

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ С РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГИСТРАЛЬЮ**

Розглянуто математичну модель системи водопостачання гідромоніторних установок, що живляться від однієї водозабірної станції, яка дозволяє значно скоротити об'єми обчислень завдяки врахуванню особливостей технології відкритої розробки розсіпних родовищ.

## **A MATHEMATICAL MODEL OF WATER SUPPLY SYSTEM UNDER OPEN MINING OPERATIONS WITH A MULTI-BRANCH MAIN LINE**

A mathematical model of water supply system in hydromonitoring installations, receiving water from one water-pumping station, that makes possible to reduce considerably the number of calculations due to taking into account the open mining development of scatterings has been considered.

Сегодня в Украине большая часть минерального сырья, за исключением углей, добывается открытым способом и в ближайшее десятилетие прогнозируется увеличение доли месторождений, разрабатываемых открытым способом [1 – 6]. Этот способ является основным при добыче титан-цирконовых россыпей и руд редкоземельных металлов, а также доминирующим при добыче железных руд. При разработке россыпных месторождений широко применяется гидромеханизация открытых горных работ, что предопределяет внедрение самотечного и напорного гидротранспорта [4, 7 – 9].

Особенность открытых горных работ на россыпных месторождениях Украины заключается в том, что месторождения, как правило, разрабатываются одновременно несколькими карьерами, борта которых содержат только один уступ [4 – 6]. Это предопределяет внедрение разветвленных сетей водоснабжения, когда вода для пульпообразования от одного водозабора одновременно подается на несколько гидромониторов, работающих на одном карьере или на разных карьерах (рис. 1). Зачастую применение таких схем гидромеханизации вызвано снижением содержания ценного компонента в исходных песках или стремлением повысить объемы добычи. Однако опыт гидромеханизации на карьерах Иршанского ГОКа и Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) свидетельствует, что при использовании таких схем, по мере удаления гидромониторов от места водозабора вслед за фронтом горных работ, нарушается регламентированный режим пульпообразования. В результате уменьшения давления и расхода воды, ниже требуемых норм, становится невозможным размыв и разрыхление исходных песков, повышается удельное потребление воды, растет энергоемкость процесса гидротранспортирования, снижается концентрация перекачиваемой гидросмеси [4, 7, 8, 10]. Это отрицательно сказывается на надежности и эффективности горных работ, существенно увеличивает себестоимость добычи и транспортировки исходных песков, а в зимний период приводит к остановке горного производства.

В существующих методиках расчета систем водоснабжения открытых горных работ и гидротранспортных комплексов используют схему, когда каждая гидромониторная установка получает воду со своего водозабора [9, 11 – 13], и

не рассматривают схему разветвленных трубопроводных систем, которые оборудованы одним общим насосом, установленным в месте водозабора, и несколькими повышающими насосами. Поскольку каждая забойная установка (ЗУ) обычно имеет зумпф для аккумуляции гидросмеси и коллектор, из которого вода по нескольким трубопроводам с шиберными задвижками поступает в зумпф и на несколько гидромониторов, осуществляющих пульпообразование, то применение для исследования таких систем известных методов расчетов разветвленных сетей водоснабжения городов и промышленных предприятий требует численного решения систем большого числа нелинейных уравнений [12, 14]. Так, для двух ЗУ, в общем случае, требуется решить систему из восьми уравнений, трех – из двенадцати, четырех – из шестнадцати и т.д.

