

УДК 622.53.004

*д.т.н. Малеев В. Б.,
Кудрявцев А. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ГЛУБОКОВОДНЫМ ЭРЛИФТНЫМ ГИДРОПОДЪЁМОМ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

В зависимости от условий работы добычной установки определены критерии: управления запуском, штатным и аварийным остановом эрлифта; регулирования расхода гидросмеси, её концентраций; управления оптимальным режимом подъёма.

Ключевые слова: эрлифт, гидросмесь, гидроподъём, режимы работы эрлифта, оптимальное управление.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В технологическом процессе добычи полезных ископаемых со дна морей и океанов эрлифтный гидроподъём твёрдого выполняет роль транспортного звена, связывающего добычные работы с доставкой сырья к потребителю.

Эрлифтный гидроподъём, представляющий собой сложный объект управления и контроля, характеризуется следующими особенностями: широким спектром возмущений; распределённостью и удалённостью точек контроля и узлов управления от пульта управления; неконтролируемостью ряда факторов и большими запаздываниями в каналах измерения и управления.

При этом следует отметить, что управление эрлифтной установкой по подъёму гидросмеси в основном определяется путём изменения подачи сжатого воздуха в смеситель. Необходимо обеспечить следующие режимы рабочего процесса установки: управление запуском эрлифта; управление штатным и аварийным остановом эрлифта; регулирование расхода и концентрации гидросмеси; оптимальное управление режимом гидравлического подъёма полезного ископаемого при минимальных энергозатратах.

Всё вышеприведённое определяет значимость разработки системы управления эрлифтной установки по подъёму твёрдого.

Анализ исследований и публикаций. Ранее авторами показано, что начальным звеном в технологической цепочке добычи

полезных ископаемых со дна морей и океанов являются процессы сбора железно-марганцевых конкреций (ЖМК), их отмыва от ила и перекачки от агрегата сбора до бункера. Определены критерии управления этими взаимосвязанными процессами с точки зрения эффективности функционирования всей добывающей установки. В этой работе не рассмотрены непосредственно вопросы управления подъёмом твёрдого эрлифтной установкой.

В работе [1] разработаны алгоритмы запуска и останова глубоководного эрлифта, комплексно описывающие переходные режимы в элементах гидроподъёма. Предложенный способ обладает надёжностью и эффективностью в сложных условиях больших глубин. Однако для глубоководного эрлифтного гидроподъёма (ГЭГ) не определены критерии управления запуском и остановом эрлифта, отклонения текущих значений расхода гидросмеси и концентрации твёрдого от заданных.

Постановка задачи. В работе впервые делается попытка аналитически найти количественный критерий управления запуском и остановом эрлифта, критерий минимальной мощности привода компрессорной станции при заданной производительности по твёрдому с целью минимизации энергозатрат на подъём заданного количества ЖМК.

Изложение материала и его результаты. Состояние автоматизированного управления эрлифтным гидравлическим подъёмом

можно контролировать следующими параметрами: мощностью, потребляемой приводом компрессорной станции; объёмным расходом воздуха на выходе из компрессорной станции, приведённым к нормальным условиям; давлением воздуха на выходе компрессорной станции; объёмным расходом воздуха на входе в смеситель, приведённым к нормальным условиям; давлением воздуха на входе в смеситель; объёмным расходом гидросмеси в подающем (подводящем) трубопроводе и плотностью гидросмеси в трубопроводе после дозатора и в других контрольных точках трубопровода.

В соответствии с [1], запуск эрлифтной установки в работу осуществляется в следующей последовательности:

- открывается продувочный вентиль с выходом воздуха в атмосферу;

- запускаются последовательно в работу компрессоры станции сжатого воздуха;

- после выхода компрессоров на рабочий режим закрывается продувочный вентиль. Воздух под давлением поступает в воздухопровод, вытесняя воду через смеситель эрлифта в подъёмный трубопровод. Для сокращения времени вытеснения воды из воздухопровода увеличивается производительность компрессорной станции путём выдачи задания на максимально допустимый расход воздуха;

- после вытеснения воды из воздухопровода и прорыва воздуха в подъёмный трубопровод начинается «трогание» эрлифта, давление на входе в смеситель падает, а расходы воды и воздуха увеличиваются. В этот момент подача компрессорной станции уменьшается до расчётного значения за счёт автоматизированной системы управления компрессорами. При этом регулируется и контролируется расход воды в трубопроводе до установленного значения.

