

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСКАВИТАЦИОННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА С НЕСКОЛЬКИМИ НАСОСАМИ**

Розглянуто проблему розташування насосних агрегатів на трубопроводі гідротранспортного комплексу під час його подовження в зв'язку розвитком фронту гірничих робіт. Запропонована методика розрахунку раціонального розташування насосів, яке забезпечує безкавітаційний режим їх роботи.

### **THE CAVITATION-FREE OPERATION ASSURANCE FOR HYDROTRANSPORT COMPLEX WITH SEVERAL PUMPS**

The problem of pump units disposition on the hydrotransport complex pipeline during the mine works front development is considered. The design procedure of pumps rational disposition which ensures their cavitation-free operation is offered.

Гидротранспортные комплексы и системы получили широкое распространение на горно-обогатительных предприятиях Украины [1-3]. Эти комплексы используются для перемещения исходного сырья от мест добычи к месту переработки, отвод отходов обогащения, а также транспортировку материала внутри обогатительного передела, подачу его в обогатительное оборудование и на склады [1-3]. По мере развития фронта горных работ и модернизации технологии обогащения происходило совершенствование гидротранспортных комплексов, в результате чего увеличивалась их производительность, вырастала протяженность трубопроводов, обеспечивающих подачу исходного сырья на обогащение, а также разветвленность системы трубопроводов внутри обогатительного передела [4].

Сначала для обеспечения процесса гидротранспортирования на существующих комплексах горных предприятий было достаточно одного насоса. Впоследствии потребовалось два последовательно включенных насоса, установленных на головной станции [4]. В дальнейшем для обеспечения доставки сырья стали использовать схемы гидротранспорта с несколькими последовательно подключенными насосами центробежного типа, расположенных на различных насосных станциях, что потребовало теоретического обоснования их рационального размещения по трассе.

При использовании двух насосов такая проблема не возникала, так как их можно установить на одной насосной станции и эксплуатировать как один насос с удвоенным напором. С тремя насосами это сделать уже невозможно, поскольку корпуса выпускаемых центробежных насосов рассчитаны на давление, не превышающее номинальное более, чем в два раза [1-3], и если поставить все три насоса на головной станции разрушится третий насос. Таким образом, необходимо или установить два насоса на головной станции, а третий на некотором удалении от нее, или разместить каждый насос на отдельной насосной станции, распределив их каким-то образом по трассе.

На практике эта проблема, как правило, решается методом «проб и ошибок» [2], и поскольку при близком расположении насосов возможно их разрушение

из-за избыточного давления внутри проточной части, а при большом отдалении – возникновение кавитации в одном из насосов. Опасность возникновения кавитации имеет место также, при установке на трубопроводе между насосами дополнительных гидравлических сопротивлений, таких, как быстро разъемные соединения, задвижки, переходники или компенсирующие колонны [1, 2].

Рассматриваемая проблема сводится к решению одной из двух возможных задач:

- для заданной гидротранспортной установки при известном количестве и типах центробежных насосов определить производительность комплекса и рассчитать места размещения насосов по трассе, обеспечивающие бескавитационный режим течения;

- для заданной гидротранспортной установки с известным размещением и характеристиками насосов оценить возможность возникновения кавитационного режима течения после установки в заданном сечении трубопровода выбранного вида местного сопротивления.

Рассмотрим каждую из этих задач последовательно. В общем случае производительность гидротранспортного комплекса определяется из решения уравнения [1-3]

$$\frac{\rho}{\rho_o} \sum_{j=1}^N \Delta Z_j + \sum_{j=1}^N h_j = \sum_{j=1}^M \chi_j H_j(Q), \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность гидросмеси;  $\rho_o$  - плотность несущей жидкости;  $\Delta Z_j$  - разница геодезических отметок начала и конца  $j$ -го участка трассы;  $h_j$  - гидравлическое сопротивление  $j$ -го участка трассы;  $\chi_j$  - коэффициент, учитывающий потери напора  $j$ -го насоса на местные гидравлические сопротивления внутри насосной станции;  $H_j(Q)$  - расходно-напорная характеристика  $j$ -го насоса;  $N$  – количество участков трассы;  $M$  - количество установленных насосов.

При проведении расчетов магистраль разбивается на участки, каждый из которых представляет собой прямолинейный, наклонный, вертикальный или горизонтальный трубопровод с местным гидравлическим сопротивлением на конце. Так как уравнение (1) решается численно, то по после определения искомого значения подачи будут известны также значения потерь напора и геодезического уклона на каждом из расчетных участков, что облегчает дальнейшие расчеты.

