

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ОПТИМИЗАЦИЮ УГЛОВ ЗАЛОЖЕНИЯ ОТКОСОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАРЬЕРА (НА ПРИМЕРЕ СТОЙЛЕНСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КМА)

Л. А. ЯРГ¹, проф., д-р геол.-минерал. наук
И. К. ФОМЕНКО¹, проф., д-р геол.-минерал. наук
О. М. ЖИТИНСКАЯ², преподаватель, gonjarova_o@mail.ru

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

² Старооскольский филиал Российского государственного геологоразведочного университета, Старый Оскол, Россия

Введение

Курская магнитная аномалия (КМА) — крупнейшая в мире железорудная провинция с запасами 51 млрд т и площадью 125 тыс. км², расположенная в пределах Воронежской антеклизы Восточно-Европейской платформы. В ее пределах локализуется 18 месторождений и 26 перспективных участков. Крупнейшие из них — Лебединское и Стойленское месторождения. С инженерно-геологической точки зрения КМА является природно-технической системой (ПТС) регионального уровня. ПТС Стойленского ГОКа относится к системе локального уровня, включающая в себя элементарные ПТС: карьер, гидроотвал, хвостохранилище, отвал вскрышных пород, дренажные сооружения и др. [1].

Эксплуатация Стойленского месторождения ведется открытым способом с 1969 г, размеры карьера по земной поверхности составляют около 2,3×2,5 км, глубина — 350 м [2]. Длительное функционирование ПТС Стойленского ГОКа (50 лет) привело к изменению режима и набора влияющих процессов. По виду негативных процессов сфера взаимодействия ПТС предприятия может быть разделена на пять зон: аэродинамического воздействия; фильтрации техногенных вод (купол растекания); дифференциации пульпы (расслоения пульпы и осаднения илов); миграции химических компонентов; уплотнения, суффозии и гравитационных процессов. Эти процессы позволяют обосновать наиболее информативные параметры, подлежащие наблюдению в системе мониторинга.

Карьерное поле характеризуют следующие параметры: суммарная длина фронта карьера, рельеф поверхности карьера, уступы: их число, высота и угол заложения, бермы, отвалы.

С позиции структуры элементарной ПТС «Карьер» борта карьера на конечных контурах формируются в толще пород осадочного чехла и рудно-кристаллического фундамента. В статье рассматриваются вопросы оценки устойчивости бортов карьера, сформированных в толще пород осадочного чехла.

На основе исследований предлагается алгоритм оптимизации углов заложения откосов Стойленского карьера, включающий разделение прибортового откоса на инженерно-геологические комплексы и инженерно-геологические элементы, осуществлен расчет коэффициента устойчивости различными методами.

Ключевые слова: природно-техническая система, месторождение, карьер, откос, процессы, устойчивость, модель, свойства, подземные воды.

DOI: 10.17580/gzh.2018.11.14

Характеристика объекта исследования

Рудно-кристаллический фундамент представлен комплексом метаморфических пород докембрия: железорудной коробковской и подстилающей ее стойленской свитой (мощностью 159–500 м), представленной кварцито-песчаниками с прослоями сланцев. Коробковская свита, средней мощностью 600 м, является продуктивной, сложена практически полностью железистыми кварцитами. Сложноскладчатый рудно-кристаллический фундамент разбит крупными тектоническими нарушениями различного порядка. Разрывные нарушения крутопадающие (65–85°). Зоны тектонических нарушений представляют собой зоны дробления, рассланцевания с глиной трения, сопровождающиеся зонами повышенной трещиноватости. Расстояния между зонами нарушений колеблется от 30 до 150 м. Системы трещин и разломов расчленяют рудно-кристаллический массив на блоки. По степени структурной нарушенности массив характеризуется как крупно- и среднеблочный, в коре выветривания — как мелкоблочный [2]. Практически повсеместно по породам докембрия развита кора выветривания, в вертикальном строении которой выделяются три зоны (снизу вверх): дезинтеграции, литомаржа, дисперсная.

Осадочный чехол мощностью от 60 м в долинах рек и до 200 м на водоразделах слагают (сверху вниз) [3]: четвертичные песчано-глинистые отложения — инженерно-геологический элемент № 1 (ИГЭ 1); палеогеновые глинистые отложения Киевской свиты (ИГЭ 2); мергельно-меловая формация сантонского яруса (ИГЭ 3); отложения турон-коньякского трещиноватого белого писчего мела (ИГЭ 4); плотные неоднородные по гранулометрическому составу пески с прослоями глин альб-сеноманского яруса (ИГЭ 5); юрско-неокомские песчано-алевритистые (ИГЭ 6) и глинистые отложения девона (ИГЭ 7), заполняющие глубокие впадины в кристаллическом фундаменте докембрия. Мощность коры выветривания (ИГЭ № 8) варьирует от 5 до 50 м.

