ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(6):45-55

УДК 556.3.06, 556.3.07 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-45-55

ЧИСЛЕННОЕ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДРЕНАЖНЫХ СКВАЖИН

С.Н. Котлов[1], А.А. Шамшев[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Artemiy.Shamshev@gmail.com

Аннотация: Выполнен анализ дренажной системы месторождения им. В. Гриба, на котором в настоящий момент реализована комбинированная система осушения. С целью снижения напоров в прибортовом массиве с нижних берм, по мере углубки карьера, будут пройдены горизонтальные дренажные скважины. Вопросы прогнозных расчетов горизонтальных скважин с применением численного геофильтрационного моделирования не имеют надлежащего методического обоснования. Авторами поставлены и проведены численные эксперименты на программе Visual Modflow, направленные на обоснование методики моделирования горизонтальных дрен. Основной задачей численных экспериментов является определение зависимости условий на гидродинамической границе дрены от дискретности и геометрии численной модели, а также параметров имитируемой горизонтальной скважины. В ходе выполнения численных экспериментов в качестве эталонного примера была выбрана горизонтальная дренажная скважина длиной 150 м и диаметром 0,2 м. При сопоставлении напоров и расходов с эталонным значением проведен подбор условий на гидродинамической границе дрены. Представлена взаимосвязь данных параметров, даны общие рекомендации по корректному моделированию горизонтальных дренажных скважин на конечно-разностных программных комплексах.

Ключевые слова: прогноз водопритоков в горные выработки, горизонтальные дренажные скважины, численное геофильтрационное моделирование, гидрогеологические условия, техногенный режим подземных вод.

Для цитирования: *Котлов С. Н., Шамшев А. А.* Численное геофильтрационное моделирование горизонтальных дренажных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 6. – С. 45–55. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-45-55.

Numerical geo-flow modeling of horizontal drainage holes

S.N. Kotlov[1], A.A. Shamshev[1]

[1] Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Artemiy.Shamshev@gmail.com

Abstract: The drainage system of the Grib deposit with implemented combined dehydrating is analyzed. Aimed to reduce water head in pitwall rock mass, as the depth of the open pit increases, horizontal drainage holes will be drilling from lower berms. Predictive designs of horizontal holes using numerical geo-flow modeling have no appropriate validation procedures. The authors have set and performed numerical experiments in VisualModflow environment in order to validate modeling procedure for horizontal drains. The key objective of the numerical experimentation is to determine conditions at hydrodynamic boundary of drains versus discreteness and geometry of

© С.Н. Котлов, А.А. Шамшев. 2019.

numerical model, as well as parameters of a model horizontal hole. The numerical experimentation reference was chosen to be a horizontal drain hole with a length of 150 m and diameter of 0.2 m. By comparing heads and flow rates with the reference values, the hydrodynamic boundary conditions of drains were selected. The interaction of the above listed parameters is described, and the general recommendations are given for correct finite-element modeling of drain holes.

Key words: prediction of water inflow in mines, horizontal drain holes. Numerical geo-flow modeling, hydrogeological conditions, induced groundwater regime.

For citation: Kotlov S. N., Shamshev A. A. Numerical geo-flow modeling of horizontal drainage holes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):45-55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-45-55.

В 90-х годах прошлого столетия в Архангельской области была открыта одна из крупнейших алмазоносных провинций, сравнимая по запасам и качеству алмазов с Якутией. Геологические условия залегания рудных тел, представленных кимберлитовыми трубками, отличаются от условий якутских месторождений алмазов. Основное отличие — это отсутствии в Архангельской области многолетнемерзлых пород, также отличается литологический состав вмещающих пород. На территории Архангельской алмазоносной провинции (ААП) кимберлитовые трубки перекрыты мощной толщей осадочных пород карбона (до 60—70 м на месторождении им. В. Гриба). Сами трубки приурочены к позднедевонскому периоду (D2-3), а вмещающие породы представлены осадочными породами венда (V_2).

Основная сложность разработки алмазных месторождений ААП связана со сложным гидрогеологическим условиям [1], заключающимися в следующем:

- при открытой отработке месторождений вскрываются несколько водоносных горизонтов, суммарной проводимостью около 500 м^2/сут;
- высокие значения водопритоков к дренажной системе (до 7000—8000 м^3/ч);
- различия проницаемости осадочных отложений вендского периода, которые будут вскрыты карьером.

Принимая во внимание все вышеперечисленные условия, при разработке алмазного месторождения им. В. Гриба с целью снижения напоров в падунском водоносном комплексе (V_{2pd}), играющем основную роль в обводнении карьера, была создана система заградительного дренажа, состоящая из 75 водопонижающих скважин (ВПС). Суммарный приток к водопонижающему контуру (система ВПС) составляет около 6000—7000 м^3/ч, однако величина «проскока» подземных вод в карьер составляет около 1000 м^3/ч. Вследствие низкой проводимости приподошвенной части падунских отложений, на начало 2019 г. высота промежутка высачивания на бортах карьера составляет до 50—60 м. В подстилающих отложениях мезенской свиты (V_{2mz} — относительный водоупорный комплекс) общий объем глинистых пород достигает 70%, поэтому ситуация с «отставанием» снижения уровня подземных вод от темпа углубки карьера при дальнейшем развитии горных работ будет только усугубляться.

