короткого замыкания управляющие импульсы должны быть немедленно блокированы. При наличии тока в обмотке возбуждения подача управляющих импульсов может быть возобновлена после восстановления в сети расчетного значения напряжения в интервале $2\pi \le \omega t \le (8\pi/3)$; при отсутствии тока – в том же интервале времени, когда напряжение u_f, будучи направленным навстречу э.д.с. вторичных обмоток трансформатора Тр, превышает по абсолютной величине мгновенное значение соответствующей э.д.с. Отсчет углов ведется с момента подачи последнего управляющего импульса.

Научный руководитель профессор, д.т.н. *Б.Н.Абрамович*

УДК 622.234.5

И.А.ЧИЛИКИН
Горно-электромеханический факультет,
студент группы ГМ-98, ассистент профессора

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГИДРОТРАНСПОРТА С ПОГРУЖНОЙ КАПСУЛОЙ

Рассмотрена система гидротранспорта при подводной разработке твердых полезных ископаемых, которая состоит из двух частей:

– горизонтального трубопровода;

– вертикального трубопровода.

Представлен также наиболее сложный участок вертикального гидравлического транспорта.

Работа системы вертикального гидротранспорта заключается в двухстадийном процессе подъема гидросмеси полезного ископаемого от придонного зумпфа до плавсредства. На первом участке – от придонного зумпфа до погружной капсулы – подъем осуществляется за счет разности между гидростатическим давлением на глубине погружения капсулы и атмосферным давлением.

Приведены расчетные формулы для определения оптимальной глубины погружения капсулы в зависимости от глубины подводного месторождения, концентрации твердого материала в объеме гидросмеси, производительности системы и других характеристик.

Адекватность теоретических формул должна быть подтверждена результатами экспериментов, что является предметом дальнейших исследований.

The hydrotransport system to be used for solid mineral resources submarine mining has been considered.

It comprises:

– the horizontal pipe-line;

– the vertical pipe-line.

The most complicated vertical hydrotransport section is shown herein as well.

The vertical hydrotransport system operation consists in a two-stage process of hoisting mineral matter slurry from the floor sump to the craft. At the first point, from the floor sump to the submerged capsule, hoisting is carried out by the difference between hydrostatic pressure at the submersion depth of the capsule and atmospheric pressure.

Design formulae to determine the optimum depth of submerging the capsule, depending on the submarine deposit depth, the solid material concentration in the slurry volume, the capacity of the system and other characteristics are listed too.

The adequacy of theoretical formulae is to be given by experimental verification, the latter being the subject for further investigations.

Общие положения. Система гидротранспорта при подводной разработке месторождений твердых полезных ископаемых состоит из двух основных частей: горизонтального трубопровода для подачи горной массы от головной добычной машины (ГМ) до придонного зумпфа (ПЗ); вертикального трубопровода от ПЗ до погружной капсулы (ПК).

Наиболее сложным с точки зрения изученности как в теоретическом, так и в экспериментальном аспектах является участок вертикального гидравлического транспорта с заданной глубины разработки подводного месторождения.

Исходные предпосылки. Работа системы вертикального гидротранспорта заключается в двухстадийном подъеме горной массы в виде пульпы от придонного зумпфа до плавсредства (ПС). Первая стадия – от ПЗ до ПК; вторая стадия – от ПК до ПС. На участке от ПЗ до ПК подъем происходит за счет разности в уровнях воды с внешней и внутренней сторон ПК, давление в которой равно атмосферному. Разность в уровнях воды обеспечивает соответствующую производительность системы Q при скорости потока v и потерях на трение i_h.

Разность уровней окружающей внутри ПК

$$h_{\text{пк}} = i\left(H_{\text{р}} - h_{\text{пк}} - h_{\text{зп}}\right)k_{\text{с}} + h_{\text{мп}}, \qquad (1)$$

где $H_{\text{р}}$ – глубина разработки, м; $h_{\text{зп}}$ – высота зумпфа внутри ПК, м; $k_{\text{с}}$ – коэффициент, учитывающий отклонение трубопровода от вертикали; $h_{\text{мп}}$ – местные потери напора, м.

В работе [3] для определения потерь напора в вертикальном трубопроводе рекомендуется формула

$$i_h = i_o\left(1 + 145c_v \frac{gD}{v^2}\frac{W}{d_o}\right), \qquad (2)$$

где $i_{\text{о}}$ – потери напора при движении чистой воды; c_v – объемная концентрация твердых частиц в гидросмеси; W – гидравлическая крупность частиц материала, м/с; $d_{\text{о}}$ – средневзвешенный диаметр частиц, м.

В работе [2] на основе выполненного анализа при вертикальном транспортировании различных материалов получена формула для потерь напора, учитывающая влияние числа Фруда Fr: при Fr > 10

$$i_h = i_{\text{о}}\left(1 + \alpha c_v\right); \qquad (3)$$

при 1 < Fr < 10

$$i_h = i_{\text{о}}\left[1 + \alpha c_v \frac{gD}{\left(v - W\right)^2}\right], \qquad (4)$$

где $\text{Fr} = \left(v - W\right)^2/(\alpha g D)$; $\alpha = (\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ – относительная плотность твердого материала.