Критерием управления запуском эрлифта в работу является минимум времени запуска Δt_3^{\min} при допустимых значениях контролируемых расходов воздуха в смеситель эрлифтной установки $Q_e^{\min} \leq Q_e \leq Q_e^{\max}$.

Расчётное значение расхода воздуха компрессорной станции определяется из условия обеспечения расхода воды в подающем трубопроводе, соответствующего надкритическому расходу гидросмеси при заданном расходе твёрдого материала.

Критический расход гидросмеси [2]:

$$Q_{гс\ кр} = \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{4} (1-S)^2 \times \left. \begin{aligned} &\times \left(1 - \left(\frac{d_m}{d_{mp}}\right)^2\right) \sqrt{\frac{\pi}{6} a \cdot g \cdot d_m \cdot \psi} + \\ &+ K \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{4} \sqrt{a \cdot S \cdot g \cdot d_{mp}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где d_{mp} — максимальный внутренний диаметр подводящего трубопровода;

d_m — средний размер частиц твёрдой фазы;

g — ускорение свободного падения;

$a = \frac{\rho_m - \rho_e}{\rho_e}$ — дифференциальная плотность гидросмеси;

ρ_m, ρ_e — соответственно плотность твёрдой и жидкой фазы;

ψ — коэффициент сопротивления, равный для свежедроблённых материалов 0,5...1,0; для окатанных — 0,22...0,6; для пластинчатых — 0,8...0,95;

K — опытный коэффициент, равный: для частиц диаметром (0...3) мм — 2,5; для частиц (2...10) мм — 2,5...3,0; для частиц 10 мм — 3...3,5;

$S = \frac{Q_m T_3}{Q_{гс\ кр}}$ — средняя (прогнозируемая)

концентрация твёрдой фазы в трубопроводе;

$Q_m T_3$ — задание на расход твёрдой фазы.

Задание на расход гидросмеси $Q_{гс\ з}$ устанавливается на уровне надкритического расхода $Q_{гс\ з} = 1,15 \cdot Q_{гс\ кр}$.

Соответствующее задание на расход воздуха:

$$Q_{вз} = F(Q_{сз}, S_{np}, d_m), \quad (2)$$

где $S_{np} = \frac{Q_{mTз}}{Q_{сз}}$ — прогнозируемая кон-

центрация частиц твёрдой фазы в подъёмном трубопроводе, соответствующая заданному расходу ЖМК $Q_{mTз}$ и расходу гидросмеси $Q_{сз}$.

Критерий управления при остановке эрлифта аналогичен критерию управления при его запуске в работу. Штатный останов производится путём уменьшения задания на расход воздуха и последующего управления положением продувочного вентиля до заполнения водой воздухопровода. Аварийный останов системы гидравлического эрлифтного подъёма осуществляется путём открытия продувочного клапана и остановка компрессорной станции.

Для поддержания заданного расхода воздуха в смеситель эрлифтной установки при воздействии на процесс подачи воздуха внешних возмущений (состояние воздухопровода, геометрическое погружение и т. п.) необходимо формировать и выдавать задание на расход воздуха в автономную автоматизированную систему управления и контроля компрессорной станции. При этом критерием управления является минимизация отклонения текущего значения расхода сжатого воздуха в смеситель эрлифтной установки от заданного:

$$\frac{1}{t_в} \cdot \int_{t-t_в}^t |Q_{вз} - Q_{сз}|^2 dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$Q_{вкз}^{\min} \leq Q_{вкз} \leq Q_{вкз}^{\max},$$

где $Q_{вз}$ — задание на расход воздуха в смеситель;

$Q_{сз}$ — текущее значение расхода воздуха в смеситель;

$t_в$ — интервал усреднения;

$Q_{вкз}$ — задающее воздействие на производительность компрессорной станцией,

выдаваемое в систему её управления. Производительность компрессорной станции изменяется от максимального значения $Q_{вкз}^{\max}$ до минимального $Q_{вкз}^{\min}$.

