

УДК 629.12:681.5.015

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ГЛУБОКОВОДНОГО ГИДРОПОДЪЕМА

Борисов А.А., докт. техн. наук, проф.,

Пащенко В.С., канд. техн. наук, доц.,

Донецкий государственный технический университет

*Представлен метод и алгоритм оптимизации энергетического режима гидравлической системы подъема глубоководного добычного комплекса, обеспечивающий за счет оптимальной загрузки и контроля параметров гидросмеси отдельных участков транспортного трубопровода, при сохранении требуемой скорости гидросмеси, надежность режима и повышение КПД на 5-7%.*

*The method and algorithm of optimization of a power condition hydraulic systems of rise deep-water mining of a complex ensuring at the expense of an optimum loading and monitoring of parameters a hydromixtures of separate sites of the transport pipeline is represented at preservation of a required velocity of a hydromixture, reliability of a condition and raise of EFFICIENCY on 5-7%.*

Оценка удельных энергозатрат и оптимизация режимов глубоководного гидроподъема на базе традиционных методов и моделей осложняется распределенностью параметров трубопровода и гидросмеси, изменением характеристик оборудования, подверженного интенсивному износу в морских условиях. Определяющим в изменении энергетического режима глубоководного гидроподъема, в отличие от гидротранспортных систем, является влияние геодезической высоты, представляющей дифференциальный вес распределенного столба гидросмеси, зависящий от его параметров (плотность, удельный вес твердого, состав гидросмеси и т.п.). Непрерывные изменения параметров столба гидросмеси, зависящие от разрабатываемого грунта и рельефа морского дна, делают традиционные модели и алгоритмы управления по усредненному режиму практически неприемлемыми, требующими перехода на новые принципы распределенного управления, с оптимизацией режимов каждого участка гидроподъема.

Идея распределенного управления и оптимизации гидроподъема заключается в разбивке трубопровода гидроподъема на участки с контролем энергетического режима предыдущего (загруженного)

участка и загрузкой последующего таким образом чтобы участковые потери напора, определяющие суммарный энергетический режим были минимальными, а скорость гидросмеси в трубопроводе была не ниже критической для любого участка трубопровода.

Задача оптимизации загрузки гидроподъема решается методом динамического программирования. При этом гидроподъем представляется в виде последовательности оптимизируемых блоков (участков) с участковыми входными и выходными переменными (см.рис. 1 – 3).

При разработке методов и алгоритмов оптимизации гидроподъема рассмотрены следующие его режимы:

- вывод гидроподъема в режим после плановых остановов с полной промывкой трубопровода (режим первоначальной оптимизации, рис.1);
- вывод гидроподъема в оптимальный режим после сбоя в системе оптимизации или устранения неисправности в технологической схеме (режим повторной оптимизации, рис.2);
- перевод системы с режима на режим при изменении параметров гидросмеси, трубопровода или перенастройке оптимизационной модели (оптимизация в переходном режиме, рис.3).

Сформулируем задачу оптимизации режима гидроподъема как многошаговую задачу последовательной оптимизации многоступенчатого объекта.

Метод первоначальной оптимизации режима гидроподъема (рис.1) формулируется как многошаговая задача принятия решений для многоступенчатого объекта. В качестве аддитивного критерия используется усредненная удельная энергоемкость. Решение глобальной задачи складывается из этапов поиска локального экстремума 1-го участка и поиска глобального минимума для совокупности участков трубопровода. Вследствие зависимости аддитивного критерия от управления, общего для совокупности участков (скорости в трубопроводе), классический метод (рис.1) должен модифицироваться и дополняться методом пошагового исключения невязок (рис.2), что позволяет свести алгоритм оптимизации к стандартному виду.

В переходном режиме при выводе гидроподъема из исходного в оптимальный режим в классическую схему (рис.1) последовательности оптимизируемых блоков вводится "скользящий" от конца к началу по последовательности  $i$ -й блок (рис.3), разделяющий трубопровод на части с исходной гидросмесью и гидросмесью с оптимизированными параметрами нового режима.

