении горных работ использовался реологический подход [1], основанный на разработанной модификации метода переменных модулей упругости [3], когда переменными модулями характеризуется деформирование не всех элементов геологического разреза, а лишь отработанных пластов. Определение интегральных реологических параметров подработанного массива производилось путем математической обработки фактических или прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности.

Количественная оценка степени изменения состояния ВЗТ при развитии процесса сдвижения базировалась на анализе потенциальной возможности формирования в массиве трещин субвертикальной ориентации [4]. Для анализа нарушения сплошности слоев ВЗТ в области сжатия использовался критерий Кулона – Мора в виде параболической огибающей [9]:

$$\tau_{\max} = \tau_{\text{пр}} = \sqrt{(\sigma_{\text{раст}} + \sigma_n)[2\sigma_{\text{раст}} - 2\sqrt{\sigma_{\text{раст}}(\sigma_{\text{раст}} + \sigma_{\text{сж}}) + \sigma_{\text{сж}}}]}, \quad (8)$$

где $\sigma_{\text{сж}}$ и $\sigma_{\text{раст}}$ – пределы прочности на сжатие и растяжение, σ_n – нормальное напряжение в плоскости действия максимального касательного напряжения $\tau_{\max}$. В области растяжения предельное напряжение ограничивалось пределом прочности на растяжение:

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{раст}}. \quad (9)$$

Прочностные характеристики пород, слагающих массив, в расчетах корректировались с учетом коэффициентов длительной прочности для соляных пород и структурного ослабления для пород надсоляной толщи. Принималось, что локализация пластических деформаций в пластах ВЗТ обусловлена нарушением их сплошности. Прогноз формирования зон субвертикальной техногенной нарушенности в пластах ВЗТ проводился с учетом фактора времени вплоть до достижения конечных оседаний земной поверхности. Расчеты проводились с использованием стандартной схемы метода конечных элементов в перемещениях [22] с дискретизацией рассматриваемой области на треугольные элементы первого порядка. Решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [10, 16].

Оценка влияния длины краевой части мульды сдвижения на характер разрушения пород ВЗТ. Рассматривалась камерная отработка двух сильвинитовых пластов АБ и КрII со следующими параметрами: пласт АБ – ширина камер 3,2 м, ширина междуканнерных целиков 5,8 м; пласт КрII – ширина камер 6,1 м, ширина целиков 2,9 м (межосевое расстояние $l = 9$ м). Вынимаемая мощность принималась равной 3,5 м (пласт КрII) и 2,4 м (пласт АБ). Глубина ведения горных работ составляла 320 м. Расчетная схема задачи отражена на рис.1.

Геомеханические исследования выполнялись применительно к типовому геологическому разрезу для условий Верхнекамского месторождения солей [8] (рис.2). В расчетах принималось, что средние физико-механические свойства пластов и толщ, слагающих подработанный массив, являются постоянными по латерали. Состояние подработанной толщи оценивалось исходя из интенсивности разрушения пластов ВЗТ, выраженной в формировании зон субвертикальной техногенной нарушенности. Анализ напряженного состояния ВЗТ осуществлялся на момент достижения конечных максимальных оседаний земной поверхности.

Рис.2. Типовой разрез соляной толщи ВКМКС

1 – глина; 2 – мергель; 3 – каменная соль;
4 – карналлитовая порода; 5-7 – сильвиниты:
5 – пестрые, 6 – красные, 7 – полосчатые

Характер разрушения ВЗТ для условий полной подработки $L/H = 1,54$ иллюстрируется на рис.3 и 4. При максимальных оседаниях земной поверхности ($\eta_{\max} = 2,2$ м) развитие зоны сдвиговой трещиноватости по разрезу ВЗТ ограничено ее нижним интервалом (см. рис.3, б). Нарушенности подвержены карналлитовые пласты (В, Г, Д, Е, Ж, З, И) и пласты каменной соли в нижней части ВЗТ (Б-В, В-Г, Г-Д, Д-Е). Сохранность ВЗТ обеспечивается целостностью переходной пачки (ПП) и покровной каменной соли (ПКС), а также слоев межпластовой каменной соли, развитых в ее средней части (Е-Ж, Ж-З, З-И, И-К). Необходимость применения дополнительных мер охраны в данном варианте отсутствует.

Увеличение максимальных оседаний земной поверхности однозначно характеризует повышение техногенной нагрузки на пласты, слагающие ВЗТ. В условиях полной подработки ($L/H = 1,54$) при конечных оседаниях $\eta_{\max} = 3,8$ м (рис.4, а) имеет место сквозное разрушение краевой части ВЗТ (рис.4, б), что диктует необходимость применения дополнительных мер ее охраны.