Одновременно с вышеприведённым при регулировании расхода воздуха в смеситель накладываются следующие ограничения:

$$\begin{aligned} Q_{вк}^{\min} &\leq Q_{вк} \leq Q_{вк}^{\max}, \\ N_{к} &\leq N_{к}^{\max}, \\ \Delta P &< \Delta P_{\partial}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $Q_{вк}$, $Q_{к}^{\max}$ — соответственно текущее и максимально допустимое значения расхода воздуха на выходе компрессорной станции, приведённой к нормальным условиям;

$N_{к}$ — текущее значение мощности, потребляемое приводом компрессорной станции;

$N_{к}^{\max}$ — максимально допустимая мощность компрессорной станции;

$Q_{вк}^{\min}$ — минимально допустимый расход воздуха в смеситель эрлифта;

ΔP , ΔP_{∂} — соответственно текущая и допустимая разность давлений между внешней средой и внутри воздухопровода на входе в смеситель.

Формирование управляющего воздействия на подачу воздуха компрессорной станцией следует осуществлять при изменении задания или при отклонении текущего значения расхода воздуха в смеситель от заданного значения:

$$\begin{aligned} Q_{вкз i} &= Q_{вкз (i-1)} + K_{в} \cdot \Delta Q_{в i}, \\ \Delta Q_{в i} &= Q_{вз i} - Q_{сз i}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$K_{в} = \frac{Q_{вк (i-1)}}{Q_{сз (i-1)}},$$

где $Q_{вкз}$ — задание на подачу воздуха компрессорной станцией;

$\Delta Q_{в}$ — отклонение текущего расхода воздуха в смеситель от заданного;

i — номер текущего цикла формулирования управляющего воздействия;

K_6 — коэффициент утечки воздуха в воздухопроводе от компрессорной станции до смесителя.

Коэффициент утечки определяется в установленном режиме расхода воздуха в воздухопроводе. Если же задание на подачу воздуха в смеситель изменилось во время переходного процесса, то значение управляющего воздействия $Q_{6\text{кз}i} = K_6 \cdot Q_{6\text{з}i}$.

Автоматическое управление процессом гидравлического транспортирования твёрдого в подъёмном трубопроводе эрлифта происходит за счёт воздействия на изменение подачи воздуха в смеситель по отклонению текущего значения расхода гидросмеси от заданного в подающем трубопроводе при воздействии на процесс гидроподъёма внешних возмущений (изменение расхода твёрдой фазы в подающем трубопроводе, изменение формы и размера подъёмных частиц). Критерием управления в этом режиме является минимизация отклонения текущего значения расхода гидросмеси от заданного:

$$\frac{1}{\tau_{2c}} \cdot \int_{t-\tau_{2c}}^t |Q_{2c\text{з}} - Q_{2c}|^2 dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$Q_{6\text{кз}}^{\min} \leq Q_{6\text{к}} \leq Q_{6\text{кз}}^{\max},$$

где $Q_{2c\text{з}}$ — задание на расход гидросмеси в подъёмном трубопроводе;

τ_{2c} — интервал усреднения сигнала расхода гидросмеси.

При этом на управление расходом гидросмеси в подъёмной трубе эрлифта накладывается ограничение

$$Q_{2c\text{кр}} < Q_{2c} \leq Q_{2c}^{\max}, \quad (7)$$

где Q_{2c} — текущее значение расхода гидросмеси в подъёмном трубопроводе;

Q_{2c}^{\max} — максимально допустимый расход гидросмеси.

Поскольку эрлифтный гидроподъём характеризуется, с точки зрения управления, большими транспортными запаздываниями и постоянными времени, то задача регулирования расхода гидросмеси решается путём формирования задания на расход воздуха в смеситель эрлифта с использованием его расходных характеристик и дальнейшим контролем протекания переходного процесса. По текущим значениям параметров средней концентрации и гранулометрического состава частиц твёрдой фазы, а также в соответствии с заданным значением расхода гидросмеси по (1) определяется прогнозируемое значение расхода воздуха в смеситель эрлифта (по заданным геометрическому и динамическому погружениям α и α_0 , удельному расходу воздуха q и т. д.). Полученное значение расхода воздуха передаётся в виде задания в задачу регулирования расхода воздуха в смеситель.