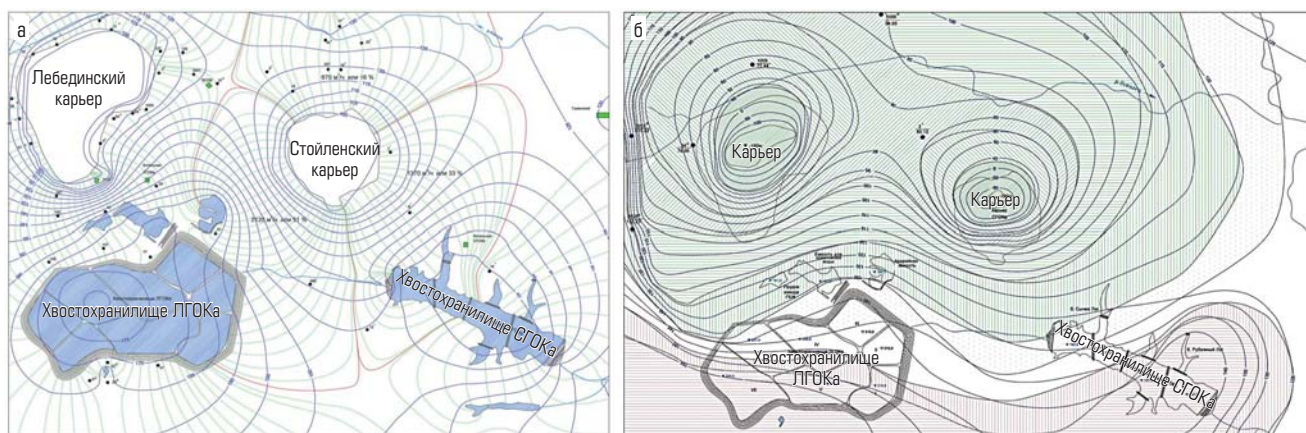


Рис. 1. Положение депрессионной воронки в Старооскольском рудном узле:

а – на 2014 г.; *б* – прогнозная карта уровней подземных вод на 2030 г. (слияние депрессионных воронок Лебединского и Стойленского месторождений)

Наличие четырех водоносных горизонтов: рудно-кристаллического, альб-сеноманского, турон-коньякского, четвертичного определяет сложность гидрогеологических условий месторождения.

Работа карьера и его дренажной сети кардинально изменяют как сам породный массив, так и динамику подземных вод. Осушение Стойленского и соседнего Лебединского карьеров осуществляется комбинированным способом с применением подземного дренажного комплекса, перехватывающего основную часть потока подземных вод за пределами штреков на альб-сеноманский и лучевые скважины на рудно-кристаллический водоносные горизонты, и внутрикарьерного дренажного комплекса: дренажные каналы, горизонтальные дренажные скважины [3].

Суммарный водоприток по контуру карьера достигает 7000 м³/с и меняется по контуру карьера вследствие неравномерной трещиноватости мергельно-меловой толщи.

Работа дренажной сети обусловила изменения гидродинамического режима вследствие образования депрессионной воронки диаметром 11 км и глубиной 40 м (рис. 1), в ходе развития которой происходит формирование техногенного режима подземных вод: интенсивное понижение напоров вод на больших площадях и многократное увеличение мощности зоны аэрации; возникновение градиентов напора и резкое возрастание скоростей фильтрации; изменение интенсивности инфильтрационного питания подземных вод; появление новых областей питания и разгрузки водоносных пластов; увеличение степени взаимосвязи поверхностных и подземных вод; усиление взаимосвязи между водоносными горизонтами посредством перетекания. Изменение гидрогеологических условий в процессе добычи руд permanently влияет на протекание горно-геологических процессов в бортах карьера.

Разработка месторождения, сопровождающаяся извлечением огромных масс горных пород и руд, складированием пустых пород, кардинально изменяет напряженное состояние породного массива. В прибортовых массивах участки пород с измененным напряженным состоянием захватывают широкие зоны, являясь областями потенциальных поверхностных разрушений, в пределах которых развиваются опасные горно-геологические процессы

(см. таблицу), приводящие к увеличению трещиноватости массива и скорости выветривания, снижению прочностных свойств пород, слагающих борта карьера.

Методика исследования устойчивости бортов карьера

Общий алгоритм оптимизации углов откосов бортов включает следующие операции.

1. Выделение инженерно-геологических комплексов (ИГК), различающихся горно-геологическими условиями и механизмом формирования процессов: ИГК-1, сложенный породами осадочного чехла, и ИГК-2, представленный породами рудно-кристаллического фундамента. В свою очередь, каждый ИКТ подразделяется на инженерно-геологические элементы (ИКЭ).