В рамках исследования процессов разрушения подработанных породных толщ показано [2], что уменьшение относительной длины краевой части мульды сдвижения обуславливает снижение величины предельных оседаний земной поверхности, при которых происходит полное разрушение ВЗТ. Таким образом, длина краевой части мульды сдвижения является важным показателем, определяющим опасность нарушения сплошности ВЗТ и необходимость применения дополнительных мер ее охраны.

Математическое моделирование состояния ВЗТ в зоне неполной подработки проводилось по аналогии с рис.3 для максимальных конечных оседаний земной поверхности $\eta_{\max} = 2,2$ м при вариации относительной длины краевой части мульды сдвижения. Изменение длины краевой части мульды сдвижения достигалось путем уменьшения размера выработанного пространства и реализации условий неполной подработки. Это при сохранении максимальных оседаний земной поверхности ведет к сокращению длины краевой части мульды сдвижения L (рис.5, а). В условиях неполной подработки ($L/H = 1,22$) все карналлитовые пласты (В, Г, Д, Е, Ж, З, И, К) и слои межпластовой каменной соли в нижней и средней части ВЗТ теряют свою целостность. В верхней части ВЗТ (интервал ПП и ПКС) также происходит потеря устойчивости каменно-соляных пластов. Для интервала ПП характерно появление трещин отрыва. Такой значительный уровень техногенного воздействия на подработанный массив предполагает необходимость принятия дополнительных мер охраны ВЗТ.

Рис.3. Расчетные оседания земной поверхности (а) и характер нарушения сплошности ВЗТ (б) в зоне полной подработки при $L/H = 1,54$ ($\eta_{\max} = 2,2$ м)

Рис.4. Расчетные оседания земной поверхности (а) и характер нарушения сплошности ВЗТ (б) в зоне полной подработки при $L/H = 1,54$ ($\eta_{\max} = 3,8$ м)

Условные обозначения см. на рис.3

Рис.5. Расчетные оседания земной поверхности (а) и характер нарушения сплошности ВЗТ (б) у остановленных границ горных работ в зоне неполной подработки при $L/H = 1,22$

Условные обозначения см. на рис.3

Таким образом, увеличение оседаний земной поверхности и уменьшение длины краевой части мульды сдвижения являются индикаторами опасности нарушения сплошности ВЗТ. При определенном сочетании этих параметров для обеспечения защиты рудников от затопления необходимым является применение дополнительных мер охраны в виде создания зон смягчения у постоянно или временно остановленных границ горных работ.

Анализ эффективности создания зон смягчения в краевой части подработанного соляного массива. Оценка эффективности различных способов создания зон смягчения базировалась на постановке, изложенной выше, для условия неполной подработки ВЗТ ($\eta_{\max} = 2,2$ м; $L/H = 1,22$). Протяженность зоны смягчения принималась равной 200 м. В геомеханических расчетах анализировались следующие варианты формирования зон смягчения:

1. Создание зоны смягчения за счет изменения параметров камерной системы разработки путем увеличения в ее пределах межосевого расстояния $l = 10,5$ м (ширина целиков: пласт АБ – 7,3 м, пласт КрII – 4,4 м) и снижения степени нагружения междукammerных целиков.
2. Закладка в пределах зоны смягчения очистных камер сильвинитового пласта КрII с коэффициентом заполнения $A = 0,8$.
3. Формирование зоны смягчения за счет исключения из отработки одного из рабочих пластов (АБ или КрII).

Результаты расчетов изменения конфигурации мульды сдвижения и разрушения пород ВЗТ при различных вариантах создания зон смягчения представлены на рис.6. Аналогичные оценки в отсутствие зоны смягчения приведены на рис.5.

Сравнительный анализ показал (рис.6), что все рассмотренные варианты создания зон смягчения обуславливают определенное выполаживание краевой части мульды сдвижения, при этом отношение L/H увеличивается с 1,22 (отсутствие зоны смягчения) до 1,40. Наиболее интенсивное выполаживание отмечается при создании зоны смягчения путем закладки камер нижнего рабочего пласта КрII ($L/H = 1,35$) или исключением его из отработки ($L/H = 1,40$). Как и следовало ожидать, снижение градиентов оседания земной поверхности напрямую отражается в характере нарушения сплошности ВЗТ. В сравнении с расчетами без применения дополнительных мер охраны ВЗТ у остановленных границ горных работ (см. рис.5) для всех вариантов создания зон смягчения (рис.6) не наблюдается локализации зон техногенной нарушенности в переходной пачке (ПП) и покровной каменной соли (ПКС). С точки зрения эффективности, по аналогии с оценками развития процесса сдвижения, предпочтительным является формирование зоны смягчения путем закладки очистных камер пласта КрII. В этом случае при прочих равных условиях разрушению подвержены лишь соляные пласты, развитые в нижней части ВЗТ (рис.6, *г*).