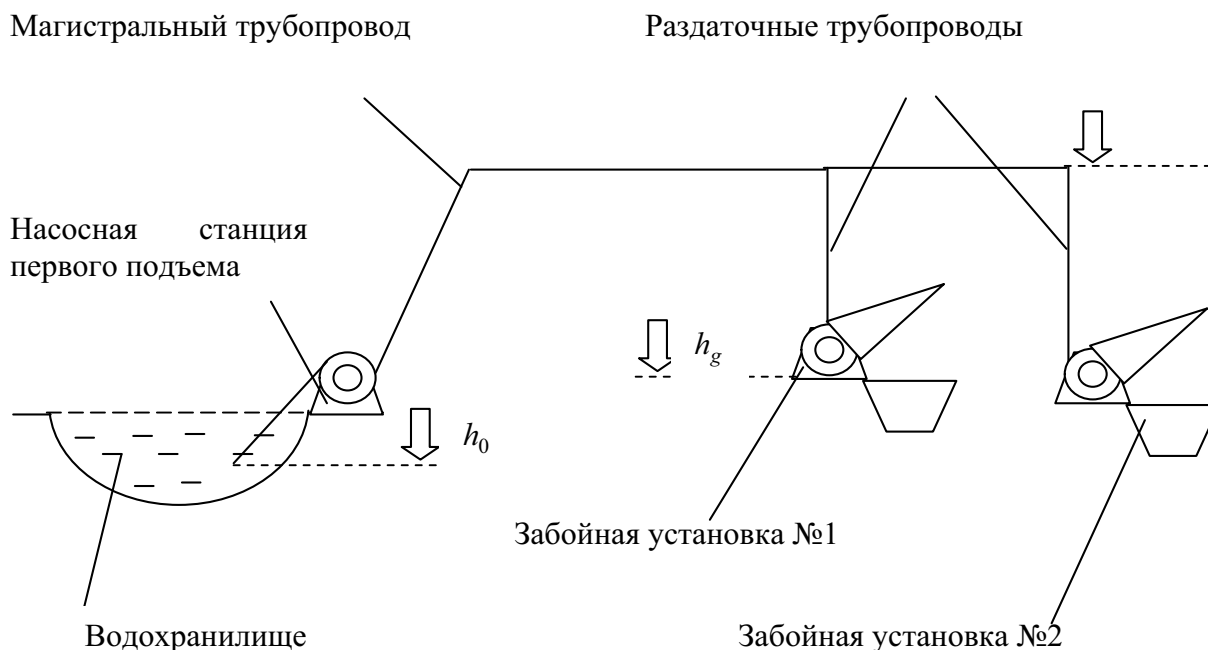


Рис. 1 – Принципиальная схема системы водоснабжения карьера

Цель данной статьи – разработка математической модели для разветвленной системы водоснабжения открытых горных работ с единственным водозабором и с использованием дополнительных повышающих насосов.

Для расчета расхода воды в трубопроводах рассматриваемой системы, которая содержит в простейшем случае две ЗУ, на каждой из которых установлен один гидромонитор и один трубопровод подачи воды в зумпф, в общем случае необходимо решить следующую систему уравнений [9, 12, 14]:

$$\Delta H_g^{(1)} = z_g Q_g^2 + z_R^{(1)} Q_R^2 + z_m^{(1)} Q_m^2 - H_m(Q_m) - H_R(Q_R) - H_g(Q_g); \quad (1)$$

$$\Delta H_g^{(2)} = z_g G_g^2 + z_R^{(2)} G_R^2 + z_m^{(2)} Q_m^2 - H_m(Q_m) - H_R(G_R) - H_g(G_g); \quad (2)$$

$$\Delta H_z^{(1)} = z_z Q_z^2 + z_R^{(1)} Q_R^2 + z_m^{(1)} Q_m^2 - H_m(Q_m) - H_R(Q_z); \quad (3)$$

$$\Delta H_z^{(2)} = z_z G_z^2 + z_R^{(2)} G_R^2 + z_m^{(2)} Q_m^2 - H_m(Q_m) - H_R(G_z); \quad (4)$$

$$\Delta H_z^{(1)} = h_0 - h_z^{(1)}; \Delta H_z^{(2)} = h_0 - h_z^{(2)}; Q_R = Q_g + Q_z; G_R = G_g + G_z; Q_m = Q_R + G_R; \quad (5)$$

$$\Delta H_g^{(1)} = h_0 - h_g^{(1)}; \Delta H_g^{(2)} = h_0 - h_g^{(2)}; c_m = I_m C_m; b_m = \frac{I_m}{K_m} B_m; a_m = \frac{I_m}{K_m^2} A_m; \quad (6)$$

$$H_R = c_R - b_R Q_R - a_R Q_R^2; H_g = c_g - b_g k Q_g - a_g k^2 Q_g^2, H_m = c_m - b_m Q_m - a_m Q_m^2, \quad (7)$$

