УДК 622.23.037.008

В.И.АЛЕКСАНДРОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)
Е.СОБОТА
Вроцлавская сельскохозяйственная академия

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОДЪЕМА ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ПОДВОДНОЙ РАЗРАБОТКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Один из сложных аспектов в проектировании и разработке глубоководных комплексов – создание экономичных и надежных систем подъема, осуществляющих транспортирование полезного ископаемого от подводного забоя до водной поверхности к транспортному плавучему средству. В качестве системы подъема горной массы весьма перспективными являются подводные модули с погружной камерой, соединенной с транспортным трубопроводом, по которому транспортируется минеральное сырье в виде гидросмеси. К неисследованным вопросам, непосредственно связанным с возможностью проектирования и создания погружных камер, относится расчет параметров вертикального подъема горной массы с больших глубин.

One of complicated aspects in designing and developing of deep-water complexes is establishing economical and safe systems of elevating carrying out transportation of valuable fossil from underwater face up to aqueous surface to transport vessel. Very perspective for elevating of rock mass are submarine modules with submersible camera, connected with transport piping, along which the transportation of mineral raw in the form of mixtures is carried out. To practically unknown questions, directly associated with the possibility of designing and building up of submersible cameras, the calculation of the parameters of the vertical elevating of rock mass with higher depths can be applied.

Подводный модуль для транспортирования и вертикального подъема горной массы с больших глубин включает горную машину (ГМ), осуществляющую отбойку и всасывание горной массы в виде пульпы в трубопровод специальной конструкции (ТСК). Трубопровод соединен с погружной капсулой (ПК), в которой поддерживается атмосферное давление. В ПК установлен зумпф для аккумулирования гидросмеси, поступающей по ТСК, а также насосная станция с грунтовыми насосами для подачи гидросмеси на водную поверхность на борт добычного судна.

Работа устройства заключается в двухстадийном подъеме твердых частиц со дна до транспортного судна, при этом транспортирование по длинному гибкому трубопроводу осуществляется за счет искусственного создания разности гидростатического давления с внешней и внутренней сторон по-

гружной капсулы, давление внутри капсулы равно атмосферному.

Разность давления с внешней и внутренней сторон камеры обеспечивает необходимую производительность системы подъема по горной массе $Q_{тв}$ при соответствующей скорости подъема $v_{п}$ и определяется величиной потерь напора в гибком плавучем трубопроводе ТСК, а также местными сопротивлениями в транспортной системе. В общем случае глубину погружения ПК можно представить в виде следующего выражения

$$h_{к} = i_{г}\left(H_{р} - h_{к} - h_{зп}\right)K_{с} + h_{мп}, \qquad (1)$$

где $h_{к}$ – $H_{р}$ – глубина в районе подводного месторождения; $h_{зп}$ – глубина погружения сливного патрубка под уровень зумпфа в ПК; $i_{г}$ – удельные потери напора в гибком трубопроводе; $K_{с}$ – коэффициент, учитывающий изменения кривизны гибкого трубопровода при продвижении подводного забоя; $h_{мп}$ – величина местных потерь в системе.

Удельные потери напора в гибком трубопроводе

$$i_{г} = i_{0}\left(1 + \sum i\right), \qquad (2)$$

где i_{0} – потери напора на течение чистой воды; $\sum i$ – дополнительные потери напора на преодоление сопротивлений трения твердых частиц в вертикальном трубопроводе и на взвешивание столба гидросмеси.

На основании обработки опытных данных при движении гидросмесей по восходящим трубопроводам ранее рекомендована [3] следующая формула для определения потерь напора:

$$i_{г} = i_{0}\left(1 + 145\, c_{д}\, \frac{gD}{v_{п}^{2}}\, \frac{w}{\sqrt{gD}}\right), \qquad (3)$$

где $c_{д}$ – средняя действительная концентрация твердых частиц в восходящем потоке гидросмеси; w – скорость свободного падения твердых частиц в воде; D – диаметр трубопровода; g – ускорение силы тяжести.

