УДК 551.49.018

Д.Л.УСТЮГОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ ОТРАБОТКИ ЯКОВЛЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Основная цель исследований – оценка величин водопритоков в выработанное пространство Яковлевского железорудного месторождения методом математического моделирования.

Использование постоянно действующих 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.

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.

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 постоянно действующей гидродинамической модели первой очереди отработки Яковлевского месторождения рассмотрим технологию создания математической модели и предлагаемые пути решения поставленных задач.

В процессе создания постоянно действующей гидродинамической модели Яковлевского месторождения были выполнены следующие этапы работ:

- пространственно-временная гидрогеологическая схематизация объекта;
- формирование на основе схематизации структуры модели;
- наполнение структуры модели информацией (данными, необходимыми для решения задач);
- калибровка модели путем решения комплекса обратных задач;
- постановка и решение прямых задач с целью выработки рекомендаций и принятия решений по управлению процессом недропользования.

Природная гидрогеологическая система Яковлевского месторождения схематизирована в виде гидравлически связанной системы напорных горизонтов, разделенных слабопроницаемым слоем с учетом имеющихся представлений о питании, стоке и разгрузке водоносных горизонтов. При этом за основу принята гидрогеологическая стратификация соответствующего масштаба (данные С.И.Чайкина, А.А.Саара); учтены водоотлив и степень изученности водоносных горизонтов по гидрогеологическим параметрам и уровенному режиму.

При гидрогеологической схематизации в плане (обосновании плановых границ модели) принимались 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 (А.И.Лябах, А.М.Божков, данные 2003, 2004 гг.).

В обводнении Яковлевского железорудного месторождения принимают участие два водоносных горизонта – рудно-кристаллический и каменноугольный, гидравлически взаимосвязанные между собой. В свою очередь каменноугольный водоносный горизонт гидравлически связан с келловейским в нарушенных условиях на отдельных участках, где мощность водоупорных бат-байосских глин, разделяющих эти горизонты, уменьшается до 10 м (в основном мощность глин бат-байосса составляет 30-50 м), и с рудно-кристаллическим в местах непосредственного контактирования водоносных известняков с рудным телом. Однако наличие плотных переотложенных руд, карбонатизированных бокситовых образований в кровле рудно-кристаллической толщи в пределах рудных полос, а также глинистых отложений в подошве каменноугольных отложений в лежачем и висячем боках рудного тела затрудняет взаимосвязь каменноугольного и рудно-кристаллического водоносных горизонтов.

Учитывая изложенное, при схематизации гидрогеологических условий исследуемого района принята трехслойная плановая модель геофильтрации подземных вод, включающая следующие слои: рудно-кристаллический водоносный горизонт, разделяющий слабопроницаемый слой и каменноугольный водоносный горизонт.

Математическое моделирование Яковлевского месторождения осуществлялось с применением программы «Processing Modflow 5/3» (W.H.Chiang & W.Kinzelbach), 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. Алгоритмы решения неявной системы нелинейных (в общем случае) уравнений используют три возможные итерационные процедуры: метод SIP, метод верхней релаксации (SOR) и метод сопряженных градиентов (PCG2).

Численный код представляется в модульном виде и состоит из основной программы и серии полностью независимых подпрограмм (модулей); последние группируются в отдельные пакеты. Подключение к основной программе пакетов, имитирующих влияние того или иного фактора, позволяет учесть многообразие гидрогеологических условий моделируемой области фильтрации (работу водозаборных скважин, дренажных систем, влияние различных граничных условий).

Модель базируется на центровой конечно-разностной сетке и предусматривает изменение граничных условий во времени путем задания ряда последовательных «стресс-периодов» возмущения пласта (изменение напоров на внешних и внутренних границах во времени).