2. Инженерно-геологическая типизация бортов карьера в пределах ИГК-1 с учетом состава и свойств горных пород, динамики техногенного альб-сеноманского водоносного горизонта.

3. Обоснование расчетных геомеханических моделей определения устойчивости бортов карьера с учетом основных причин и условий, определяющих развитие процессов.

4. Выбор расчетных параметров для численного прогнозирования состояния откосов карьера. Для ИГК-1, сложенного рыхлыми и полускальными породами мощностью до 90 м, параметрами расчета явились: ρ – плотность; C – сцепление; φ – угол внутреннего трения; E – модуль деформации; μ – коэффициент Пуассона; $P_{\text{доп}}$ – пригрузка от отвалов; K_{φ} – коэффициент фильтрации (учет гидростатического давления), выветривания и микросейсмики. В пределах ИГК-2, представленного скальными породами мощностью до 600 м, составляющими расчета являются: прочность пород, их блочность, трещиноватость и ориентировка по отношению к бортам карьера.

Особенности горно-геологических условий, в том числе литолого-петрографический состав, физико-механические свойства, структурная нарушенность, параметры естественного поля напряжений, требуют индивидуального подхода к процессу прогноза поведения массива пород при вскрытии их горными выработками. Это становится возможным лишь на основе корректных данных инженерно-геологических исследований.

Предметом данного исследования является расчет устойчивости борта карьера на конечных контурах, формирующихся в толще пород осадочного чехла.

Структура геомеханической модели борта включает 8 инженерно-геологических элементов (рис. 2).

Оптимизация функционирования ПТС «Карьер» базируется на современной методологии расчета устойчивости бортов карьера [4–7]. В работе использованы следующие методы расчета:

- предельного равновесия (метод Morgenstern – Price) и упрощенные методы Bishop и Janbu), которые рассматриваются действующими нормативными документами [8] в качестве общепринятых методов расчета устойчивости склонов; метод Ямбу по своей сути близок к методу горизонтальных сил Маслова – Берера, который также рекомендован нормативными документами;
- конечных элементов.

Класс методов предельного равновесия в зависимости от числа уравнений равновесия [9, 10] можно разделить на 3 группы: удовлетворяющих общему равновесию моментов; удовлетворяющих общему равновесию сил; удовлетворяющих общему равновесию моментов и сил.

В упрощенном методе Bishop [11] удовлетворяются условия равновесия общих моментов и вертикальных сил (равновесие сдвигающих сил не соблюдается). Несмотря на то, что условия равновесия удовлетворяются не полностью, тем не менее, метод обеспечивает хорошие результаты и рекомендуется для проведения большинства практических расчетов. Вследствие того, что коэффициент устойчивости K_y входит в обе части уравнения, для решения задачи необходимо задаться начальным значением коэффициента устойчивости. Далее решение данного уравнения сводится к итерационному процессу до тех пор, пока вычисляемый K_y не окажется меньше заданной допустимой погрешности.

Упрощенный метод Ямбу [12] подобен упрощенному методу Bishop, за исключением того, что он удовлетворяет полному равновесию горизонтальных сил, но не удовлетворяет полному равновесию моментов. Сравнительный анализ результатов расчетов [9] показывает, что метод Ямбу дает заниженные результаты коэффициента устойчивости.

Morgenstern и Price [13] разработали метод расчета устойчивости откосов на основе решения двух уравнений: одно – удовлетворяет общему равновесию моментов, другое – общему равновесию горизонтальных сил. Равновесие в отсеке обеспечивается приравнением к нулю моментов сил относительно подошвы отсека и приравнением к нулю суммы проекций сил на направления нормали и касательной к подошве отсека. В результате получается система из двух дифференциальных уравнений, для решения которой в методе Morgenstern и Price вводится упрощающее допущение, касающееся зависимости между касательными E и нормальными N составляющими силами взаимодействия: $X = E\lambda f(x)$, где E – касательные составляющие сил взаимодействия; $f(x)$ – вид функциональной зависимости между E и N ; N – нормальные составляющие сил взаимодействия; λ – доля используемой функции. В методе Morgenstern и Price функциональная зависимость между E и N может быть различной. Применение уравнения делает задачу расчета устойчивости по методу Morgenstern и Price статически определенной.

При расчете методами предельного равновесия была выполнена процедура оптимизации поверхности скольжения [14] методом «кукушки» [15].

Метод конечных элементов (МКЭ) наряду с методами конечных разностей является одним из основных численных методов решения задач механики сплошной среды [9, 16].