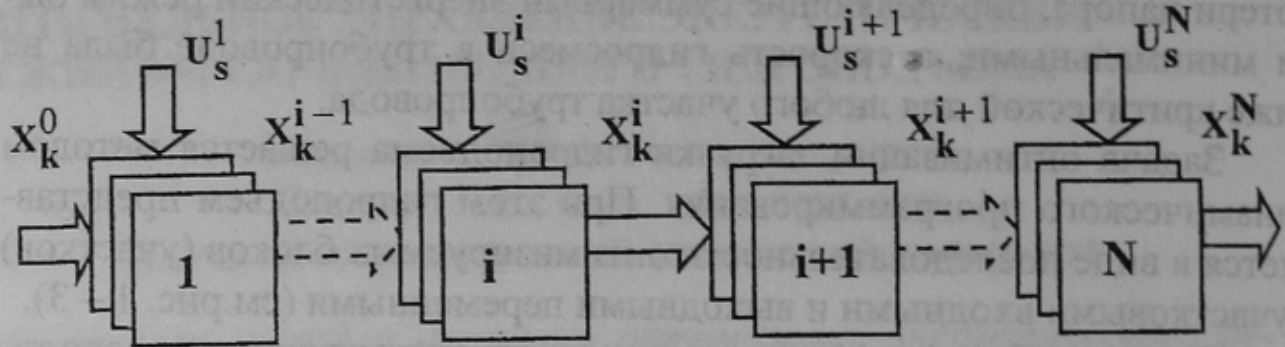


Рис. 1 – Классическая последовательность оптимизируемых блоков

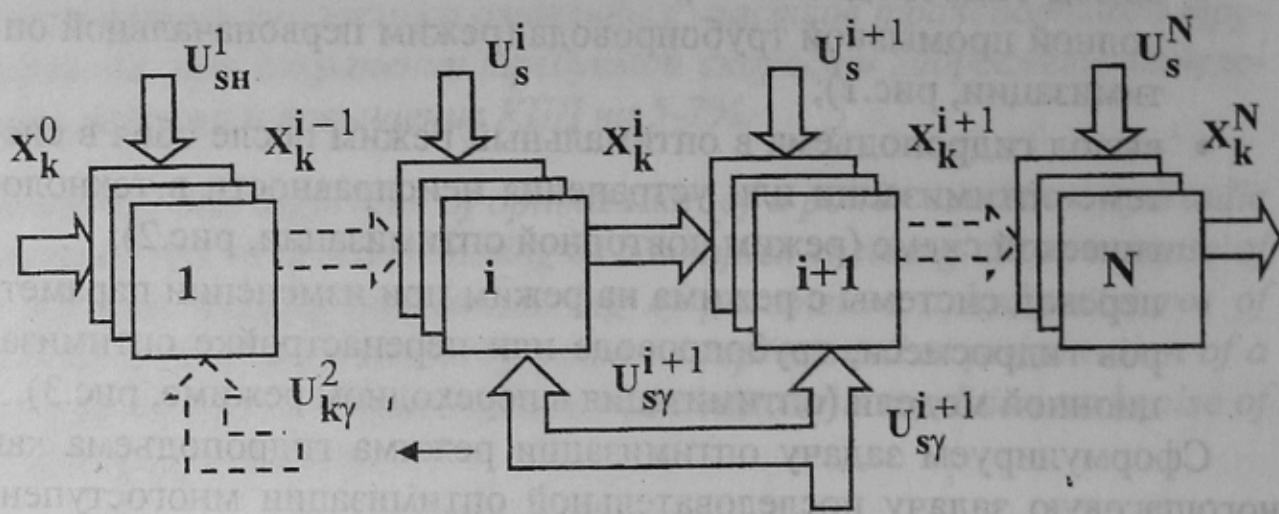


Рис.2 – К методу пошаговой оптимизации блоков

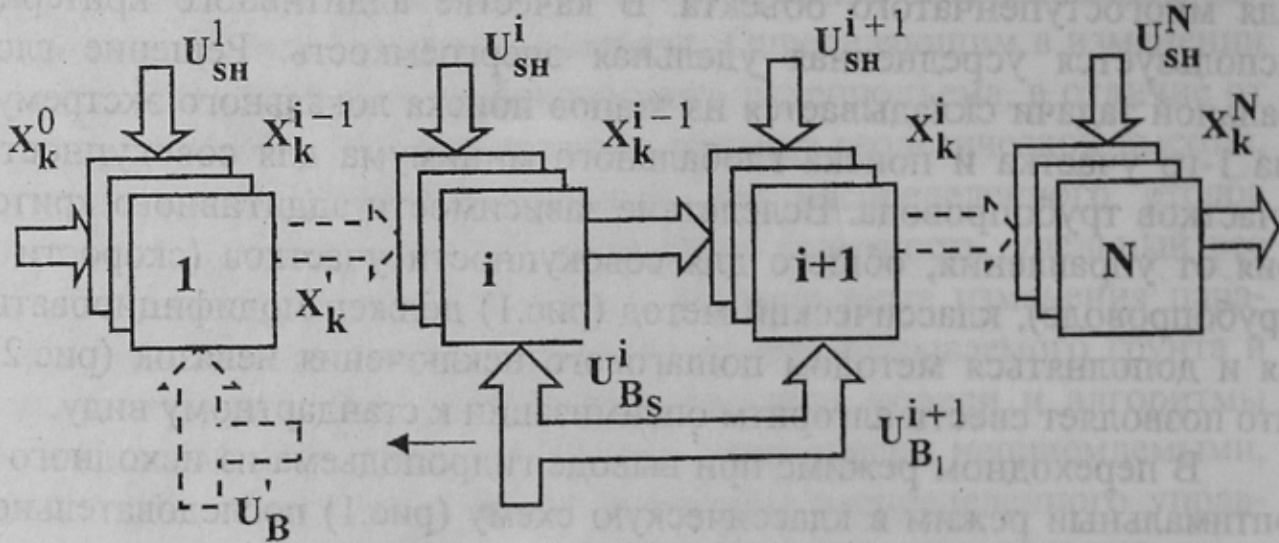


Рис.3 – Последовательность блоков с разделяющим "скользящим" блоком

При этом используется метод пошагового компромиссного принятия решений для усредненных значений целевой функции  $i$ -го шага и  $i+1$ ,  $N$  - последовательности оптимизированных блоков.

Введем обозначения:

$$L_i i_{\text{ги}} = \Delta H_i = x_1^i; \quad \rho_{\text{гв}i} = x_2^i; \quad T_{\text{с}i} = x_3^i; \quad (1)$$

$$V_i = u_1^i; \quad \rho_{\text{г}i} = u_2^i; \quad T_i = u_3^i, \quad (2)$$

где  $L_i$  - длина участка трубопровода,  $i_{\text{ги}}$  - гидравлический уклон,  $\Delta H_i$  - перепад давления на участке,  $\rho_{\text{гв}i}$  - усредненная плотность гидросмеси,  $\rho_{\text{г}i}$  - текущая плотность,  $T_{\text{с}i}$  - интервал усреднения плотности,  $V_i$  - скорость гидросмеси в трубопроводе.

Здесь  $x_1^i, x_2^i, x_3^i$  - переменные состояния,

$u_1^i, u_2^i, u_3^i$  - переменные управления для участка.

Уравнения перехода  $i$ -го блока из состояния в состояние с учетом (1), (2) будут:

$$x_1^i = f_1(x_1^{i-1}, x_2^{i-1}, x_3^{i-1}, u_1^i, u_2^i, u_3^i). \quad (3)$$

