

Д.Л.УСТЮГОВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, *ustiugov@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

D.L.USTYUGOV, PhDr in geol. & min. sc, associate professor, *ustiugov@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ПОСТОЯННОДЕЙСТВУЮЩАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД (КУРСКАЯ МАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ)

Основное назначение исследований связано с оценкой водопритоков в выработанное пространство Яковлевского железорудного месторождения методом математического моделирования. Использование постояннодействующих математических моделей позволяет оперативно реагировать на быстро меняющуюся гидрогеологическую обстановку, оценивать прогнозные водопритоки в горные выработки в ходе дальнейшего ведения горных работ и решать инженерные задачи по оптимизации дренажных мероприятий.

Ключевые слова: математическое моделирование, водопритоки, Яковлевское железорудное месторождение.

CONSTANTLY WORKING HYDRODINAMICAL MODEL OF YAKOVLEVSKY RICH IRON-ORES DEPOSIT (KURSK MAGNETIC ANOMALY)

Main goal of researches is bound with an estimation of values of inflows of water in goal Yakovlevsky of an iron-ore deposit using a method of mathematical modeling.

Usage of constantly working mathematical models allows reacting operatively to fast varying hydro-geological circumstances and allows to value prognosis inflows of water in mine workings during the further support of mining operations and to solve engineering tasks on optimization of drainage actions.

Key words: mathematical modeling, water inflows, Yakovlevsky iron-ore deposit.

Принятие обоснованных решений по управлению процессом недропользования для геоэкологических систем со сложными природными геолого-гидрогеологическими условиями и интенсивным техногенным воздействием возможно при использовании компьютерно-информационных технологий на базе математических моделей, созданных с применением современных методов схематизации природных гидрогеологических условий. На примере разработанной нами постояннодействующей гидродинамической модели Яковлевского месторождения богатых железных руд рассмотрим основные

принципы создания математической модели и предлагаемые пути решения поставленных задач.

Природная гидрогеологическая система Яковлевского месторождения схематизирована в виде гидравлически связанной системы напорных горизонтов, разделенных слабопроницаемыми слоями, с учетом имеющихся представлений о питании, стоке и разгрузке водоносных горизонтов. При этом за основу была принята гидрогеологическая стратификация соответствующего масштаба для данной территории; учтены водоотлив и степень изученно-

сти водоносных горизонтов по гидрогеологическим параметрам и уровенному режиму.

При гидрогеологической схематизации в плане (обосновании плановых границ модели) принималось во внимание: топология водосборных бассейнов, границы распространения водоносных горизонтов, водопонизительных систем горных выработок, т.е. площадь и интенсивность техногенного воздействия на исследуемой территории. При гидрогеологической схематизации во времени проводился анализ рядов режимных наблюдений за уровнями подземных вод, ретроспективных данных по водоотливу.

В обводнении Яковлевского железорудного месторождения принимают участие два водоносных горизонта – руднокристаллический и нижнекаменноугольный, гидравлически взаимосвязанные между собой. В свою очередь, нижнекаменноугольный водоносный горизонт на отдельных участках представляет единую систему с келловейским (где мощность водоупорных батбайоских глин, разделяющих эти горизонты, уменьшается до 10 м, в основном мощность глин бат-байоса составляет 30-50 м), а в местах непосредственного контактирования водоносных известняков нижнего карбона с рудным телом – и с руднокристаллическим горизонтом. Однако наличие плотных перетолженных руд, карбонатизированных бокситовых образований в кровле руднокристаллической толщи в пределах рудных полос, а также глинистых отложений в подошве нижнекаменноугольных отложений в лежачем и висячем боках рудного тела затрудняет взаимосвязь нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов.

Учитывая вышеизложенное, при схематизации гидрогеологических условий исследуемого района принята трехслойная плановая модель геофильтрации подземных вод: руднокристаллический водоносный горизонт, разделяющий слабопроницаемый слой и нижнекаменноугольный водоносный горизонт.

Математическое моделирование Яковлевского месторождения осуществлялось с применением программы «Processing

Modflow 5/3» (В.Чанг и В.Кинцельбах), которая реализует численную конечно-разностную модель фильтрации подземных вод для расчета пространственно-временного распределения напоров в трехмерной постановке и базируется на уравнении неразрывности фильтрационного потока.

Ввод исходной информации осуществлялся в форматном виде, который более удобен при моделировании неоднородных водоносных горизонтов.

Для проведения моделирования вся область фильтрации была разбита на 12996 расчетных блоков, по оси абсцисс – 114 блоков, по оси ординат – 114 блоков. Задача решалась на неравномерной сетке, причем в центральной части разбивка более дробная (в районе Яковлевского рудника), размер каждого блока 25×25 м. К периферии области моделирования размеры блоков увеличивались до 500×500 м. Моделируемая площадь в итоге получилась равной 36 км².

Для построения матриц кровли и подошвы нижнекаменноугольного водоносного горизонта использовалась карта мощности и рельефа подошвы глинисто-известняковой толщи С₁; для остальных слоев – инженерно-геологические разрезы по профилям и база данных по скважинам, вскрывшим руднокристаллический водоносный горизонт.

Гидродинамические границы модели и их физико-математическое представление в численной схеме выбирались исходя из анализа общей геолого-гидрогеологической ситуации. Нижняя граница области геофильтрации принята по абсолютной отметке минус 800 м в соответствии с данными о распространении тектонических разломов в массиве руднокристаллических пород до глубины 1,0-1,1 км.

По внешней границе области фильтрации в обоих водоносных горизонтах учитывалась схема «неограниченного пласта» (условия I рода, $H = \text{const}$).

