

**С.Н.КОТЛОВ**, аспирант, *sergei\_k@spmi.ru*  
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

**S.N.KOTLOV**, post-graduate student, *sergei\_k@spmi.ru*  
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОБОСНОВАНИИ МЕРОПРИЯТИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УСТОЙЧИВОСТЬ БОРТОВ КАРЬЕРОВ

В статье рассматривается использование программы Modflow для численного моделирования геофильтрационных процессов на карьерных полях. Описана методика моделирования горизонтальных дренажных скважин. Дан прогноз устойчивости прибортовых массивов при эксплуатации системы горизонтальных дрен.

**Ключевые слова:** устойчивость бортов, численное моделирование, горизонтальные дрены, гидростатический напор, глубокий карьер.

## USAGE MODERN COMPUTER TECHNIQUES FOR VALIDATION OF ACTIONS GUARANTEEING OPENING STRENGTH OF PIT EDGE

In this article is described an example of using program Modflow for the issues of oreation geofiltration processes numerical simulation on procedure of horizontal drainage well simulation. Also is estimated stability of pit edges in case of using system horizontal drains.

**Key words:** stability of pit edges, numerical simulation, horizontal drains, hydrostatic head, deep pit.

С начала 90-х годов прошлого столетия компьютерные технологии стали использоваться в России при решении гидрогеологических задач. В области горнопромышленной гидрогеологии основателем этого направления может считаться В.А.Мироненко.

В настоящее время для численного моделирования геофильтрационных процессов в России и за рубежом чаще всего применяется американская программа MODFLOW, ее широко используют в практике гидрогеологических исследований.

При обосновании дренажных мероприятий на месторождениях, разрабатываемых открытым способом численные геофильтрационные модели используются в основном для прогноза водопритоков в карьеры и определения параметров систем заградительного дренажа. Однако при строительстве и эксплуата-

ции карьеров глубиной более 200 м зачастую возникают проблемы, связанные с влиянием подземных вод на устойчивость прибортовых массивов\*. Гидростатические давления, действующее в водонасыщенных прибортовых массивах, снижают эффективные напряжения и соответствующие силы трения, что может приводить к потере устойчивости бортов карьеров.

Влияние гидростатических давлений на устойчивость борта карьера рассмотрено на примере месторождения алмазов им. В.Гриба.

В рассматриваемых условиях дренирование падунского ( $V_{pd}$ ) и мезенского ( $V_{mz}$ ) водоносных комплексов карьером и системой водопонижающих скважин сопровождается

\* Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод. Л.: Недра, 1988. 256 с.

Norvatov Y.A. Study and forecast of technological regime of groundwater. L.: Nedra, 1988. 256 p.

сложным распределением напоров и соответствующих этим напорам распределением гидростатических давлений прибортовых массивов.

Гидростатические давления в прибортовых массивах, сложенных мезенскими слоистыми слабопроницаемыми отложениями (переслаиванием аргиллитов, алевролитов и песчаников), существенно влияют на устойчивость бортов карьера. Интенсивное развитие горных работ в глубину около 30 м в год и сравнительно низкие значения пьезопроводности мезенских отложений –  $(2-4)10^2$  м<sup>2</sup>/сутки по горизонтали и  $(20-40)$  м<sup>2</sup>/сутки вкрест напластования предопределяют ограниченное снижение напоров в прибортовых массивах только за счет дренирующего действия карьера.

Для оценки рационального дополнительного снижения гидростатических давлений с целью обеспечения устойчивости бортов карьера выполнено моделирование условий эксплуатации горизонтальных разгрузочных скважин.

Скважины длиной 200 м могут быть пройдены с подошвы карьера для опережающего снижения напоров (гидростатических давлений) в мезенских отложениях, залегающих ниже подошвы. При необходимости по мере увеличения глубины карьера следует оборудовать на разных отметках несколько ярусов горизонтальных скважин. Такой подход должен обеспечивать стабильную устойчивость бортов карьера по мере увеличения его глубины.

Опережающее снижение гидростатических давлений должно быть обеспечено в той части прибортового массива, в которой проходит потенциальная поверхность скольжения, что предопределяет выбор рациональной конфигурации системы разгрузочных скважин. В частности, веерная система разгрузочных скважин позволяет создать в глубине прибортового массива (на участке расположения потенциальной поверхности скольжения) дренажную сеть, по плотности соответствующую расстоянию между устьями скважин, пройденных в основании откоса борта. Расстояние между группами скважин по контуру карьера составляет 50 м. В этом варианте в каждом из ярусов следует пройти 75 горизонтальных скважин.