В качестве целевой функции в модели используется усредненный КПД гидроподъема [1]:

$$\eta^y(\Delta p, C_{\text{г}}^y, Q_{\text{г}}, Q_{\text{вн}}, C_{\text{г}}) = \frac{Q_{\text{г}} g \{ C_{\text{г}}^y (\rho_{\text{с}} - \rho_0) H_{\text{м}} + [C_{\text{г}}^y (\rho_{\text{с}} - \rho_0) + \rho_0] H_{\text{п}} \}}{Q_{\text{вн}} \rho_{\text{а}} l_{\text{п}} \frac{p'_{\text{с}}}{p_{\text{а}}}} \quad (4)$$

Здесь  $\Delta p, C_{\text{г}}^y$  - параметры состояния,  $Q_{\text{г}}, C_{\text{г}}$  - параметры оптимизации, однозначно определенные выражениями (1) - (3).

Обозначим текущее значение целевой функции для участка:

$$\eta^y(\Delta p, C_{\text{г}}^y, Q_{\text{г}}, C_{\text{г}}) = F(x_1, x_2, u_1, u_3) \quad (5)$$

Введем понятия оптимизационного КПД гидроподъема и долевого коэффициента оптимизации  $\eta_{\text{ли}}$  и  $k_{\text{oi}}$ :

$$\eta_{\text{ли}} = k_{\text{oi}} \cdot \eta_i; \quad k_{\text{oi}} = e_i/L, \quad (6)$$

где  $\eta_i$  - полный КПД гидроподъема при оптимальных управляющих параметрах  $u_1^i$  и  $u_3^i$  для  $i$ -го участка.

С учетом (6) усредненный КПД ГП будет иметь вид:

$$\eta^y(u_1, u_3) = \sum_{i=1}^k k_{oi} \eta_i; \quad (i = \overline{1, k}), \quad (7)$$

где  $k$  – число оптимизируемых участков.