Необходимым условием бескавитационного режима работы центробежного насоса является превышение действительного значения кавитационного запаса потока над допустимым для данного насоса значением [5]:

$$\frac{P_o - P_k}{\rho_o g} + \frac{Q^2}{2gF^2} \frac{\rho}{\rho_o} \geq \varphi \left( \frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (2)$$

где  $P_o$  - давление перед насосом;  $P_k$  - давление насыщенных паров жидкости;  $g$  - ускорение свободного падения;  $Q$  - производительность гидротранспортного комплекса;  $F$  - площадь сечения трубопровода;  $\varphi$  - коэффициент запаса;  $n$  - номинальное число оборотов рабочего колеса;  $C$  - эмпирическая константа Руднева [1,5].

Давление перед первым и вторым насосами, если второй находится от первого, на некотором расстоянии определяется по формулам

$$\frac{P_1}{\rho_o g} = \frac{P_a}{\rho_o g} - \Delta Z_o \frac{\rho}{\rho_o} - \frac{Q^2}{2gF^2} \frac{\rho}{\rho_o} - h_o ; \quad (3)$$

$$\frac{P_2}{\rho_o g} = \frac{P_1}{\rho_o g} + \chi_1 H_1(Q) - \Delta Z_1 \frac{\rho}{\rho_o} - h_1 , \quad (4)$$

где  $P_1$  - давление перед первым насосом;  $P_a$  - атмосферное давление;  $\Delta Z_o$  - разница геодезических отметок уровня гидросмеси в зумпфе и входа в рабочее колесо первого насоса;  $h_o$  - потери напора во всасывающем трубопроводе установки;  $P_2$  - давление перед вторым насосом;  $H_1(Q)$  - напор первого насоса;  $\Delta Z_1$  - разница геодезических отметок выхода из рабочего колеса первого насоса и входа в рабочее колесо второго насоса;  $h_1$  - потери напора в трубопроводе между первым и вторым насосом.

Подставляя последовательно выражения (3) и (4) в формулу (2), получим условия бескавитационного режима работы первого и второго насосов:

$$H_B - \Delta Z_o \frac{\rho}{\rho_o} \geq \varphi \left( \frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3} + h_o ; \quad (5)$$

$$H_B - \Delta Z_o \frac{\rho}{\rho_o} - \Delta Z_1 \frac{\rho}{\rho_o} \geq \varphi \left( \frac{n\sqrt{Q}}{C} \right)^{4/3} + h_o + h_1 - \chi_1 H_1(Q); \quad (6)$$

$$H_B = \frac{P_a - P_k}{\rho_o g} , \quad (7)$$

где  $H_B$  - вакуумметрическая высота всасывания.

Обобщая (5) и (6), получаем условие бескавитационного режима работы для  $j$ -го из последовательно включенных насосов

$$H_B - \frac{\rho}{\rho_o} \sum_{j=1}^{i-1} \Delta Z_j \geq K_i Q^{2/3} + \sum_{j=1}^{i-1} h_j - \sum_{j=1}^{i-1} \chi_j H_j(Q); \quad (8)$$

$$K_i = \varphi_i \left( \frac{n_i}{C_i} \right)^{4/3} . \quad (9)$$

При решении второй задачи вместо неравенства (9) необходимо рассмотреть неравенство

$$H_B - \frac{\rho}{\rho_o} \sum_{j=1}^{i-1} \Delta Z_j \geq \frac{Q^2}{2gF^2} \frac{\rho}{\rho_o} + \sum_{j=1}^{i-1} h_j - \sum_{j=1}^{i-1} \chi_j H_j(Q), \quad (10)$$

которое является условием бескавитационного режима течения в круглом трубопроводе. На основании (10) допустимый в расчетной точке коэффициент местного гидравлического сопротивления будет рассчитываться по формуле

$$\zeta_i \leq \frac{\sum_{j=1}^{i-1} \chi_j H_j(Q) - \frac{\rho}{\rho_o} \sum_{j=1}^{i-1} \Delta Z_j - \sum_{j=1}^{i-1} h_j + H_B}{\frac{Q^2}{2gF^2} \frac{\rho}{\rho_o}} - 1, \quad (11)$$

где  $\zeta_i$  - допустимый в расчетной точке коэффициент местного гидравлического сопротивления.