Условия, причины и последствия развития опасных горно-геологических процессов в ходе функционирования элементарной ПТС «Карьер» Стойленского и Лебединского месторождений

Процесс	Условия	Причины	Последствия
Осыпания	Трещиноватые породы: связанные и несвязные; скальные и полускальные	Выветривание пород; взрывные работы в карьере	Выполаживание откосов. Перекрытие нижних площадок уступов. Перманентное развитие
Обрушения	Наличие поверхностей ослабления, зон дизъюнктивных нарушений и трещиноватости; контактов пород с падением в сторону карьера	Углы падения поверхностей ослабления больше 25–30°, трещиноватости – 35–40°	Выполаживание откосов. Полное или частичное перекрытие нижних площадок уступов. Представляют наибольшую опасность для технических средств и персонала
Оползневый процесс	Песчано-глинистые породы: низкие прочностные свойства пластичных глинистых пород; углы падения слоев больше угла внутреннего трения. Скальные породы: наличие глинки трения, заполняющей дизъюнктивные нарушения, падающие в сторону карьера	Изменения напряженного состояния горных пород; незарегулированность поверхностных и подземных вод; снижение прочностных свойств за счет увлажнения; генеральные углы заложения бортов менее 25–35°	Завалы, оползни деформации бортов. Перекрытие уступов. Нарушение технологического ритма. Разрушение транспортных коммуникаций
Поверхностная эрозия	Прибортовой массив сложен песчано-глинистыми грунтами	Атмосферные осадки и подземные воды, стекающие по откосу	Разрушение и подтопление уступов откоса
Фильтрационные деформации	Песчано-глинистые грунты; подземные воды с техногенным гидродинамическим режимом	Градиент изменения уровня подземных вод в результате работ дренажной системы	Подтопление откоса уступов и их частичное разрушение. Перекрытие уступов деформированными массами
Суффозия: механическая и химическая	Приоткосный массив сложен обводненными песками; содержит растворимые породы	Гидростатическое и гидродинамическое давление; выщелачивание и растворение фильтрационным потоком	Создание условий для развития оползней, оплывин, обвалов и других опасных процессов
Выпираания	Невскрытый слой пластичных глин	Изменения напряженного состояния горных пород	Пластические деформации в подошве борта карьера

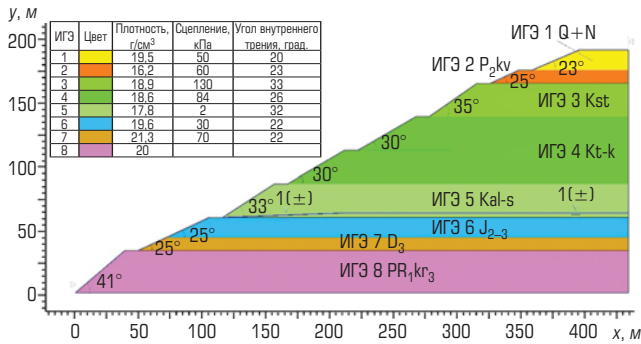


Рис. 2. Геомеханическая модель борта карьера (1(±) – уровень подземных вод)

Определение устойчивости борта выполняется методом редукиции (ступенчатого уменьшения) прочностных параметров материалов модели с доведением ее до искусственного разрушения. Состояние математической модели, при котором не может быть получено устойчивое решение краевой задачи вследствие безграничного нарастания деформаций расчетной области, трактуется как предельное. Коэффициент запаса устойчивости откосов определяется как отношение исходных прочностных параметров пород, слагающих откос, к их минимальным значениям, при которых решение краевой задачи еще возможно [9, 17].

Результаты расчета устойчивости борта

Моделирование устойчивости борта карьера выполнено по следующим схемам: локальный расчет устойчивости с определением минимального коэффициента устойчивости K_y борта (рис. 3, а); определение глобальной устойчивости породного массива (см. рис. 3, б и в; рис. 4).

Анализ полученных результатов расчета по первой схеме позволяет сделать вывод, что наиболее вероятным сценарием является локальная потеря устойчивости борта, сложенного песками.

Глобальный расчет устойчивости борта карьера породного массива был выполнен как методами предельного равновесия (в плоской и объемной постановке задачи – рис. 3, б и в соответственно), так и методом конечных элементов (см. рис. 4). Расчет по второй схеме показал, что основной деформируемый горизонт будет приурочен к кровле ИГЭ 7, представленного глинами позднедевонского возраста.

Результаты моделирования и расчетов позволили оценить факторы, определяющие устойчивость бортов карьера.

Влияние подъема уровня подземных вод на коэффициент устойчивости K_y . Одним из основных факторов, определяющим как локальную, так и глобальную устойчивость бортов карьера, является динамика техногенного водоносного горизонта, в частности формирование депрессионной воронки. На рис. 5, а приведены зависимости локального (а) и глобального (б) K_y от положения уровня подземных вод. Как видно, при повышении уровня подземных вод глобальная устойчивость резко снижается, локальная устойчивость борта нарушается при повышении уровня подземных вод альб-сеноманского горизонта на 2,7 м.