где  $\Delta H_g^{(1)}, \Delta H_g^{(2)}$  – перепад геодезических отметок водозабора и насадок гидромониторов ЗУ 1 и 2, м;  $z_g$  – гидравлическое сопротивление трубопровода, подающего воду к гидромонитору;  $Q_g, G_g$  – расход воды через насадки гидромониторов ЗУ 1 и 2, м<sup>3</sup>/с;  $z_R^{(1)}, z_R^{(2)}$  – гидравлические сопротивления раздаточных трубопроводов;  $Q_R, G_R$  – расход воды через раздаточные трубопроводы, подающие воду к гидромониторам ЗУ 1 и 2, м<sup>3</sup>/с;  $z_m^{(1)}, z_m^{(2)}$  – гидравлические сопротивления магистрального трубопровода до отвода воды на ЗУ 1 и 2;  $Q_m$  – расход воды через магистральный трубопровод, м<sup>3</sup>/с;  $H_m$  – напор насосов на водозаборной станции, м. вод. ст.;  $H_R$  – напор насосов на промежуточной станции, размещенной внутри карьерного поля, м. вод. ст.;  $H_g$  – напор насосов на бустерной станции перед гидромониторами, м. вод. ст.;  $\Delta H_z^{(1)}, \Delta H_z^{(2)}$  – перепад геодезических отметок водозабора и выхода из трубопровода, подающего воду в зумпфы ЗУ 1 и 2, м;  $z_z$  – гидравлическое сопротивление трубопровода, подающего воду в зумпф;  $Q_z, G_z$  – расход воды через трубопроводы, подающие воду в зумпфы ЗУ №1 и №2, м<sup>3</sup>/с;  $h_0$  – геодезическая отметка водозабора, м;  $h_z^{(1)}, h_z^{(2)}$  – геодезические отметки выходов из трубопроводов, подающих воду в зумпфы ЗУ 1 и 2, м;  $h_g^{(1)}, h_g^{(2)}$  – геодезические отметки насадок гидромониторов ЗУ 1 и 2, м;  $c_m, b_m, a_m$  – эффективные коэффициенты аппроксимации расходно-напорной характеристики (РНХ) насосов водозаборной станции [4, 12, 13];  $I_m$  – количество последовательных подъемов давления;  $C_m, B_m, A_m$  – коэффициенты аппроксимации РНХ насосов;  $K_m$  – количество параллельно работающих насосов, шт.;  $c_R, b_R, a_R$  – эффективные коэффициенты аппроксимации РНХ насосов на промежуточной станции, размещенной на магистральном трубопроводе;  $k$  – количество гидромониторов на одной забойной станции;  $c_g, b_g, a_g$  – эффективные коэффициенты аппроксимации РНХ повышающего насоса перед гидромониторами.

При таком подходе задача является достаточно трудоемкой, в то время как различия в параметрах трубопроводов забойных установок для условий открытых горных работ бывают незначительными. Это позволяет систему уравнений (1) – (7) упростить, поскольку различие в системах водоснабжения забойных установок при проведении открытых горных работ заключается только в длине трубопроводов [15]. Так, для условий карьеров ВГМК разность длин магист-

ральных трубопроводов не превышает 200 м, раздаточных трубопроводов – 17 м, а разность геодезических отметок сопел гидромониторов и зумпфов – 1 м.

Проанализируем, как эти отличия влияют на уравнения для расчета подачи воды на гидромониторы каждой из очередей. Учитывая вышеуказанную особенность рассматриваемых систем водоснабжения, уравнение (2) можно представить как

$$\Delta H_g^{(2)} \left( 1 + \frac{h_g^{(1)} - h_g^{(2)}}{\Delta H_g^{(2)}} \right) = z_g G_g^2 + z_R^{(1)} G_R^2 \left( 1 + \frac{\Delta z_R^{(1)}}{z_R^{(1)} G_R^2} \right) + \quad ; \quad (8)$$

$$+ z_m^{(2)} Q_m^2 \left( 1 + \frac{\Delta z_m^{(1)}}{z_m^{(1)} Q_m^2} \right) - H_m - H_R(G_R) - H_g(G_g)$$

$$z_R^{(2)} = z_R^{(1)} + \Delta z_R^{(1)}; \quad z_m^{(2)} = z_m^{(1)} + \Delta z_m^{(1)}; \quad \Delta H_g^{(2)} = \Delta H_g^{(1)} + h_g^{(1)} - h_g^{(2)}, \quad (9)$$

где  $\Delta z_R^{(1)}$  – гидравлическое сопротивление, обусловленное различной длиной раздаточных трубопроводов ЗУ 1 и 2;  $\Delta z_m^{(1)}$  – гидравлическое сопротивление, обусловленное различной длиной магистральных трубопроводов ЗУ 1 и 2.