Из сравнительного анализа формул (8) и (10) видно, что они отличаются только первым слагаемым в правой части, которое является допустимым кавитационным запасом. При этом левые части этих неравенств могут рассматриваться как геодезическая характеристика трассы, а правые – как совместные расходно-напорные характеристики трассы и насосов гидротранспортного комплекса. Для решения неравенств (8) и (10) можно воспользоваться одним и тем же методом, для чего запишем эти выражения в общем виде

$$\sum_{j=1}^{i-1} \chi_j H_j(Q) - \frac{\rho}{\rho_o} \sum_{j=1}^{i-1} \Delta Z_j - \sum_{j=1}^{i-1} h_j \geq k_i Q^n - H_B. \quad (12)$$

Левая часть неравенства (12) является совместной расходно-напорной характеристикой участка трассы, тогда как правую можно рассматривать в качестве некоторой кавитационной характеристики устанавливаемого объекта - насоса или местного гидравлического сопротивления.

Из сравнительного анализа (1) и (12) видно, что в левой части неравенства (12) присутствует часть выражения (1). Это позволяет рассчитывать левую часть неравенства (12) еще в процессе решения уравнения (1), а при определении допустимого места размещения объекта сравнивать это значение со значением его кавитационной характеристики, которая записана в правой части (12). Таким образом, вычисляя выражение (12) для всех участков магистрали, определяют допустимое расстояние от ее начала, на котором можно установить рассматриваемый объект, обеспечив при этом бескавитационный режим работы гидротранспортного комплекса.

По предложенной методике было проведено обоснование рационального размещения насосов гидротранспортного комплекса Вольногорского государственного горно-металлургического комбината (ВГГМК) для случая, когда

фронт горных работ дошел до границы охранного целика месторождения (см. рис. 1 и 2).

В настоящее время гидротранспортирование на ВГГМК осуществляется по схеме «насос-в-насос» без разрыва струи посредством трех последовательно включенных центробежных насосов WBC-54 18×20, которые укомплектованы синхронными двигателями (см. рис. 2). Рабочая зона насосов составляет от 1000 до 7000 м<sup>3</sup>/ч при развиваемом напоре от 50 до 110 м.в.ст. в зависимости от частоты вращения рабочего колеса.

До границы охранного целика остается около трех километров, поэтому дальнейшее развитие магистрали гидротранспортного комплекса потребует увеличения числа насосов. Расчет размещения насосов был проведен для насосов WBC-54 18×20, в предположении, что они укомплектованы электродвигателями с частотой вращения вала 450 об/мин (см. рис 3).

При обосновании рациональных мест размещения насосов предполагалось, что первый насос устанавливается в начале трассы на головной пульпонасосной станции, поэтому на рис.3 приведены допустимые расстояния от начала трассы до места установки очередного насоса для остальных четырех насосов. Из рис. 3 видно, что наиболее сильно с увеличением концентрации гидросмеси изменяется допустимое место размещение третьего насоса. При этом кривые для всех насосов имеют минимум при значениях концентрации около 10 %.

Учитывая, что гидротранспортный комплекс запускается на воде, а затем выводится на рабочий режим постепенным увеличением концентрация гидросмеси, то максимально допустимые значения расстояний от начала трассы до мест установки насосов будут соответствовать концентрации 10 %.