Средняя действительная концентрация твердого материала в трубопроводе зависит от средней скорости скольжения твердых частиц относительно потока чистой воды, а также от средней исходной концентрации твердого, поступающего в трубопровод от ГМ,

$$c_{д} = \frac{c_{0} v_{п}}{v_{0} - w'} = \frac{4 Q_{тв}}{\pi D^{2} \rho_{тв} (v_{0} - w')}, \qquad (4)$$

где c_{0} – средняя исходная концентрация частиц твердого материала (горной массы); v_{0} – средняя скорость чистой воды; w' – средняя скорость стесненного падения частиц материала в воде (гидравлическая крупность); $\rho_{тв}$ – плотность твердых частиц,

$$Q_{тв} = v_{п}\, \frac{\pi D^{2}}{4}\, c_{0} \rho_{тв},$$

откуда

$$v_{п} = \frac{4 Q_{тв}}{\pi D^{2} c_{0} \rho_{тв}}.$$

С учетом сделанных определений глубина погружения ПК по формуле (1) запишется в следующем виде:

$$h_{к} = \left(H_{р} - h_{к} - h_{зп}\right)K_{с} \times$$

$$\times \left\{ \lambda \frac{v_{п}^{2}}{2gD} \left[1 + 145 \frac{4 Q_{тв} \sqrt{gD}}{\pi g D^{2} \rho_{тв} v_{п}^{2}} \frac{w}{v_{0} - w'} \right] \right\} + h_{м}. \qquad (5)$$

Скорость чистой воды можно определить по следующей формуле:

$$v_{0} = \frac{v_{п} - w'}{2} + \sqrt{\frac{\left(v_{п} - w'\right)^{2}}{4} - v_{п} c_{0} w'}.$$

Скорость стесненного падения твердых частиц

$$w' = w\left(1 - c_{0}\right)^{2}\left(1 - \frac{d^{2}}{D^{2}}\right).$$

Скорость свободного падения частиц в спокойной воде может быть определена с помощью формулы Руби:

$$w = F \sqrt{dg\left(\frac{\rho_{тв}}{\rho_{0}} - 1\right)},$$

где

$$F=\sqrt{\frac{2}{3}+\frac{36\mu^2}{gd^3\rho_0(\rho_{тв}-\rho_0)}}-\sqrt{\frac{36\mu^2}{gd^3\rho_0(\rho_{тв}-\rho_0)}};$$

μ – динамический коэффициент вязкости морской воды.

При исследовании процессов, протекающих в двухфазном потоке смеси при гидравлическом подъеме минерального сырья с помощью подводного модуля с устройством ПК, необходимо внести некоторые упрощения и допущения.

В работах, исследующих гидротранспортные потоки в вертикальных и наклонных трубопроводах, под гидросмесью понимается «псевдожидкость», которая имеет среднюю плотность и движется с некоторой средней по сечению трубопровода скоростью. При усреднении скоростей эффект турбулентных пульсаций не учитывается. Пренебрегая массой воздуха, можно сделать предположение о равенстве давлений на поверхности моря и внутри ПК. При этом будем считать, что температура транспортируемой гидросмеси не изменяется и процесс протекает изотермически.

В работе [2] на основе выполненного анализа рекомендуется формула для удельных потерь напора в вертикальном трубопроводе в зависимости от числа Фруда:

$$\mathrm{Fr}>10,\ \ i_г=i_0(1+\alpha c_д), \qquad (6)$$

$$1<\mathrm{Fr}<10\Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_г=i_0\left[1+10\alpha c_д\frac{gD}{(v_п-w')^2}\right], \qquad (7)$$

где $\mathrm{Fr}=\dfrac{(v_п-w')^2}{\alpha gD}$; $\alpha=\dfrac{\rho_{тв}-\rho_0}{\rho_0}$ – относительная плотность твердого материала в воде.

С учетом (6) и (7) получим из (5) следующие выражения:

$$h_к=h_{тр}K_с\left[i_0\left(1+145c_д\frac{gD}{v_п^2}\frac{w}{\sqrt{gD}}\right)\right]; \qquad (8)$$

$$h_к=h_{тр}K_с[i_0(1+\alpha c_д)]; \qquad (9)$$

$$h_к=h_{тр}K_с\left\{i_0\left(1+10c_д\alpha\frac{gD}{(v_п-w')^2}\right)\right\}; \qquad (10)$$

где $h_{тр}=(H_р-h_к-h_{зп})$ – расстояние от дна до ПК.