Из сравнения уравнений (1) и (9) видно, что их можно считать одинаковыми, если выполняются условия:

$$\frac{h_g^{(1)} - h_g^{(2)}}{\Delta H_g^{(2)}} \leq 0.1; \quad \frac{\Delta L_R}{L_R^{(1)}} \leq 0.1 \frac{k_R^{(1)}}{k_R^{(2)}} G_R^2; \quad \frac{\Delta L_m}{L_m^{(2)}} \leq \frac{k_m^{(1)}}{k_m^{(2)}} 0.1 Q_m^2, \quad (10)$$

где  $k_R^{(1)}$ ,  $k_R^{(2)}$  – коэффициенты, учитывающие местные гидравлические сопротивления (МГС) для раздаточных трубопроводов, подающих воду на ЗУ 1 и 2;  $k_m^{(1)}$ ,  $k_m^{(2)}$  – коэффициенты, учитывающие МГС для магистральных трубопроводов, подающих воду на ЗУ 1 и 2.

Справедливость условий очевидна, так как обе ЗУ располагаются практически на одной геодезической отметке (разница отметок  $\Delta H_g^{(2)}$  составляет около 20 м). Для анализа условий (10) исследуем их предельные случаи, которые представим в обобщенном виде  $f(Q, K) = 10KQ^2$  (см. рис. 2), где  $f$  – допустимая относительная разность длин трубопроводов, %;  $Q$  – расход воды через трубопровод, м<sup>3</sup>/ч;  $K$  – соотношение коэффициентов МГС.

Поскольку для рассматриваемого случая величина подачи воды к забойной установке не превышает 3000 м<sup>3</sup>/ч, а расход воды в магистральном трубопроводе составляет около 6000 м<sup>3</sup>/ч, то условия (10) выполняются при относительной разности длин трубопроводов, не превышающей, соответственно, 10 и 40% (рис. 2). Для условий карьеров ВГМК соответствующие допустимые абсолютные разности длин трубопроводов составляют 20 и 1200 м, что значительно больше реальных величин.

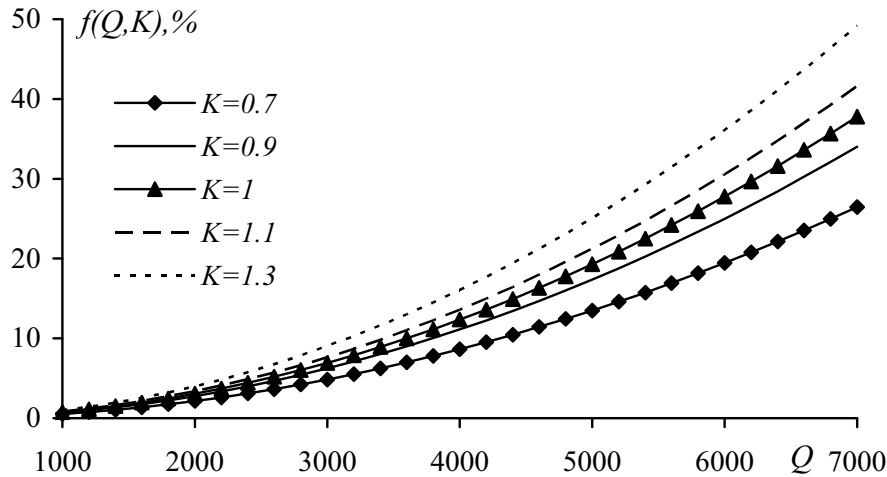


Рис. 2 – Зависимость допустимой относительной разности длин трубопроводов (%) от расхода воды через них (м<sup>3</sup>/ч) для различных соотношений коэффициентов МГС