Первый (верхний) ярус скважин целесообразно организовать на глубине около 120 м от кровли комплекса мезенских отложений (при глубине карьера 350 м). Выше этой отметки мезенская свита характеризуется наличием прослоев песчаников, которые способствуют снижению напоров в прибортовых массивах за счет дренажного воздействия карьера, поэтому устойчивость бортов при вскрытии этих отложений, очевидно, будет обеспечена без дополнительных дренажных мероприятий.

При необходимости второй ярус скважин может быть пройден при глубине карьера 400 м (170 м относительно кровли мезенских отложений).

Для прогнозной оценки снижения напоров в мезенских отложениях создана локальная численная модель, которая представляет собой симметричный элемент общей геофильтрационной модели карьерного поля, который имитирует условия эксплуатации одной группы из трех горизонтальных скважин при заданной скорости углубки карьера.

В плане моделируемая область имеет вид равнобедренной трапеции с основаниями равными 110 м на борту карьера и 270 м на максимальном удалении от карьера. Плановая разбивка моделируемой области представлена в соответствии с рис. 1.

Модель состоит из 6 слоев, верхний имитирует падунские отложения, а остальные 5 – мезенские. Мощность каждого слоя модели по мезенским отложениям составляет 50 м, а мощность слоя водонасыщенной части толщи падунских отложений принята равной 30 м. Каждый слой разбит на блоки, размер блоков изменяется от  $10 \times 10$  м в непосредственной близости к карьере до  $300 \times 10$  м на максимально удаленном от карьера участке (рис. 1).

По внешнему контуру на боковых границах моделируемой области задано граничное условие второго рода (непроницаемая граница); на внешней границе реализовано граничное условие первого рода (постоянный напор). На контуре карьера заданы условия высачивания подземных вод на откос борта. На верхней границе модели задано граничное условие первого рода, (напор падунского комплекса, сниженный при экс-

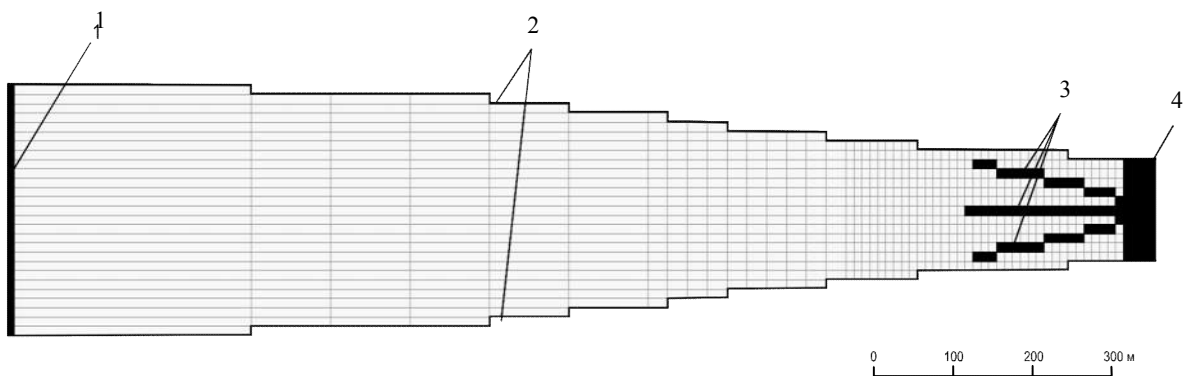


Рис.1. Плановая разбивка моделируемой области на блоки

1 – внешняя граница (с постоянным напором); 2 – непроницаемые границы; 3 – горизонтальные скважины; 4 – контур карьера