Влияние прочности песков на глобальную устойчивость борта. Изменение уровня и возникновение градиентов напора в песках

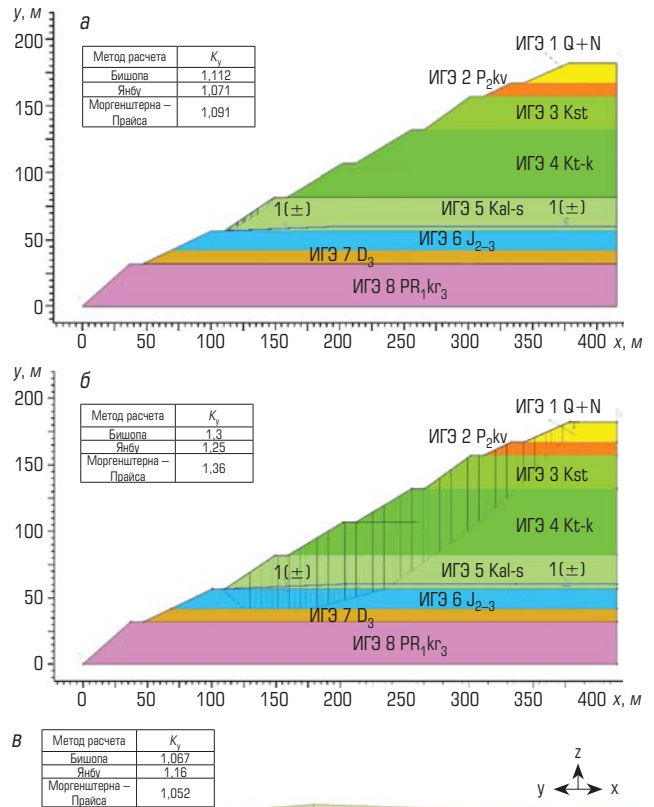


Рис. 3. Модель расчета устойчивости борта карьера методом предельного равновесия:

а – локальный расчет с определением минимального K_y ; б – глобальный расчет (плоская постановка задачи); в – глобальный расчет (объемная постановка задачи)

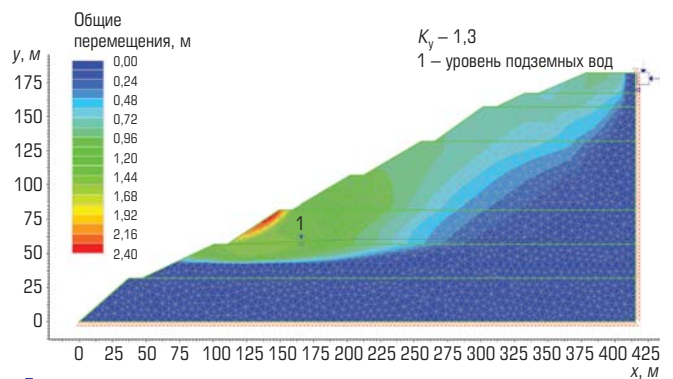


Рис. 4. Модель глобального расчета устойчивости борта карьера методом конечных элементов

альб-сеноманского водоносного горизонта вследствие работы дренажной системы приводит к развитию суффозионного процесса, изменению влажности и снижению прочностных свойств песков (угол внутреннего трения). На рис. 5 приведен график (в), свидетельствующий о весьма значительном влиянии угла внутреннего трения песков на глобальную устойчивость борта.