Таким образом, для расчета параметров и режимов работы систем водоснабжения открытых горных работ, удовлетворяющих условиям (10), независимо от количества забойных установок, вместо системы уравнений (1) – (7) можно использовать следующие уравнения:

$$\left(z_g + (a_g + \alpha)k^2\right)Q_g^2 + n^2\alpha Q_z^2 + 2kn\alpha Q_g Q_z + k(b_g + \beta)Q_g + n\beta Q_z - \gamma_g = 0; \quad (11)$$

$$k^2\alpha Q_g^2 + (z_z + n^2\alpha)Q_z^2 + 2kn\alpha Q_g Q_z + k\beta Q_g + n\beta Q_z - \gamma_z = 0; \quad (12)$$

$$\beta = k(b_R + mb_m); \quad \alpha = z_R + a_R + (z_m + a_m)m^2; \quad (13)$$

$$\gamma_g = h_0 - h_g + c_m + c_R + c_g; \quad \gamma_z = h_0 - h_z + c_m + c_R + c_g, \quad (14)$$

где  $h_g$  – среднее для ЗУ значение отметки насадки гидромонитора, м;  $h_z$  – среднее для ЗУ значение отметки выхода из водовода в зумпфе, м;  $z_R$  – гидравлическое сопротивление раздаточного трубопровода;  $z_m$  – гидравлическое сопротивление магистрального трубопровода;  $n$  – количество трубопроводов, обеспечивающих подачу воды в зумпф забойной насосной станции;  $m$  – количество забойных насосных станций.

На основании закона сохранения расход воды в магистральном и раздаточном трубопроводах рассчитывают по известным  $Q_g$  и  $Q_z$  следующим образом:

$$Q_m = kmQ_g + nmQ_z; \quad Q_R = kQ_g + nQ_z. \quad (15)$$

При поверочном расчете системы водоснабжения открытых горных работ необходимо по заданным диаметрам и количеству трубопроводов, РНХ используемых насосов, а также по геометрическим характеристикам гидромонитора определить расход воды в водоводах системы, давление перед гидромонито-

ром, а также напор насосов и потребляемую электродвигателями мощность.

Уравнения (11) и (12) решаются численно методом Ньютона или методом простой итерации. При этом на каждой итерации проводится проверка выполнения ограничения на подачу воды на гидромонитор, обусловленного величиной  $Q_z$ :

$$Q_g > \frac{\sqrt{b_g^2 k^2 + 4(c_g - \Delta H_g + \Delta H_z)(a_g k^2 + z_g)} - b_g k}{2(a_g k^2 + z_g)}. \quad (16)$$

Если это условие выполняется, то переходят к следующей итерации, иначе расчет прекращают, поскольку в этом случае регламентированный режим работы узла пульпоприготовления не может быть обеспечен из-за отсутствия подачи воды в зумпф.

Поверочный расчет проводят по следующему алгоритму (рис. 3). На первом шаге осуществляют подготовку начальных данных, на втором – путем итерационного решения системы уравнений (11) и (12) определяют расход воды в трубопроводах на гидромонитор и в зумпф, на третьем – по известному расходу воды на гидромонитор и в зумпф по формулам (15) вычисляют расход воды в остальных трубопроводах, на четвертом – по формулам (7) рассчитывают напор насосов и потери напора в трубопроводах системы водоснабжения, на пятом – определяют давление перед каждым насосом, а также перед гидромониторами и оценивают режим течения воды во всасывающих патрубках насосов путем сравнения значений действительного и допустимого кавитационных запасов.

По разработанной методике был проведен поверочный расчет параметров и режимов работы системы водоснабжения карьерных гидротранспортных установок ВГМК.

Водоснабжение карьерных гидротранспортных установок ВГМК осуществляется так. Водозабор производят с отметки 110 м из водохранилища, организованного в балке Глубокая, двумя насосами Д6300 на станции первого подъема. Затем по трубопроводу диаметром 1020 мм вода направляется на борт карьера и по междурядному телу с отметкой 130 м доставляется на расстояние 2700 м, где организован отвод диаметром 630 мм на забойную станцию первой очереди гидротранспорта. На расстоянии около 200 м от этого отвода по ходу течения воды сделан такой же отвод на забойную станцию второй очереди гидротранспорта. ЗУ первой и второй очереди размещены на отметках 117 или 116 м. В случае необходимости систему дополняют насосной станцией второго подъема, которая размещена на борту карьера и оснащена одним насосом Д6300. На первой и второй очередях используют одинаковые ЗУ, каждая из которых имеет зумпф объемом 5 м<sup>3</sup>, два гидромонитора ГМД250 с насадкой 800 мм, коллектор диаметром 630 мм, трубопроводы подачи воды в зумпф диаметром 270 мм, трубопроводы подачи воды на гидромониторы диаметром 230 мм. Осредненные значения параметров работы системы водоснабжения для различных вариантов приведены в табл. 1.