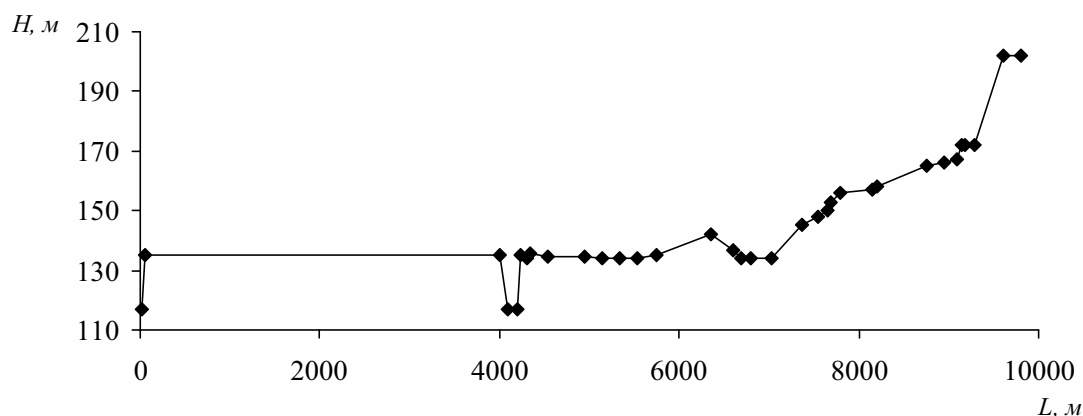


Рис. 1 – Нивелировка трассы гидротранспортного комплекса ВГГМК

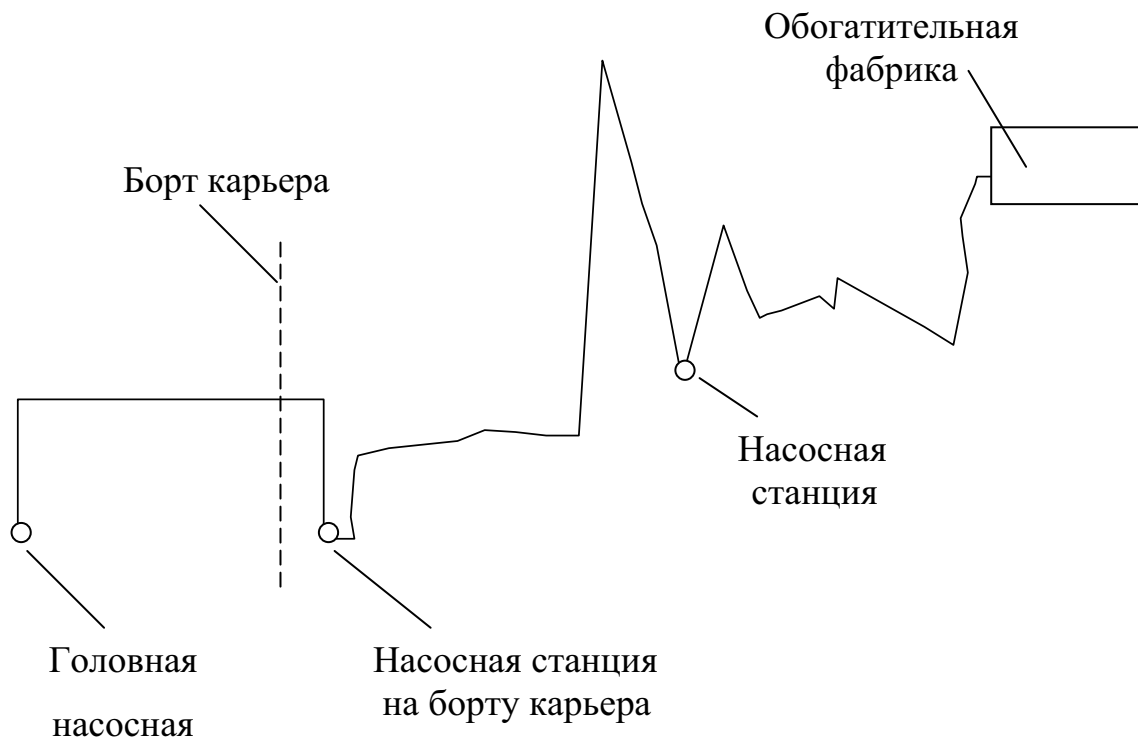


Рис. 2 – План трассы гидротранспортного комплекса ВГГМК

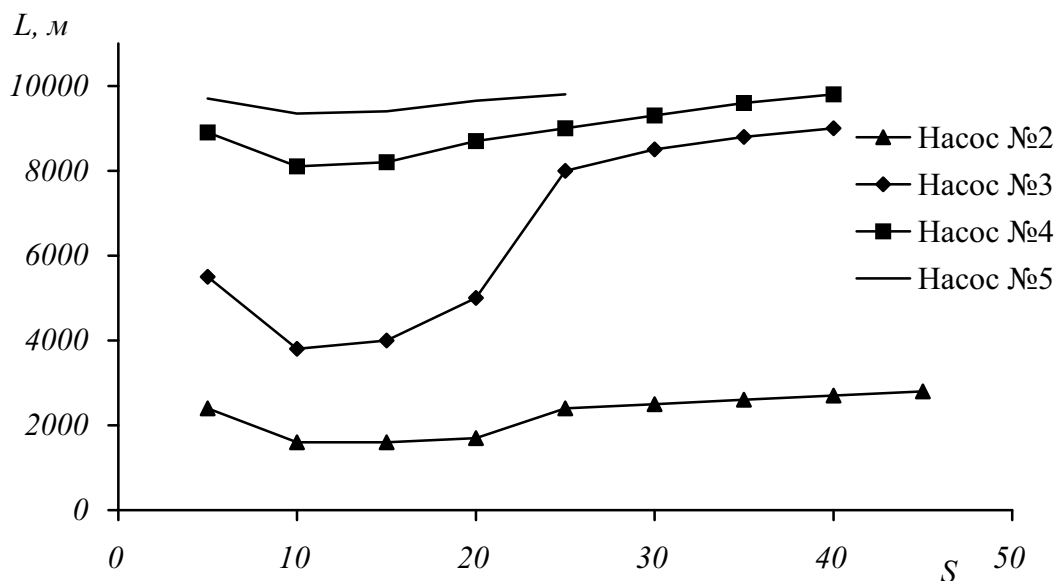


Рис. 3 – Зависимость допустимого расстояния от начала трассы до места установки насоса от концентрации гидросмеси

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нурок Г.А. Процессы и технологии гидромеханизации открытых горных работ. – М.:Недра,1985. – 583 с.
2. Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем / Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, Д.Г. Сулаберидзе, Л.А. Алехин. - М.: Недра, 1984. - 119 с.
3. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт. – М.: Металлургия, 1975. – 384 с.
4. Гуменик И.Л., Сокил А.М., Семененко Е.В., Шурьгин В.Д. Проблемы разработки россыпных месторождений. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.

УДК 622.648.6.65:622.647.7.65+531.555.1:531.384:532.51.542.012.4.001.24

Б.В. Пономарев

## **ВЫЛЕТ ЧАСТИЦ ПОЛИДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАМКНУТОЕ ВЫРАБОТАННОЕ ПРОСТРАНСТВО ШАХТЫ ПРИ ПНЕВМОЗАКЛАДКЕ**

У статті описано розрахункову схему для визначення геометричних і кінематичних параметрів повітряного струменя, а також руху частки закладального матеріалу у прямому та зворотному потоці повітря в замкнутому просторі шахтної виробки. Наведено вивід розрахункових формул математичної моделі процесу вильоту часток закладального матеріалу в замкнутий простір. Дано алгоритм, а також аналіз результатів розрахунку на прикладі конкретних значень параметрів.

## **START OF POLIDISPERSE MATERIAL IN THE CLOSED PRODUCED SPACE OF SHAFT AT A BACKFILLING**

Described the method for determination of parameters of an air jet, and also movement of particles of backfilling material in direct and return flow of air in the closed space of mine development. The conclusion of the settlement formulas of mathematical model that process.

