

**С.Н.КОТЛОВ**, аспирант, *sergei\_k@spmi.ru*

**К.Е.ВОЛОДЧЕНКО**, магистрант, *Volodchenko62@mail.ru*

*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

**S.N.KOTLOV**, post-graduate student, *sergei\_k@spmi.ru*

**K.E.VOLODCHENKO**, undergraduate student, *Volodchenko62@mail.ru*

*Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ ПРИ РАЗВЕДКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Рассмотрена методика моделирования геофильтрационных процессов при имитации планируемой кустовой откачки на алмазном месторождении им. В.П.Гриба и при интерпретации проведенной кустовой откачки на поле шахты «Котинская» в Кузбассе. Сделаны выводы о повышении эффективности опытно-фильтрационных работ при использовании имитационного моделирования, за счет оптимизации эксперимента и повышения информативности на стадии интерпретации, за счет более полного учета сложных гидрогеологических условий.

**Ключевые слова:** численное моделирование, опытные откачки, планирование, интерпретация, фильтрационные параметры.

## **USAGE OF SIMULATION MODELING FOR PLANNING AND INTERPRETATION EXPERIMENTAL-FILTRATIONAL WORKS WHEN PROSPECTING SOLID MINERAL PRODUCT DEPOSIT**

Is considered the method of modeling geofiltration processes for simulating the planned pumping test on the diamond deposit named of V.P.Grib and of interpretation carried out by pumping test in the field of coal mine «Kotinskaya» in the Kuzbass. Are drawn conclusions about effectiveness increase of experimental-flow works with using simulating modeling by experiment optimization and improvement of self-descriptiveness on interpretation stage by taking to the account more detailed investigation of hydro conditions.

**Key words:** numerical modeling, pumping test, planning, interpretation, filtration parameters.

С середины 80-х годов прошлого столетия численное моделирование геофильтрационных процессов широко используется для решения широкого круга гидрогеологических задач. В современных экономических условиях использование имитационного моделирования при интерпретации и планировании опытно-фильтрационных работ приобретает особое значение.

Цель имитационного моделирования – обосновать конструкцию скважин, наметить схему расположения датчиков гидростати-

ческого давления, обосновать конструкции скважин опытного куста, определить методику проведения опытно-фильтрационных работ, обеспечивающую при минимальных экономических затратах получение максимума информации о фильтрационных параметрах опробуемой толщи.

Для имитационного моделирования могут быть использованы как трехмерные, так и осесимметричные геофильтрационные модели.

Наиболее популярным средством для создания трехмерных моделей является па-

кет программ PROCESSING MODFLOW (Геологическая служба США, руководитель проекта – М. Мак Дональд, 1996). Программа реализует численную конечно-разностную модель фильтрации подземных вод для расчета пространственно-временного распределения напоров в трехмерной среде и базируется на уравнении неразрывности фильтрационного потока.

Авторы статьи имеют опыт работы с одной из таких программ – программой «RELIS» (автор Коносовский П.К., Россия), интегрированной численным кодом в программный комплекс «ANSDIMAT» (автор Синдаловский Л.Н., ИГЭ РАН, Россия).

Программа «RELIS» позволяет моделировать геофильтрационные процессы слоистых толщ, учитывать профильную неоднородность пород, анизотропию по проницаемости в каждом слое, имитировать напорный, безнапорный и напорно-безнапорный режимы фильтрации, учитывать емкость и скин-эффект откачивающей скважины.

Созданные численные модели могут быть использованы как при планировании экспериментов, так и для интерпретации проведенных опытно-фильтрационных работ.

В случае планирования (имитации) откачек выбирается диапазон возможных изменений параметров, исследуемых водоносных горизонтов по данным предварительной разведки или по литературным данным. Далее на модели намечается размещение наблюдательных скважин опытного куста, фиксируются уровни в скважинах. По результатам численного эксперимента строится индикаторный график понижений уровней подземных вод, на основе анализа которого выбирается конструкция опытного куста, дебит откачки, продолжительность откачки, наиболее рациональное размещение датчиков и пьезометров.

Возможности применения численного моделирования при планировании опытных откачек рассмотрены на примере откачки на одном из месторождений алмазов Архангельской области.

Месторождение алмазов им. В.Гриба планируется к отработке открытым способом до глубины 450 м. Гидрогеологическое

строение района месторождения характеризуется наличием следующих водоносных комплексов, вскрываемых карьером: водоносный комплекс четвертичных отложений (песчано-глинистые отложения); олмуго-окуневский (карбонатные отложения); урзуго-воереченский (песчаники с редкими прослоями аргиллитов); падунский (переслаивание песчаников и алевролитов) и слабоводоносный мезенский комплекс (переслаивание алевролитов, аргиллитов и песчаников).

Численный эксперимент связан с необходимостью обоснования методики проведенной опытной откачки из несовершенной скважины с использованием датчиков гидростатического давления для оценки коэффициента фильтрации отложений падунского комплекса вкрест напластования. На геофильтрационной модели имитируется откачка из несовершенной скважины, оборудованной на нижнюю часть толщи падунских отложений.

Значимость определения вертикального коэффициента фильтрации связана с тем, что терригенные отложения, представленные частым переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов, как правило, характеризуются явно выраженной анизотропностью проницаемости по напластованию и вкрест напластования. При вскрытии слоистых толщ карьерами высота высачивания подземных вод на фильтрующих откосах над подошвой выработки может достигать нескольких десятков метров, что существенно влияет на напряженное состояние прибортовых массивов и может быть причиной потери их устойчивости\*.

В результате была обоснована методика проведения эксперимента с применением датчиков гидростатического давления, которая была реализована при его выполнении.