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

При формировании гидродинамической модели Яковлевского месторождения была использована следующая картографическая информация:

- Гидрогеологическая карта Яковлевского месторождения.
- Карта фактического материала Яковлевского месторождения.
- Схематическая карта мощности и рельефа подошвы глинисто-известняковой толщи C_1.
- Инженерно-геологические разрезы по профилям.
- Карты гидроизопьез рудно-кристаллического и нижнекаменноугольного водоносных горизонтов с отметками уровней воды во всех опорных точках.
- Данные опытно-фильтрационных и лабораторных работ, определяющие основные расчетные параметры и возможный диа-

пазон их изменения: коэффициент фильтрации, водопроводимость, упругая водоотдача, пьезопроводность, параметр перетекания, активная пористость.

• Данные режимных наблюдений за уровнями и расходами действующих дренажных скважин. Величины фактического водопритока в горные выработки.

• Данные по площадям горных выработок и их развития во времени.

Для проведения моделирования вся область фильтрации была разбита на 12996 расчетных блоков. По оси 0x – 114 блоков, по оси 0y – 114 блоков. Задача решалась на неравномерной сетке, причем в центральной части разбивка более дробная (в районе Яковлевского рудника), размер каждого блока 25 × 25 м. Размеры блоков увеличивались к периферии области моделирования, и их величина изменялась от 25 × 25 до 500 × 500 м. Моделируемая площадь в итоге получилась равной 36 км^2.

В разрезе область принималась трехслойной:

• слой 1 – нижнекаменноугольный напорный водоносный горизонт (C_{1v});

• слой 2 – разделяющий слабопроницаемый слой;

• слой 3 – рудно-кристаллический водоносный горизонт (AR-PR).

Для построения матриц кровли и подошвы нижнекаменноугольного водоносного горизонта использовалась карта мощности и рельефа подошвы глинисто-известняковой толщи C_1; для построения матриц кровли и подошвы остальных слоев использовались инженерно-геологические разрезы по профилям и база данных по скважинам, вскрывших рудно-кристаллический 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 –800 м в соответствии с данными о распространении тектонических разломов в массиве рудно-кристаллических пород до глубины 1,0-1,1 км (Г.Н.Гензель, 1993 г.).

По внешней границе области фильтрации в обоих водоносных горизонтах задавались граничные условия I рода (H = const), учитывалась схема «неограниченного пласта».

При моделировании производственного понижения дренажная система Яковлевского рудника в каменноугольном и рудно-кристаллическом водоносных горизонтах реализована на модели граничными условиями II рода (Q = const). Водоприток к горным выработкам (околоствольные горные выработки, горные выработки порожнякового и вентиляционного квершлагов, 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 –425 м через специальный расчетный блок «Drain» программы «Processing Modflow 5/3».

Для построения матриц начальных напоров по моделируемым водоносным горизонтам использовались карты гидроизопьез водоносной зоны трещиноватых архейско-протерозойских кристаллических пород и гидроизопьез нижнекаменноугольного водоносного комплекса района работ по состоянию на 2004 г.

При построении матриц коэффициентов фильтрации, коэффициента упругой водоотдачи, пористости исходили из особенностей строения водоносного комплекса и результатов опытных работ.

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, условиях взаимосвязи водоносных горизонтов, фильтрационных параметрах водоносных горизонтов и параметрах взаимодействия водоносных горизонтов на различные моменты времени.

Уточненные фильтрационные параметры водоносных горизонтов приведены в табл.1.

Таблица 1

Фильтрационные параметры водоносных горизонтов и разделяющего слабопроницаемого слоя (модельные)

Название водоносного горизонта или водоупора и пространственная привязка	Коэффициент фильтрации $K_ф$, м/сут	Коэффициент упругой водоотдачи μ^*
Каменноугольный водоносный горизонт		
в направлении висячего блока	0,25	$3 \cdot 10^{-3}$
над рудной полосой	9,3	$3 \cdot 10^{-3}$
в направлении лежачего блока	0,25	$3 \cdot 10^{-3}$
Разделяющий слабопроницаемый слой		
в направлении висячего блока	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
над рудной полосой	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
в направлении лежачего блока	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Рудно-кристаллический водоносный горизонт		
сланцы висячего блока	0,01	$8 \cdot 10^{-4}$
рудная полоса	0,08	$1 \cdot 10^{-3}$
сланцы лежачего блока	0,06	$8 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Модельные и фактические уровни подземных вод нижнекаменноугольного и рудно-кристаллического водоносных горизонтов (по состоянию на 2004 г.)