Проблематика вскрытия мезенских отложений является актуальной из-за высоких значений прогнозных напоров [2], что негативно влияет на устойчивость бортов карьера [3]. Для интенсификации снижения напоров, дальнейшее развитие системы дренажа [4] будет основываться на проходке горизонтальных дренажных скважин (ГДС) с подошвы карьера, что в значительной мере снизит напоры подземных вод в прибортовом массиве, повышая общую устойчивость борта.

В 2018 г. в приподошвенной части падунских отложений выполнено строитель-

ство пилотных скважин ГДС с абсолютной отметки минус 86 м (а.о. поверхности около плюс 100 м). Их использование показало эффективность данного метода, визуально на карьере наблюдались практически «сухие» борта в зоне функционирования ГДС. После получения первых удачных результатов, запланировано дальнейшее развитие комплексной системы дренажа [5], путем строительства новых ГДС, по мере углубки карьера. Из-за сложности гидрогеологических условий месторождения, проектные решения выполняются с научным сопровождением работ Санкт-Петербургским горным университетом с 2008 г.

В рамках этой работы была создана численная геофильтрационная модель района месторождения, которая используется для решения различного рода задач. Модель откалибрована по фактическим данным [6]. В структуру модели введены ГДС, параметры определены по результатам калибровки. Однако для прогноза и имитации ГДС [7] в мезенских отложениях, еще не вскрытых карьером, необходима разработка методики моделирования ГДС.

Численное геофильтрационное моделирование горизонтальных дренажных скважин — вопрос мало освещенный в современной научной литературе. Проблемам прогноза и моделирования ГДС посвящены труды Мироненко В.А. [3, 8], Кравчука С.В. [9], Русанова И.В. [8], Котлова С.Н. [10, 11], Воронина А.А. [12, 13], однако данный вопрос все еще требует разработки дополнительных методических принципов.

При моделировании ГДС в основном возникают вопросы корректного отображения прогнозной ситуации в условиях, когда еще нет натурных данных, на основании которых можно откалибровать модель. Точно не установлена зависимость, по которой можно определить заранее дебит ГДС. При моделировании вертикальных водопонижающих скважин данный вопрос был рассмотрен в работах Ломакина Е.А. [14], им была предложена формула для задания фильтрационного сопротивления блоков, в которых располагается вертикальная скважина на модели, в случае моделирования с использованием модуля «дрена»:

$$\Phi = \frac{1}{T_c} \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{\Delta x}{r_c}\right)}{2\pi} - 0{,}25 \right) \qquad (1)$$

где Φ — фильтрационное сопротивление дрены, сутки/м^2; Δx — размер блока в плане, м; T_c — проводимость моделируемого слоя, м^2/сут ($T_c = K_ф \Delta z$); Δz — мощность слоя, м; rc — радиус скважины, м; $K_ф$ — коэффициент фильтрации, м/сут.

Результаты моделирования с применением данной формулы в условиях, когда водопонижающая скважина располагается в блоке размерами больше диаметра скважины, очень близки к расчетам по формуле Ж. Дюпюи, с помощью которой можно аналитически рассчитать точное значение расхода скважины:

$$Q = \frac{\pi K_D (h_г^2 - h_c^2)}{\ln \frac{R_г}{r_c}} \quad , \qquad (2)$$

где $h_г$ — напор на границе питания м; h_c — напор в скважине, м; $R_г$ — расстояние до границы питания, м.

При литературном обзоре подобных решений для моделирования горизонтальных скважин не обнаружено, а применение данного, рассчитанного на вертикальные скважины, не дает хорошей сходимости результатов при моделировании.

С этой целью была выполнена серия численных экспериментов с использованием программного комплекса Visual Modflow. Данный программный комплекс очень хорошо зарекомендовал се-

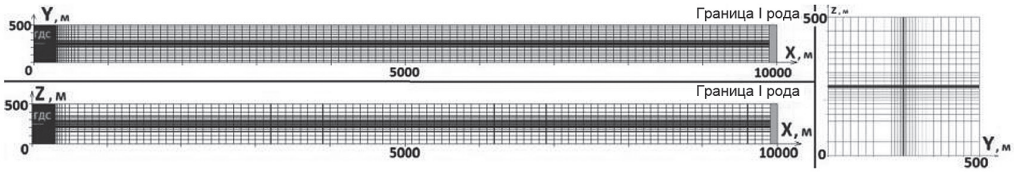

Рис. 1. Геометрия численной модели
Fig. 1. Numerical model geometry

бя при выполнении гидрогеологических расчетов и прогнозов изменения техногенного режима подземных вод [15]. Основная задача выполнения численных экспериментов — выведение зависимости параметров дрены от параметров модели (размеры блока, $K_ф$).