---

\* Гидрогеологические проблемы при освоении алмазных месторождений в Архангельской области / Ю.А.Норватов, И.Б.Петрова, С.Н.Котлов, Д.И.Савельев // Народное хозяйство Республики Коми. 2010. Т.19. С. 259-261.

Hydrogeological problems during the development of diamond deposits in the Arkhangelsk Region / Y.A.Norvatov, I.B.Petrova, S.N.Kotlov, D.I.Saveliev / National Economy of the Komi Republic of. 2010. V.19. P. 259-261.

Таким образом, применение имитационного моделирования способствует повышению эффективности планируемых опытно-фильтрационных работ за счет рационального расположения наблюдательных скважин и точечных пьезометров (датчиков гидростатического давления), а также обоснованного регламента проведения откачки.

Возможности применения численного моделирования при интерпретации опытных опробований показаны на примере откачки, проведенной на поле шахты «Котинская» в Кузбассе.

Гидрогеологическая структура поля шахты «Котинская» представлена переслаиванием мелкозернистых и крупнозернистых алевролитов с песчаниками. Условия формирования водопритоков в горные выработки определяются наличием приповерхностного водоносного комплекса, приуроченного к зоне повышенной трещиноватости угленосной толщи и к покровным четвертичным отложениям.

При ревизии опытных откачек на шахте «Котинская» (проведенных ранее ФГУП «Запсибгеолсъемка») основной целью численных экспериментов было обоснование правомерности выбора тех или иных типовых расчетных схем при интерпретации опытных откачек аналитическими методами. Для уточнения достоверности результатов, полученных при интерпретации откачек аналитическими методами, была создана модель осесимметричной фильтрации для имитации откачки, проведенной в полевых условиях.

Суть моделирования сводится к решению обратной задачи на основе вариантного подбора фильтрационных характеристик до достижения на модели известного понижения уровня воды в скважине, полученного в ходе откачки с известным дебитом.

Так, при моделировании в каждом из блоков модели задаются значения начального напора, а также предполагаемые значения вертикального ( $k_z$ ) и горизонтального ( $k_x$ ) коэффициентов фильтрации; помимо этого задаются значения упругоэластичности ( $\eta$ ) и гравитационной водоотдачи ( $\mu_{гр}$ ). С этими данными в ходе моделирования определяется понижение в скважине и, если

оно отличалось от действительного, то операция повторялась с другими фильтрационными параметрами. Таким образом, на модели итеративно подбираются основные характеристики водоносного горизонта.

Для интерпретации опытных опробований с использованием моделирования выбрана опытная откачка из скважины 17015а. В соответствии с геологическим описанием было выделено 3 слоя: первый слой мощностью 50 м – алевролиты (относительный водоупор); второй слой – 65 м (водоносный горизонт); третий мощностью 15 м (водоупор), соответствует слабопроницаемым угленосным отложениям.

Каждый слой в плане разбит на 100 блоков, размеры блоков увеличиваются по мере удаления от центральной скважины в логарифмической зависимости. Минимальный размер блока равен радиусу скважины (0,057 м), а максимальный 16 м. Радиус моделируемой области составляет 200 м.

В интервале залегания водоносного горизонта скважина оборудована фильтром, в центральном блоке модели во втором слое задавался расход равный 259 м<sup>3</sup>/сут. Задача решалась в нестационарной постановке, продолжительность моделируемого отрезка времени 1,75 суток (42 часа). Результаты численного моделирования представлены в таблице.

Подобранные на модели значения ( $k_x = k_z = 2,4$  м/сутки,  $T = 188$  м<sup>2</sup>/сутки водоносного горизонта) совпадают с параметрами, полученными при интерпретации этой откачки аналитически (по решению Болтона), что позволяет сделать вывод: расчетная схема, выбранная для аналитической интерпретации откачки по скважине 17015а, является достоверной, и с ее использованием можно проводить расчеты фильтрационных параметров и для других откачек.

В настоящее время численное моделирование интенсивно внедряется при проведении работ на стадиях проектирования и разработки месторождений твердых полезных ископаемых. О признании численного моделирования при ведении гидрогеологических исследований свидетельствует разработка усовершенствованных и в

**Результаты вариантного подбора фильтрационных параметров приповерхностного водоносного горизонта на модели осесимметричной фильтрации RELIS**

Номер эксперимента	Коэффициенты фильтрации I слоя, м/сутки		Коэффициенты фильтрации II слоя, м/сутки		Упругость, $\eta$ ; 1/м	Водоотдача, $\mu_{\text{рав}}$	Понижение через 5 минут на модели/ фактическое при откачке $S$ , м	Максимальное понижение, на модели/ фактическое при откачке $S_{\text{max}}$ , м
	Горизонтальный, $K_x$	Вертикальный, $K_z$	Горизонтальный, $K_x$	Вертикальный, $K_z$				
1	1,0	1,0	2,5	2,5	0,0001	0,07	1,31/1,15	1,88/1,55
2	0,1	0,1	2,5	2,5	0,0001	0,07	1,32/1,15	2,11/1,55
3	0,1	0,1	3,5	3,5	0,0001	0,07	0,97/1,15	1,58/1,55
4	0,1	0,1	3,2	3,2	0,0001	0,07	1,00/1,15	1,71/1,55
5	0,1	0,1	2,4	2,4	0,0002	0,07	1,15/1,15	1,73/1,55

то же время упрощенных в использовании аналогов программы «RELIS» – «MODFE» и «RADFLOW».

В заключении хотелось бы отметить, что при планировании и интерпретации опытно-фильтрационных работ роль чис-

ленного моделирования трудно переоценить. Данные, полученные по результатам моделирования, используются в дальнейшем для оценки параметров дренажной системы, обеспечивающей безопасные условия разработки месторождений.