Скважина	Место расположения скважины	Номер блока по оси		Координаты блока на модельной сетке по оси		Уровни подземных вод		Абсолютная погрешность, м
		x	y	x	y	по факту, абс.отм.	по модели, м	
Каменноугольный водоносный горизонт								
32-кр	Лежачий бок	46	96	3020	1840	112,4	110,2	-2,2
7-кр	Лежачий бок	15	47	2220	2970	97,4	96,1	-1,3
28-кр	Рудная полоса	59	37	3375	3230	71,9	75,5	3,6
640	Висячий бок	103	14	4360	3840	79,5	79,7	0,2
638	Висячий бок	76	4	3660	4390	76,2	78,6	2,4
Рудно-кристаллический водоносный горизонт								
610	Висячий бок	85	17	3950	3760	-290,1	-291,5	-1,4
642	Рудная полоса	103	48	4350	2940	-324,6	-330,3	-5,7
603	Лежачий бок	57	44	3200	3090	-114,2	-128,8	-14,6
619	Висящий бок	76	4	3660	4350	-84,3	-80,6	3,7

Правильность оценки параметров модели определялась: сравнением невязок между модельными и натурными отметками уровней подземных вод; соответствием натурного и модельного водопритоков в горные выработки.

При калибровке моделей использовались среднегодовые уровни подземных вод по скважинам режимной сети.

Анализ соответствия между модельными и фактическими положениями уровней подземных вод каменноугольного и рудно-кристаллического водоносных горизонтов по опорным точкам приведен в табл.2.

Помимо сбивки по уровням, выполнена корректировка модели по модельным и фактическим водопритокам.

Результаты калибровки модели по модельным и фактическим водопритокам к горным выработкам рудно-кристаллического водоносного горизонта представлены в табл.3.

Результатами решения эпигнозных задач явились карты фильтрационных параметров водоносных горизонтов, карты гидроизопьез, балансовые характеристики (водопритоки, перетекание, величины горизонтального и вертикального водообмена между горизонтами).

Таблица 3

Модельные и фактические водопритоки к горным выработкам (по состоянию на 2004 г.)

Наименование горных выработок и участков шахты	Водоприток к горным выработкам, стволам и участкам шахты, $м^3$/сут		Абсолютная погрешность, $м^3$/сут
	фактический	модельный	
Шахтные стволы № 1, 2 и руддворы	1701	1705	4
Порожняковый квершлаг	6761	6765	4
Шахтный ствол № 3 и руддвор	320	316	-4
Вентиляционный квершлаг № 1	1442	1419	23
Всего:	10224	10205	19

Подводя итоги результатам 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 проведения 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 управлению процессом недропользования.

На разработанной гидродинамической модели были реализованы следующие прямые задачи:

- прогнозные расчеты водопритоков в шахту при ведении очистных работ на участке первой очереди отработки Яковлевского железорудного месторождения;
- прогнозные расчеты величины перетока из каменноугольного водоносного горизонта в рудно-кристаллический водоносный горизонт через разделяющий слабопроницаемый слой.

Моделирование водопритоков в шахту на участке первой очереди отработки месторождения осуществлялось с учетом увеличения коэффициента фильтрации рудно-кристаллического водоносного горизонта, так как данный фактор определяет безопасные условия ведения очистных работ под несдренированным каменноугольным водоносным горизонтом.

Результаты расчетов водопритоков представлены на рис.1.

Анализ выполненных прогнозных расчетов показал, что среднегодовой водоприток из рудно-кристаллического водоносного горизонта к первоочередному участку отработки при увеличении коэффициента фильтрации в 4-6 раз будет находиться в диапазоне 500-550 $м^3$/ч. При вскрытии аномальных зон с повышенной проницаемостью, на порядок больше фактической, водоприток составит около 700 $м^3$/ч, на два порядка – 1400 $м^3$/ч.