В формулах (8)-(10) основными параметрами являются диаметр трубопровода и средняя скорость восходящего потока смеси. Остальные являются заданными ($c_д, \rho_{тв}, \rho_0, w$), или зависящими от них ($h_{тр}, i_0, K_с, h_к$). Использование трех разных выражений для расчета $h_к$ вызвано тем, что значения потерь напора i_0 рассчитываются по приближенным эмпирическим формулам, которые требуют экспериментального подтверждения для каждого конкретного случая их применения.

При заданной производительности $Q_{тв}$ системы скорость потока является зависимой величиной от диаметра трубопровода D, и для гидравлически подобных явлений эти два параметра связываются значением числа Рейнольдса:

$$\mathrm{Re}=\frac{v_п D}{\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости.

Для подобных процессов (например, натурного и лабораторного) необходимо выбрать соответствующие значения $v_п, D, \nu$, при которых соблюдается равенство числа Re [1],

$$\mathrm{Re}_{лаб}=\left(\frac{v_п D}{\nu}\right)_{лаб}=\mathrm{Re}_{нат}\left(\frac{v_п D}{\nu}\right)_{нат}. \qquad (11)$$

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

$$(v_п D)_{лаб}=(v_п D)_{нат}=\nu_{нат}\,\mathrm{Re}. \qquad (12)$$

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

$$v_{\text{лаб}} = \frac{\nu_{\text{нат}}}{D_{\text{лаб}}}\text{Re};$$
$$Q_{\text{лаб}} = v_{\text{лаб}}\frac{\pi D_{\text{лаб}}^2}{4} = \nu_{\text{нат}} D_{\text{лаб}}\frac{\pi}{4}\text{Re}. \quad (13)$$

Использование для лабораторного эксперимента выражения (13) после подстановки соответствующих геометрических параметров ($h_{\text{тр}}$ при $K_{\text{с}} = 1$) и постоянных величин, определяемых гранулометрическим составом твердого материала $d_{\text{ср}}$, концентрацией гидросмеси $c_{\text{д}}$ и плотностью твердой фазы $\rho_{\text{тв}}$, дает возможность оценить величину $h_{\text{к}}$, которая будет затрачиваться на компенсацию гидравлических сопротивлений в гибком трубопроводе на расстоянии от ГМ до зумпфа в ПК.

После некоторых несложных преобразований формулы (8)-(10) запишутся в виде

$$h_{\text{к}} = h_{\text{тр}}\left[\lambda\frac{v_{\text{п}}^2}{2gD}\left(1 = K_1\frac{D}{v_{\text{п}}^2}\right)\right]; \quad (14)$$

$$h_{\text{к}} = h_{\text{тр}}\left[\lambda\frac{v_{\text{п}}^2}{2gD}\left(1 + K_2\right)\right]; \quad (15)$$

$$h_{\text{к}} = h_{\text{тр}}\left\{\lambda\frac{v_{\text{п}}^2}{2gD}\left[1 + K_3\frac{D}{\left(v_0 - w'\right)}\right]\right\}. \quad (16)$$

Применимость формул (14)-(16) определяется по условию соответствия числа Fr значениям по выражениям (6) и (7). Фактически зависимости (8)-(10), а также (14)-(16) позволяют достоверно и в полном объеме исследовать величину необходимого гидростатического напора $h_{\text{к}}$ и рассчитать параметры D, $H_{\text{р}}$, $Q_{\text{тв}}$, а также установить гидравлические характеристики $v_{\text{п}}$, $c_{\text{д}}$, λ и др.

Формулы (8)-(10) и соответствующие им (14)-(16) описывают подобные процессы и фактически являются математической моделью вертикального подъема минерального сырья с глубины $H_{\text{р}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Седов Л.М.* Теория подобия и размерностей в механике. М.: Высшая школа, 1973.

2. *Смолдырев А.Е.* Гидравлический транспорт гидросмесей высокой концентрации. М.: Недра, 1972.

3. *Юфин А.П.* Гидромеханизация. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965.