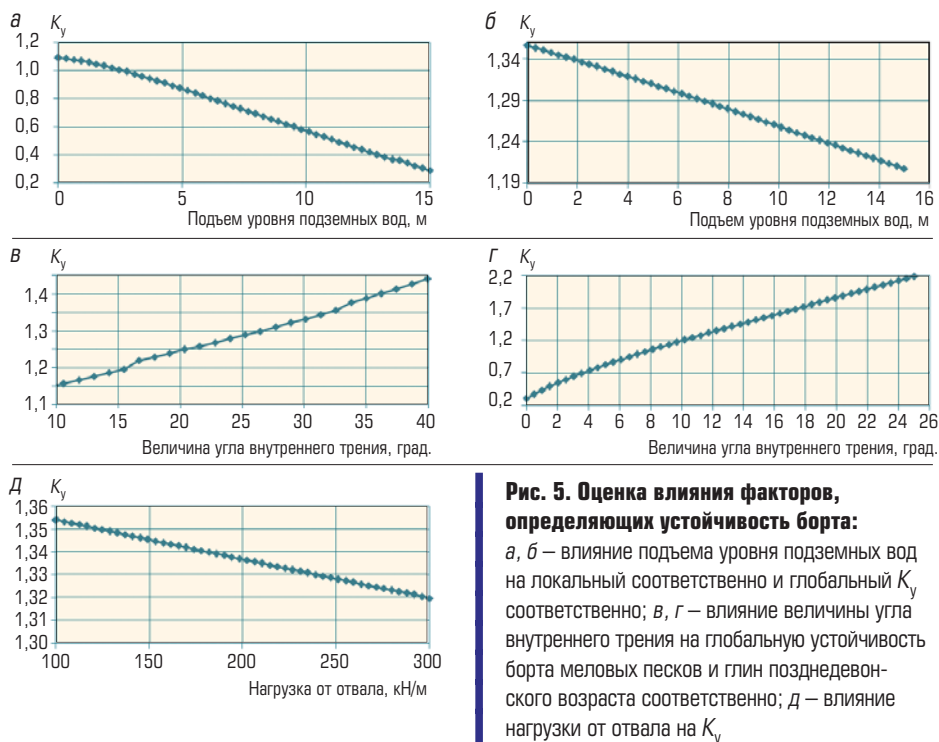


Рис. 5. Оценка влияния факторов, определяющих устойчивость борта:
 а, б – влияние подъема уровня подземных вод на локальный соответственно и глобальный K_y соответственно; в, г – влияние величины угла внутреннего трения на глобальную устойчивость борта меловых песков и глин позднедевонского возраста соответственно; д – влияние нагрузки от отвала на K_y

Влияние величины порового давления в глинах позднедевонского возраста на глобальную устойчивость борта. При нестационарном гидрогеологическом режиме в зарубежной практике при оценке устойчивости откосов, сложенных глинистыми грунтами, рекомендуется использовать в расчетах недренируемую прочность [17, 18].

Влияние порового давления на сопротивление сдвигу описывается следующим уравнением: $\tau = (\sigma - u) \times \text{tg}\phi + c$, где τ – сопротивление сдвигу, u – поровое давление; σ – эффективные напряжения; ϕ – угол внутреннего трения; c – сцепление.

Изменение величины порового давления может быть учтено за счет изменения величины угла внутреннего трения. Например, если $u = 1/2\sigma$, $\text{tg}\phi$ будет равен половине расчетного коэффициента трения грунтов основного деформируемого горизонта (ОДГ), определенного по данным инженерно-геологических изысканий [19]. Использование такого подхода в практике расчетов устойчивости склонов позволяет, с одной, стороны упростить расчеты, а с другой – получить достаточно объективную картину поведения расчетного склона при изменении гидрогеологических условий.

На рис. 5, г приведена зависимость глобального K_y от величины угла внутреннего трения глин девонского возраста. При использовании в расчетах показателя недренируемой прочности верхнедевонских глин (угол внутреннего трения равен 0) борт теряет устойчивость. По механизму нарушения глобальной устойчивости борт вскрышных грунтов может быть отнесен к смешанному типу – скольжения-выдавливания.

Влияние техногенной нагрузки от отвала вскрышных пород. Как видно из графика (рис. 5, д), нагрузка от отвала незначительно влияет на глобальную устойчивость борта. Однако, учитывая тот факт, что глобальное нарушение устойчивости может развиваться по механизму выдавливания верхнедевонских глин, с учетом их длительной прочности, влияние данного фактора в средне-

срочном прогнозе может стать более значимым.

Заключение

1. В соответствии с существующими рекомендациями, значения коэффициентов запасов устойчивости уступов в пределах осадочной толщи и рудно-кристаллического скального массива определяются: для рабочих уступов $K_y = 1,2$; для временно нерабочих уступов (время стояния до 5 лет) $K_y = 1,5$; для нерабочих уступов (время стояния более 5 лет) $K_y = 2$. Принятые в настоящее время углы заложения откосов в осадочной толще являются недостаточными для обеспечения длительной устойчивости борта карьера при неблагоприятном сочетании факторов, определяющими прочность слагающих его пород.

2. Основным фактором, влияющим на устойчивость борта является нестационарный гидрогеологический режим и связанные с ним суффозионные процессы в песках и колебания порового давления в глинах позднедевонского возраста.


3. Развитие процессов, инициируемое горными работами, носит прогрессирующий характер в пространственно-временном отношении: массовые взрывы, перманентное углубление карьера и функционирование дренажных установок приводят к изменению напряженного состояния породного массива, разуплотнению пород, увеличению размеров депрессионной воронки, активизации инженерно-геологических процессов. Поэтому актуальность проблемы обеспечения устойчивости породного массива в динамике развития горных работ очевидна.

4. Дальнейшая разработка месторождения (проектная глубина карьера – 450 м) требует контроля и прогноза состояния приоткосных массивов. Прогнозные оценки устойчивости бортов карьера должны выполняться с учетом изменения компонентов горно-геологических условий под влиянием техногенных взаимодействий производственного процесса и корректироваться с учетом их влияния на величину коэффициента устойчивости.