На первом этапе была выполнена имитация ленты тока, размеры моделируемой территории составили: по оси *X* 10 000 м, по оси *У* 500 м, по оси *Z* 500 м. Со стороны восточной части модели была задана граница первого рода с напором 500 м во всех модельных слоях. На западе, непосредственно у границы моделируемой территории, в блоках модулем «drain» задавалась горизонтальная дренажная скважина общей длиной 150 м (рис. 1) с абсолютной отметкой дрены — 250 м (положение — центр модели). Идея численных экспериментов состоит в том, что на первом этапе размеры блоков в зоне горизонтальной скважины (изометрично — по всем направлениям) задавались близкими к реальному размеру ГДС 0,2 м (по аналогии с реальными данными о ГДС на месторождении им. В. Гриба, где пробурены скважины длиной 150 м и диаметром около 0,2 м). На модели выполнялись расчеты дебита скважины в зависимости от изменения параметра проводимости дрены. Данная операция была выполнена для трех различных вариантов коэффициента фильтрации моделируемого массива — 5 м/сут, 1 м/сут и 0,1 м/сут.

На данном этапе было отмечено, что приток в скважину закономерно увели-

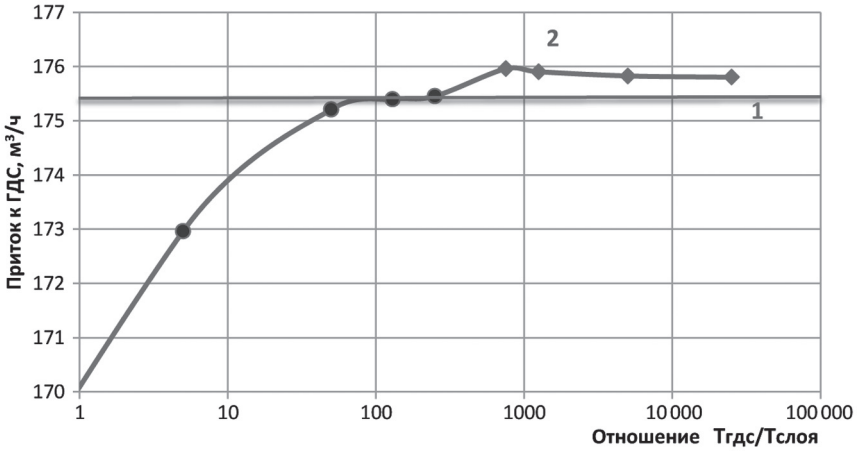

Рис. 2. График изменения водопритока в дрену ГДС при изменении проводимости дрены ($K_ф$ массива 1 м/сут): 1 — граница закономерного изменения водопритока по мере увеличения проводимости; 2 — зона возникновения «численной дисперсии» данных

Fig. 2. The graph of changes in water inflow into the drain of the HDW (Horizontal drainage well) with changes in the conductivity of the drain ($K_ф$ of the array 1 m / day): 1 — the limit of the regular change in water inflow with increasing conductivity; 2 — zone of «numerical dispersion» of data

чивается с увеличением проводимости блоков дрены до определенного соотношения $T_{др}/T_{слоя}$ (отношение проводимости блоков дрены к проводимости расчетного слоя, где располагается ГДС). При данном соотношении более 250 возникает «численная дисперсия», проявляющаяся в незакономерном изменении (как увеличении, так и уменьшении) водопритока в дрену ГДС (рис. 2).

Для каждого из вариантов моделирования было определено оптимальное значение проводимости, при котором значение притока в «дрену» максимально, при этом не возникает «численная дисперсия». Для коэффициента фильтрации 0,1 м/сут значение притока в ГДС составило 17,5 м^3/ч, для 1 м/сут 175,4 м^3/ч, а для 5 м/сут 877,3 м^3/ч. Данные значения условно приняты за реальный дебит горизонтальной скважины, диаметром 0,2 м.

На следующем этапе численных экспериментов изменялись размеры блоков, где имитируется ГДС. Для каждого из вариантов коэффициента фильтрации были выполнены эксперименты для размеров блоков 0,5 м, 1 м, 2 м, 5 м, 10 м, 15 м. В каждом конкретном случае посредством изменения параметра проводимости дрены подбиралось значение притока к ГДС, соответствующее принятому за реальное значение притоку к ГДС (при размере блока 0,2 м). Все полученные значения были нанесены на точечный график в координатах Q, f (Lg($T_{гдс}$/ /$T_{слоя}$)) — рис. 3.