При закладке выработанного пространства шахты подача материала осуществляется пневмотранспортными машинами в заранее подготовленный объем в массиве, полученный после выемки полезного ископаемого. В технологии пневмозакладочных работ при подготовке выработанного пространства удаляют забойную крепь и ограждают закладочную полосу с заданной шириной и высотой.

В процессе формирования закладочного массива возникает обратный поток воздуха отраженный от откоса закладки, а сама струя представляет собой турбулентную затопленную струю [1].

Рассмотрим частицу эквивалентного радиуса  $a$ , вылетающую из трубопровода радиусом  $R_0$  с начальной скоростью  $v_0$  и движущуюся в турбулентной струе истекающей со скоростью  $u_0$  в выработанное пространство высотой  $H$  и шириной  $b_1$ . Ось трубопровода расположена на половине высоты  $H/2$  выработанного пространства. Начало координат  $O$  поместим в точку центра выходного сечения трубопровода, ось  $Ox$  - вдоль оси трубопровода. Ось  $Oy$  - вниз перпендикулярно оси  $Ox$  (рис. 1).

Нахождение формы и размеров затопленной газовой струи с учетом обратного тока представляет собой сложную задачу газовой динамики. Определим форму и размеры струи приближенно. Сделаем допущение, что расширение струи в зависимости от пути, пройденного частицей газа от среза трубы к откосу закладочного массива и затем обратно до выхода ее из выработки, происходит так, что площадь поперечного сечения струи возрастает по линейному закону как в прямом так и в обратном потоке. Мысленно продолжим коридор выработки по направлению прямого тока на расстояние равное расстоянию  $L_1$  от среза