При моделировании производственного понижения дренажная система Яковлевского рудника в нижнекаменноугольном и руднокристаллическом водоносных горизонтах реализована на модели граничными

условиями II рода ($Q = \text{const}$). Водоприток к горным выработкам (околоствольные горные выработки, горные выработки порожнякового и вентиляционного квершлага, штрека между околоствольными дворами, откаточного штрека лежачего блока, грузового квершлага, горные выработки первоочередного выемочного участка) реализованы на модели через граничные условия III рода с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке минус 425 м через специальный расчетный блок «Drain» программы «Processing Modflow 5/3».

Калибровка модели проводилась в процессе решения обратных (эпигнозных) задач с целью уточнения фильтрационных параметров водоносных горизонтов и разделяющего слабопроницаемого слоя. Для этого проводились численные эксперименты при различных граничных условиях, учете взаимосвязи водоносных горизонтов, изменении фильтрационных характеристик водоносных горизонтов и параметрах взаимодействия водоносных горизонтов на различные моменты времени.

Правильность оценки параметров модели определялась: 1) степенью сходимости модельных и фактических отметок уровней подземных вод; 2) соответствием реального и модельного водоприток в горные выработки. При калибровке моделей использовались среднегодовые уровни подземных вод по скважинам системы гидродинамического мониторинга.

Анализ соответствия между модельными и фактическими положениями уровней подземных вод нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов по опорным точкам (см. таблицу) показывает хорошую сходимость результатов.

Помимо сравнительной оценки по уровням водоносных горизонтов выполнена также корректировка модели по модельным и фактическим водопритокам по состоянию на 2010 г. Фактический водоприток к горным выработкам $10560 \text{ м}^3/\text{сут}$, модельный $10675 \text{ м}^3/\text{сут}$; абсолютная погрешность $115 \text{ м}^3/\text{сут}$; относительная погрешность 1,1 %.

Результатами решения эпигнозных задач явились карты фильтрационных пара-

метров водоносных горизонтов, карты гидроизопьез, балансовые характеристики (водоприток, перетекание, горизонтальный и вертикальный водообмен между горизонтами).

Подводя итоги выполненных работ по построению и калибровке модели можно сделать следующие выводы:

- созданная модель не противоречит всей совокупности имеющейся геолого-гидрогеологической информации;
- модель адекватно отражает основные закономерности, принятые при схематизации природных гидрогеологических условий;
- реакция модели функционально (количественно и качественно) соответствует реакции природной гидрогеологической системы на различного рода возмущения.

Следовательно, созданная модель может служить основой для принятия различных прогнозных решений и оценок состояния геологической среды.

Решение прямых (прогнозных) задач проводилось с целью анализа возможного изменения гидродинамической обстановки, выработки рекомендаций и принятия решений по повышению безопасности эксплуатации Яковлевского рудника.

На разработанной гидродинамической модели были реализованы следующие прогнозны задачи:

- определение водоприток в горные выработки Яковлевского железорудного месторождения при выходе рудника на проектную мощность;
- расчеты перетекания из каменноугольного водоносного горизонта в руднокристаллический водоносный горизонт через разделяющий слабопроницаемый слой.

Моделирование водоприток в горные выработки месторождения осуществлялось с учетом возрастания коэффициента фильтрации руднокристаллического водоносного горизонта и увеличения фронта очистных работ, что существенно определяет безопасные условия ведения выемки полезных ископаемых под неосушенным нижнекаменноугольным водоносным горизонтом.

Анализ выполненных прогнозных расчетов показал, что при увеличении коэффициента фильтрации в 2-4 раза среднегодовой

**Уровни подземных вод нижнекаменноугольного и руднокристаллического водоносных горизонтов
(по состоянию на 2010 г.)**

Номер скважины	Место расположения скважины	Абсолютная отметка уровня подземных вод, м		Абсолютная погрешность, м
		фактическая	модельная	
32-кр	Лежачий бок	107,57	109,8	2,23
7-кр	« «	91,46	93,5	2,04
28-кр	Рудная полоса	48,50	50,6	2,1
640	Висячий бок	55,58	57,2	1,62
638	« «	50,39	51,8	1,41
610	« «	-320,35	-329,8	9,45
642	Рудная полоса	-341,99	-347,2	5,21
603	Лежачий бок	-150,36	-156,7	6,34
619	Висячий бок	-110,74	-115,8	5,06

водоприток из руднокристаллического водоносного горизонта к первоочередному участку отработки будет находиться в диапазоне 200-360 м³/ч.

Ведение горных работ под неосушенными водоносными горизонтами при условии закладки выработанного пространства быстро твердеющими материалами приводит к уменьшению водопритоков. Если брать в расчет, что коэффициент фильтрации руднокристаллического водоносного горизонта с учетом закладки выработанного пространства будет составлять 0,05 м/сут, водоприток к горным выработкам не превысит 165 м³/ч.

Необходимо отметить, что водопритоки в горные выработки будут существенно зависеть от параметров разделяющего

слоя и целика руднокристаллических пород. Значения таких водопритоков получены при коэффициенте фильтрации и мощности глинистого слоя в контактной зоне соответственно $3 \cdot 10^{-5}$ м/сут и 14,5 м. Мощность целика принималась по минимальному значению 53 м, коэффициент фильтрации – 0,28 м/сут. Водопритоки к дренажной системе будут формироваться, главным образом, за счет перетекания из нижнекаменноугольного водоносного горизонта. При коэффициенте фильтрации разделяющего слоя $3 \cdot 10^{-5}$ м/сут перетекание будет составлять порядка 305 м³/ч.

Таким образом, водоприток к горным выработкам при выходе рудника на проектную мощность может достигать 470 м³/ч.