К целевой функции (7) может быть применен алгоритм динамической оптимизации на базе метода динамического программирования. Применительно к гидроподъему алгоритм запишется в виде

$$Q_0^*(\bar{x}_0) = \max_{\bar{U} \in \bar{U}_0} \sum_{i=1}^k k_{oi} F_i(x_1^i, x_2^i, u_1, u_2) \quad (8)$$

Сформулируем задачу перевода гидроподъема из исходного в требуемый (оптимальный) режим (рис.3). Пусть  $x_{1H}^i, x_{2H}^i, x_{1K}^i, x_{2K}^i$  – параметры состояния исходного и конечного режимов. Используя метод "скользящего блока" и усреднения параметров, обозначим:

$F_{1i}(\bar{x}^{i-1})$  – критерий оценки локализованных режимов блоков от 1 до  $i$ ;

$F_{i+1, N}(\bar{x}^i)$  – критерий оценки локализованных режимов блоков от  $i+1$  до  $N$ .

Тогда совмещению "скользящего" блока с блоком  $N$  соответствует замена исходного режима конечным, а переменная  $u_{B_1}^{N+1} = 0$ . Перемещению блока из  $N$  в  $N-1$  соответствует локальный исходный режим в блоке  $N$  и новый режим для последовательности блоков от 1 до  $N-1$ . Критерий оценки локального режима  $N$ -го блока имеет вид:

$$Q_N^*(\bar{x}_j^{N-1}) = \max_{\bar{U}_S^N \in \bar{U}_0} k_{0N} F_N(\bar{x}^{N-1}, \bar{u}_S^N), \quad (9)$$

а критерий для последовательности блоков от 1 до  $N-1$  при новом режиме с учетом входных переменных "скользящего" блока  $\bar{u}_{B_S}$  будет

$$Q_{(N-1)k}(\bar{x}^{N-2}, \bar{u}_{B_S}^{N-1}) = \sum_{i=1}^{N-1} k_{oi} F_i(\bar{x}^{i-1}, \bar{u}_{B_S}^i) \quad (10)$$

Заменяя в (9)  $\bar{u}_S$  на  $\bar{u}_{B_1}^N$  и минимизируя сумму (9) и (10), получим

$$Q_{(N-1)k}^*(\bar{x}^{N-2}) = \max_{\bar{U}_{B_S} \in \bar{U}_0} \left[ \sum_{i=1}^{N-1} k_{oi} F_i(\bar{x}^{i-1}, \bar{u}_{B_S}^i) + k_{0N} F_N(\bar{x}^{N-1}, \bar{u}_{B_1}^N) \right] \quad (11)$$

Для любого  $i$ -го шага оптимизации заменим  $N-1=i$  и запишем второе слагаемое в (11) в следующем виде:

$$Q_{(i+1)k}^*(\bar{x}^i, u_{B_1}^{i+1}) = \max_{\bar{U}_S^{i+1} \in \bar{U}_0} \left( \sum_{m=i+1}^N k_{0m} F_m(\bar{x}^{m-1}, \bar{u}_{B_1}^m) \right) \quad (12)$$

С учетом (12) выражение критерия (11) для любого шага оптимизации (кроме последнего) будет иметь вид

$$Q_{ik}^*(\bar{x}^{i-1}) = \max_{\bar{U}_S^i \in \bar{U}_0} \left[ \sum_{i=1}^{N-1} k_{0i} F_i(\bar{x}^{i-1}, \bar{u}_{B_S}^i) + Q_{(i+1)k}^*(\bar{x}^i, \bar{u}_{B_1}^{i+1}) \right] \quad (13)$$

Таким образом, получено рекуррентное выражение для вычисления предыдущего значения  $Q_{ik}^*$  через последующее  $Q_{i+1,k}^*$ , начиная от последнего шага  $N$ , для которого значение критерия известно. Безусловные оптимальные управляющие воздействия по переменным  $u_1, u_3$  получаются подстановкой в выражение (13) для первого шага вектора начальных условий  $\bar{x} = \bar{x}_H$

$$Q_{ik}^*(\bar{x}_H) = \max_{\bar{U}_B^1 \in \bar{U}_0} \left[ k_{01} F_1(\bar{x}_H, \bar{u}_B^1) + Q_{2k}^*(\bar{x}^1, \bar{u}_B^2) \right] \quad (14)$$

Далее безусловные оптимальные уравнения назначаются на каждом шаге оптимизации, после заполнения гидросмесью очередного участка  $l_i$  трубопровода.

Приведенный метод и алгоритм оптимизации энергетического режима гидроподъема, за счет оптимальной загрузки и контроля каждого его участка, при сохранении требуемой скорости гидросмеси в трубопроводе, обеспечивает надежную его работу и повышение КПД на 5–7%.

#### Список источников.

1. Проблемы управления технологическим процессом добычи железомарганцевых конкреций в оксиде. Геленджик: ПО "Южморгеология", 1990.- 101 с.