5. Оптимизация функционирования ПТС «Карьер» должна базироваться на современной методологии расчета устойчивости бортов карьера. Эффективность рассмотренных в работе методов (Моргенштерна – Прайса и упрощенные методы Бишоп и Ямбу, конечных элементов) следует уточнять путем верификации с натурными данными в рамках системы мониторинга.

Расчеты устойчивости выполнены в программном комплексе Rocscience: методами предельного равновесия – в Rocscience Slide 2018, методом конечных элементов – в Rocscience RS2. Кафедра инженерной геологии РГПУ является участником Rocscience Education Program.

Библиографический список

1. Бондарик Г. К., Ярг Л. А. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии : учеб. пособие. – М. : КДУ, 2015. – 296 с.
2. Житинская О. М., Ярг Л. А. Изменение компонентов природной среды при длительной разработке месторождений открытым способом (на примере КМА) // Известия вузов. Геология и разведка. 2018. № 1. С. 49–61.
3. Житинская О. М., Ярг Л. А., Фоменко И. К. Оптимизация системы мониторинга природно-технической системы «Железорудные месторождения» на базе анализа временных рядов // Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ) : матер. междунар. науч.-практ. конф. – М. : НПП «Филтроткани», 2018. Т. 2. С. 220–221.
4. Bar N., Heweston A. Considerations for Effectively Using Probability of Failure as a Means of Slope Design Appraisal for Homogeneous and Heterogeneous Rock Masses // International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. 2018. Vol. 12. No. 2. P. 66–72.
5. Wang R., Wang X., Yin K., Zhao Y. Landslide stability analysis based on GeoStudio // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 634–638. P. 3701–3704.
6. Годовников Н. А., Дунаев В. А. Вероятностный метод прогнозирования потенциальных деформаций уступов карьера в массивах скальных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С. 81–83.
7. Зеркаль О. В. Современные тенденции в изучении оползневых процессов // Инженерно-геологические задачи современности и методы их решения : матер. науч.-практ. конф. – М. : Геомаркетинг, 2017. С. 102–110.
8. СП 11-105-97. Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. II. Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов. – М. : ПНИИИС Госстроя России, 2000. – 118 с.
9. Пендин В. В., Фоменко И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. – М. : Ленанд, 2015. – 320 с.
10. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. – Calgary : GEO-SLOPE International Ltd., 2004. – 396 p.
11. Bishop A. W. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes // Geotechnique. 1955. Vol. 5. Iss. 1. P. 7–17.
12. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis // Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes. – Stockholm, 1954. P. 43–49.
13. Morgenstern N. R., Price V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces // Geotechnique. 1965. Vol. 15. Iss. 1. P. 79–93.
14. Malkawi A. I. H., Hassan W. F., Sarma S. K. Global Search Method for Locating General Slip Surface Using Monte Carlo Techniques // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001. Vol. 127. Iss. 8. P. 688–698.
15. Wu A. Locating General Failure Surfaces in Slope Analysis Via Cuckoo Search / Rocsience Inc., 2012. – 52 p.
16. Wang R., Wang X., Yin K., Zhao Y. Landslide stability analysis based on GeoStudio // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 634–638. P. 3701–3704.
17. Duncan J. M., Wright S. G., Brandon T. L. Soil Strength and Slope Stability. 2nd ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 336 p.
18. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов : пер. с англ. – М. : Стройиздат, 1988. – 240 с.
19. Фоменко И. К., Иванов А. И., Волков С. Н. Расчет устойчивости склонов вдоль трассы Центральной кольцевой автомобильной дороги (ЦКАД) // Геотехнические проблемы мегаполисов : тр. Междунар. конф. по геотехнике. – СПб. : ПИ «Геореконструкция», 2010. Т. 5. С. 1761–1765. 

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 11, pp. 76–81
DOI: 10.17580/gzh.2018.11.14

Evaluation of slope optimization factors for long-term operating open pit mines (in terms of the Stoilensky iron ore deposit of the Kursk Magnetic Anomaly)

Information about authors

L. A. Yarg¹, Professor, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences

I. K. Fomenko¹, Professor, Doctor of Geologo-Mineralogical Sciences

O. M. Zhitinskaya², Lecturer, gonjarova_o@mail.ru

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia

²Stary Oskol Division, Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Stary Oskol, Russia

Abstract

Open pit mining of the Stoilensky iron ore deposit entails extraction of huge volumes of overburden and ore and radically changes stress–strain state in subsoil.

The long-term operation (50 years) of the nature-and-technology system (NTS) at Stoilensky Mining and Processing Plant has altered ranges, regimes and sets of influential processes. With respect to the negative effects, the interaction sphere inside NTS can be divided into 5 zones: aerodynamic impact; process water seepage (spreading dome); slurry differentiation (stratification and sludge settling); migration of chemicals; compaction, suffusion and gravity processes (slides, falls, landslides and mudflows). Thereupon, it is possible to substantiate the most informative parameters to be monitored. The ultimate pit limit is reached in the sedimentary cover overlying the uneven ore crystal basement.