Формирование управляющего воздействия на поддержание заданной концентрации твёрдой фазы в подъёмной трубе эрлифта при воздействии на процесс гидроподъёма внешних возмущений происходит за счёт минимизации отклонения текущего значения концентрации от заданного:

$$\frac{1}{\tau_S} \cdot \int_{t-\tau_S}^t |S_3 - S|^2 dt \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$Q_{6\text{кз}}^{\min} \leq Q_{6\text{кз}} \leq Q_{6\text{кз}}^{\max},$$

где S , S_3 — соответственно текущее и заданное значения концентрации гидросмеси в транспортном трубопроводе на выходе дозатора;

τ_S — интервал усреднения.

Сформированное в результате решения этой задачи задание на расход гидросмеси передаётся задаче регулирования расхода гидросмеси, которая формируется и корректируется при изменении задания концентрации или расхода твёрдой фазы:

$$Q_{zc3} = \frac{Q_{m3}}{S_3}, \quad (9)$$

где Q_{m3} — задание на расход твёрдой фазы.

В случае отклонения текущего значения концентрации в транспортном трубопроводе от заданного значение на расход гидросмеси формируется следующим образом:

$$Q_{zc3i} = Q_{zc3(i-1)} - \Delta S \frac{Q_{zc3(i-1)}}{S_{3(i-1)}}, \quad (10)$$

где ΔS — отклонение текущего значения концентрации от заданного.

Основным режимом управления гидравлическим эрлифтным гидроподъёмом является оптимальное управление концентрацией твёрдого в подъёмном трубопроводе с целью повышения эффективности работы эрлифта за счёт минимизации энергозатрат на подъём заданного количества твёрдого.

Одним из критериев оптимального управления является минимизация мощности, потребляемой приводом компрессорной станции при заданной производительности по твёрдому, при воздействии на процесс подъёма внешних возмущений:

$$\int_{t-\tau_y}^t \frac{N}{Q_m} dt \rightarrow \min, \quad (11)$$

$$0 \leq S \leq S_{кр},$$

где N — мощность, потребляемая компрессорной станцией;

Q_m — расход твёрдого;

$$i = \frac{4S \cdot Q_{mT} \cdot (\rho_m - \rho_{жс})}{\rho_{жс} \cdot 4 \cdot Q_{mT} \cdot \pi \cdot \rho_m \cdot d_{mp}^2 \cdot (1-S)^2 \sqrt{\frac{4g \cdot d_m \cdot (\rho_m - \rho_{жс})}{3\rho_{жс} \cdot C}}} +$$

$$+ \frac{8\lambda \cdot Q_{mT}^2}{\pi^2 \cdot d_{mp}^3 \cdot S^2 \cdot \rho_m \cdot g} \cdot \left\{ 1 + \frac{10S \cdot g \cdot d_{mp} \cdot (\rho_m - \rho_{жс})}{\rho_m \cdot \frac{4 \cdot Q_{mT}}{\pi \cdot \rho_m \cdot d_{mp}^2 \cdot S} \cdot (1-S)^2 \sqrt{\frac{4g \cdot d_m \cdot (\rho_m - \rho_{жс})}{3\rho_{жс} \cdot C}}} \right\}, \quad (14)$$

$S, S_{кр}$ — соответственно текущая и критическая концентрация твёрдых частиц в гидросмеси в транспортном трубопроводе;

τ_y — интервал скользящего усреднения.

При оптимальном по минимуму энергозатрат значении объёмной концентрации гидросмеси мощность подводимого к смесителю сжатого воздуха будет минимальной:

$$N_g = \frac{K [S(\rho_m - \rho_{жс}) + \rho_{жс}] \times}{\rho_{жс} \cdot \rho_m \cdot S} \times \frac{q_c \cdot Q_{mT}}{\rho_{жс} \cdot \rho_m \cdot S} \cdot P_{см}^{дин}, \quad (12)$$

где K — коэффициент, зависящий от средней плотности гидросмеси и изменяющийся в пределах (1,2...1,4);

$\rho_m, \rho_{жс}$ — соответственно плотность твёрдых частиц и транспортируемой жидкости;

$P_{см}^{дин}$ — динамическое давление в смесителе эрлифта;

q_c — среднеинтегральное значение удельного расхода воздуха по длине подъёмной трубы.

$$P_{см}^{дин} = \rho_{жс} \cdot g \cdot (h - i \cdot L_{mp}), \quad (13)$$

где L_{mp} — длина подводящей трубы эрлифта;

h — геометрическое погружение смесителя относительно свободного уровня жидкости;

i — удельные потери напора (давления) при движении гидросмеси в транспортном трубопроводе [2]:

где C — коэффициент сопротивления движению твёрдых частиц, зависящий от формы последних;

λ — коэффициент гидравлических сопротивлений (коэффициент Дарси).