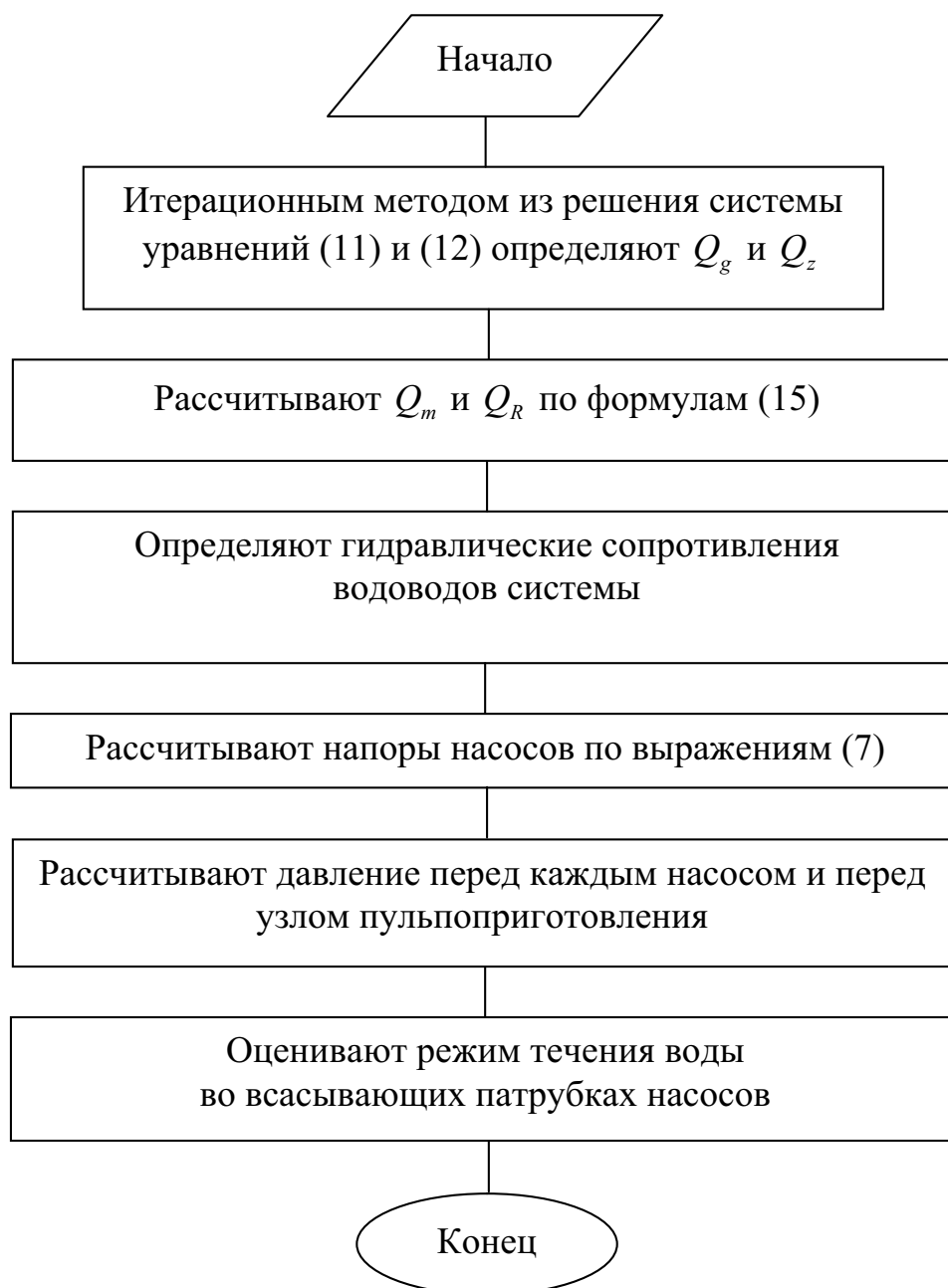


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма поверочного расчета системы водоснабжения открытых горных работ

На основании анализа результатов расчета специалистами ВГМК для модернизации системы водоснабжения был выбран четвертый вариант, реализация которого позволила поднять давление перед гидромониторами с 7 до 11 ат, сократить объемы потребления воды на пульпообразование на 7.3%, обеспечить регламентированные режимы пульпообразования и заданную концентрацию гидросмеси. При этом расход и давление воды в системе водоснабжения отличались от расчетных значений не более чем на 5%.