Ведение горных работ под неосушенными водоносными горизонтами при условии закладки выработанного пространства быстротвердеющими материалами приводит к уменьшению водопритоков. Если коэффициент фильтрации рудно-кристаллического водоносного горизонта с учетом закладки выработанного пространства будет находиться в диапазоне 0,05 м/сут, то водоприток к первоочередному участку отработки составит 220-240 $м^3$/ч.

Необходимо отметить, что водопритоки к первоочередному участку отработки в рудно-кристаллическом водоносном горизонте будут существенно зависеть от параметров разделяющего слоя. Приведенные на рис.1 значения водопритоков к первоочередному участку отработки получены при коэффициенте фильтрации и мощности раз-

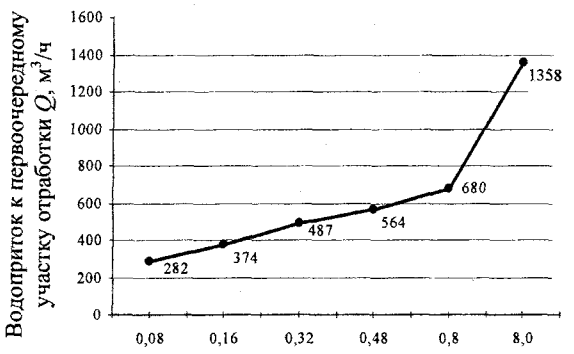


Рис.1. Зависимость водопритоков к первоочередному участку отработки от коэффициента фильтрации рудно-кристаллического водоносного горизонта

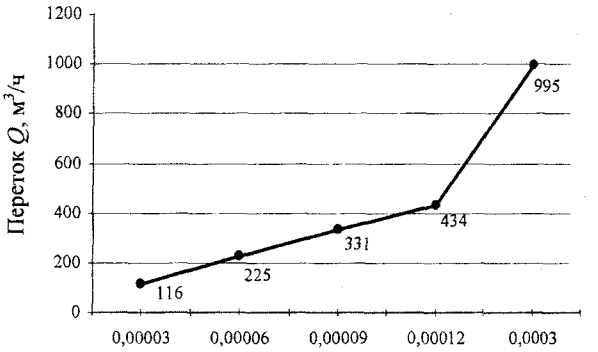


Рис.2. Зависимость величины перетока между каменноугольным и рудно-кристаллическим водоносными горизонтами от коэффициента фильтрации разделяющего слоя (нижнекаменноугольных глин)

деляющего слоя $3 \cdot 10^{-5}$ м/сут и 14,5 м соответственно. Водопритоки к дренажной системе будут формироваться за счет осушения пласта и перетока из каменноугольного водоносного горизонта. При прогнозном моделировании перетока между водоносными горизонтами (для различных значений коэффициентов фильтрации разделяющего слоя) получена зависимость, представленная на рис.2.

При коэффициенте фильтрации разделяющего слоя $3 \cdot 10^{-5}$ м/сут переток в районе первоочередного участка отработки будет составлять 100-120 м^3/ч, при $3 \cdot 10^{-4}$ м/сут – около 1000 м^3/ч. Если коэффициент фильтрации разделяющего слоя достигнет $3 \cdot 10^{-3}$ м/сут, то переток составит 4500 м^3/ч.

Таким образом, водоприток к первоочередному участку отработки в рудно-кристаллическом водоносном горизонте с учетом перетока из каменноугольного водоносного горизонта и закладки выработанного пространства может варьироваться в достаточно широких пределах от 340-360 до 570 м^3/ч. При наличии зон повышенной проницаемости в разделяющем слое возможны экстремальные ситуации, когда водоприток может достигать 4800 м^3/ч. В этом случае определение параметров разделяющего слоя становится приоритетной задачей и требует проведения специальных натурных исследований для предотвращения аварийных ситуаций.