Среднеинтегральное значение удельного расхода воздуха по длине подъёмной трубы:

$$q_c = (22,7 + 10,1\alpha_\partial) \cdot 0,0063^{0,97\alpha_\partial}. \quad (15)$$

Динамическое погружение смесителя эрлифтной установки:

$$\alpha_\partial = \frac{P_{см}^{дин}}{\rho_{жс} \cdot g \cdot (h + H_n)}, \quad (16)$$

где H_n — высота подъёма гидросмеси над уровнем гидросмеси.

Как отмечалось ранее, задача оптимального управления режимом подъёма твёрдого решается путём определения такого значения концентрации, при котором энергозатраты на гидроподъём близки к минимальному значению. Для этого путём исследования (11) на экстремум, соответствующий заданному расходу твёрдого $Q_{тТ}$, определяется близкое к относительному значению концентрации. Вывод эрлифта в

этот расчётный рабочий режим по концентрации гидросмеси осуществляется путём решения задачи её регулирования. После установления в подводящем транспортном трубопроводе заданной концентрации гидросмеси производится пошаговый поиск такого значения на концентрацию гидросмеси, при котором мощность, потребляемая электроприводом компрессорной станции будет минимальной.

Выводы и направления дальнейших исследований. Выходной информацией системы управления технологическим процессом эрлифтного гидравлического подъёма твёрдого являются: управляющее воздействие — задание объёмного расхода воздуха эрлифтом (производительности компрессорной станции); сообщения о режимах гидроподъёма, выводимое на терминал оператора-технолога (сообщения о приближении критического режима движения в транспортном трубопроводе; сообщение о завершении запуска эрлифта); значения регулируемых переменных, выводимые на терминал оператора-технолога.

Необходимо разработать алгоритмы управления эрлифтными установками.

Библиографический список

1. Самуся, В. И. Разработка алгоритмов управления переходными режимами в глубоководных эрлифтных гидроподъёмах [Текст] / В. И. Самуся, В. Е. Кириченко, В. В. Евтеев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Донецьк : ДонНТУ, 2008. — Вип. 16 (142). — С. 239–244 — (Серія: гірничо-електромеханічна).
2. Мияэ, С. Оптимальные условия гидравлической транспортировки сыпучих веществ [Текст] / С. Мияэ // «Рюттай когакку». — 1976. — Т. 12., № 9. — С. 536–544.

© Малеев В. Б.

© Кудрявцев А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМиО ДонГТУ Корнеевым С. В., д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.

Статья поступила в редакцию 11.10.18.

д.т.н. Малєєв В. Б., Кудрявцев О. О. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАДАЧ КЕРУВАННЯ ГЛУБОКОВОДНИМ ЕРЛІФТНИМ ГІДРОПІДЙОМОМ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Залежно від умов роботи видобувної установки визначено критерії: управління запуском, штатним і аварійним остановом ерліфта; регулювання витрати гідросуміші, її концентрацій; управління оптимальним режимом підйому.

Ключові слова: ерліфт, гідросуміш, гідропідйом, режими роботи ерліфта, оптимальне керування.

Doctor of Tech. Sc. Maleev V. B., Kudriavtsev A. A. (DonNTU, Donetsk, DPR,

teormeh@fimm.donntu.org)

CHARACTERISTICS OF MANAGEMENT OF THE DEEP-WATER AIRLIFT OF THE HYDRAULIC MINERALS HOISTING

Depending on the operating conditions of the mining track, the management criteria have been determined: the airlift starting; normal and emergency shut-down of the airlift; controlling the flow of slurry; regulating the concentrations of slurry and the optimal hoisting mode.

Key words: airlift, slurry, hydraulic hoisting, modes of airlift operating, optimal control.