На полученном графике можно наблюдать, что значения проводимости блоков с дреной, отнесенные к проводимости слоя, при различных коэффициентах фильтрации ложатся очень кучно. Данный факт свидетельствует о наличии взаимосвязи параметра проводимости дрены и размера блока, а характер взаимосвязи был определен путем задания степенной линии тренда. Полученная на графике аппроксимация была преобразована в следующую зависимость для нахождения корректной проводимости дрены:

$$T_{ГДС} = 10^{\left(\frac{0,5591}{\sqrt{\Delta x}} - \lg T_{слоя}\right)} \qquad (3)$$

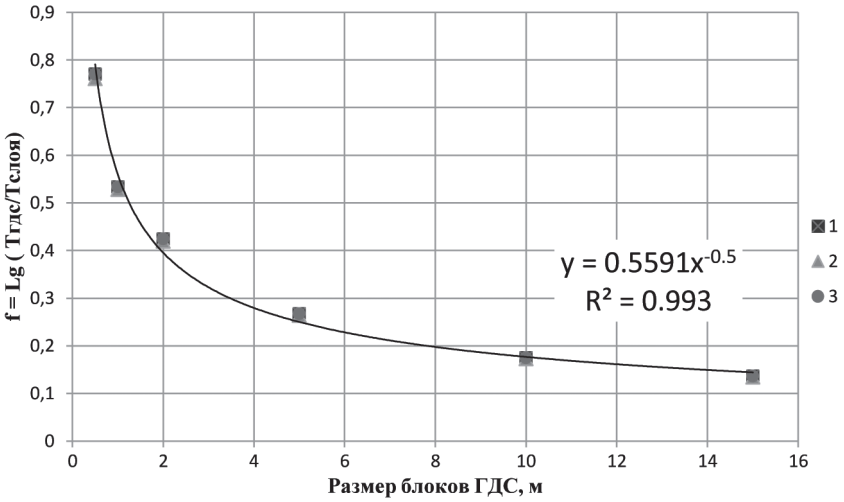

Рис. 3. График отношения $T_{гдс}$ к $T_{слоя}$, в зависимости от размера блока для подобранных в ходе моделирования значений: 1 — значения для $K_ф$ = 0,1 м/сут; 2 — для $K_ф$ = 1 м/сут; 3 — для $K_ф$ = 5 м/сут

Fig. 3. Graph of the ratio T_{hdw} to T_{layer}, depending on the block size for values selected during the simulation: 1 — values for $K_ф$ = 0,1 m/day; 2 — for $K_ф$ = 1 m/day; 3 — for $K_ф$ = 5 m/day

В процессе моделирования выполнялась проверка сходимости результатов не только по величине водопритока к ГДС, но и по уровням подземных вод. Для этого на модели были заданы наблюдательные скважины на различном удалении от забоя ГДС, по основным осям *X, Y* и *Z*. По оси *X* и *Y* скважины располагались на расстоянии 25 м, 50 м, 100 м и 150 м от забоя ГДС, по оси *Z* на 20 м выше забоя, на 25 м и на 75 м ниже (рис. 4 и табл. 1).

Анализируя представленные данные об уровнях подземных вод, можно сделать выводы о хорошей сходимости результатов для размеров блоков 0,5 м, 1 м и 2 м. Для размеров блоков 5 м, 10 м и 15 м на близком расстоянии от забоя ГДС появляются погрешности в уровнях, особенно заметные в разрезе, по скважинам оси *Z*. Данный факт связан с более активным влияние разбивки моделируемой области в разрезе на результаты моделирования.

В целом сходимость результатов можно назвать хорошей, в плоскости *XY* расхождения в уровнях не превышают 20—30 см для блоков 15×15×15 м, по оси *Z*