This study estimated influence factors of slope stability for Stoilensky open pit mine to ensure its stable operation in the sedimentary cover rock mass.

Optimization of NTS performance is based on the modern design procedure for pit wall slope stability. This study involved: 1) the method of limit equilibrium with Slide7, Slide3D (Morgenstern–Price and simplified Bishop and Janbu); 2) FEM with Rocscience RS2, which is a class of numerical methods recommended for the current regulatory documentation applications.

The pit wall slope stability was modeled in two schemes: local stability calculus with the minimum stability coefficient (K_s) for pit wall; global stability assessment. The global pit wall stability was calculated using both the methods of limit equilibrium (in 2D and 3D formulation) and finite elements. The variability patterns of the geological engineering environment components are the basis to set certain limit parameters for Stoilensky open pit mine such that the long-term operating system is never beyond the allowable ranges. This includes assessment of the pit wall stability coefficient with regard to induced change in state and strength of the pit wall rock mass, dynamics of groundwater and additional load on pit walls from overburden dumps.

Keywords: nature-and-technology system, deposit, open pit mine, slope, processes, stability, model, properties, groundwater.

References

1. Bondarik G. K., Yarg L. A. Engineering Geology. Theory and Practice. Philosophy and Methodology of Geology: Educational Aid. Moscow : KDU, 2015. 296 p.

2. Zhitinskaya O. M., Yarg L. A. Changes in the components of the natural environment with the long-term development in the opencast mines (the case of KMA). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018. No. 1. P. 49–61.
3. Zhitinskaya O. M., Yarg L. A., Fomenko I. K. Optimizing monitoring system for iron ore deposit nature-and-technology system based on the time series analysis. *Development Strategy for Geological Exploration of Subsoil: Present and Future (MGRI–RGGRU is 100): International Scientific–Practical Conference Proceedings*. Moscow NPP Filtrtkani, 2018. Vol. 2. pp. 220–221.
4. Bar N., Heweston A. Considerations for Effectively Using Probability of Failure as a Means of Slope Design Appraisal for Homogeneous and Heterogeneous Rock Masses. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*. 2018. Vol. 12. No. 2. pp. 66–72.
5. Wang R., Wang X., Yin K., Zhao Y. Landslide stability analysis based on GeoStudio. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 634–638. pp. 3701–3704.
6. Godovnikov N. A., Dunayev V. A. A probabilistic method of predicting potential deformations of the ledges in solid rock. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2015. No. 5. pp. 81–83.
7. Zerkal O. V. Modern trends in the landslide process research. *Problems and Solutions of the Modern Engineering Geology: Scientific–Practical Conference Proceedings*. Moscow : Geomarketing, 2017. pp. 102–110.
8. SP 11-105-97. Code. Construction Site Investigation. Part II: Regulations for Operations in the Zones of Hazardous Geological and Engineering Geological processes. Moscow : PNIIS Gosstroya Rossii. 2008. 118 p.
9. Pendin V. V., Fomenko I. K. Methodology of Landslide Hazard Estimation and Prediction. Moscow : Leonand, 2015. 320 p.
10. Krahn J. Stability modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. Calgary : GEO-SLOPE International Ltd., 2004. 396 p.
11. Bishop A. W. The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*. 1955. Vol. 5, Iss. 1. pp. 7–17.
12. Janbu N. Application of composite slip surface for stability analysis. *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes*. Stockholm, 1954. pp. 43–49.
13. Morgenstern N. R., Price V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*. 1965. Vol. 15, Iss. 1. pp. 79–93.
14. Malkawi A. I. H., Hassan W. F., Sarma S. K. Global Search Method for Locating General Slip Surface using Monte Carlo Techniques. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2001. Vol. 127, Iss. 8. pp. 688–698.
15. Wu A. Locating General Failure Surfaces in Slope Analysis via Cuckoo Search. Rocscience Inc., 2012. 52 p.
16. Wang R., Wang X., Yin K., Zhao Y. Landslide stability analysis based on GeoStudio. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 634–638. pp. 3701–3704.
17. Duncan J. M., Wright S. G., Brandon T. L. Soil Strength and Slope Stability. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc., 2014. 336 p.
18. Huang Y. H. Stability Analysis of Earth Slopes. New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1983. 316 p.
19. Fomenko I. K., Ivanov A. I., Volkov S. N. Calculation of Slope Stability along the Central Beltway. *Geotechnical Problems of Mega-Cities: International Conference on Geotechnical Engineering*. Saint-Petersburg : PI Georekonstruktsiya, 2010. Vol. 5. pp. 1761–1765.