С учетом (2)-(4) получим следующие выражения для $h_{\text{пк}}$:

$$h_{\text{пк}} = h_{\text{тр}}k_{\text{с}}\left[i_{\text{о}}\left(1 + 145c_v \frac{gD}{v^2}\frac{W}{\sqrt{gd_o}}\right)\right]; \qquad (5)$$

$$h_{\text{пк}} = h_{\text{тр}}k_{\text{с}}\left[i_{\text{о}}\left(1 + c_v \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)\right]; \qquad (6)$$

$$h_{\text{пк}} = h_{\text{тр}}k_{\text{с}}\left[i_{\text{о}}\left(1 + 10c_v \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\frac{gD}{\left(v - W^2\right)}\right)\right], \qquad (7)$$

где $h_{\text{тр}} = \left(H_{\text{р}} - h_{\text{пк}} - h_{\text{зп}}\right)$ – длина вертикального трубопровода.

В формулах (5)-(7) основными параметрами являются диаметр трубопровода D и средняя скорость потока гидросмеси v. Остальные (c_v, ρ_s, ρ_w, W) являются заданными или зависящими от основных параметров ($h_{\text{тр}}$, $i_{\text{о}}$, $k_{\text{с}}$, $h_{\text{пк}}$). Использование трех различных выражений для определения $h_{\text{пк}}$ объясняется тем, что значения потерь напора i_h рассчитываются по приближенным эмпирическим формулам, которые требуют экспериментального подтверждения для каждого конкретного случая их применения.

При заданной производительности системы Q_s скорость потока является также зависимой величиной от диаметра трубопровода D, и для гидравлически подобных процессов эти два параметра связываются значением числа Рейнольдса

$$\text{Re} = vD/\mu, \qquad (8)$$

где μ – кинематический коэффициент вязкости, м^2/с.

Для гидравлически подобных процессов (для натурного и лабораторного, например) необходимо выбрать соответствующие значения v, D и μ, при которых соблюдалось бы равенство числа Рейнольдса [1]:

$$\mathrm{Re}_{\text{лаб}} = \left(\frac{vD}{\mu}\right)_{\text{лаб}} = \mathrm{Re}_{\text{нат}} = \left(\frac{vD}{\mu}\right)_{\text{нат}}, \quad (9)$$

где индексы «лаб» и «нат» относятся соответственно к лабораторному и натурному процессам.

Если предположить, что кинематические коэффициенты вязкости для натурного и лабораторного процессов равны, т.е. $\mu_{\text{лаб}} = \mu_{\text{нат}}$, то из оставшихся двух характеристик потока смеси производным будет диаметр трубопровода и, следовательно,

$$(vD)_{\text{лаб}} = (vD)_{\text{нат}} = \mu_{\text{нат}}\,\mathrm{Re}. \quad (10)$$

Для заданного значения $D_{\text{лаб}}$ рассчитывается скорость потока смеси v и соответствующий расход в трубопроводе $Q_{\text{лаб}}$:

$$v = \frac{\mu_{\text{нат}}}{D_{\text{лаб}}}\mathrm{Re};$$

$$Q_{\text{лаб}} = v_{\text{лаб}}\frac{\pi D_{\text{лаб}}^2}{4} = \mu_{\text{нат}} D_{\text{лаб}}\frac{\pi}{4}\mathrm{Re}. \quad (11)$$

Использование для лабораторного эксперимента выражения (11) после подстановки в уравнение (5)-(7) соответствующих геометрических параметров ($h_{\text{тр}}$, $k_{\text{с}}$) и постоянных величин, определяемых гранулометрическим составом твердого материала ($d_{\text{о}}$), концентрацией гидросмеси (c_v) и плотностью материала (ρ_s), дает возможность оценить величину $h_{\text{пк}}$, которой определяется необходимый гидростатический подпор, расходуемый на преодоление сопротивлений в трубопроводе на участке $h_{\text{тр}}$.

После некоторых преобразований формулы (5)-(7) запишутся в виде

$$h_{\text{пк}} = h_{\text{тр}}\left[\lambda\frac{v^2}{2gD}\left(1 + K_1\frac{D}{v^2}\right)\right]; \quad (12)$$

$$h_{\text{пк}} = h_{\text{тр}}\left[\lambda\frac{v^2}{2gD}(1 + K_2)\right]; \quad (13)$$

$$h_{\text{пк}} = h_{\text{тр}}\left[\lambda\frac{v^2}{2gD}\left(1 + K_3\frac{D}{(v - W)^2}\right)\right], \quad (14)$$

где

$$K_1 = 145 c_v W^2 / d_{\text{о}}; \quad K_2 = c_v(\rho_s - \rho_w)/\rho_w;$$
$$K_3 = 10 c_v g(\rho_s - \rho_w)/\rho_w.$$

Применимость формул (13) и (14) определяется по условию соответствия числа Fr значениям по (3) или (4). Фактически зависимости (5)-(7), а также зависимости (11)-(13) позволяют достоверно и в полном объеме исследовать величину необходимого гидростатического давления $h_{\text{пк}}$ и рассчитать параметры D, $H_{\text{р}}$, Q_s, а также установить гидравлические характеристики v, c_v, λ и т. д.

Формулы (5)-(7) и соответствующие им формулы (12)-(14) описывают подобные процессы и фактически являются математической моделью вертикального подъема минерального сырья с глубины $H_{\text{р}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972.

2. *Смолдырев А.Е.* Трубопроводный транспорт. М.: Недра, 1970.

3. *Юфин А.П.* Гидромеханизация. М.: Лит. по строительству, 1985.

Научный руководитель доцент, к.т.н. *В.И.Александров*