Таблица 1

Результаты калибровки модели
Model calibration results

$K_ф$, м/сут	Размер блока, м	№ наблюдательной скважины и расстояние от забоя ГДС											Приток к ГДС, м³/ч
		X0	X1	X2	X3	Y0	Y1	Y2	Y3	Z0	Z1	Z2	
		25 м	50 м	100 м	150 м	25 м	50 м	100 м	150 м	20 м	25 м	75 м	
		Абсолютная отметка уровня подземных вод по наблюдательным скважинам, м											
0,1	0,2	286,4	288,8	291,58	293,6	284,32	287,06	288,88	289,89	282,38	284,8	288,19	17,55
	0,5	286,4	288,8	291,58	293,6	284,3	287,05	288,87	289,88	283,28	284,78	288,18	17,55
	1	286,4	288,8	291,58	293,6	284,28	287,04	288,86	289,88	283,25	284,75	288,17	17,55
	2	286,5	288,84	291,59	293,61	284,3	287,02	288,85	289,86	283,28	284,77	288,15	17,55
	5	286,4	288,8	291,58	293,6	284,01	286,93	288,8	289,39	281,91	284,54	288,09	17,55
	10	286,53	288,53	291,58	293,6	284,31	286,01	288,72	289,32	282,56	284,21	287,98	17,55
	15	286,16	289,09	291,43	293,49	284,01	285,47	288,64	289,25	283,83	283,83	287,87	17,55
1	0,2	286,49	288,88	291,66	293,68	284,41	287,14	288,96	289,97	282,47	284,89	288,27	175,40
	0,5	286,49	288,88	291,66	293,68	284,39	287,14	288,96	289,96	283,38	284,87	288,27	175,40
	1	286,49	288,89	291,66	293,68	284,37	287,12	288,95	289,96	283,34	284,84	288,26	175,40
	2	286,58	288,93	291,68	293,69	284,39	287,11	288,93	289,94	283,38	284,86	288,24	175,40
	5	286,49	288,89	291,66	293,68	284,1	287,01	288,88	289,47	282,01	284,63	288,17	175,40
	10	288,62	288,62	291,66	293,68	284,4	286,1	288,8	289,4	282,65	284,3	288,06	175,40
	15	286,24	289,17	291,51	293,57	284,09	285,55	288,71	289,33	282,15	283,91	287,95	175,40
5	0,2	286,4	288,8	291,58	293,6	284,32	287,06	288,88	289,89	282,38	284,8	288,19	877,29
	0,5	286,4	288,8	291,58	293,6	284,3	287,05	288,87	289,88	283,28	284,78	288,18	877,29
	1	286,4	288,8	291,58	293,6	284,28	287,04	288,87	289,88	283,25	284,75	288,17	877,29
	2	286,5	288,84	291,59	293,61	284,3	287,02	288,85	289,86	283,28	284,77	288,15	877,29
	5	286,4	288,8	291,58	293,6	284,01	286,93	288,8	289,39	281,91	284,54	288,09	877,29
	10	286,53	288,53	291,58	293,6	284,31	286,01	288,72	289,32	282,56	284,21	287,98	877,29
	15	286,16	289,09	291,43	293,49	284,01	285,46	288,63	289,25	282,05	283,82	287,87	877,29

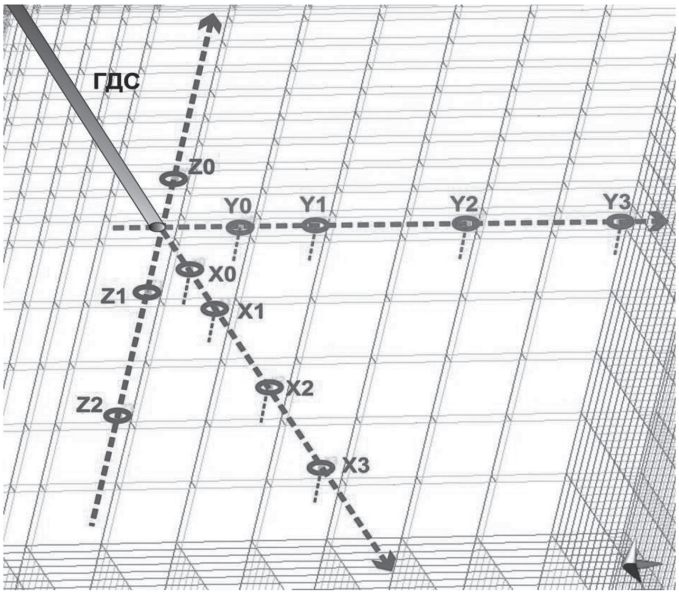

Рис. 4. 3D схема расположения наблюдательных скважин относительно ГДС
Fig. 4. 3D layout of observation wells relative to the HDW

расхождения достигают 1 м, однако в масштабах модели (понижение около 250 м) данную погрешность можно считать незначительной. Для проверки полученной зависимости на модели было изменено расстояние до границы I рода в 2 раза. Результаты подтвердили, что расстояние до границы влияет лишь на ве-

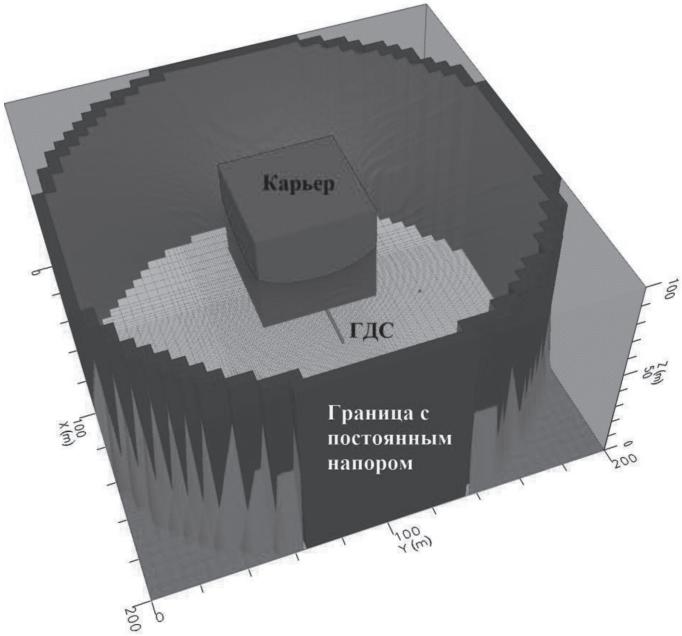

Рис. 5. Трехмерное изображение модели на втором этапе численных экспериментов
Fig. 5. Three-dimensional image of the model in the second stage of numerical experiments