Максимальное снижение техногенной нагрузки на пласты ВЗТ достигается при исключении из отработки пласта КрII (рис.6, *е*). В этом случае область техногенной субвертикальной трещиноватости «разбивается» на две зоны: первая формируется в краевой части выработанного пространства по пласту КрII, вторая, менее выраженная, у постоянных или длительно остановленных границ горных работ. Разрушение ограничивается интервалом карналлитового пласта Д и самых нижних пластов каменной соли Б-В, В-Г.

Таким образом, дополнительные меры охраны в виде зон смягчения у постоянно или временно остановленных границ горных работ обуславливают снижение интенсивности техногенного воздействия на ВЗТ. При этом максимальный защитный эффект достигается при изменении условий ведения горных работ на нижнем обрабатываемом пласте.

Выводы. Признаком опасности нарушения сплошности ВЗТ является критическое сочетание параметров мульды сдвижения: максимальных оседаний земной поверхности и длины ее краевой части. Данные показатели легко контролируются инструментальными методами и могут быть включены в основу общей системы мониторинга состояния водозащитной толщи на калийных рудниках.

В целях обеспечения безопасных условий подработки водозащитной толщи на участках постоянно или длительно остановленных границ горных работ необходимым является создание зон смягчения. Наиболее эффективным способом формирования зоны смягчения является закладка нижнего обрабатываемого пласта или исключение его из очистной выемки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосин Б.З. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести / Б.З.Амосин, А.М.Линьков // *Механика твердого тела*. 1974. № 6. С. 162-166.
2. Барях А.А. Разрушение водоупорных толщ при крупномасштабных горных работах / А.А.Барях, Н.А.Самodelкина // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 6. С. 12-21.
3. Барях А.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / А.А.Барях, Н.А.Самodelкина // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2005. № 6. С. 32-41.
4. Барях А.А. Оценка условий развития трещин в подработанном соляном массиве / А.А.Барях, Н.А.Еремина, Е.А.Грачева // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 1994. № 5. С. 84-88.
5. Губанов В.А. Обоснование геомеханических параметров охраны и поддержания подготовительных и очистных выработок при разработке калийных месторождений: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с опытным производством». Солигорск, 2006. 35 с.
6. Драсков В.П. Опыт управления сдвижением горных пород на рудных месторождениях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2010. № 9. С. 269-272.
7. Константинова С.А. К оценке механической роли закладки выбранного пространства на калийных рудниках / С.А.Константинова, В.А.Соловьев, И.Б.Ваулина // *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Всероссийской конф., посвящ. 80-летию акад. М.В.Курлени*. В 2 т. 2011. Т. 1. С. 394-399.
8. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение калийных солей / ГИ УрО РАН. Пермь, 2001. 429 с.
9. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. М.: Углетехиздат, 1947. 180 с.
10. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Юрайт, 2018. 402 с.
11. Пачгин В.В. Обоснование технологии интенсивной отработки пологих калийно-магниевых пластов под водоносными горизонтами // *Проблемы недропользования: Сб. науч. тр. Ч. 1.* / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2015. С. 82-83.
12. Петровский Б.И. Частичная закладка как способ эффективного управления кровлей при селективной выемке Третьего калийного пласта / Б.И.Петровский, В.Я.Прушак, В.Я.Щерба // *Материалы, технологии, инструменты*. 2002. Т. 7. № 4. С. 86-91.
13. Повышение безопасности рудников при отработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / В.П.Зубов, Е.Р.Ковальский, С.В.Антонов, В.В.Пачгин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 5. С. 22-33. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.
14. Савон Д.Ю. Снижение воздействия отходов калийной промышленности на окружающую среду / Д.Ю.Савон, С.В.Шевчук, Р.В.Шевчук // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 8. С. 360-368.
15. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей. Пермь-Березники, 2018. 130 с.
16. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. 221 с.
17. Шкуратский Д.Н. Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств / Д.Н.Шкуратский, М.И.Русаков // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015. Вып. 3. С. 87-97.
18. Accetta J. Piping the paste // *Paste Tailings Management*. April 2010. P. 14-15.
19. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: International European Rock Mechanics Symposium. EUROCK 2018* (Saint Petersburg, Russian Federation, 22 May 2018). London: Taylor and Francis Group. 2018. Vol. 1. P. 3-16.
20. Lottermoser B. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Heidelberg: Springer. 2010. 400 p.
21. Slade N. Paste technology – an application for mine backfilling and mineralwaste disposal // *Paste Tailings Management*. April 2010. P. 2.
22. Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. Moscow: Mcgraw-Hill-London. 1971. P. 541.

Авторы: А.А.Барях, д-р техн. наук, академик РАН, директор, bar@mi-perm.ru (Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН, Пермь, Россия), Е.А.Губанова, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Elena.T@mi-perm.ru (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 15.08.2019.

Статья принята к публикации 03.09.2019.