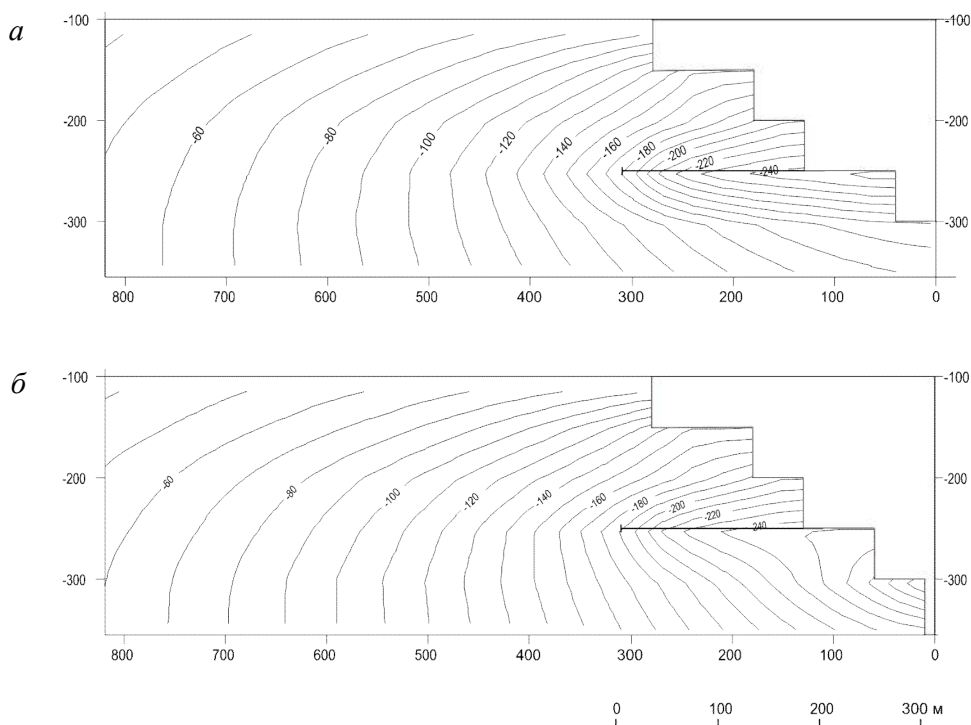


Рис.2. Распределение напоров в прибортовом массиве по оси горизонтальной скважины после ввода в эксплуатацию первого яруса скважин: а – спустя 600 суток, б – через 1200 суток

плутации водопонижающих скважин), нижняя граница модели – непроницаемая.

Принятые значения коэффициентов фильтрации мезенских отложений ( $K_x$ ) заданы в пределах: от 0,0019 до 0,0044 м/сутки. В вертикальном направлении коэффициенты фильтрации  $K_z$  были приняты на порядок меньшими, чем в горизонтальном. Коэффициент упругоэластичности водонасыщенных пород принят равным  $10^{-5}$  1/м).

Горизонтальные скважины задавались с использованием модуля Drain; проводимость дрены определена по зависимости, учитывающей осесимметричный характер потока в блоке, в котором задана разгрузочная скважина.

$$T_{др} = \frac{2\pi\Delta y\sqrt{K_x K_z}}{\ln \sqrt{\Delta z \cdot \Delta x} - \ln r_c - 1,6}$$

где  $T_{др}$  – проводимость дрены,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – размеры блока ( $\Delta x$  – вертикальный размер блока),  $K_x$ ,  $K_z$  – коэффициенты фильтрации по горизонтали и по вертикали,  $r_c$  – радиус скважины\*.

Моделирование условий эксплуатации горизонтальных скважин выполнялось в нестационарной постановке – на модели при выделении расчетных стресс-периодов учитывалась скорость углубки карьера (около 30 м/год) и совместный дренажный эффект горизонтальных скважин и карьера на несколько расчетных моментов времени. Отсчет времени проводился от «момента» ввода скважин в эксплуатацию при учете начальных условий на этот момент. На модели были определены прогнозные напоры в мезенской толще на моменты времени 600 и 1200 суток после ввода в эксплуатацию первого яруса горизонтальных скважин.

На рис.2 представлены гидрогеологические разрезы с распределением напоров в прибортовых массивах на момент 600 и 1200 суток, при достижении максимальной глубины горных работ (450 м).

На численной геофильтрационной модели остаточные напоры определялись также при эксплуатации двух ярусов горизонтальных скважин, пройденных из карьера на глубинах 350 и 400 м.

По результатам моделирования оценена эффективность каждого из двух вариантов расположения горизонтальных скважин с использованием прогнозного распределения остаточных напоров в прибортовых массивах путем определения коэффициентов запаса устойчивости бортов с учетом соответствующих этим напорам гидростатических давлений.

Вариантный подход всегда необходим при моделировании гидрогеологических процессов, так как достоверность исходных фильтрационных параметров зачастую может быть сомнительна, следовательно, для обеспечения достоверности прогнозов необходимо оценивать несколько возможных вариантов прогнозируемых процессов. В данном случае было принято решение об использовании двух вариантов модели с различными условиями дренирования мезенской толщи для выявления экономически рационального коэффициента запаса устойчивости бортов карьера. В результате чего определен рациональный вариант снижения напоров прибортовой части мезенского комплекса за счет эксплуатации 75 горизонтальных скважин, размещенных в виде одного яруса на глубине карьера 350 м. Этот вариант обеспечивает устойчивость бортов карьера глубиной 450 м с коэффициентом запаса 1,35.

---

\* Ломакин Е.А. Численное моделирование геофильтрации / Е.А.Ломакин, В.А.Мироненко, В.М.Шестаков. М.: Недра, 1988. 228 с.

Lomakin E.A. Numerical simulation geofiltration / E.A.Lomakin, V.A.Mironenko, V.M.Shestakov. Moscow: Nedra, 1988. 228 p.