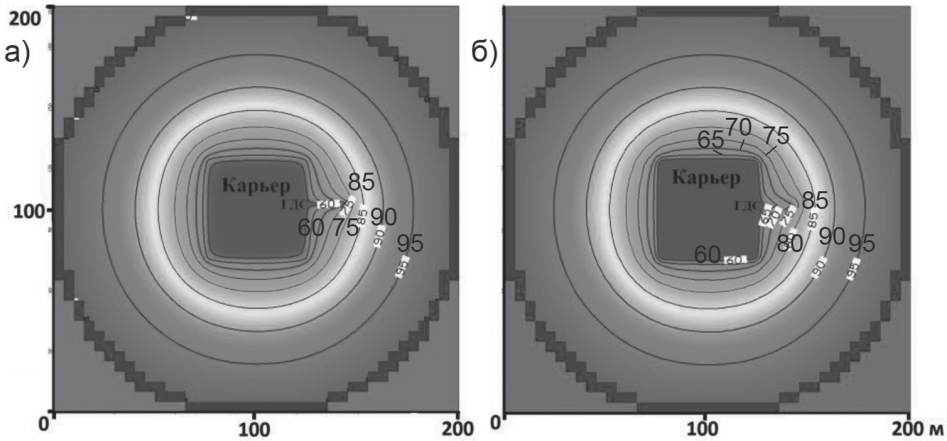

Рис. 6. Сравнение гидроизогипс напоров в расчетном слое модели, в котором заданы ГДС: размеры блоков в центре модели 1×1×1 м (а); блоки 5×5×5 м (б)

Fig. 6. A comparison of hydroisogypses of pressures in the calculated layer of the model in which the HDW is given: the dimensions of the blocks in the center of model area 1×1×1 m (a); blocks 5×5×5 m (b)

личину водопритока к ГДС и уровни, но выведенное соотношение проводимости дрены ГДС продолжает сохраняться и не зависит от граничных условий.

Далее были выполнены тесты в условиях кругового пласта, по краям которого задавалась граница I рода. Размеры моделируемой территории 200×200×100 м (*XYZ*). В центре имитировалась горная выработка квадратной формы, размерами 50×50×50 м (рис. 5). С западной стороны, посередине модели (а.о. 50 м), задавалась скважина ГДС длиной 20 м. В зоне карьера и ГДС было выполнено несколько вариантов разбивки, сначала 5×5 м, затем с уменьшением до 1×1 м, по краям модели были оставлены блоки 5×5 м. В разрезе модель представлена 60 слоями, так, что в зоне распространения карьера и 10 м ниже него мощность слоев составляет 1 м.

Затем разбивка в центральной части была изменена на 5×5×5 м. При выполнении расчетов были получены значения водопритока в выработку и в ГДС, значение $K_ф$ на всей модели равно 1 м/сут. Для корректного выполнения сравнения стоит помнить, что суммарная проводимость всех модулей «дрена» карьера в случае разбивки 1×1×1 м должна быть равна соответствующей более крупной разбивке, в нашем случае 5×5×5 м. При различной геометрии модели в разрезе вследствие трехмерной структуры потока значение водопритока в карьер может отличаться, обычно в сторону увеличения при более дробной разбивке моделируемой территории. Проводимость дрен карьера была изменена пропорционально изменению объема блока. Для блоков 1×1×1 м она была задана 0,24 м^2/сут, а для блоков 5×5×5 м составила 30 м^2/сут.

Как видно из представленных данных, расхождение между различными вариантами незначительно, гидроизогипсы практически полностью совпадают. Незначительное расхождение присутствует в непосредственной близости от ГДС. При сравнении различных вариантов моделирования были получены следующие результаты, приведенные в табл. 2.

Различия расходов составляют около 1%, что можно назвать несущественным. Использование полученной зависимости позволяет довольно точно выполнять моделирование горизонтальных дренажных скважин на программных комплексах, основанных на конечно-раз-

Таблица 2

Результаты второго этапа численных экспериментов
Results of the second stage of numerical experiments

Вариант моделирования	Блоки 1×1×1 м	Блоки 5×5×5 м
Приток в карьер, м^3/ч	437,4	432,9
Приток к ГДС, м^3/ч	19,95	20,13
Проводимость «дрены» ГДС, м^2/сут	9,20	3,38

ностных уравнениях фильтрационного потока [16, 17].

Стоит отметить, что полученная зависимость действует в довольно ограниченных пределах. В настоящий момент она показывает неплохие результаты сходимости лишь для случаев, когда моделируется ГДС размером около 0,2 м, а среда изотропна по своим фильтарционным характеристикам. Безусловно, дебит ГДС будет связан с диаметром скважины и степенью анизотропии пород. Выявление корреляции параметров дрены с диаметром скважины и анизотропии пород — это цель для дальнейших исследований в этом направлении.