Полученная близость расчетных величин и экспериментальных данным позволяет обоснованно использовать предлагаемый метод расчета для разветв-

ленных систем водоснабжения на карьерах россыпных месторождений, для которых выполняются условия (10).

Таблица 1 – Осредненные параметры работы системы водоснабжения гидротранспортного комплекса для различных расчетных вариантов

Тип насоса	Степень открытия задвижки, %	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч			Напор, м. вод. ст.		Давление, м. вод. ст.	
		$Q_g$	$Q_z$	$Q_m$	$H_g$	$H_m$	$P_m$	$P_g$
Д6300* Д2000	100	910/1030	2930/1470	15400/9990	106/101	73/83	35/73	148/186
	40	988/1070	2050/816	12100/7530	103/99	80/87	59/85	173/199
Д6300* Д2000-1	100	865/993	2960/1470	15300/9880	92/88	73/83	35/73	134/174
	40	949/1030	2060/819	12000/7410	89/86	80/87	60/86	160/187
Д6300* Д2500	100	788/936	3010/1490	15200/9700	70/68	73/84	36/74	113/156
	40	887/979	2080/824	11900/7210	69/68	80/87	61/87	141/170
Д4000* Д2000	100	902/1090	2810/1510	14900/10200	106/100	67/89	31/77	146/190
	40	990/1040	2060/857	12200/7780	102/98	80/97	60/95	173/207
Д4000* Д2000-1	100	857/1010	2840/1520	14800/10100	92/87	67/89	32/78	132/178
	40	952/1060	2070/860	12100/7670	89/85	81/97	61/96	161/196
Д4000* Д2500	100	779/951	2900/1530	14700/9930	70/68	68/90	33/80	111/161
	40	890/1010	2100/865	12000/7490	69/67	82/98	62/97	142/179

Примечание: «\*» отмечен тип насоса установленного на водозаборной станции, без «\*» – тип повышающего насоса перед гидромонитором. В числители указаны значения для трубопровода подачи воды в зумпф диаметром 273 мм, а в знаменателе – 150 мм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Національна програму розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2010 року.
2. Технично-економічні показателі горнодобувальних підприємств України / В.Г. Близнюков, В.А. Салганик, Л.А. Штанько и др. – Кривий Ріг: ГНИГРИ, 2002. – 178 с.
3. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семеновко. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
4. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семеновко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
5. Блюсс Б.А., Головач Н.А. Совершенствование технологий преобогащения ильменитовых руд. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 126 с.
6. Блюсс Б.А., Сокил А.М., Гоман О.Г. Проблемы гравитационного обогащения титан-цирконовых песков. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 190 с.
7. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
8. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
9. Нурок Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 583 с.
10. Руденко В.Л., Семеновко Е.В. Исследование параметров гидротранспорта при переносе головной насосной станции // Металлургическая и горнорудная промышленность, 2002. – № 6. – С. 73 – 77.
11. Антонов Э.И., Пак В.В. Новый метод обобщения, анализа и выбора режимов работы водоотливных установок // Уголь Украины. – 1996. – №4. – С. 35 – 37.
12. Белан А.Е., Хоруджий Л.Д. Технично-економічні розрахунки водопровідних систем на ЕВМ. – К.: Вища школа, Головне изд-во, 1979. – 192 с.
13. Антонов Э.И., Пак В.В., Рязанцева И.М. Критерии сравнительной оценки надежности и экономичности режимов работы многоагрегатных мощных шахтных водоотливных установок // Сб. науч. тр. «Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок». – 2003. – №96. – С. 112 – 120.
14. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. – Л.: Стройиздат, 1973. – 408 с.
15. Блюсс Б.А., Семеновко Е.В. Обеспечение рационального режима работы карьерного гидротранспортного комплекса // Сб. науч. тр. НГУ. – 2003. – №17, т. 1. – С. 228 – 233.