Полученные в ходе работы результаты позволяют сделать определенные выводы и рекомендации:

1. Моделирование горизонтальных дренажных скважин следует выполнять при корректной дискретизации пространства модели:

• модельный слой, в котором будут имитироваться ГДС, следует делать изометричным по осям *XYZ*, чтобы ГДС задавались в идеальные блоки кубической формы;

• дискретизация сетки в плане и в разрезе должна соответствовать общепринятым нормам геофильтрационного моделирования. Размеры соседних блоков не должны отличаться более чем в 2 раза;

2. Для моделирования ГДС, разбивку области моделирования скважин желательно делать не более 5×5×5 м, так как при больших размерах блока будет возникать погрешность в уровнях подземных вод непосредственно вблизи скважины;

3. В случае совместной работы модулей «дрена», имитирующие ГДС и карьер, очень важно корректное задание проводимости для карьера [18], так как при изменении размера блоков соответствующим образом должна изменяться и проводимость «дрены» карьера. Данный факт можно отнести к самостоятельному вопросу, требующему отдельного рассмотрения;

4. Полученная в работе зависимость в настоящий момент, дает хорошую сходимость результатов для узкого диапазона параметров скважины: диаметр ГДС около 0,2 м, изотропная среда. В случае, когда диаметр скважины сильно отличается от рассмотренного, будет возникать расхождение в результатах расчета с реальной ситуацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Норватов Ю. А.* Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод. — Л.: Недра, 1988. — 261 с.

2. *Бакшевская В. А.*, *Поздняков С. П.* Методы моделирования геофильтрационной неоднородности осадочных отложений // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2012. — № 6. — С. 560–570.

3. *Арсентьев А. И.*, *Букин И. Ю.*, *Мироненко В. А.* Устойчивость бортов и осушение карьеров. — М.: Недра, 1982. — 165 с.

4. *Chambers J.E., Meldrum I.P., Uhlemann S.* Spatial monitoring of groundwater drawdown and rebound associated with quarry dewatering using automated time-lapse electrical resistivity tomography and distribution guided clustering // Engineering Geology. 2015, no 193. Pp. 412—420.

5. *Батрак Г.И., Томс Л.С.* Гидрогеологические расчеты для оптимизации дренажа // Мониторинг. Наука и технологии. — 2015. — № 2(23). — С. 6—14.

6. *Семенчук А.В.* Интерпретация результатов опытно-фильтрационных работ с применением метода математического моделирования для обоснования параметрической базы численной геофильтрационной модели // Региональная геология и металлогения. — 2017. — № 1. — С. 75—83.

7. *Aaron G. Smith, Stephen R. Howles, Don Armstrong* Loxton trial horizontal drainage well: hydraulics and effectiveness in controlling groundwater flux entering the River Murray // MESA Journal. 2007. № 47.

8. *Мироненко В.А., Русанов И.В.* Фильтрационная оценка горизонтальных скважин в условиях горного дренажа // Геология и разведка. — 1997. — № 3. — С. 127—138.

9. *Кравчук С.В.* Расчет систем горизонтальных дренажных скважин при защите бортов карьеров от подземных вод. — Белгород, ВИОГЕМ, 1969. — 79 с.

10. *Шамшев А.А., Котлов С.Н.* Совершенствование методики оценки фильтрационных параметров анизотропных слабопроницаемых отложений на основе опытно-фильтрационных наблюдений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 10. — С. 194—204.

11. *Kotlov S., Saveliev D., Shamshev A.* Peculiarities of numerical modeling of the conditions for the formation of water inflows into open-pit workings when constructing the protective water-tight structures at the Koashvinsky quarry / In V. Litvinenko (ed.) Eurock2018: Geomechanics and geodynamics of rock masses. Proceedings of the 2018 European rock mechanics symposium, 2018, pp. 827—832.

12. *Воронин А.А.* Новый способ осушения бортов карьеров для повышения их устойчивости. Деп. рук. № 1071/6—16 от 14 марта 2016 г. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 6. — С. 105.

13. *Воронин А.А., Пономаренко Ю.В.* Об эффективности горизонтальных дренажных скважин при осушении бортов карьеров // Научные ведомости. Серия Естественные науки. — 2011. — № 21 (116). — Вып. 17. — С. 179—182.

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

15. *Usman M., Arshad M., Liedl R., Conrad C.* 3-D numerical modelling of groundwater flow for scenario-based analysis and management // Water, 2018, Vol. 44, Issue 2. Pp. 146—154.

16. *Qi Y., Wang Y., Zhang J.* Three-dimensional turbulence numerical simulation of flow in a stepped dropshaft // Water, 2018, Vol. 11, Issue 1.

17. *Smaoui H., Ouahsine A., Zouhri L., Carlier E.* Modelling of groundwater flow in heterogeneous media by finite element method // Hydrological Processes. 2012, no 26(4). Pp. 558—569.

18. *Молокова Н.В.* Решение геофильтрационных задач средствами математического моделирования // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. — 2008. — № 3(20). — С. 31—34. ГИАБ

REFERENCES

1. Norvatov Yu.A. *Izuchenie i prognoz tekhnogennogo rezhima podzemnyh vod* [Study and forecast of man-made groundwater regime], Leningrad, Nedra, 1988, 261 p.

2. Bakshevskaya V.A., Pozdnyakov S.P. Methods for modeling geofiltration sedimentation heterogeneity. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2012, no 6, pp. 560—570. [In Russ].

3. Arsent'ev A.I., Bukin I.Yu., Mironenko V.A. *Ustoichivost' bortov i osushenie kar'erov* [Open pit wall stability and drainage of quarries], Moscow, Nedra, 1982, 165 p.

4. Chambers J.E., Meldrum I.P., Uhlemann S. Spatial monitoring of groundwater drawdown and rebound associated with quarry dewatering using automated time-lapse electrical resistivity tomography and distribution guided clustering. *Engineering Geology*. 2015, no 193. Pp. 412—420.

5. Batrak G.I., Toms L.S. Hydrogeological calculations for drainage optimization. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2015, no 2(23), pp. 6—14. [In Russ].

6. Semenchuk A.V. Interpretation of the pilot filtration works results using the method of mathematical modeling to substantiate the parametric base of the numerical geofiltration model. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2017, no 1, pp. 75—83. [In Russ].

7. Aaron G. Smith, Stephen R. Howles, Don Armstrong Loxton trial horizontal drainage well: hydraulics and effectiveness in controlling groundwater flux entering the River Murray. *MESA Journal*. 2007, no 47.

8. Mironenko V.A., Rusanov I.V. Filtration evaluation of horizontal wells in mining drainage. *Geologiya i razvedka*. 1997, no 3, pp. 127—138. [In Russ].

9. Kravchuk S.V. *Raschet sistem gorizontal'nykh drenazhnykh skvazhin pri zashchite bortov kar'erov ot podzemnykh vod* [Calculation of horizontal well systems in the protection of airborne quarries from groundwater]. Belgorod, VIOGEM, 1969, 79 p.

10. Shamshev A.A., Kotlov S.N. Improving the methodology for assessing the filtration parameters of low-permeable anisotropic sediments based on experimental filtration observations. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2017, no 10, pp. 194—204. [In Russ].

11. Kotlov S., Saveliev D., Shamshev A. Peculiarities of numerical modeling of the conditions for the formation of water inflows into open-pit workings when constructing the protective watertight structures at the Koashvinsky quarry. In V. Litvinenko (ed.) Eurock2018: *Geomechanics and geodynamics of rock masses. Proceedings of the 2018 European rock mechanics symposium*, 2018, pp. 827—832.

12. Voronin A.A. New way of drainage the open pit walls to increase their sustainability. Deposited manuscript, no 1071/6—16 from 14 March 2016. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 6, pp. 105. [In Russ].

13. Voronin A.A., Ponomarenko Yu.V. The effectiveness of horizontal drainage wells when draining open pit walls. *Nauchnye vedomosti. Seriya Estestvennye nauki*. 2011, no 21 (116). Вып. 17, pp. 179—182.

14. Lomakin E.A., Mironenko V.A., Shestakov V.M. *Chislennoe modelirovanie geofil'tratsii* [Numerical modeling of geofiltration]. Moscow, Nedra, 1988, 228 p.

15. Usman M., Arshad M., Liedl R., Conrad C. 3-D numerical modelling of groundwater flow for scenario-based analysis and management. *Water,* 2018, Vol. 44, Issue 2. Pp. 146—154.

16. Qi Y., Wang Y., Zhang J. Three-dimensional turbulence numerical simulation of flow in a stepped dropshaft. *Water*, 2018, Vol. 11, Issue 1.

17. Smaoui H., Ouahsine A., Zouhri L., Carlier E. Modelling of groundwater flow in heterogeneous media by finite element method. *Hydrological Processes*. 2012, no 26(4). Pp. 558—569.

18. Molokova N.V. Solving geofiltration problems using mathematical modeling. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika M.F. Reshetneva*. 2008, no 3(20), pp. 31—34. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Котлов Сергей Николаевич[1] — канд. геол.-минерал. наук,
старший научный сотрудник,
Шамшев Артемий Андреевич[1] — инженер,
e-mail: Artemiy.Shamshev@gmail.com,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Шамшев А.А., e-mail: Artemiy.Shamshev@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.N. Kotlov[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Senior Researcher,
A.A. Shamshev[1], Engineer,
e-mail: Artemiy.Shamshev@gmail.com,
[1] Saint Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.A. Shamshev, e-mail: Artemiy.Shamshev@gmail.com.